



Université d'Ottawa • University of Ottawa



Université d'Ottawa - University of Ottawa

FACULTÉ DES ÉTUDES SUPÉRIEURES
ET POSTDOCTORALES

FACULTY OF GRADUATE AND
POSTDOCTORAL STUDIES

Geneviève Mercier

AUTEUR DE LA THÈSE - AUTHOR OF THESIS

M. Sc. (Géographie)

GRADE - DEGREE

Département de géographie

FACULTÉ, ÉCOLE, DÉPARTEMENT - FACULTY, SCHOOL, DEPARTMENT

TITRE DE LA THÈSE - TITLE OF THE THESIS

Fluctuations des fronts glaciaires du sud de la Passe D'Akshayuk, Parc National
d'Auyuittuq, Nunavut

B. Lauriol

DIRECTEUR DE LA THÈSE - THESIS SUPERVISOR

CO-DIRECTEUR DE LA THÈSE - THESIS CO-SUPERVISOR

EXAMINATEURS DE LA THÈSE - THESIS EXAMINERS

K. Gajewski

A. Lewkowicz

J-M. De Koninck, Ph D

LE DOYEN DE LA FACULTÉ DES ÉTUDES
SUPÉRIEURES ET POSTDOCTORALES

DEAN OF THE FACULTY OF GRADUATE
AND POSTODORAL STUDIES

**FLUCTUATIONS DES FRONTS GLACIAIRES DANS LE SUD DE LA
PASSE D'AKSHAYUK, PARC NATIONAL D'AUYUITTUQ,
NUNAVUT.**

Thèse soumise à la Faculté des études supérieures et postdoctorales
pour l'obtention d'une Maîtrise ès Sciences en Géographie

Geneviève Mercier

Département de Géographie
Université d'Ottawa
Ottawa, Ontario
Juin, 2004



Library and
Archives Canada

Bibliothèque et
Archives Canada

Published Heritage
Branch

Direction du
Patrimoine de l'édition

395 Wellington Street
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

395, rue Wellington
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

Your file *Votre référence*
ISBN: 0-494-01552-7
Our file *Notre référence*
ISBN: 0-494-01552-7

NOTICE:

The author has granted a non-exclusive license allowing Library and Archives Canada to reproduce, publish, archive, preserve, conserve, communicate to the public by telecommunication or on the Internet, loan, distribute and sell theses worldwide, for commercial or non-commercial purposes, in microform, paper, electronic and/or any other formats.

The author retains copyright ownership and moral rights in this thesis. Neither the thesis nor substantial extracts from it may be printed or otherwise reproduced without the author's permission.

AVIS:

L'auteur a accordé une licence non exclusive permettant à la Bibliothèque et Archives Canada de reproduire, publier, archiver, sauvegarder, conserver, transmettre au public par télécommunication ou par l'Internet, prêter, distribuer et vendre des thèses partout dans le monde, à des fins commerciales ou autres, sur support microforme, papier, électronique et/ou autres formats.

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

In compliance with the Canadian Privacy Act some supporting forms may have been removed from this thesis.

Conformément à la loi canadienne sur la protection de la vie privée, quelques formulaires secondaires ont été enlevés de cette thèse.

While these forms may be included in the document page count, their removal does not represent any loss of content from the thesis.

Bien que ces formulaires aient inclus dans la pagination, il n'y aura aucun contenu manquant.


Canada

RÉSUMÉ

Cette thèse présente les fluctuations des fronts glaciaires actuels et modernes des glaciers de cirque et de vallée dans la Passe d'Akshayuk Sud située dans le parc national d'Auyuittuq (Terre de Baffin, NU). Des photographies aériennes corrigées géométriquement pour la période 1948 à 1977 ont été analysées pour calculer le recul des fronts des glaciers suivants : Tête de Cirques, Glacier 12, Windy Lake, Niflheim et Glacier 20A. Trois scènes satellitaires, deux d'IKONOS et une du capteur ETM+ de LANDSAT 7, ont aussi été employées dans le but de cartographier le recul des fronts de ces glaciers entre 1977 et 2003. Le résultat indique un taux de retrait moyen annuel des glaciers de 8.9 m par an entre 1948 et 2003. Comparativement aux glaciers orientés vers l'ouest et le sud, ceux orientés vers le nord sont caractérisés par des taux de retrait inférieurs. Ensuite, la lichénométrie a été utilisée pour déterminer les fluctuations glaciaires depuis le Petit Âge Glaciaire. Trente-huit sites d'échantillonnage, situés sur des complexes morainiques des glaciers Turnweather, Tête de Cirques, Glacier 12, Windy Lake, Niflheim, Glacier 20A et Sivingavuk, ont été analysés. Les thalles de *Rhizocarpon geographicum* ont été mesurés dans une aire d'échantillonnage supérieure ou équivalente à 100 m² et le diamètre le plus large des thalles de lichens a été mesuré. L'âge des moraines frontales échantillonnées fut déterminé selon la moyenne des dix thalles de *R. geographicum* les plus larges pour chaque site et par la courbe de croissance de *R. geographicum* disponible pour cette région d'étude. Le résultat indique que l'avancée maximale des glaciers de cirque et de vallée se situe entre l'an 800 et 1860 de notre ère, majoritairement entre 1840 et 1860, fin de la période du Petit Age Glaciaire. Une analyse de la distribution taille – fréquence a été réalisée et une analyse de variance et des comparaisons multiples ont été exécutées dans le but de regrouper les échantillons appartenant aux mêmes populations de *R. geographicum*. Ces analyses indiquent que des complexes morainiques ont été sujets à des variations environnementales qui affectent la dynamique de la croissance des populations de *R. geographicum*, engendrant des conséquences sur l'interprétation lichénométrique de l'âge des fluctuations des fronts glaciaires modernes.

ABSTRACT

This thesis discusses the actual and modern ice margin fluctuations of valley and cirque glaciers in South Akshayuk Pass, Auyuittuq National Park (Baffin Island, NU). The fluctuation of the ice margins of the Tête de Cirque, Glacier 12, Windy Lake, Niflheim and Glacier 20A glaciers were analysed using geometrically rectified aerial photographs taken between 1948 and 1977. IKONOS and LANDSAT 7 ETM+ satellite imagery covering the 1977 to 2003 period were also used. The results indicate a mean annual ice margin retreat of 8.9 m per year during the 1948 to 2003 period. Compare to south and west-facing glaciers, the ones facing north are characterize by a smaller annual retreat rate. Ice margin fluctuations since the Little Ice Age were evaluated using lichenometric measurements of *Rhizocarpon geographicum* found on the moraines of the Turnweather, Tête de Cirques, Glacier 12, Windy Lake, Niflheim, Glacier 20A and Sivingavuk glaciers. Moraine ages were determined by measuring the 10 largest-diameter *R. geographicum* thalli in the sampling area (100 m²) and converting these measurements to ages using the regional growth curve of *R. geographicum*. The maximum extent of the ice margins of the valley and cirques glaciers was reached between AD 800 to 1860, mainly between 1840 and 1860 at the end of the Little Ice Age period. Size-frequency distribution, an analysis of variance, and multiple comparisons showed that some moraines were subjected to local environmental variations, which affected the growth of *R. geographicum*, with subsequent implications in the interpretation of the lichenometric ages of the moraines and the ice margin fluctuations.

REMERCIEMENTS

Cette recherche a été subventionnée par le programme de formation scientifique dans le Nord (PSFN) pour les travaux de terrain estivaux 2002 et 2003. De plus, elle a été financièrement supportée par la bourse du Conseil de recherche en sciences naturelles et en génie du Canada (CRSNG) de Dr Bernard Lauriol.

D'innombrables remerciements s'adressent à mon superviseur, Dr Bernard Lauriol, qui avec ses connaissances, ses conseils et ses encouragements m'ont permis de compléter cette thèse de maîtrise. Son support technique et psychologique a toujours été fort apprécié, que ce soit après de longues journées de travail au laboratoire informatique du département de géographie ou lors de nos incroyables expéditions mémorables dans le parc national d'Auyuittuq. Je lui suis aussi vraiment reconnaissante de m'avoir donné la chance de présenter mes résultats de recherche à de nombreuses conférences et colloques. Merci pour ces voyages tous aussi impressionnants et enrichissants les uns que les autres!

Je tiens aussi énormément à remercier mes deux assistants de terrain, Annik Doucet et Jason VanderSchoot. Votre aide et votre sens de l'humour sur le terrain ont été très agréables et votre présence sur le terrain à compter un nombre infini de lichens restera inoubliable!

De nombreux remerciements à Jean Poitevin de Parcs Canada pour avoir contribué à la cartographie des fronts glaciaires. Sans oublier les nombreux employés de Parcs Canada pour la distribution des permis de recherche pour les deux saisons estivales de terrain et leur accueil chaleureux au centre des visiteurs à Pangnirtung.

J'ai aussi beaucoup de reconnaissance envers les membres de mon comité, Dr Konrad Gajewski et Dr Antoni Lewkowicz, pour leur intuition scientifique et leurs nombreux conseils. De plus, de chauds remerciements au gestionnaire du réseau SIG du département de géographie, Jim McGrath, pour avoir répondu à mes questions quotidiennes et pour avoir résolu tous les tracas informatiques inimaginables.

Sur une note plus personnelle, je suis reconnaissante aux membres de ma famille pour leur compréhension à mon dévouement de vouloir réaliser cette tâche et surtout, d'avoir toujours cru en moi. Merci de votre amour et de votre appui constant, ceci m'ayant donné les outils nécessaires pour réussir mes objectifs personnels. Merci aussi à ma colocataire et très bonne amie, Dominique Potvin, de m'avoir rassurée et de m'avoir écouté avec une oreille attentive dans les moments les plus difficiles. Et finalement, n'étant pas le moindre, merci à Francisco Chaves de bien avoir voulu vivre mes hautes et basses émotions. Merci pour ton support psychologique et ton attention si appréciée.

TABLE DES MATIÈRES

| | |
|---|-------------|
| Résumé | ii |
| Abstract | iii |
| Remerciements | iv |
| Table des matières | v |
| Liste des figures | viii |
| Liste des tableaux | xii |
| 1 INTRODUCTION | 1 |
| 2 RÉGION D'ÉTUDE | 3 |
| 2.1 GÉOLOGIE ET GÉOMORPHOLOGIE | 3 |
| 2.2 OBSERVATIONS CLIMATIQUES ET TYPES DE VÉGÉTATION | 3 |
| 2.3 LE QUATERNAIRE | 5 |
| 2.4 CONCLUSION | 6 |
| 3 REVUE DE LITTÉRATURE | 8 |
| 3.1 DÉFINITIONS | 8 |
| 3.2 LICHÉNOMÉTRIE | 11 |
| 3.2.1 Définition | 11 |
| 3.2.2 Sélection et identification de l'espèce | 11 |
| 3.2.3 Paramètres d'échantillonnage des lichens | 13 |
| 3.2.4 Datation | 18 |
| 3.2.5 Étude de la distribution taille-fréquence des lichens | 23 |
| 3.2.6 Pourcentage de couverture des lichens | 28 |
| 3.2.7 Variations écologiques du taux de croissance des lichens | 29 |
| 3.2.8 Néoglaciation et lichénométrie – Terre de Baffin | 34 |
| 3.3 CONCLUSION | 37 |
| 4 MÉTHODOLOGIE | 38 |
| 4.1 FLUCTUATIONS ACTUELLES | 38 |
| 4.2 FLUCTUATIONS MODERNES | 45 |
| 4.2.1 Échantillonnage sur le terrain | 45 |
| 4.3 FLUCTUATIONS MODERNES – ANALYSES STATISTIQUES DES LICHENS | 47 |
| 4.3.1 Analyses digitales et statistiques du pourcentage de couverture des lichens | 47 |
| 4.3.2 Histogrammes de fréquences | 48 |
| 4.3.3 Tests paramétriques | 48 |
| 4.3.4 Transformation de la variable d'un échantillon | 49 |
| 4.3.5 Analyse de variance de la moyenne des échantillons de populations de lichens | 50 |
| 4.3.6 Moyenne des thalles maximums et chronologie de la stabilisation des moraines | 52 |
| 4.3.7 Points de contrôle et âges au radiocarbone | 52 |
| 4.4 INFLUENCE DE L'ENVIRONNEMENT | 55 |
| 4.4.1 Mesure du rayonnement solaire direct total annuel | 55 |
| 4.4.2 Mesure de la pente, de l'orientation, de l'altitude et de l'aire des glaciers | 56 |
| 4.4.3 Température sur les complexes morainiques du glacier Tête de Cirques et du Glacier 12 | 58 |
| 4.4.4 Effet de l'orientation des sites d'échantillonnage | 58 |
| 4.5 CONCLUSION | 59 |

| | | |
|-----------|--|------------|
| 5 | RÉSULTATS GÉNÉRAUX DES FLUCTUATIONS DES FRONTS GLACIAIRES | 60 |
| 5.1 | FLUCTUATIONS ACTUELLES | 60 |
| 5.2 | FLUCTUATIONS MODERNES | 63 |
| 5.2.1 | Les paramètres statistiques des populations de <i>Rhizocarpon geographicum</i> | 64 |
| 5.2.2 | Relation entre le pourcentage de couverture des lichens et la moyenne des échantillons des sites lichénométrique | 65 |
| 5.2.3 | L'âge des moraines | 65 |
| 5.3 | CONCLUSION | 66 |
| 6 | LE GLACIER TURNWEATHER | 72 |
| 6.1 | FLUCTUATIONS MODERNES | 72 |
| 6.1.1 | Mesures lichénométriques et pourcentage de couverture des lichens | 72 |
| 6.1.2 | Caractéristiques des histogrammes des données brutes et des données transformées | 72 |
| 6.1.3 | Analyse de variance et comparaisons <i>a posteriori</i> | 73 |
| 6.1.4 | Chronologie de l'âge des moraines | 73 |
| 6.1.5 | Variations environnementales affectant la logique de la chronologie des moraines | 73 |
| 7 | LE GLACIER TÊTE DE CIRQUES | 82 |
| 7.1 | FLUCTUATIONS ACTUELLES | 82 |
| 7.2 | FLUCTUATIONS MODERNES | 82 |
| 7.2.1 | Mesures lichénométriques et pourcentage de couverture des lichens | 82 |
| 7.2.2 | Caractéristiques des histogrammes des données brutes et des données transformées | 83 |
| 7.2.3 | Analyse de variance et comparaisons <i>a posteriori</i> | 83 |
| 7.2.4 | Chronologie de l'âge des moraines | 84 |
| 7.2.5 | Variations environnementales affectant la logique de la chronologie des moraines | 84 |
| 8 | LE GLACIER 12 | 96 |
| 8.1 | FLUCTUATIONS ACTUELLES | 96 |
| 8.2 | FLUCTUATIONS MODERNES | 96 |
| 8.2.1 | Mesures lichénométriques et pourcentage de couverture des lichens | 96 |
| 8.2.2 | Caractéristiques des histogrammes des données brutes et des données transformées | 97 |
| 8.2.3 | Analyse de variance et comparaisons <i>a posteriori</i> | 97 |
| 8.2.4 | Chronologie de l'âge des moraines | 98 |
| 8.2.5 | Variations environnementales affectant la logique de la chronologie des moraines | 98 |
| 9 | LE GLACIER WINDY LAKE | 109 |
| 9.1 | FLUCTUATIONS ACTUELLES | 109 |
| 9.2 | FLUCTUATIONS MODERNES | 109 |
| 9.2.1 | Mesures lichénométriques et pourcentage de couverture des lichens | 109 |
| 9.2.2 | Caractéristiques des histogrammes des données brutes et des données transformées | 110 |
| 9.2.3 | Analyse de variance et comparaisons <i>a posteriori</i> | 110 |
| 9.2.4 | Chronologie de l'âge des moraines | 110 |
| 9.2.5 | Variations environnementales affectant la logique de la chronologie des moraines | 111 |
| 10 | LE GLACIER NIFLHEIM | 119 |
| 10.1 | FLUCTUATIONS ACTUELLES | 119 |
| 10.2 | FLUCTUATIONS MODERNES | 119 |
| 10.2.1 | Mesures lichénométriques et pourcentage de couverture des lichens | 119 |
| 10.2.2 | Caractéristiques des histogrammes des données brutes et des données transformées | 120 |
| 10.2.3 | Analyse de variance et comparaisons <i>a posteriori</i> | 120 |
| 10.2.4 | Chronologie de l'âge des moraines | 121 |
| 10.2.5 | Variations environnementales affectant la logique de la chronologie des moraines | 121 |

| | |
|---|------------|
| 11 LE GLACIER 20A | 130 |
| 11.1 FLUCTUATIONS ACTUELLES | 130 |
| 11.2 FLUCTUATIONS MODERNES | 130 |
| 11.2.1 Mesures lichénométriques et pourcentage de couverture des lichens | 130 |
| 11.2.2 Caractéristiques des histogrammes des données brutes et des données transformées | 131 |
| 11.2.3 Analyse de variance et comparaisons <i>a posteriori</i> | 131 |
| 11.2.4 Chronologie de l'âge des moraines | 131 |
| 11.2.5 Variations environnementales affectant la logique de la chronologie des moraines | 132 |
| 12 LE GLACIER SIVINGAVUK | 140 |
| 12.1 FLUCTUATIONS MODERNES | 140 |
| 12.1.1 Mesures lichénométriques et pourcentage de couverture des lichens | 140 |
| 12.1.2 Caractéristiques des histogrammes des données brutes et des données transformées | 140 |
| 12.1.3 Analyse de variance et comparaisons <i>a posteriori</i> | 141 |
| 12.1.4 Chronologie de l'âge des moraines | 141 |
| 12.1.5 Variations environnementales affectant la logique de la chronologie des moraines | 141 |
| 13 SYNTHÈSE ET CONCLUSION GÉNÉRALE | 150 |
| 13.1 FLUCTUATIONS ACTUELLES | 150 |
| 13.2 FLUCTUATIONS MODERNES | 152 |
| 13.3 RECOMMANDATIONS | 153 |
| RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES | 156 |
| ANNEXE 1 | 163 |
| ANNEXE 2 | 165 |
| ANNEXE 3 | 167 |
| ANNEXE 4 | 175 |

LISTE DES FIGURES

| | |
|--|----|
| Figure 2.1 : Localisation de la Passe d'Akshayuk et de l'aire d'étude 2002-2003 (Parc national d'Auyuittuq, Terre de Baffin, Nunavut) | 4 |
| Figure 3.1: Définitions de l'aménagement morphologique des glaciers (Vivian, 1975) | 8 |
| Figure 3.2: <i>Rhizocarpon geographicum</i> X 5.6 (Brodo, 2001) | 12 |
| Figure 3.3: Mesure du plus petit diamètre, le plus grand cercle inscrit à l'intérieur d'un thalle (Locke & al., 1979) | 15 |
| Figure 3.4: Changement des phases de croissance d'un thalle de croissance (Armstrong: 1974, 1976) | 22 |
| Figure 3.5: Distributions taille-fréquence hypothétique de quatre populations de lichens (Farrar, 1974) | 26 |
| Figure 3.6: Modèles illustrant les relations entre la taille moyenne et la densité moyenne d'une population de lichens (Haines-Young, 1988) | 28 |
| Figure 3.7: Modèle "safe-site" de la lichénométrie (McCarthy, 1999) | 34 |
| Figure 3.8: Courbe de croissance pour <i>R. geographicum</i> (Davis, 1980) | 36 |
| Figure 4.1: Localisation des glaciers étudiés et des sites d'échantillonnage 2002-2003 dans la Passe d'Akshayuk | 39 |
| Figure 4.2: (1) Moraine latérale et interne (Sites 1A03 et 1B02) du complexe morainique du glacier Tête de Cirques; (2) Moraine latérale du complexe du Glacier 12; (3) Moraine latérale du complexe du Glacier 20A (4C03); Moraine frontale du complexe Tête de Cirques (Site 1C03) | 40 |
| Figure 4.3: Complexe morainique du glacier Turnweather (1); Glacier Turnweather (2); Complexe morainique du Glacier 12 (3); Glacier 12 (4); Complexe morainique du glacier Tête de Cirques (5); Glacier Tête de Cirques | 41 |
| Figure 4.4: Complexe morainique du glacier Niflheim (1-à droite) et Glacier 20A (1-à gauche); Complexe morainique du Glacier 20A (2); Complexe morainique du glacier Sivingavuk (3); Glacier Windy Lake (4) | 42 |
| Figure 4.5: Analyse digitale du pourcentage de couverture des lichens (couverture de 55.47 %) | 47 |
| Figure 4.6: Illustration des différentes sources de variation des données de deux échantillons indépendants (Scherrer, 1984) | 50 |
| Figure 4.7: Courbe de croissance des lichens de la péninsule de Cumberland | 54 |
| Figure 4.8: Courbe de croissance des lichens de la péninsule de Cumberland (fonction transposée) | 54 |
| Figure 4.9: Procédé d'analyse du rayonnement solaire direct total annuel à partir de l'extension Solar Analyst 1.0, ArcView GIS ESRI (Fu & Rich, 2004) | 55 |
| Figure 4.10: Cartes des mesures de la pente, de l'orientation et du rayonnement solaire direct total annuel dans la Passe d'Akshayuk | 57 |
| Figure 5.1: Caractéristiques environnementales des glaciers étudiés en 2002-2003 | 60 |
| Figure 5.2: Distribution de l'âge des substrats morainiques étudiés en 2002-2003 | 66 |

| | |
|--|-----|
| Figure 5.3: Paramètres statistiques des communautés de lichens (A,B,C) et relation entre le pourcentage de couverture des lichens et la taille moyenne des thalles de lichens lichens, 2002-2003 | 70 |
| Figure 6.1: Localisation des sites d'échantillonnage et paramètres statistiques du complexe morainique du glacier Turnweather | 75 |
| Figure 6.2: Histogrammes de la distribution taille-fréquence des données brutes du glacier Turnweather | 76 |
| Figure 6.3: Graphique probabilité-probabilité des données brutes du glacier Turnweather | 77 |
| Figure 6.4: Histogrammes de la distribution taille-fréquence des données transformées du glacier Turnweather | 78 |
| Figure 6.5: Graphiques probabilité-probabilité des données transformées du glacier Turnweather | 79 |
| Figure 6.6: Age des moraines étudiées du glacier Turnweather | 80 |
| Figure 6.7: Caractéristiques des sites d'échantillonnage du complexe morainique du glacier Turnweather | 81 |
| Figure 7.1: Localisation des sites d'échantillonnage et paramètres statistiques du complexe morainique du glacier Tête de Cirques | 87 |
| Figure 7.2: Histogrammes de la distribution taille-fréquence des données brutes du glacier Tête de Cirques | 88 |
| Figure 7.4: Histogrammes de la distribution taille-fréquence des données transformées du glacier Tête de Cirques | 90 |
| Figure 7.5: Graphique probabilité-probabilité des données transformées du glacier Tête de Cirques | 91 |
| Figure 7.6: Age des moraines étudiées du glacier Tête de Cirques | 92 |
| Figure 7.7: Caractéristiques des sites d'échantillonnage du complexe morainique du glacier Tête de Cirques | 93 |
| Figure 7.8: Localisation des instruments d'enregistrement de la température sur le complexe morainique du glacier Tête de Cirques | 94 |
| Figure 7.9: Données de température enregistrées sur le complexe morainique du glacier Tête de Cirques (Juillet 2002) | 95 |
| Figure 8.1: Localisation des sites d'échantillonnage et paramètres statistiques du complexe morainique du Glacier 12 | 100 |
| Figure 8.2: Histogrammes de la distribution taille-fréquence des données brutes du Glacier 12 | 101 |
| Figure 8.3: Graphique probabilité-probabilité des données brutes du Glacier 12 | 102 |
| Figure 8.4: Histogrammes de la distribution taille-fréquence des données transformées du Glacier 12 | 103 |
| Figure 8.5: Graphique probabilité-probabilité des données transformées du Glacier 12 | 104 |
| Figure 8.6: Age des moraines étudiées du Glacier 12 | 105 |
| Figure 8.7: Caractéristiques des sites d'échantillonnage du complexe morainique du Glacier 12 | 106 |
| Figure 8.8: Localisation des instruments d'enregistrement de la température sur le complexe morainique du Glacier 12 | 107 |

| | |
|--|-----|
| Figure 8.9: Données de température enregistrées sur le complexe morainique du Glacier 12 (Juillet 2003) | 108 |
| Figure 9.1: Sites d'échantillonnage des paramètres statistiques du complexe morainique du glacier Windy Lake | 112 |
| Figure 9.2: Histogrammes de la distribution taille-fréquence des données brutes du glacier Windy Lake | 113 |
| Figure 9.3: Graphique probabilité-probabilité des données brutes du glacier Windy Lake | 114 |
| Figure 9.4: Histogrammes de la distribution taille-fréquence des données transformées du glacier Windy Lake | 115 |
| Figure 9.5: Graphique probabilité-probabilité des données transformées du glacier Windy Lake | 116 |
| Figure 9.6: Age des moraines et du glarier d'accumulation étudiés du glacier Windy Lake | 117 |
| Figure 9.7: Caractéristiques des sites d'échantillonnage du complexe morainique du glacier Windy Lake | 118 |
| Figure 10.1: Sites d'échantillonnage et paramètres statistiques du complexe morainique du glacier Niflheim | 123 |
| Figure 10.2: Histogrammes de la distribution taille-fréquence des données brutes du glacier Niflheim | 124 |
| Figure 10.3: Graphique probabilité-probabilité des données brutes du glacier Niflheim | 125 |
| Figure 10.4: Histogrammes de la distribution taille-fréquence des données transformées du glacier Niflheim | 126 |
| Figure 10.5: Graphique probabilité-probabilité des données transformées du glacier Niflheim | 127 |
| Figure 10.6 : Age des moraines étudiées du glacier Niflheim | 128 |
| Figure 10.7: Caractéristiques des sites d'échantillonnage du complexe morainique du glacier Niflheim | 129 |
| Figure 11.1: Sites d'échantillonnage et paramètres statistiques du complexe morainique du Glacier 20A | 133 |
| Figure 11.2: Histogrammes de la distribution taille-fréquence des données brutes du Glacier 20A | 134 |
| Figure 11.3: Graphique probabilité-probabilité des données brutes du Glacier 20A | 135 |
| Figure 11.4: Histogrammes de la distribution taille-fréquence des données transformées du Glacier 20A | 136 |
| Figure 11.5: Graphique probabilité-probabilité des données transformées du Glacier 20A | 137 |
| Figure 11.6 : Age des moraines étudiées du Glacier 20A | 138 |
| Figure 11.7: Caractéristiques des sites d'échantillonnage du complexe morainique du Glacier 20A | 139 |
| Figure 12.1: Sites d'échantillonnage et paramètres statistiques du complexe morainique du glacier Sivingavuk | 143 |
| Figure 12.2: Histogrammes de la distribution taille-fréquence des données brutes du glacier Sivingavuk | 144 |
| Figure 12.3: Graphique probabilité-probabilité des données brutes du glacier Sivingavuk | 145 |

| | |
|--|-----|
| Figure 12.4: Histogrammes de la distribution taille-fréquence des données transformées du glacier Sivingavuk | 146 |
| Figure 12.5: Graphique probabilité-probabilité des données transformées du glacier Sivingavuk | 147 |
| Figure 12.6 : Age des moraines étudiées du glacier Sivingavuk | 148 |
| Figure 12.7: Caractéristiques des sites d'échantillonnage du complexe morainique du glacier Sivingavuk | 149 |

LISTE DES TABLEAUX

| | |
|---|-----|
| Tableau 4.1 : Localisation et aire des glaciers étudiés en 2002-2003 | 39 |
| Tableau 4.2: Caractéristiques des sites d'échantillonnage 2002-2003 de la section sud de la Passe d'Akshayuk, Parc national d'Auyuittuq (Nunavut) | 43 |
| Tableau 4.3: Photographies aériennes disponibles pour les sites d'études de la Passe d'Akshayuk | 44 |
| Tableau 4.4: Images satellitaires employées pour la caractérisation et la cartographie des sites échantillonnés | 44 |
| Tableau 5.1: Caractéristiques des glaciers étudiés en 2002-2003 | 60 |
| Tableau 5.2: Caractéristiques de la correction géométrique des photographies aériennes | 62 |
| Tableau 5.3: Caractéristiques des fluctuations des fronts glaciaires et taux de retrait calculés pour les cinq glaciers étudiés (1948 - 2003) | 62 |
| Tableau 5.4: Paramètres statistiques des données brutes des sites d'échantillonnages lichénométrique 2002-2003 | 68 |
| Tableau 5.5: Valeurs du pourcentage de couverture des lichens, 2002-2003 | 70 |
| Tableau 5.6: L'âge des sites d'échantillonnage basé sur la moyenne des dix thalles les plus larges | 71 |
| Tableau 6.1: Caractéristiques des sites d'échantillonnage du complexe morainique du glacier Turnweather | 74 |
| Tableau 7.1: Caractéristiques des sites d'échantillonnage du complexe morainique du glacier Tête de Cirques | 85 |
| Tableau 7.2: Caractéristiques des sites d'emplacement des instruments d'enregistrement – Glacier Tête de Cirques | 85 |
| Tableau 8.1: Caractéristiques des sites d'échantillonnage du complexe morainique du Glacier 12 | 99 |
| Tableau 8.2: Caractéristiques des sites d'emplacement des instruments d'enregistrement – Glacier 12 | 99 |
| Tableau 9.1: Caractéristiques des sites d'échantillonnage du glacier d'accumulation du glacier Windy Lake | 111 |
| Tableau 10.1: Caractéristiques des sites d'échantillonnage du complexe morainique du glacier Niflheim | 122 |
| Tableau 11.1: Caractéristiques des sites d'échantillonnage du complexe morainique du Glacier 20A | 132 |
| Tableau 12.1: Caractéristiques des sites d'échantillonnage du complexe morainique du glacier Sivingavuk | 142 |
| Tableau 13.1: Taux de retrait annuel (m) pour les différentes périodes d'analyse de la position des fronts glaciaires étudiés | 151 |

1 INTRODUCTION

Dans le contexte d'une phase de planification et de gestion environnementale dans le parc national d'Auyuittuq, il est nécessaire de quantifier les informations sur les changements environnementaux biotiques et abiotiques (Parcs Canada, 2002). Plus précisément, les parcs nationaux doivent informer le public de leur état d'intégrité sur un intervalle de cinq ans (Parcs Canada, 2002). L'Acte des parcs nationaux prescrit que Parcs Canada doit maintenir l'intégrité écologique de ces parcs. Dans l'intention de satisfaire leur mandat, les gestionnaires doivent être informés des menaces pouvant affecter les écosystèmes des parcs. Ils doivent comprendre et détecter les changements et être dans la possibilité de mesurer l'efficacité des actions de gestion. Toutefois, de telles informations sont encore absentes dans le parc national d'Auyuittuq et l'intégrité écologique du parc doit être évaluée. « As with other national parks in the Eastern Canada, perhaps Auyuittuq's major role in the future will be to act as a catalyst in the responsible promotion and implementation of ecosystem-based management in Canada's Arctic regions » (Parcs Canada, 2002). Notre étude contribuera à réaliser les objectifs prescrits par l'Acte des parcs nationaux (Parcs Canada, 2002).

Les fluctuations glaciaires sont un des géoindicateurs des changements environnementaux identifiés par Parcs Canada (Plasse, 2002). Un géoindicateur est un élément du paysage qui peut varier de façon significative sur un intervalle de moins de 100 ans (Plasse, 2002). Le géoindicateur des fluctuations glaciaires est relié aux variations de la température de l'air. À une échelle globale, la température de l'air est considérée par la plupart des glaciologistes comme le facteur le plus important pour les retraits des glaciers (IPCC, 2001). Depuis 1976, l'augmentation de la température globale de l'air a été de 0.15°C par décennie (IPCC, 2001). De plus, la tendance indique que les précipitations augmenteront durant l'été et l'hiver pour les régions nordiques de l'Amérique du Nord. La couverture de neige, le pergélisol et l'étendue de la glace de mer diminueront pour cette même région. IPCC (2001) a conclu que le taux de réchauffement de $0.66 \pm 0.20^{\circ}\text{C}$ par siècle a occasionné le recul de 48 glaciers étudiés et localisés à différents endroits dans le monde.

La création des parcs a pour objectif la préservation d'un environnement représentatif des écozones ou des écodistricts pour les générations à venir (Parcs Canada, 2002). Les trois parcs de l'écozone de la Cordillère arctique, Auyuittuq, Smirilik et Quttinirpaaq, ont en commun l'existence de nombreux glaciers. Cependant, il semble que ces glaciers ne réagissent pas de la même façon aux changements globaux. Les fronts glaciaires paraissent assez stables au XX^{ième} siècle sur l'île d'Ellesmere. Ils marquent un léger recul sur l'île Bylot alors que le recul paraît très marqué sur la péninsule de Cumberland (USGS, 2002).

Bref, le recul des fronts glaciaires représente un élément de réflexion important. En effet les parcs ont été créés pour préserver l'intégrité des paysages, notamment face à l'industrialisation, l'urbanisation et le tourisme. Cela n'empêche pas cependant que des actions prenant place à l'extérieur des parcs viennent perturber considérablement les paysages. Le recul des fronts glaciaires, s'il est en effet induit par un réchauffement climatique anthropique, témoigne d'une atteinte à l'intégrité du parc, que les lois et règlements des parcs nationaux ne peuvent prévenir. Notre thèse ne pourra qu'identifier et quantifier le recul des glaciers au niveau de la Passe d'Akshayuk.

Pour évaluer le retrait des fronts glaciaires dans la Passe, on a d'abord examiné le mouvement actuel des fronts. Cinq fronts, situés dans le sud de la Passe, ont été cartographiés entre 1948 et 2003 à partir de photographies aériennes et d'images satellitaires. Les résultats ont permis de calculer le retrait des fronts entre 1948 et 2003.

Ensuite, nous avons entrepris la cartographie et la modélisation de la dynamique spatio-temporelle moderne, depuis le Petit Âge Glaciaire, des fronts glaciaires et de leurs systèmes morainiques. Au total, sept complexes morainiques ont été analysés dans le sud de la Passe d'Akshayuk. Cette analyse a été basée sur le concept de la lichénométrie. L'âge de l'édification et de la stabilisation des moraines a été établi par la mesure du diamètre des thalles de lichens, l'analyse du pourcentage de couverture des lichens et la disponibilité de points de contrôle servant à quantifier l'âge des thalles de lichens mesurés. En ajout, la prise en considération des variations environnementales sur les complexes morainiques a permis d'évaluer l'efficacité de la lichénométrie pour établir la chronologie des fluctuations glaciaires dans le sud de la Passe d'Akshayuk.

Les résultats associés à l'étude des fluctuations des fronts glaciaires actuelles et modernes ont été présentés à partir de treize chapitres. Tout d'abord, le deuxième chapitre décrit la région d'étude dans le parc national d'Auyuittuq (Terre de Baffin, Nunavut). Par la suite, au troisième chapitre, une revue de littérature détaillée est effectuée, révisant les principaux concepts de la technique de la lichénométrie et de certaines définitions géomorphologiques. Au chapitre quatre, on décrit les méthodes employées pour réaliser les mesures des fluctuations des fronts glaciaires. Au chapitre cinq, on présente les résultats généraux des fluctuations actuelles et modernes dans le sud de la Passe d'Akshayuk. Les chapitres six à douze regroupent et discutent séparément des résultats obtenus concernant les fluctuations actuelles et modernes des fronts des glaciers Turnweather, Tête de Cirques, Glacier 12, Windy Lake, Niflheim, Glacier 20A et Sivingavuk. Finalement, le dernier chapitre résume les résultats et interprète la chronologie des fluctuations glaciaires dans cette région.

2 RÉGION D'ÉTUDE

La région du parc national d'Auyuittuq se situe dans la zone du pergélisol continu. La Passe d'Akshayuk, localisée entre les fjords Pangnirtung Sud et Pangnirtung Nord (**Figure 2.1**), a une longueur totale de 97 km. Cette vallée glaciaire divise topographiquement la péninsule de Cumberland et elle est traversée par le cercle arctique. L'élévation de la Passe varie du niveau de la mer à 500 m d'altitude. Le mont Odin représente le sommet le plus élevé de cette région (2140 m). Les parois verticales qui longent la vallée atteignent jusqu'à 1200 m d'altitude. La vallée est caractérisée par la présence de glaciers de vallée et de cirque. La calotte glaciaire de Penny, d'une aire de 6000 km², est localisée au nord de la Passe.

2.1 GÉOLOGIE ET GÉOMORPHOLOGIE

La roche-mère de la région d'étude est une roche métamorphique précambrienne, faisant partie de la province géologique du Bouclier canadien. La plupart des roches du bouclier de la péninsule de Cumberland ont été déposées originalement comme des roches sédimentaires et volcaniques. Des roches tels le granite, le gneiss et le quartz monzonite caractérisent le parc national d'Auyuittuq. Elles possèdent un grain moyen à grossier (INQUA, 1987).

Des centaines de glaciers de cirque et de glaciers de vallée caractérisent la région (Blouin & al., 1975; Thompson, 1954; Wilson, 1976). L'altitude limite de glaciation pour la région d'étude se situe entre 1100 et 1200 m (Andrews & Miller, 1972; Benn & Evans, 1998). Plus précisément, la Passe d'Akshayuk symbolise l'activité de l'érosion glaciaire par sa forme en « U ». De nombreux complexes morainiques ornent à plusieurs centaines de mètres les fronts des langues glaciaires. Les parois abruptes engendrent des activités régulières de chutes de blocs et les coulées de débris sont abondantes (Doucet, 2004).

2.2 OBSERVATIONS CLIMATIQUES ET TYPES DE VÉGÉTATION

La région du parc national d'Auyuittuq possède un climat polaire à tendance maritime. Les données climatiques suivantes proviennent de la station climatique de Pangnirtung (Nunavut), située à 40 km au sud de la Passe d'Akshayuk. Ces données représentent les moyennes entre 1995 et 2001. La température moyenne annuelle est de -10.4°C; la température moyenne du mois de janvier est de -28°C et la température moyenne du mois de juillet est de 7°C. Les précipitations moyennes totales sont de 450 mm. Près de la moitié des précipitations, soit 45 %, tombe entre les mois de juillet et de septembre (Environnement Canada, 2004).

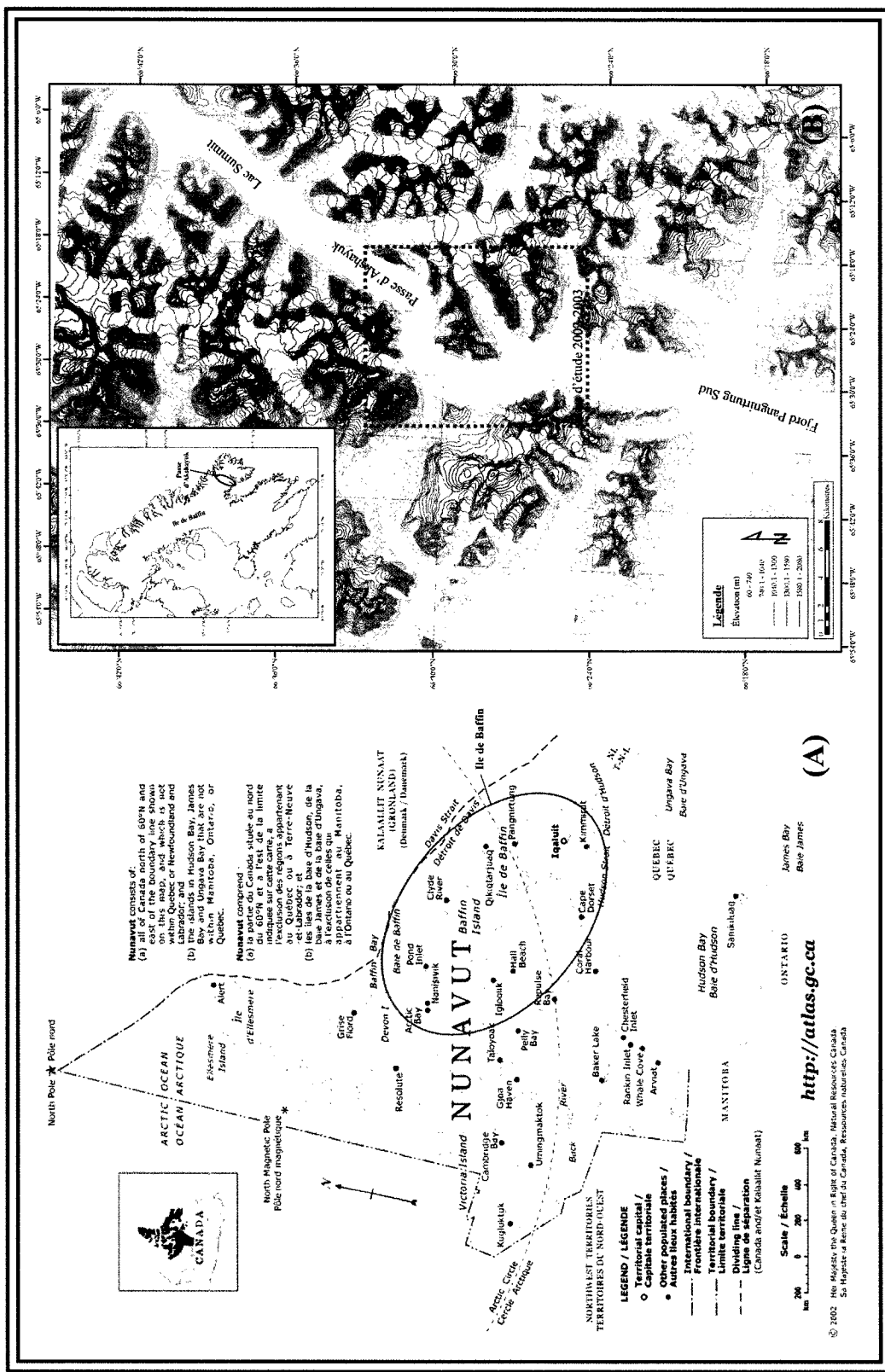


Figure 2.1 : Localisation de la Passe d'Akshayuk et de l'aire d'étude 2002-2003 (Parc national d'Auyuittuq, Terre de Baffin, Nunavut)

La région du parc national d'Auyuittuq appartient à l'écorégion de la cordillère arctique. Plus précisément, la péninsule de Cumberland est localisée à l'intérieur de la région de Davis du Nord. La végétation est clairsemée et ouverte sur les pentes et une végétation de la toundra caractérise la plaine alluviale. La végétation est un couvert de mousses discontinu, de lichens et de plantes vasculaires rustiques. Les espèces dominantes sont la laïche, le lin des marais, le silène acaule, la saxifrage à feuilles opposées et la dryade à feuilles entières (Blouin & al., 1975; Parcs Canada, 2004).

2.3 LE QUATERNAIRE

La dernière grande glaciation, la glaciation de Foxe, a eu lieu entre 120 000 ans BP et 9 000 ans BP. Selon Dyke (1979), la région de la Passe d'Akshayuk est libre de glace permanente depuis 60 000 ans BP. Cette période est reliée à l'épisode chaud du moyen Wisconsin. Cette chronologie est maintenant contredite par les nouvelles évidences des sédiments de lacs et les âges d'exposition cosmogénique sur des moraines et des terrains anciennement englacés dans l'est de l'arctique canadien. En effet, Miller & al. (2002) affirment que toute la section sud de la Terre de Baffin a été englacée durant le dernier maximum glaciaire à l'exception de certains plateaux côtiers de la péninsule de Cumberland Nord. Ces plateaux restèrent au-dessus de la limite active d'érosion glaciaire, même quand les glaciers atteignaient la limite de la plate-forme continentale en provenance de la plupart des fjords et détroits. Des évidences suggèrent aussi l'existence de deux maximums glaciaires locaux dans la région du fjord de Pangnirtung et à Cape Dyer. Il y aurait eu une première avancée entre 30 000 et 20 000 ans BP et une autre avancée plus tardive durant le dernier cycle glaciaire entre 12 000 et 10 000 ans BP. La récession de cette extension maximum débuta il y a environ 11 000 ans BP.

La glaciation de Foxe s'est terminée soudainement au début de l'Holocène, période caractérisée par des températures plus chaudes qu'aujourd'hui. Fisher & al. (1998) affirment ceci à partir de reconstructions paléoclimatiques basées sur le $\delta^{18}\text{O}$ de la calotte glaciaire de Penny. La calotte glaciaire de Penny et les glaciers de vallée adjacents ont connu des retraits de grandes échelles à partir de 9 000 ans BP. Miller (1973a) indique que la glace des fjords et les glaciers locaux de la péninsule de Cumberland Nord ont maintenu leurs positions maximales du Wisconsin jusqu'à 8000 ans BP. Il se base sur l'âge de radiocarbone des mollusques situés sur des faciès marins reliés à des dépôts glaciaires. Bierman & al. (1999), en se basant sur des données cosmogéniques, et Jennings (1993), en se basant sur des études de sédimentation marine, disent que la glace s'est retirée de la Passe d'Akshayuk entre 13 400 et 9 000 ans BP. De plus, Marsella & al. (2000) indiquent que les moraines Duval, situées près de Pangnirtung, auraient été déposées entre 24 000 et 9 000 ans BP, en

accord avec Miller & al. (2002). De la glace permanente aurait donc dominé les fjords de Pangnirtung et Kingnait il y a 15 000 ans BP. Les études sur les blocs erratiques analysés par Marsella & al. (2000) supportent aussi une récession de la glace dans le fjord de Pangnirtung entre 12 000 et 9 000 ans BP. À partir de 9000-8000 ans BP, les glaciers disparurent presque de la vallée (Miller, 1973a), notamment pendant le maximum thermique qui a eu lieu vers 6000 ans BP. Il y a environ 3500 ans BP, les sections ouest des calottes de Penny et de Barnes avancèrent à nouveau (Dyke, 1979; Andrews & Barnett, 1979) et les glaciers de cirque et de vallée s'étendirent. Andrews & al. (1972) et Miller (1973a), en étudiant des glaciers effluents et des glaciers de cirque, établirent une chronologie néoglaciale, et ce, à partir de la lichénométrie et d'âge au radiocarbone sur de la tourbe et de la matière organique enfouie. Les moraines néoglaciales les plus âgées analysées sur la péninsule de Cumberland sont de 3200 ± 600 ans BP.

Les derniers 2000 ans ont été caractérisés par des alternances entre des périodes froides et sèches et des périodes chaudes et humides. Les études d'activités éoliennes et celles sur la croissance de tourbe par Dyke (1979) ont permis de déterminer ces périodes. Le minimum thermique de l'Holocène produisit une activité glaciaire intense. Miller (1973a) étudia ces variations climatiques à partir des différentes avancées glaciaires ayant permis la stabilisation de moraines aux alentours de 1650, 780, 350 et 65 ans BP. Davis (1985) discuta également de ces avancées glaciaires dans la Passe d'Akshayuk, associées à ce minimal thermique de l'Holocène.

La glaciation du Petit Âge Glaciaire a été la plus intense au cours des derniers 3000 ans, cette affirmation est appuyée par la taille des lichens à l'intérieur des « lichen-kill zones» (Locke & Locke, 1977; Williams, 1978). Ce concept a été révisé par Lévesque & Svoboda (1999), ces derniers ayant aussi observés des lichens morts comme évidence dans des paysages sans couverture végétale en arctique. Toutefois, la chronologie d'une couverture de neige associée au Petit Âge Glaciaire n'est pas encore bien établie, tout comme sa répartition et son impact sur les communautés végétales de l'arctique canadien. L'intensité du refroidissement pendant le Petit Âge Glaciaire est aussi soulignée par Miller (1973a). Ce dernier affirme qu'il y a 350 ans, les glaciers de la péninsule de Cumberland étaient plus avancés que durant les derniers 5000 ans. Ces observations sont appuyées par Wright (1975) et Locke & Locke (1977).

2.4 CONCLUSION

En conclusion, la région d'étude est la section sud de la Passe d'Akshayuk. Cette Passe se caractérise par :

- Un climat froid et humide;
- De nombreux glaciers de vallée et de cirque en recul;
- Une déglaciation d'inlandsis survenue entre 12 000 et 9 000 ans BP;
- Une réavancée glaciaire par des glaciers de vallée lors du Petit Âge Glaciaire;
- Un recul des glaciers au XX^{ième} siècle.

Notre étude a pour objectif de préciser ces deux derniers points.

3 REVUE DE LITTÉRATURE

Le but de ce chapitre est de fournir une revue de littérature pertinente à notre projet d'étude. On définit d'abord les termes les plus usuels de la géomorphologie glaciaire; par la suite, on décrit le concept de base de la lichénométrie; et ensuite, on présente les études les plus pertinentes de la lichénométrie.

3.1 DÉFINITIONS

- **Bourrelet morainique frontal (Figure 3.1 : #5)** : Forme de faible envergure, soit de un à quelques mètres de hauteur, et longs rubans qui frangent l'aval des marges proglaciaires, étant un résultat de petites phases de crues. Dépendamment de la texture et de l'étanchéité du matériel poussé par le glacier, la marge proglaciaire est divisée en séries d'espaces transversaux séparés par de petites murailles (Vivian, 1975).

- **Calotte locale** : De plus petite dimension que les inlandsis, cette calotte revêt des montagnes et peut émettre des langues divergentes à sa périphérie. Ce glacier peut occuper des

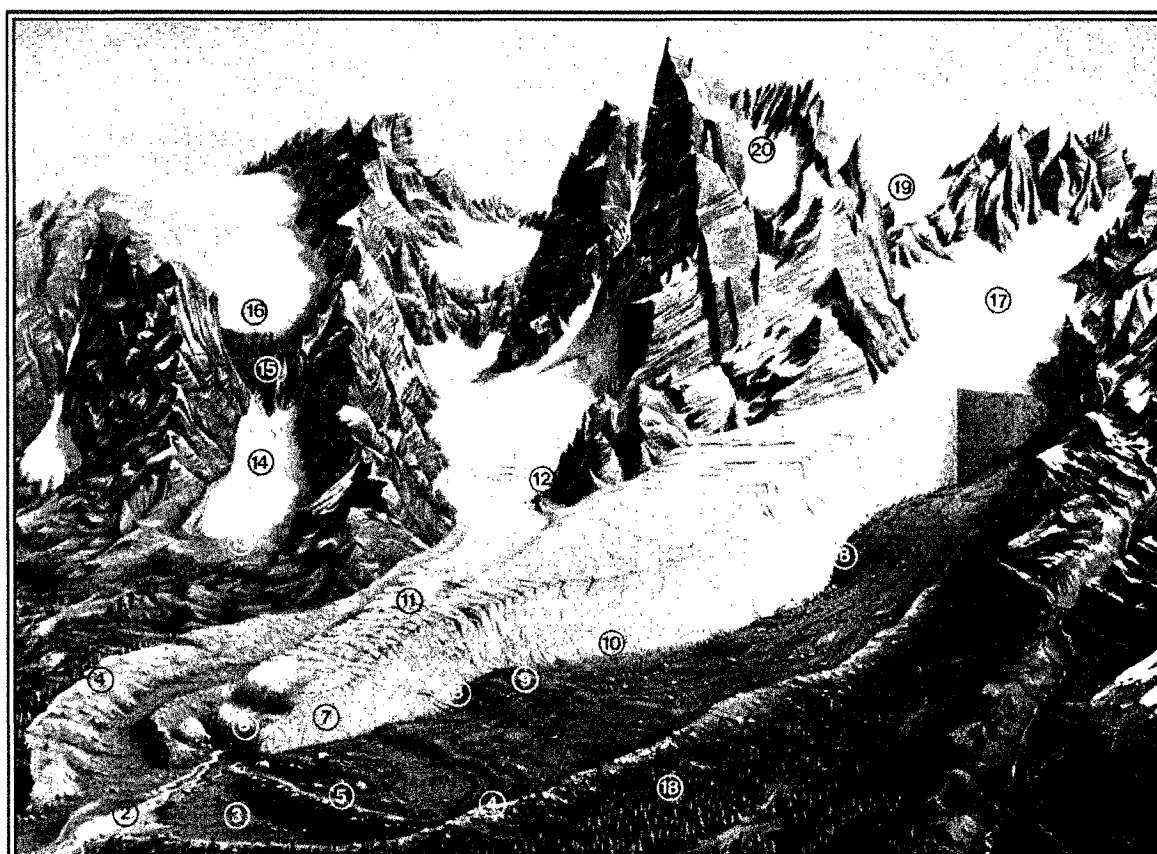


Figure 3.1: Définitions de l'aménagement morphologique des glaciers (Vivian, 1975)

cuvettes suspendues ou des plateaux ondulés, réplique locale des inlandsis (Derruau, 1974).

- **Glacier de cirque (Figure 3.1 : #17)** : Dans les montagnes dont les sommets dépassent de peu la ligne des neiges persistantes, des glaciers se logent souvent dans des cirques (parties la plus basse des montagnes arctiques ou subarctiques, montagnes tempérées et tropicales). Le glacier est de dimensions réduites et il est dominé par des parois rocheuses presque verticales, d'où descendent les avalanches qui l'alimentent. Entre la paroi et le glacier, un espace béant, la rimaye est masqué en hiver par des ponts de neige, mais apparent en été. La rimaye sépare la glace adhérant à la paroi et celle du glacier et cette glace est animée par un mouvement de descente vers l'aval (Derruau, 1974).

- **Glacier de vallée** : Caractérisé comme un réseau dentritique. La zone d'alimentation comprend plusieurs langues issues des cirques supérieurs. Ces langues s'unissent en confluence et en aval, seule descend la grande langue résultante, de topographie convexe car l'ablation est plus forte sur les bords. Il est important de noter que la surface de la glace est plus ou moins recouverte par des dépôts (Derruau, 1974).

- **Glazier** : Le glazier représente l'espace abandonné par les glaciers. Deux types de glazier existent, soit le glazier dénudé et le glazier d'accumulation. Les **glaziers dénudés** sont caractérisés par l'absence d'accumulation, où la roche en place apparaît sous forme de grandes dalles lisses érodées par le glacier et par les eaux. Les gorges proglaciaires constituent une forme limite des glaziers dénudés. Suivant leurs profondeurs, elles sont surmontées, ou non, d'épaulement rocheux qui eux peuvent être recouverts, si leurs pentes ne sont pas trop accusées, de blocs épars ou de formations morainiques. (Vivian, 1975). Les **glaziers d'accumulation (Figure 3.1 : #3)**, associés à des glaciers dont les fronts sont étalés, sont les délaissées glaciaires à faible pente, où les apports par le glacier sont de beaucoup supérieurs à la capacité de transport des eaux qui sinuent à travers la marge proglaciaire. Ce type de glazier d'accumulation se présente sous forme de dépôts inorganisés ou de constructions ordonnées perpendiculaires ou parallèles au sens d'écoulement du glacier. Par la suite, le plan des eaux représente les marges où le rôle de l'eau d'une part et des phénomènes de barrages à cet écoulement par dépôts morainiques frontaux, éboulements, accumulations glaciaires ou autres verrous rocheux d'autre part se révèlent fondamentaux. Le plan des eaux correspond à des formes de comblement fluvio-glaciaire ou lacustre de la vallée. Cette forme se produit à l'arrière de barrages glaciaires ou à l'arrière de barrages morainiques.

- **Lac glaciaire** : La formation des lacs glaciaires a comme origine la présence de glaciers :

(1) **Bassin de barrage morainique (Figure 3.1 : #13)** : « This type of basin is a product of glacial retreat, either in a mountain valley or across a continental surface with various scoured grooves and pre-existing valleys; the periodic stillstands of the receding ice cause morainic walls to be left extending from side to side of the valleys and thus form ideal dams » (Fairbridge, 1968).

(2) **Bassin de barrage de glace** : « In this case, the existing (tributary) valley is dammed by an ice barrier in the main trough, causing a block in the drainage (usually at an altitude below the snowline, thus including both local rainwater precipitation and meltwater » (Fairbridge, 1968).

(3) **Kettle** : « Stagnant ice deposits a ground moraine or lodgement till over the entire glaciated surface in irregular heaps. Depressions mainly represent the sites of residual ice blocks that melted out last, and today are occupied by small lakes, ponds or partly filled swampy depressions » (Fairbridge, 1968).

- **Moraine** : « Moraines are characteristic glacial land forms, and also features built of clastic glaciogene sediments. The latter are transported by moving ice (especially by mountain glaciers or continental ice sheets) and are deposited during both growth and recession (shrinking) of the ice. This picks up rock debris ranging from clay to large block size and of heterogeneous origin, at its base, along its flanks and over its surface. This debris thus is transported beneath, beside, on, within and in front of the ice, and so travels into other parts of the continent or into the ocean where it is deposited as marine till » (Fairbridge, 1968).

(1) **Moraine latérale (Figure 3.1 : #4)** : Ce type de moraine est formé par les matériaux tombés sur le glacier ou arrachés par lui aux parois de la vallée. Quand deux courants de glace confluent, une moraine médiane est formée par juxtaposition de deux moraines latérales (Derruau, 1974).

(2) **Moraine frontale** : Ce type de moraine est formé par la déposition de matériaux transportés au front du glacier. Cette moraine terminale n'est étendue que si le front du glacier stationne depuis longtemps au même endroit, ou si le glacier les rassemble en les poussant devant lui lors d'une progression glaciaire, aussi appelée moraine de poussée (Derruau, 1974).

- **Vallée glaciaire** : « A valley that is primarily U-shaped is not to be found in regions that have not been glaciated. Valleys today that are partly occupied by retreating mountain glaciers also show the distinctive U-shaped profile in the sector recently abandoned by the ice. The U-shaped valley or trough is therefore taken to be a characteristic feature of mountain glaciation. Its walls are

frequently marked by striated pavements, while the floors are generally veneered by till of the ground moraines or by successive abandoned end moraines » (Fairbridge, 1968).

3.2 LICHÉNOMÉTRIE

3.2.1 Définition

La lichénométrie représente une technique de datation pour les environnements arctiques et alpins. La lichénométrie est définie comme étant :

- L'utilisation des lichens dans le but de fournir une estimation d'un âge relatif ou absolu des substrats sur lesquels ils sont établis;
- Une technique qui mesure le diamètre des thalles de lichens pour générer une estimation minimale de temps de la surface colonisée depuis qu'elle est exposée et stable (Locke et al., 1979; Innes, 1985a; McCarthy, 1999, 2002a).

Innes (1985a) définit l'hypothèse de base de cette technique comme suit :

« [...] is that lichens growing on a rock surface or other suitable substrate can be used to obtain an approximation of the date of deposition of that surface. If the time taken between the exposure of a substrate and its colonisation by lichens is known, and if the rate of growth of a given species at a site is also known, then a minimum date can be obtained by measuring the diameter of the largest lichen at that site and referring this to a growth curve for the species ».

La lichénométrie représente une technique de datation absolue et relative pour les périodes des 500 dernières années. Elle peut être employée à toutes les latitudes, longitudes et altitudes. Les dates relatives indiquent qu'un dépôt peut différer en âge en comparaison avec un autre dépôt, tandis que les dates absolues permettent d'obtenir un âge plus ou moins précis pour la déposition et l'exposition d'un substrat. Si une relation est établie entre la taille et l'âge de l'espèce, l'âge d'une surface peut être déduite à partir de la taille des lichens qui la colonisent (Innes, 1988). La lichénométrie a été expérimentée pour les premières fois par Beschel au cours des années 1950.

3.2.2 Sélection et identification de l'espèce

Plus de 35 espèces de lichens ont été utilisées pour les études lichénométriques. Beschel (1957) suggère l'emploi de lichens de type crustacé et foliacé. Le choix des espèces est basé sur l'abondance et la longévité de l'espèce et la présence de thalles plus ou moins circulaires sur une

surface. Si les surfaces étudiées sont jeunes et d'âges relativement similaires, une espèce ayant une croissance rapide devrait être utilisée; si les surfaces étudiées sont plus âgées et possèdent des âges variés, une espèce ayant une croissance lente devrait être employée (Locke & al., 1979).

La majorité des études lichénométriques utilise le genre *Rhizocarpon*, plus particulièrement l'espèce noire-verte-jaune *Rhizocarpon geographicum* aussi généralisée comme *R. geographicum sensu lato*, ou *R. geographicum agg.* ou *R. geographicum coll.* (Locke & al., 1979). « These yellow-green crustose lichens are common to abundant in many arctic-alpine environments and are also believed to grow to a considerable age. As this growth tends to be slow (ca 0.02 – 2.00 mm yr⁻¹ diameter increase) the group is particularly useful in

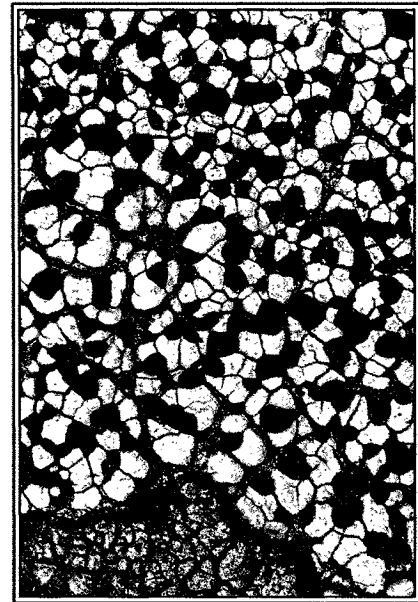


Figure 3.2: *Rhizocarpon geographicum* X 5.6 (Brodo, 2001)

lichenometry » (Innes, 1985a). Cette espèce est grandement utilisée en lichénométrie puisqu'elle colonise rapidement des surfaces arctiques et alpines et que son taux de croissance est lent.

L'identification de *R. geographicum* sur le terrain présente toutefois une difficulté et il existe deux points de vue distincts concernant la subdivision du genre *Rhizocarpon*. Tout d'abord, certains affirment que plusieurs espèces de lichens ne sont pas en réalité de « vraies » espèces mais qu'elles représentent plutôt soit des phénotypes ou des écotypes. « Such a view is supported by the differential response of individuals within the same species which have been drawn from different habitats and subjected to the same environmental stresses. Furthermore, some lichens species may not always have identical chemical characteristics » (Innes, 1985a).

Ainsi, comme les caractéristiques chimiques de *R. geographicum* peuvent être directement utilisées comme caractéristiques taxonomiques, un point de vue alternatif existe. Ce dernier indique que le genre *Rhizocarpon* regroupe en effet quatre sections. Ces quatre sections sont : (1) *R. superficiale* (Runem.) Thoms., (2) *R. alpicola* (Runem.) Thoms., (3) *R. viridiatrum* (Runem.) Thoms. et (4) *R. rhizocarpon*. Les études lichénométriques emploient le plus fréquemment l'espèce *Rhizocarpon geographicum*, se retrouvant sous le genre *Rhizocarpon* section *Rhizocarpon*. Les autres espèces ayant aussi été utilisées dans le cadre d'études lichénométriques sont: *Alectoria minuscula*, *A. pubescens*, *Aspicilia candida*, *Sporastitia testudinea*, *Umbilicaria proboscidea*, *U. hyperborea* et

Xanthoria elegans (Andrews & Webber, 1964; Calkin & Ellis, 1980, 1984; Dyke, 1990; Innes, 1986b; McCarthy & Smith, 1995; Miller, 1973b; Smith & al., 1995)

La généralisation de la section *R. geographicum* pose cependant un problème : certaines espèces de cette section colonisent plus rapidement des substrats que d'autres et certaines espèces sont plus compétitives que d'autres (Benedict, 1988; Innes, 1982, 1983a, 1988, 1985a). De plus, comme mentionné précédemment, la classification des lichens est complexe et l'identification sur le terrain ne peut être qu'effectuée qu'au niveau de la section. Subséquemment, Innes (1985b) recommande les classifications suivantes dans le cadre d'études lichénométriques :

« a) *Rhizocarpon* subgenus: Referring to the entire yellow-green *Rhizocarpon* subgenus; b) Section level: Referring to studies where identification has been made to section level, e.g. *Rhizocarpon* section *Alpicola* (usually possible in the field); c) Species level: Where identification has been made to the specific level, e.g. *Rhizocarpon geographicum* (L.) DC (usually involving laboratory determinations). »

Dans un contexte lichénométrique, ce débat concernant la classification des lichens est à un certain degré plus ou moins important : « The available evidence indicates that there are morphological and biochemical variations within the *Rhizocarpon* subgenus and that thalli showing similar sets of characteristics are related to specific environments. It has been shown that these units may have different growth rates and that there may also be variations in the growth rates within any given unit » (Innes, 1985a). Il reste toutefois important de comprendre ces variations d'unités afin de différencier les distributions et les taux de croissance entre les différentes espèces de lichens, ce qui pourrait expliquer des conditions environnementales particulières.

3.2.3 Paramètres d'échantillonnage des lichens

Jochimsen (1973) indique que la lichénométrie procède selon les trois critères suivants :

« (1) With ice recession, or the end of an ice advance, the morainic debris becomes available for colonization by plants. The final deposition of the moraine, consequently the maximum of glacier advance, coincides with colonization by the first lichens; (2) The thalli with the largest diameter are therefore the oldest individuals and hence form a measure of the age of the substratum; (3) Only a few species of lichens with a cosmopolitan distribution are required for the measurements. »

Toutefois, Jochimsen (1973) nous informe de plusieurs sources d'erreurs concernant la possibilité réelle et exacte d'évaluer l'âge de la déposition des moraines. Les sources d'erreurs possibles sont

soit (1) la présence de roches colonisées par des lichens n'appartenant pas au substrat étudié, (2) la méthode d'échantillonnage et la technique de mesures des thalles et (3) l'identification de l'espèce et les facteurs environnementaux. Innes (1985a) mentionne que la lichénométrie ne peut qu'indiquer des âges pour la stabilisation d'un dépôt. Toutefois, dans le cas de moraines à cœur de glace, la stabilisation du dépôt peut s'effectuer à l'intérieur d'une plus grande période de temps. Ces facteurs sont discutés dans les sections suivantes élaborant sur les différentes techniques lichénométriques ainsi que leurs avantages et désavantages.

3.2.3.1 *Approches lichénométriques*

McCarthy (1999) résume les deux méthodes lichénométriques, étant la méthode traditionnelle et la méthode statistique. Il décrit la méthode traditionnelle comme suit :

« The key assumptions of the traditional approach are: (i) a plant is no older than the surface on which it is growing; (ii) the radial growth of a lichen is uniform when averaged over the long-term; and (iii) the largest individual in a population grows under optimal conditions and provides a minimum estimate of the amount of time that the substrate has been stable and exposed. » (McCarthy, 1999)

Il définit par la suite la méthode statistique :

« It rests on the fundamental assumption that lichen populations have a statistically normal distribution of thallus size in which mean thallus size increases with substrate age. » (McCarthy, 1999)

La méthode statistique partage les deux premiers points de la méthode traditionnelle mais elle considère que les conditions qui affectent la croissance des lichens sont constantes et que ces conditions affectent tous les thalles.

3.2.3.2 *Mesures des thalles et stratégies d'échantillonnage*

Locke & al. (1979), Andrews & Webber (1964), Birkeland (1973) et Luckman (1977) ne mesurent que le plus petit diamètre du thalle (**Figure 3.3**). Une autre alternative est la mesure du plus grand diamètre d'un thalle, soit l'axe le plus long (Bickerton & Matthews, 1992; Innes, 1985a; Karlén, 1973; 1979; Matthews, 1974; Matthews & Shakesby, 1984; Mottershead, 1980; Proctor, 1983). Le risque de cette mesure est que plus d'un thalle pourrait être mesuré. On résout ce problème en ne mesurant que les thalles plus ou moins circulaires. La précision des mesures varie entre plus ou

moins 0.01 mm (Matthews, 1973), 0.5 mm (Andrews & Webber, 1964) et 1 mm, quelle que soit la méthode.

En ce qui concerne les stratégies d'échantillonnage, trois méthodes ont été employées pour les études lichénométriques : (1) la mesure du thalle le plus large sur une surface (Beschel, 1961; Benedict, 1967, 1968; Miller, 1973b; Webber & Andrews, 1973), (2) la moyenne des cinq ou dix thalles les plus larges sur un substrat (Matthews, 1973, 1974, 1975; Mottershead & White, 1972; Stork, 1963) et (3) un échantillonnage aléatoire dans le but de déterminer une distribution taille – fréquence de la population des lichens sur une surface déterminée (Benedict, 1967; Innes, 1983b, 1986a; Locke & al., 1979). Locke & al. (1979) discutent du raisonnement élaboré par Beschel (1961)

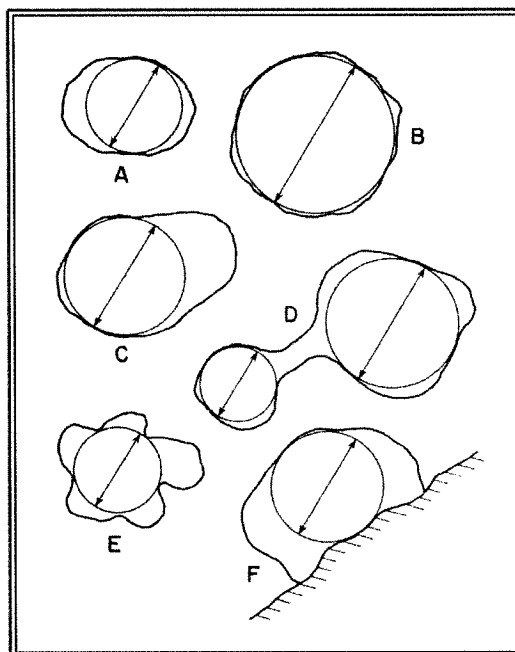


Figure 3.3: Mesure du plus petit diamètre, le plus grand cercle inscrit à l'intérieur d'un thalle (Locke & al., 1979)

concernant la mesure des thalles les plus larges : « He states that a consideration of the largest plants of one species as age indicators will simultaneously select the individual growing under optimal local conditions and that in the resulting mixture only the largest plants will be of an age equal to that of the exposed substratum ». Toutefois, l'utilisation des thalles les plus larges de lichen pourrait inclure des thalles provenant d'une source externe, ce qui sera discuté plus en détails dans les sections suivantes (Benedict, 1968; Locke & al., 1979).

Discutons maintenant du nombre de lichen devant être pris en considération lors d'une étude lichénométrique. Plusieurs opinions existent concernant ce sujet : (1) Webber & Andrews (1973) indiquent que seulement le thalle le plus large est représentatif de l'âge d'un substrat; (2) Innes (1984), Locke & al. (1979), Matthews (1974; 1975), Matthews & Shakesby (1984) et Mottershead & White (1972) emploient la moyenne de plusieurs thalles les plus larges sur une même surface. Toutefois, Gordon & Sharp (1983) suggèrent que la moyenne des thalles les plus larges ne soit qu'employée lorsqu'il y a peu de variations environnementales sur la surface étudiée. Ces deux auteurs suggèrent plutôt la mesure du thalle le plus large. Innes (1984; 1985a) discute de la logique de l'utilisation d'une moyenne des thalles les plus larges sur une surface :

« Within a large area, there are frequently one or two lichens that are substantially larger than any of the others on that substrate. These thalli may have survived deposition onto

that surface or they may simply represent the closest to the optimum growth rate. On other surfaces, these may not be encountered, and any derived dates for the surface with larger lichens will overestimate the age of the deposit. If more than the single largest thallus on the surface used, the probability of including anomalous thalli will be proportionally reduced. »

3.2.3.3 Aire d'échantillonnage

Un paramètre d'échantillonnage supplémentaire important est celui de l'aire des sites d'échantillonnage. Il est bien évident que les surfaces étudiées ne peuvent être échantillonnées en entier. Ainsi, il est important d'examiner une aire d'échantillonnage déterminée devant être la plus représentative. Toutefois, il est important de noter que plus l'aire de l'échantillonnage est large, plus la probabilité d'identifier le thalle le plus large est grande. Innes (1984) examine ce problème en détail et définit que la moyenne du lichen le plus large par quadrant augmente avec une augmentation de la taille du quadrant.

Beschel (1961) suggère une aire de 100 m². Dans le même ordre d'idées, Stork (1963) examine cinq quadrants de 25 m² chacun pour la même surface, Andrews & Webber (1964) mesurent huit quadrants de 64 m² chacun et des stations de 10 m de rayon. Matthews (1973, 1974) examine des bandes sur les crêtes morainiques de 50 m par 8 m et de 25 m par 8 m. L'aire d'échantillonnage dépend bien évidemment de la taille des substrats étudiés. Une méthode alternative est l'exécution d'une marche aléatoire afin de mesurer les lichens les plus larges durant une période de temps déterminée (Birkeland, 1973; Miller, 1973a) : « This presupposes that a similar area will be searched over a given length of time. This is usually not the case: the problem of lichen distributions, terrain character and field climatic conditions mean that it frequently takes much longer to sample some areas than it does others » (Innes, 1985a). Innes (1985a) discute de la possibilité d'échantillonner en entier une surface en divisant la surface en quadrants. De cette façon, les valeurs extrêmes et anormales peuvent être éliminées.

3.2.3.4 Variables anormales et extrêmes

Selon les auteurs employant la mesure du thalle le plus large par substrat, cette mesure est la plus représentative de l'âge de cette surface. Toutefois, ce thalle pourrait ne pas être un membre de la population de lichens ayant colonisé ce substrat. « Most large thalli may have grown after deposition of a substrate but some may have been transported in, e.g., by rock fall, or preserved since before substrate deposition » (Locke & al., 1979). De plus, Innes (1985a) affirme:

« A variety of processes can lead to this, including mass movement activity, the incorporation of boulders into a push moraine (Anderson & Sollid, 1971) and deposition by a medial moraine (Matthews, 1973). Whatever the cause, it is likely that there will be more than one anomalous thallus. [...] In a sequence of moraines, terraces or fan deposits, it may be possible to recognize these thalli by relating the dates to the stratigraphic position of the deposit. Obviously, an older deposit would not be expected to lie above a younger one. Apparent anomalies may be due to factors such as the differential composition of moraines, different moraine sizes, the presence of vascular vegetation and the occurrence of snowkill. »

Pour accepter la mesure du plus grand thalle, un nombre de thalles ayant un diamètre plus ou moins similaires au diamètre maximum doit exister sur la même surface étudiée (Denton & Karlén, 1977). De plus, dans le but d'éliminer les thalles anormaux, Calkin & Ellis (1980) ne considèrent pas les lichens ayant un diamètre plus grand que 20% comparativement au prochain plus grand thalle mesuré. Quant à Rapp & Nyberg (1981), ils éliminent les thalles ayant un diamètre maximum supérieur de 10 mm comparativement au prochain thalle le plus large sur le substrat. Innes (1983a) emploie un indice quantitatif basé sur le ratio de la moyenne des cinq thalles les plus larges d'un substrat par rapport au thalle le plus large. Cet indice a aussi permis de constater qu'une augmentation de la variation du diamètre des lichens se produisait avec une augmentation de l'âge (Innes, 1983b). Dans d'autres cas, certains auteurs préfèrent tout simplement opter pour la moyenne des cinq ou dix thalles les plus larges.

D'un autre point de vue, McCarroll (1994) suggère une nouvelle approche basée sur un échantillon de la population : la mesure des thalles-individus des lichens les plus larges sur chaque bloc de roche pour une aire d'échantillonnage déterminée. McCarroll (1994) discute des thalles anormaux : « Anomalous lichens might represent any that were incorporated into the deposit as it formed [...] ». Ce problème d'identification des thalles anormaux varie selon la technique d'échantillonnage : l'utilisation du plus gros thalle versus la moyenne des cinq plus gros thalles. Ce problème est relié aussi à la taille du quadrant d'échantillonnage où la taille moyenne des plus gros lichens augmentent avec l'augmentation de la taille du quadrant d'échantillonnage et ce, jusqu'à 1000 m² (Innes 1985a). McCarroll (1994) propose ainsi une technique lichénométrique basée sur l'analyse d'échantillons dérivés de la population : cette méthode permet d'évaluer des échantillons aléatoires des lichens les plus larges sur des blocs individuels, ceci permettant de réduire l'influence des thalles anormaux. Il affirme aussi que les études lichénométriques taille-fréquence, basée que sur les lichens les plus larges, s'engagent à analyser que la queue prolongée de la distribution. « As the area that is searched is increased, the probability of finding the largest lichens in the population also increases. Standard

lichenometry will therefore tend to overestimate the age of very large surfaces and underestimate the age of small surfaces » (McCarroll, 1994).

Une méthode distincte permet de remédier aux problèmes de thalles anormaux en analysant plusieurs quadrants de petites tailles. Cette méthode permet d'étudier une plus grande proportion d'une même surface. Matthews (1974) divise chaque substrat en un nombre de bandes de 50 m par 8 m et ces bandes sont aussi divisées en section de 2 m par 8 m. En mesurant le plus grand thalle à l'intérieur de chaque section, il détermine donc les 25 thalles les plus larges pour une surface de 400 m² échantillonnée. Matthews (1975) mesure les cinq thalles les plus larges selon une aire d'échantillonnage de 25 m par 8 m, et détermine statistiquement qu'ils représentent davantage l'âge réel des moraines étudiées. Cette technique d'observation est aussi appuyée par Innes (1984a) et Locke & al. (1979).

Finalement, une autre méthode pour réduire l'impact des thalles anormaux d'une population de lichens sur une même surface est celle de l'analyse de la distribution taille-fréquence. L'introduction de variables erronées dans une distribution taille-fréquence d'un échantillon de lichen analysé peut indiquer qu'une distribution est plus âgée en devenant positivement asymétrique. « The probability of incorporating anomalous thalli is related to the sample area searched. In size-frequency studies, the sample area is related to the density of the thalli; on older substrates, the probability that an anomalous thallus will be included in a size frequency distribution is therefore inversely related to the age of the substrate » (Innes, 1983b).

3.2.4 Datation

3.2.4.1 Les datations relatives

Après la collecte des données sur le terrain, les résultats peuvent être corrélés à l'intérieur de la même région et faire l'objet d'une datation relative. Locke & al. (1979) expliquent que la précision d'une corrélation relative est en fonction de la technique appliquée, de la diversité climatique d'une région et de la variabilité intrinsèque de la croissance de la végétation. La cohérence des données internes pour un même site peut être analysée selon un ratio si plus d'une espèce de lichens a été mesurée. Selon la moyenne et l'écart-type des mesures, la cohérence à l'intérieur d'un site spécifique peut être analysée et ce ratio permet de déterminer la présence de mesures anormales. Lors de l'utilisation d'une même espèce, la vérification de la cohérence s'effectue entre les sites d'échantillonnage d'une même région. Si un échantillonnage détaillé a été effectué pour un substrat, la distribution des diamètres des thalles mesurés peut être représentée sur une carte par des isohypses.

De plus, les diamètres des thalles mesurés peuvent être illustrés par des histogrammes de fréquence, en associant par exemple le nombre de moraines observées versus les tailles maximums des diamètres (Benedict, 1968; Denton & Karlén, 1973). En comparant les résultats lichénométriques d'une région restreinte, des âges relatifs peuvent être confirmés si une constance dans les techniques utilisées a été appliquée.

3.2.4.2 *Les datations absolues*

Les datations absolues à partir des lichens nécessitent des connaissances concernant le taux de croissance d'une espèce de lichen. Ces datations absolues peuvent être effectuées par des mesures directes (mesures de la croissance du diamètre d'un thalle ou de l'aire d'un thalle pour une période de temps donnée) et par des mesures indirectes (mesures des diamètres des thalles sur des surfaces dont l'âge a été déterminé).

- Approche directe

La technique ayant la plus grande précision pour effectuer des mesures directes est la photographie, comparativement aux méthodes de traçage et aux mesures effectuées à l'aide d'une règle et d'un pied de coulisse. En établissant un site d'étude au centre d'une surface où les lichens possèdent des tailles variées (les thalles devant être plus ou moins circulaires et n'étant pas en compétition avec d'autres thalles), des photographies avec un objet ayant une taille connue sont prises. Ces photographies seront répétées sur un intervalle de temps donné. Miller (1973b) suggère que les photographies et les mesures soient prises au moins pendant trois saisons de croissance. Les mesures peuvent aussi être notées à l'aide d'une règle ou d'un pied de coulisse, en employant la méthode par traçage. Plusieurs études lichénométriques ont effectué des mesures directes dans le but de déterminer un taux de croissance des lichens (Andrews & Webber, 1969; Brink, 1973; Calkin & Ellis, 1984; Miller & Andrews, 1972; McCarthy, 2002b; Miller, 1973b; Proctor, 1983).

L'utilisation d'un taux de croissance relatif, exprimé en cm^2 par an, n'est pas d'une très grande utilité en lichénométrie, quoi qu'elle puisse définir les différentes phases de croissance d'une espèce de lichen. De plus, ce taux est aussi employé dans le but de modéliser la croissance des lichens (Innes, 1985a). Principalement, le taux de croissance d'une espèce de lichen est exprimée en mm an^{-1} .

Un point important doit être noté. L'approche directe assume que l'environnement est uniforme pour la période de croissance des lichens mesurée :

« Direct growth rates refer to the growth during the measurement period only and it has to be assumed that the environmental characteristics over that time period are similar to those of other periods, both in the past and in the future. » (Innes, 1985a)

Toutefois, cette hypothèse est fautive puisque la majorité des études lichénométriques font référence à des séquences morainiques fournissant elles-mêmes des évidences de changements climatiques. En ajout, Armstrong (1974, 1976) définit la croissance d'un thalle de lichen selon trois phases – linéaire, pré-linéaire et post-linéaire – le taux de croissance d'un thalle étant initialement rapide pour ensuite diminuer et devenir constant. Les mesures directes doivent prendre en considération la possibilité d'un environnement dynamique et un facteur de croissance non-uniforme. Ainsi, deux sources d'erreurs sont possibles soit (1) le temps de colonisation et (2) la variation du taux de croissance par les variations environnementales (Locke & al., 1979).

- Approche indirecte

Les mesures indirectes consistent à mesurer la taille des lichens sur des surfaces dont les âges sont connus. L'âge des substrats peut être déterminé par la datation radiocarbone, la dendrochronologie, l'analyse d'images aériennes et de photographies satellitaires et par la disponibilité de données historiques. Cette technique possède comme avantage, comparativement aux mesures directes, la prise en considération et l'atténuation des variations climatiques et les fluctuations des taux de croissance des thalles (Innes, 1985a). De nombreuses études lichénométriques ont utilisé cette méthode des mesures indirectes (Andrews & Barnett, 1979; Andrews & Webber, 1964; Bickerton & Matthews, 1992, 1993; Davis, 1980; Denton & Karlén, 1973; Federici & Stefanini, 2001; Matthews, 1994; Miller & Andrews, 1972; Mottershead & White, 1972). Il est important de prendre en considération que les mesures indirectes ne représentent pas le maximum potentiel de croissance d'une espèce de lichens à un site. Cette mesure représente plutôt la croissance du thalle de lichen avant la prise de la mesure (Innes, 1985a).

Locke & al. (1979) présentent quelques points importants devant être pris en considération pour l'interprétation des dates radiocarbone utilisées pour les analyses employant des mesures indirectes. Premièrement, les dates radiocarbone ne représentent que la limite inférieure ou supérieure de l'évènement. Deuxièmement, les dates radiocarbone pour les 100 à 400 ans BP sont ambiguës. Troisièmement, les courbes de croissance établies n'utilisent que peu de dates radiocarbone, interpolant et extrapolant la portion restante de la courbe. Les variations climatiques sont ainsi négligées par cette procédure et ce, pour un intervalle de temps de 1000 ans et plus.

Quant à l'utilisation de la dendrochronologie afin d'établir une courbe de croissance, cette technique est problématique puisqu'un temps de colonisation de la surface étudiée doit être pris en considération. Andrews & Webber (1964) ont analysé les anneaux de croissance de l'espèce *Salix arctica* pour déduire des âges de différents substrats. Innes (1985a) critique cette méthode :

« Problems arose over the date of colonisation which, although it may occur within three years of a site becoming ice-free, is more likely to occur within five to ten years or longer. [...], all the willows were less than 40 years old, and a 5-10 year colonisation lag therefore represents a considerable margin of error. In some areas, it may be possible to determine colonisation lags by examining the area immediately in front of the glaciers, but many present-day glaciers are currently retreating over bedrock and colonisation by trees is therefore greatly inhibited. »

Le temps de colonisation des arbres sur un substrat récemment déglacé peut aller jusqu'à 100 ans environ, représentant ainsi une des difficultés de l'utilisation de la dendrochronologie à des fins de mesures indirectes.

3.2.4.3 Les courbes lichénométriques et les phases de croissance des lichens

Les différentes courbes de croissance d'espèces de lichen sont distinctes, mais caractérisées par trois phases. Armstrong (1974, 1976) définit ces trois phases comme étant (1) phase pré-linéaire (croissance radiale augmente avec le temps de manière logarithmique; (2) phase linéaire (aussi connue sous le nom de « Great Period ») et (3) post-linéaire (**Figure 3.4**). Il mentionne que la croissance radiale diminue graduellement avec le temps. Toutefois, les phases de croissance sont distinctes entre les espèces de lichens et elles varient selon les conditions environnementales.

Selon Innes (1985a), la plupart des études lichénométriques concerne des situations portant sur la deuxième et la troisième phase. Il ajoute que « The duration of the second and third phases is variable and appears to be size-dependent rather than age-dependent. Where growth is rapid, the linear phases are short: Innes (1983b) considered them to last for less than 30 years ». Miller & Andrews (1972), Reger & Péwé (1969) et Denton & Karlén (1973) ont noté que la durée de la phase linéaire est entre 200 à 400 ans. La durée de la phase post-linéaire est définie à 3000 ans selon Benedict (1967), tandis que Denton & Karlén (1973) l'estime à 8000 ans et Miller & Andrews (1972) l'estiment jusqu'à 9500 ans. Innes (1985a) affirme cependant qu'il est plus approprié d'effectuer l'utilisation de *Rhizocarpon* section *Rhizocarpon* jusqu'à un diamètre de 150 mm et d'effectuer l'utilisation de *Rhizocarpon alpicola* jusqu'à un diamètre de 300 mm.

Les courbes de croissance illustrent l'âge du thalle versus sa taille et ce, selon l'acquisition de points de contrôle. Les données historiques représentent le plus souvent les points de contrôle pour la section la plus jeune de la courbe tandis que les datations au radiocarbone représentent les points de contrôle les plus âgés sur la courbe. Il est important de noter que les courbes de croissance varient selon leur représentation graphique et statistique. Les coordonnées arithmétiques sont celles étant le plus fréquemment utilisées (Innes, 1985a); toutefois, les coordonnées semi-logarithmiques (Orombelli & Porter, 1983; Matthews, 1975) et logarithmiques (Miller & Andrews, 1972; Innes, 1983b) sont aussi employées.

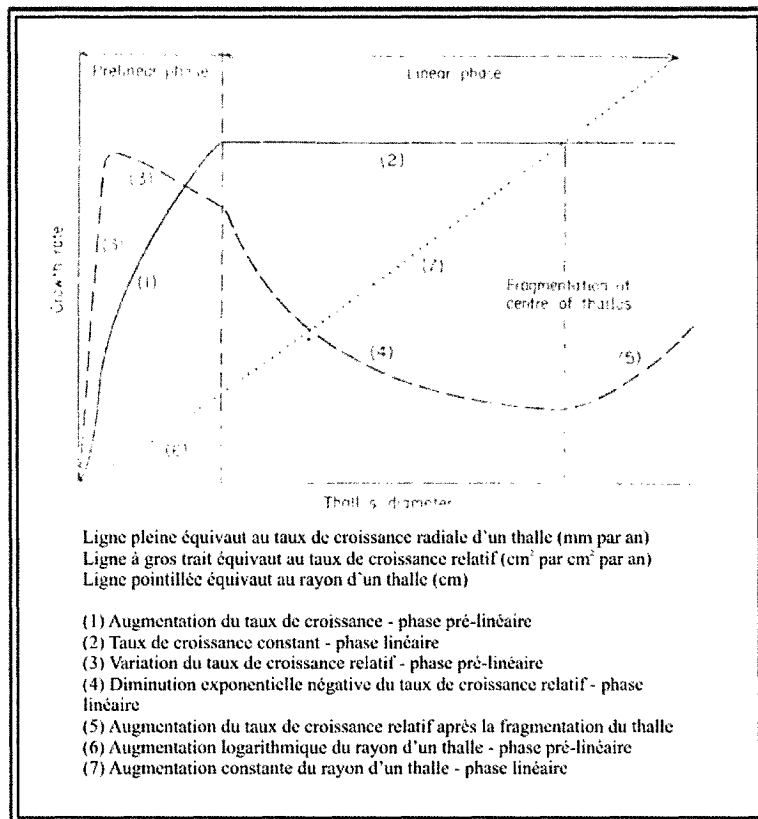


Figure 3.4: Changement des phases de croissance d'un thalle de croissance (Armstrong: 1974, 1976)

Les résultats des études lichénométriques effectuées dans plusieurs régions et ayant définis une courbe de croissance pour l'espèce de lichen *Rhizocarpon geographicum* démontrent des résultats similaires. Le taux de croissance linéaire pour la Terre de Baffin est de 0.03 mm/an (Andrews & Barnett, 1979); de 0.04 mm/an pour la région de la Laponie suédoise (Denton & Karlén, 1973); de 0.035 mm/an pour la chaîne de montagnes St-Elias au Yukon et en Alaska (Denton & Karlén, 1977); et de 0.031 mm/an pour Brooks Range en Alaska (Calkin & Ellis, 1980).

Un point important doit cependant être mentionné. Armstrong (1976) indique qu'il est possible de connaître un âge précis pour un thalle dont le taux de croissance a été analysé. Toutefois, lorsque l'âge de la structure d'un grand échantillon d'une population de lichens veut être déterminé, « [...] this method does not take account of the changes in the radial growth rate which occur during the life of a lichen thallus. In addition, if the age structure of a large population of thalli is to be determined, then it is impractical to measure the growth rate of every thallus in the population to be aged »

(Armstrong, 1976). Cette méthode de datation de surface doit donc prendre en considération ces deux problèmes. Toutefois, en étudiant la structure de la taille d'une population de lichens, cette structure peut être convertie en structure d'âge selon la relation entre le taux de croissance des thalles et leur taille. Ainsi, la dynamique de cette population peut être analysée.

3.2.4.4 Temps de colonisation des lichens sur un substrat

Jochimsen (1973) discute du temps de colonisation des lichens sur un substrat stable. Ce temps de colonisation est imprécis. « The commonest crustose lichens of alpine areas form neither soredia (propagation units in which algae cells and fungus hypha are interwoven, and which become free as a dusty mass) nor isidia, but the propagation of the algae and fungi proceeds separately. Therefore it is very unlikely that colonization of the substratum begins immediately, since the two companions must find each other in order to form a new symbiosis » (Jochimsen, 1973).

Bailey (1976) discute des différents processus de dispersion des propagules des lichens. Les propagules peuvent être transportées par le vent, l'eau, par une libération active et par les animaux. L'établissement des propagules des lichens a lieu par une déposition et par une germination ou attachement par la suite : les propagules seront transportées et déposées sur un substrat idéal; la germination est décrite comme étant la croissance initiale d'un thalle de lichen; et l'attachement est décrit comme étant l'apparence initiale d'un thalle de lichen. Mais il ne faut pas oublier un des facteurs de la colonisation, la compétition. Les lichens sont en compétition entre eux et avec d'autres organismes pour l'espace et les nutriments. Ainsi, tous ces facteurs doivent être pris en considération pour calculer le temps de colonisation des lichens.

Bref, il est grandement important de prendre en considération que les dates fournies à l'aide de la lichénométrie ne représentent qu'un âge minimum des substrats étudiés et que les dates au radiocarbone d'une surface colonisée par des lichens prennent en considération un temps de colonisation.

3.2.5 Étude de la distribution taille-fréquence des lichens

Le principe de base de l'étude d'une population de lichens selon la distribution taille-fréquence est que les caractéristiques d'une population de lichens représentent un meilleur indice pour l'âge de déposition d'un substrat. Comparativement aux mesures des lichens les plus larges, cette technique permet de discriminer des valeurs anormales (Innes, 1985a; Locke & al., 1979) et de

nombreux auteurs en ont fait l'usage (Andersen & Sollid, 1971; Benedict, 1967; Bull & al., 1994; Lindsay, 1973). Un minimum de 100 thalles est mesuré à l'intérieur d'une aire uniforme pour effectuer cette analyse de distribution (Farrar, 1974; Haines-Young, 1988; Innes, 1983b, 1985a; Locke & al., 1979). Locke & al. (1979) recommandent que deux échantillons de plus de 1000 thalles soit mesurés sur un même substrat. Dyke (1990) a modifié la technique de Locke & al. (1979) en ne mesurant que les tailles circulaires et en ne mesurant qu'environ 400 individus par surface d'âge uniforme. Dyke (1990) compare ainsi les données de ces sites d'échantillonnage en présentant des courbes cumulatives.

Quelques conditions sont nécessaires pour l'utilisation de l'analyse de la distribution taille-fréquence des lichens :

- Une quantité nécessaire de thalles doit être présente pour les mesurer et;
- La présence d'une aire ayant un microclimat raisonnablement uniforme (ombre, orientation et aspect) ou deux aires ayant des microclimats comparables (Farrar, 1974).

Locke & al. (1979) suggèrent que la fréquence logarithmique des thalles selon une classe de taille précise soit linéairement reliée à la taille du thalle. « They argued that a linear regression run through these data could provide a 1 in 1000 diameter which would act as a suitable index of that population. The 1 in 1000 diameter was given by the point at which the regression line crossed the x axis (i.e. where $y = -1$) representing a frequency of 0.1 per cent. This index could then be related to the age of a known surfaces to obtain an absolute dating curve or used to obtain the relative ages of a group of deposits » (Innes, 1985a). Toutefois, Innes (1983b) affirme que la difficulté de cette méthode est de déterminer un indice généralisant les caractéristiques de l'échantillon de la population étudiée.

Selon les résultats obtenus, Haines-Young (1988) discute des formes d'histogrammes décrivant la population de lichens étudiée : « [...] lichen populations should follow in sequence a Poisson function from no thalli (all classes zero) to a log-linear, to a truncated log-normal to a positively-skewed normal through to a normal distribution ».

L'avantage principal de l'analyse de la distribution taille-fréquence des lichens est l'identification des thalles anormaux : « By using size-frequency analysis, [...] large individuals are identified readily and removed from the sample and some other statistic (other than maximum size) can be used as a measure of relative or absolute age » (Dyke, 1990).

3.2.5.1 *Analyses statistiques des distributions taille – fréquence*

Locke & al. (1979) indiquent qu'une régression linéaire peut être appliquée aux données, selon le logarithme où la fréquence représente la variable dépendante et que le diamètre des thalles soit la variable indépendante. La statistique 1 pour 1000 thalles peut donc être ensuite calculée et ceci représente l'index caractérisant le statut d'une population de lichens sur un substrat. Cette statistique indique un diamètre prédit à une fréquence \log_{10} pour -1 lorsque les données fréquences sont sujettes à une régression log-linéaire.

Benedict (1967), Andersen & Sollid (1971) et Lindsay (1973) affirment qu'une distribution taille-fréquence d'une population de lichens est décrite par un modèle log-normal tronqué. Toutefois, Innes (1981) présente une distribution d'une population de lichens qui se rapproche beaucoup plus à une distribution log-normal réelle (où la classe modale ne représente pas les classes les plus petites). De plus, Farrar (1974) indique quant à lui que la distribution des populations de lichens analysées est caractérisée par une courbe normale.

Ainsi, si la distribution d'un échantillon de lichens pour un substrat ne représente pas une distribution log-normale véritable, la statistique 1 pour 1000 thalles (dérivée d'une méthode de régression) n'est pas appropriée pour décrire une population. Pour que cette statistique soit une caractéristique représentative d'une population de lichens, la distribution de la taille-fréquence doit représenter une distribution log-normale tronquée. Mais comme les distributions taille-fréquence des lichens sont variables, il est impossible d'affirmer qu'un modèle log-normal tronqué est universellement applicable (Innes, 1983b). Dans certains cas, une distribution Poisson est plus appropriée.

Benedict (1990) affirme de son côté que le gradient des diamètres des lichens diminue avec le temps, se caractérisant donc comme un bon index d'âge – gradient de la régression log-linéaire. Contrairement à l'indice statistique 1 pour 1000 thalles qui augmente avec l'âge, le gradient décroît avec le temps. Locke & al. (1979) et Innes (1986b) affirment que dans les deux cas, le taux de changement diminue avec le temps, ce qui suggère que ces deux derniers indices soient d'une grande utilité pour les substrats relativement jeunes.

3.2.5.2 *Forme de l'histogramme*

D'après Locke & al. (1979), les distributions taille-fréquence d'une population de lichens ont tendance à se déplacer d'une distribution log-normale vers une distribution Poisson. Les populations de lichens suivent une distribution type Poisson (sans thalle), une distribution log-linéaire, une

distribution normale tronquée, une distribution normale selon une asymétrie positive et finalement une distribution normale (Locke, 1983). Locke (1983) affirme donc que si la population est le meilleur indice pour l'âge, des paramètres statistiques de l'échantillon peuvent être utilisés (comme l'estimé 1 pour 1000 lichens d'une probabilité). Pour les plantes plus grandes, la distribution taille-fréquence des plantes à l'intérieur d'une cohorte est reliée à la densité de ces plantes et à l'âge de la cohorte :

« At low densities, the distributions tend towards normal, although they become positively skewed with increasing age. At high densities, the distributions are markedly positively skewed and in some cases may approach a truncated lognormal form. The observations suggest that to argue that the lichens within a given size class all represent a single cohort would be incorrect, although at present it is unknown whether higher plant population patterns are replicated by lichens. » (Innes, 1983b)

Lorsqu'il y a une compétition intra- et interspécifique affectant quelques thalles, une queue asymétrique négative peut être observée tandis que lorsque la population entière commence à ressentir la compétition, la distribution devient fortement positivement asymétrique (Innes, 1986c). S'il est possible d'observer une diminution de la fréquence des classes plus petites, ceci est la conséquence d'une réduction du taux de colonisation; un changement de la densité engendre aussi des changements de la structure de la population à cause de la compétition, incluant aussi le taux de natalité et de mortalité (Haines-Young, 1988). Topham (1977) a révisé l'utilisation

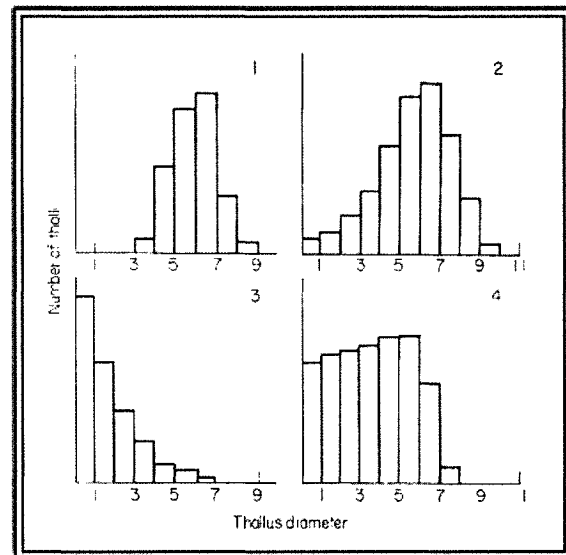


Figure 3.5: Distributions taille-fréquence hypothétique de quatre populations de lichens (Farrar, 1974)

des histogrammes de fréquence pour l'application écologique de la lichénométrie et il affirme que la plupart des recherches ayant été effectuée considère un faible taux de mortalité.

Farrar (1974) présente et discute quatre distributions hypothétiques de populations de lichens (**Figure 3.5**). La **Figure 3.5 (1)** montre que la colonisation s'est produite sur une courte période de temps et qu'elle est désormais inexistante. La **Figure 3.5 (2)** indique que la colonisation a toujours lieu ou que le taux de croissance rapide des petits thalles résulte en la présence de peu de petits thalles; ou que les thalles les plus âgés se sont désintégrés donnant l'impression d'un faux nombre de petits thalles. La

Figure 3.5 (3) illustre une situation où le taux de colonisation augmente encore ou qu'il existe un fort taux de mortalité chez les thalles ayant colonisés la surface étudiée. La **Figure 3.5 (4)** est celle qui est caractéristique d'une rotation constante des thalles. Un point important à noter est que les thalles les plus larges présents sur un substrat ne représentent pas nécessairement les thalles les plus vieux, même si la plupart des études lichénométriques emploie ce paramètre comme étant un bon indice d'estimation de l'âge d'un substrat.

Trois modèles (**Figure 3.6**) illustrant les changements par rapport au temps de distributions taille-fréquence sont décrits par Haines-Young (1988). Ces modèles indiquent la forme de la distribution lorsque :

- (1) Aucune compétition n'existe et qu'une population de lichens occupe un espace infini;
- (2) L'espace disponible est graduellement occupé par la colonisation et la croissance des thalles jusqu'à la formation d'une communauté fermée;
- (3) Même situation initiale que le modèle précédent; une plus grande compétition est présente entre certains thalles au détriment de leurs thalles voisins, ce qui leur permet de croître davantage jusqu'à la formation d'une communauté fermée (dans ce cas-ci, il y a donc élimination des thalles plus petits).

Haines-Young (1988) démontre qu'il existe une relation évidente entre la forme de la distribution taille-fréquence d'une population de lichens et la densité de la mosaïque de la même population de lichens. Mais peu importe les formes des histogrammes mentionnées précédemment, les courbes des populations de lichens sont toujours positivement asymétrique.

Armstrong (1976) discute des différentes sources d'erreurs pour l'interprétation des histogrammes taille-fréquence pour mesurer l'âge d'un thalle de lichen :

« (1) Because of the low radial growth rates of thalli less than 1 cm in diameter a small error in the measurements of growth rate or diameter of such a thallus will result in a large error in the measurement of the age of a thallus; (2) The method assumes that all thalli in the population have grown either as a result of lichenization or from very small vegetative reproductive structures so that age is zero when thallus diameter is zero; (3) The method assumes that there is a relationship between the size and age of a thallus and implies both that thalli of equal size are the same age and that thalli of different size are of different ages. However, because of the variability in the radial growth rate shown by thalli of equal size in the linear phase of radial growth neither of these assumptions may be valid for all thalli in the population; (4) The calibration curve does not take account of yearly variation in the radial growth rate of a thallus [...]. »

L'interprétation des distributions taille-fréquence des lichens peut être difficile puisqu'il est impossible d'affirmer que les classes pour la taille des lichens équivalent à des classes d'âge. « For

any given age-class, there will be a range of thallus diameters and each cohort will have its own size-frequency distribution. The standard deviations of the cohort distributions will increase through time due to natural variations in the growth rates of individuals within each cohort » (Innes, 1986c). Ainsi, si le taux de croissance des lichens diminue avec une plus grande taille, l'effet est le suivant : une diminution du

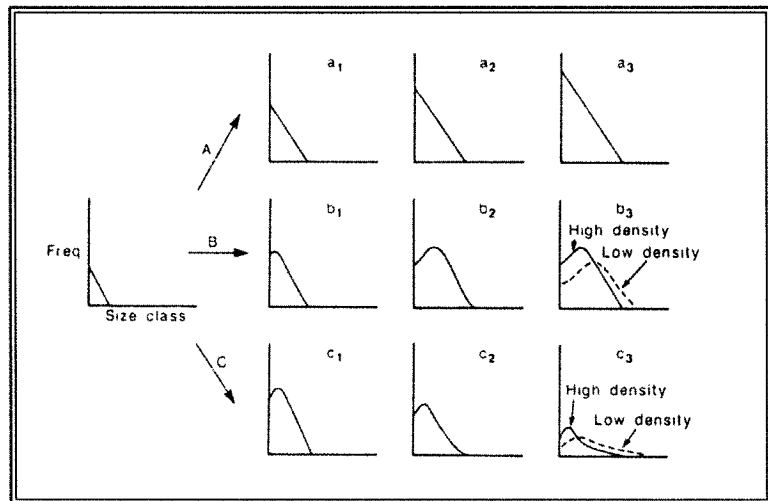


Figure 3.6: Modèles illustrant les relations entre la taille moyenne et la densité moyenne d'une population de lichens (Haines-Young, 1988)

taux de croissance résulte en des classes-tailles plus larges des lichens regroupant un plus grand intervalle d'âge que pour les classes-tailles plus petites (Innes, 1986c). La seule méthode pour déterminer une relation âge-taille est d'effectuer des mesures directes sur des thalles individuelles, considérant que cette relation ne peut être appliquée à une distribution taille-fréquence. Des données sur la structure de l'âge d'une population de lichens peuvent être quand même analysées. Cette structure est représentée à l'aide des histogrammes de fréquence selon différents intervalles. Ainsi, ces intervalles âges-tailles généralisent les erreurs engendrées par la méthode de mesure des taux de croissance et l'analyse de population peut être effectuée.

3.2.6 Pourcentage de couverture des lichens

La technique du pourcentage de couverture des lichens est basée sur le principe que le pourcentage d'une surface d'une roche recouverte par des lichens augmente avec le temps (Innes, 1985a). « Thus a boulder that has a higher percentage cover of lichens than another might be expected to be the older » (Innes, 1985a). Cette technique a été appliquée dans le cadre de plusieurs études lichénométriques dont celles de Carrara & Andrews (1972; 1973), Birkeland (1973), Carroll (1974), Dyke (1990) et Miller (1973a). Les études lichénométriques ont employé cette méthode dérivée afin d'analyser la succession des lichens et d'évaluer l'importance de la couverture de la neige et de l'aspect des sites étudiés. De plus, Carrara & Andrews (1972) ont démontré qu'il existait une relation linéaire entre le pourcentage de couverture des lichens sur une surface et le diamètre maximum d'une espèce de lichen. Cette observation pourrait permettre d'employer les mesures de pourcentage de couverture des lichens comme indice pour déterminer des âges absolus.

La procédure pour obtenir ce pourcentage est l'estimation visuelle de l'abondance d'une espèce de lichen pour un nombre de roches précis. McCarthy & Zaniwski (2001) ont récemment suggéré une méthode d'analyse digitale du pourcentage de couverture : « In lichenometry, digital analysis has the potential to free workers from reliance on manual measures that have made it difficult to measure large numbers of lichens or test a variety of indices (e.g., thallus area, perimeter, circularity) that may be more reliable indicators of substrate age ». Cette technique permet donc de collecter un grand nombre d'échantillons rapidement et d'effectuer des mesures objectives. En photographiant la surface d'un nombre de roches par site sur le terrain, cette analyse digitale peut être exécutée par la suite en laboratoire, en distinguant la roche nue des lichens (McCarthy & Zaniwski, 2001). Cette technique peut être utilisée pour examiner les patrons de colonisation des lichens et explorer de nouvelles approches pour la datation relative par lichénométrie.

Les études antérieures font l'objet du pourcentage maximum de couverture et de la moyenne du pourcentage de couverture par site. Un nombre varié de roches a été considéré pour cette évaluation : Birkeland (1973) estime le pourcentage de couverture de 50 roches tandis que Carrara & Andrews (1972) estime ce pourcentage selon 250 roches. Innes (1985a) ajoute ceci : « Percentage-cover estimates can provide a means of filling in unknown dates in a moraine sequence. If dates have been obtained by standard lichenometric or other techniques, it may be possible to obtain dates for the unknown surfaces by a combination of percentage-cover measurements and morphology ».

Locke & al. (1979) ont aussi effectué des analyses de pourcentage de couverture des lichens selon les variations du niveau de gris des surfaces à analyser. « Qualitative examination of airphoto imagery can, however, reveal large areas with a distinct light tone indicative of immature lichen cover. On central Baffin Island, examination of such areas in the field indicated that the former mature lichen cover had been killed under enlarged snowbanks during the Little Ice Age (100-300 yr BP) » (Locke & al., 1979). Cette procédure peut aussi être complétée à l'aide d'images satellitaires.

3.2.7 Variations écologiques du taux de croissance des lichens

De nombreuses observations ont indiqué que les taux de croissance des lichens est dépendant des conditions environnementales, de l'espèce et de la taille des thalles (Hill, 1981). Toutefois, la plupart des études se concentrent sur l'étude du taux annuel absolu de croissance des thalles d'une espèce et peu d'entre elles examinent le taux de croissance relatif à la taille des thalles. Hill (1981) discute aussi de différents critères environnementaux influençant les taux de croissance: (1) le cycle de mouillage et de séchage et (2) la photosynthèse, la respiration et la production de carbone.

Les variations des taux de croissance d'un lichen et de différentes espèces de lichens sont reliées à des facteurs biotiques et abiotiques. « The rate of lichen growth is a function not only of the species under consideration, but of the macro- and microenvironment as well. Rock type, abrasion by wind and water, aspect (including sunlight, wind, temperature, and moisture), stability of the substrate, and length of the growing season may affect the rate of lichen growth (Benedict, 1967) » (Locke & al., 1979). Ces variations doivent être prises en considération lorsque qu'une courbe de croissance est reliée à un substrat dont l'âge est inconnu et lorsqu'un échantillonnage s'effectue sur un substrat où une importante variation environnementale est présente.

Malheureusement, les études lichénométriques effectuées sont employées principalement comme indicateur sur des bases géomorphologiques et géographiques; peu d'études questionnent la théorie biologique de la lichénométrie. Il est difficile d'estimer la dynamique des populations de lichens et la taille des lichens en fonction de l'environnement. Des suivis à long terme devraient être complétés afin d'identifier les différentes cohortes d'une population étudiée. McCarthy (1999) indique que peu d'informations sont disponibles sur l'étendue de la tolérance, des conditions maximales de croissance ou de l'histoire de croissance de la plupart des espèces de lichens. Le microclimat à long terme et les données sur les populations pour les communautés de lichens sont rares. McCarthy (1999) contredit le modèle proposé par Farrar (1974), qui affirme que : « (1) Individual lichen cohorts can be recognised by thallus size; (2) Environmental and metabolic requirements do not change over time; (3) Lichen establishment can occur only on lichen-free surfaces ». Des concepts écologiques pour le choix de sites adéquats et excluant la compétition inter- et intra-spécifique peuvent être utilisés comme base pour le développement d'une interprétation biologique de la dynamique des populations de lichens.

Innes (1985a) discute des facteurs connus affectant la croissance des lichens. Toutefois, dans le but de connaître les effets d'une variable environnementale, les autres variables doivent être constantes. Cette situation est quasi impossible et il est important de noter que la réponse d'une variable pour un environnement particulier pourrait être distincte pour la réponse de cette même variable à l'intérieur d'un autre environnement. Les facteurs pris en considération par Innes (1984a, 1985a) sont les suivants : l'âge du substrat, la géologie du substrat, le micro-environnement (humidité, température, exposition à la lumière, exposition au vent, altitude, aspect, stabilité du substrat, pollution, couverture de la neige), les facteurs affectant la dynamique d'une population de lichen (colonisation, mortalité, compétition), l'espèce employée, l'aire d'échantillonnage et la présence de thalles âgés et anormaux. Jochimsen (1973) discute aussi des différents facteurs environnementaux affectant les populations de lichens : le type de substrat (composition chimique et la structure externe), le microclimat, la

radiation solaire, la température, la précipitation, l'assimilation et la respiration. La liste suivante décrit brièvement les facteurs affectant le taux de croissance des lichens :

- **Lithologie du substrat** : Les aspects du substrat affectant le plus la croissance des lichens sont la texture et la composition chimique. Benedict (1967) affirme que les roches ayant une texture grossière retiennent plus d'humidité. La plupart des espèces peuvent croître sur diverses textures (Innes, 1985a), sauf sur les roches riches en carbonate.
- **Disponibilité de l'humidité** : L'humidité disponible est directement reliée au processus de photosynthèse et au taux d'assimilation du carbone des lichens (Innes, 1985a). Le taux de croissance d'une espèce de lichen est affecté par les caractéristiques du lieu d'échantillonnage.
- **Température** : La photosynthèse représente un processus métabolique sensible à la température. Par exemple, les lichens des milieux arctiques et alpins sont soumis à de très basses températures, ce qui provoque un stress important dans leur croissance. Les sites d'échantillonnage situés dans des environnements glaciaires doivent prendre en considération la variation spatiale de la température.
- **Intensité de la lumière** : Les lichens des environnements alpins et arctiques sont sujets à des intensités lumineuses intenses. Les lichens s'adaptent à la luminosité avec l'épaisseur de leur cortex. Indirectement, le taux de croissance peut varier d'un environnement à l'autre selon les caractéristiques biochimiques des lichens et leurs relations avec la lumière (Innes, 1985a).
- **Altitude** : L'altitude a un effet sur le taux de croissance des lichens par l'intermédiaire d'autres facteurs comme la couverture de neige, les précipitations, la température et l'intensité de la lumière.
- **Topographie** : La topographie a un effet sur le taux de croissance par l'intermédiaire d'autres facteurs comme l'intensité de la lumière, l'exposition au vent, l'humidité, la couverture de la neige et la température. Premièrement, « [...], the general aspect of the land will influence air temperatures, wind exposure, the length of the snow-free season and other variables » (Innes, 1985a). Deuxièmement, « [...], aspect will also be important on a smaller scale. This is especially true of moraines where the proximal and distal sides may have very different microenvironments » (Innes, 1985a).
- **Stabilité du substrat** : Il existe une relation entre la stabilité d'un substrat et la taille des blocs de roche le composant. De plus, il existe une relation entre la taille des blocs et la taille des lichens les

colonisant. La lichénométrie devrait être évitée sur des substrats instables puisque les âges estimés à l'aide de cette technique seront sous-estimés.

- **Exposition au vent** : Le vent a un effet indirect sur la croissance des lichens. Plus précisément, ce facteur affecte la distribution de petites couvertures de neige ainsi que le taux d'évaporation sur les surfaces rocheuses.
- **Couverture de neige** : Différents auteurs démontrent qu'une longue durée de couverture de neige ralentit la croissance des lichens (Karlén, 1979; Reger & Péwé, 1969; Porter, 1981). Andrews & al. (1976) ont émis l'hypothèse qu'une couverture de neige persistante durant le Petit Âge Glaciaire a engendré une réduction de la colonisation des lichens ou freiné la croissance de ces derniers : « In the arctic-alpine areas, snowcover was more extensive during the Little Ice Age and it is likely that this represent a period of reduced growth or, in some cases, resulting in the apparent anomalies reported by Karlén (1979) and Porter (1981) » (Innes, 1985a). Ainsi, on devrait observer sur la courbe de croissance des lichens une diminution de la pente durant cette période de réduction de croissance.
- **Pollution** : La croissance des lichens est affectée par des polluants divers, tel le dioxyde de soufre (Innes, 1985a). Toutefois, peu d'informations existent concernant les effets des polluants sur les espèces *Rhizocarpon*.
- **Rôle de la végétation** : Dans certains environnements alpins, la croissance des lichens est restreinte par la végétation. De plus, ce phénomène peut se traduire par une diminution d'espace disponible pour les lichens ayant colonisés cet espace. « When this is the case, sample areas should be adjusted to take this into account otherwise bias may be introduced due to sample area variations. This is particularly true of moraine sequences, where there may be systematic variations in the amount of vascular vegetation » (Innes, 1985a).
- **Dynamique des populations** : La colonisation et les taux de natalité et de mortalité sont trois aspects très importants concernant la lichénométrie. Farrar (1974) affirme que la taille des thalles de lichens représente un bon indicateur de leur âge mais les études taille-fréquence représentent des analyses encore ambiguës puisque la taille la plus large des lichens ne représente pas nécessairement l'âge le plus vieux.

En résumé, les variables à noter dans le cadre d'une étude lichénométrique sont: (1) la localisation géographique, (2) la lithologie, (3) l'altitude, (4) la température et la précipitation moyenne annuelle. La position des sites d'échantillonnage sur la moraine représente un facteur primordial concernant les

variations environnementales des distributions (Innes, 1986b). Innes (1986b) et Haines-Young (1983) indiquent que la croissance des lichens est limitée sur les crêtes morainiques comparativement à la base des moraines. En deuxième lieu, les paramètres suivants doivent être pris en note durant la collecte des données et ce, pour chacun des sites d'échantillonnage : (1) l'espèce utilisée pour l'étude, (2) la mesure du diamètre maximum ou minimum, (3) le degré d'irrégularité du thalle accepté, (4) le patron d'échantillonnage, (5) la localisation des sites d'échantillonnage, (6) le degré d'erreur des mesures, (7) le nombre d'observateurs, (8) la nature du contrôle par datation, (9) la durée moyenne du couvert de neige, (10) l'exposition, (11) les sources potentielles de pollution et (12) la présence, l'amplitude et les types de végétation caractérisant les sites d'échantillonnage.

McCarthy (1999) affirme aussi qu'il existe un manque de connaissances écologiques pour la dynamique des populations de lichens (relation âge et taille des lichens) et qu'il est impossible d'identifier les cohortes à l'intérieur des communautés de lichens. « In addition, there is little information on the range of tolerance, optimum growing conditions or life histories of most lichen species and long-term microclimate and population data for naturally occurring lichen communities are rare or nonexistent » (McCarthy, 1999). Ce dernier propose un modèle pour interpréter les dynamiques des populations des lichens, basé sur des concepts écologiques. Les hypothèses suivantes sont employées pour construire ce modèle :

« (i) Propagules for colonisation are distributed randomly and in unchanging amounts through time; (ii) The likelihood of injury and mortality increases with age; (iii) Microclimate at the site is constant over the long-term; (iv) The substrate is not uniform, but various site attributes are randomly distributed and occupy the same amount of space on a stable substrate (e.g. all combinations of aspect, surface roughness, moisture availability, temperature regimes, etc., occupy equal spaces); (v) At any time, radial growth of a lichen may be limited by adjacent thalli or lack of space (i.e. overgrowth of thalli is not possible); (vi) Closure may be temporary, or due to a prolonged imbalance between recruitment and mortality closure might never occur; (vii) Larger thalli are expected in species which have low initial colonisation densities. » (McCarthy, 1999)

La **Figure 3.7** illustre le modèle « safe-site » pour la lichénométrie et examine la fréquence de la colonisation, la densité et la taille des thalles. La série A discute de la fréquence de colonisation. Cette série illustre une pluie de propagules résultant de l'établissement des lichens à l'intérieur d'une aire idéale. Avec le temps, des sites de moins bonne qualité seront aussi colonisés ce qui pourrait résulter à un établissement d'une population de lichens ayant soit une distribution statistiquement irrégulière ou soit une distribution statistiquement normale. La série B discute de la densité des populations. Avec le temps, la densité augmente pour les aires de qualité idéale. Cette situation peut

finale-ment se caractériser par une mortalité massive de nombreux thalles ou par l'établissement d'un équilibre dynamique (Temps B5). La série C discute de la taille des thalles. Au début de la colonisation, il est sous-entendu que les plus gros thalles colonisent les sites idéaux. Plus tard, les premiers colonisateurs seront remplacés par des espèces de succession tardive.

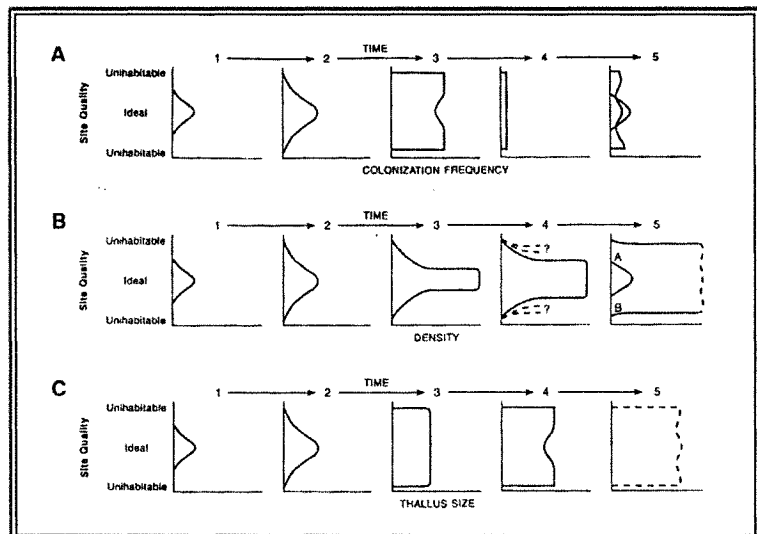


Figure 3.7: Modèle "safe-site" de la lichénométrie (McCarthy, 1999)

Bull & Brandon (1998) ont proposé une nouvelle approche statistique pour la lichénométrie, afin de construire une chronologie des chutes de blocs causées par des tremblements de terre en Nouvelle-Zélande. Ils ont mesuré le diamètre des thalles maximum trouvés sur plusieurs douzaines de roches incluses dans des dépôts historiquement datés. Des courbes de croissance sont ainsi produites en utilisant des graphiques probabilité de type Gaussienne; ceci permet d'identifier à l'intérieur des distributions taille-fréquence les pics d'âges spécifiques. Comme cette méthode se restreint à une petite section d'un substrat, elle permet de réduire les variations micro-environnementales. McCarthy (1999) indique que « Although their data show that a statistically normal distribution of largest thallus sizes may be closely approached in some cases, they have removed irregularities by statistically smoothing the data set using a Gaussian probability plot ».

3.2.8 Néoglaciation et lichénométrie – Terre de Baffin

La lichénométrie a été employée à l'intérieur de nombreuses recherches scientifiques sur la Terre de Baffin, plus précisément sur la côte est et la péninsule de Cumberland. Les premières études lichénométriques dans cette région ont eu lieu de 1961 à 1963 par la Branche canadienne géographique, le long de la marge nord de la calotte de Barnes. Sept espèces de lichens ont été étudiées et leur taux de croissance ont été basés sur un taux de retrait linéaire du glacier entre sa marge actuelle au premier emplacement où se trouve les premier thalles d'*Alectoria minuscula*. Le taux de croissance établi pour cette espèce a été de 0.4 mm par an. Les points de contrôle utilisés pour déterminer ce taux ont été déterminés par l'analyse de la position du front glaciaire à partir d'images aériennes.

Andrews & Webber (1969) ont par la suite approfondi les résultats publiés en 1964 en effectuant des mesures directes de la croissance d'*Alectoria minuscula* sur une période de 4 saisons de croissance. Une chronologie des fluctuations glaciaires des vallées adjacentes à la calotte de Barnes a été établie à partir des marges glaciaires pour la période de temps de 1650 à 1969. Les isohypses ont permis d'établir les tendances de la perte du volume de glace en tenant compte des différences de l'histoire de la déglaciation. Andrews & Barnett (1979) ont par la suite affirmé que les marges ouest et sud de la calotte de Barnes possèdent une courbe de croissance des lichens similaire à celle du sud de l'île de la Terre de Baffin.

Carrara & Andrews (1972) ont aussi employé la lichénométrie pour définir la chronologie des dépôts néoglaciers des glaciers Akudlermuit et Boas, situés aux débuts des fjords Quajon et Narpaing sur l'île de Baffin. Les thalles maximums de l'espèce *Rhizocarpon geographicum* et le pourcentage de couverture des lichens ont été employés pour établir une courbe de croissance. Cette courbe a été basée sur l'âge de trois moraines. La chronologie initiale a été effectuée à l'aide de la lichénométrie tandis que la chronologie de plus de 6000 ans BP des moraines a été interprétée par le taux d'érosion des blocs et des cailloux.

L'étude de l'histoire du Quaternaire pour la partie nord de la péninsule de Cumberland par l'établissement d'une courbe de croissance préliminaire de *Rhizocarpon geographicum* a été effectuée par Miller & Andrews (1972). Cette courbe de croissance basée sur le diamètre des thalles maximums de *R. geographicum* et l'âge des surfaces où se situent ces individus a été à la base des études chronologiques de l'Est de l'arctique. Cette courbe de croissance est basée sur (1) des surfaces datées historiquement; (2) des mesures directes de la croissance d'*Alectoria minuscula*; (3) des taux interspécifiques entre *A. minuscula* et *R. geographicum*; et (4) des surfaces associées à des lichens où l'âge a été déterminé par des dates radiocarbone. Miller & Andrews (1972) définissent alors différents taux de croissance pour *R. geographicum* : il y a d'abord un taux de croissance initial exponentiel de 0.15 mm par an puis il y a un taux linéaire de 0.03 mm par an et ce, après 250 à 300 ans de colonisation. La courbe de croissance pour *R. geographicum* a été extrapolée jusqu'à 9500 ans BP. Les lichens de cet âge ont un diamètre de 280 mm.

Miller (1973a) a ajouté deux points de contrôle à la courbe de croissance de Miller & Andrews (1972). A partir de la courbe, il définit une chronologie néoglacière pour la partie Nord de la péninsule de Cumberland. Plus précisément, 46 glaciers furent étudiés et les moraines néoglacières les plus âgées ont été datées de 3200 ans. Miller (1973b) a aussi effectué des mesures directes des thalles d'*A. minuscula* permettant la construction d'une courbe de croissance préliminaire pour l'Est

de la Terre de Baffin. La photogrammétrie a été employée comme méthode d'acquisition de l'aire des thalles, dont la précision est de ± 0.5 mm. Le taux de croissance sigmoïde d'*A. minuscula* a été évalué entre 0.6 à 1 mm par an. Miller (1973b) affirme que le taux de croissance de ce lichen diminue avec l'altitude, tirant comme conclusion qu'il serait primordial

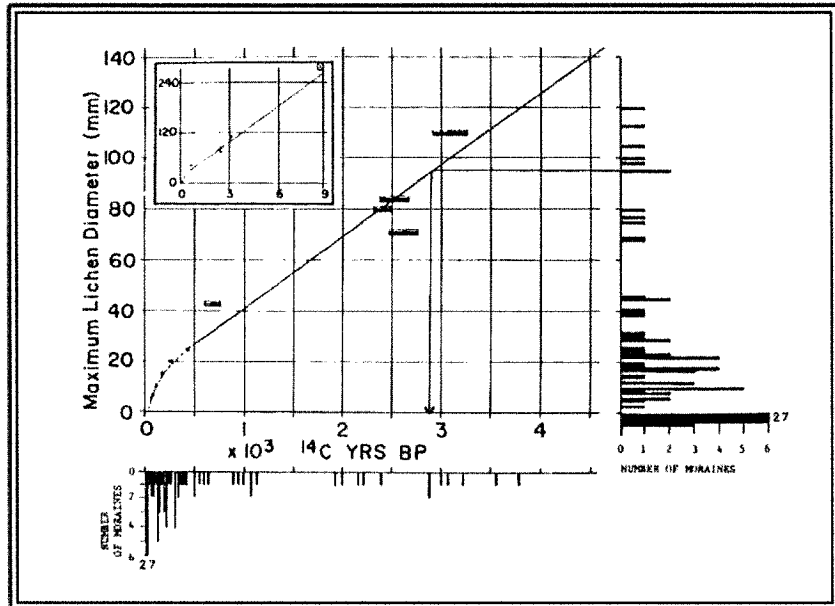


Figure 3.8: Courbe de croissance pour *R. geographicum* (Davis, 1980)

d'établir des stations de contrôle sur les surfaces à étudier.

Deux études lichénométriques ont été faites dans la région du parc national d'Auyuittuq. La première est celle de Davis (1980). Cet auteur a étudié la chronologie de 85 moraines de 27 glaciers distribués dans trois aires d'étude sur la partie sud de la péninsule de Cumberland. Dans sa recherche, Davis (1980) a utilisé *R. geographicum*. Il a créé une courbe de croissance (Figure 3.8) en ajoutant des points de contrôle à ceux de Miller & Andrews (1972). Des cartes ont été établies pour illustrer les chronologies de déposition des surfaces pour chacun des glaciers étudiés.

La deuxième étude lichénométrique dans le parc national d'Auyuittuq est celle de Graham (1997). Cet auteur a étudié 4 glaciers. Les moyennes des cinq diamètres des thalles maximums de *R. geographicum* et d'*Alectoria minuscula* ont été calculées. Graham (1997) se réfère à la courbe de croissance des lichens construite par Davis (1980). De plus, il effectue des analyses visuelles du pourcentage de couverture des lichens. Il identifie plusieurs périodes de stabilisation des moraines dans la passe d'Akshayuk, compatibles avec celles de Davis (1980): soit 2200 ± 550 , 900 ± 230 , 410 ± 120 et entre 260 ± 80 et 120 ± 35 ans BP.

En dehors des limites du parc, Andrews & al. (1976), Locke & Locke (1977) et Williams (1978) ont examiné les vastes aires de l'Est de l'arctique canadien caractérisées d'un gris pâle sur des photographies aériennes en noir et blanc et à l'aide des scènes du satellite LANDSAT-1. Des études sur le terrain démontrèrent que les aires pâles représentent des surfaces caractérisées par très peu de

lichens et de plantes arbustives, contrairement aux zones foncées reliées à des surfaces colonisées par des populations de lichens matures. Ces zones ont été définies comme étant des surfaces recouvertes par des champs de neige permanents. Des âges au radiocarbone et des études lichénométriques déterminèrent que ces zones sans lichens ont été recouvertes de neige entre 500 et 300 ans BP et que la fonte de cette neige débuta il y a entre 300 et 70 ans BP. Locke & Locke (1977) affirment que durant le Petit Âge Glaciaire, la glace et les lacs couvraient 35 % plus de surface qu'au XX^{ième} siècle.

3.3 CONCLUSION

La revue de littérature permet de tirer les conclusions suivantes concernant la lichénométrie :

- La sélection et l'identification de l'espèce représentent des points importants. Il faut s'assurer de bien étudier la même espèce;
- Les techniques de mesures (diamètre du thalle et superficie de l'aire d'échantillonnage) doivent demeurer les mêmes pour pouvoir établir des comparaisons;
- Les analyses statistiques doivent être approfondies pour pouvoir caractériser les thalles dont le diamètre va être utilisé pour connaître l'âge du substrat;
- L'âge des lichens est déterminé à partir d'une courbe de croissance qui présente généralement trois étapes de croissance, dépendamment de la taille et de l'âge des thalles de lichens;
- Des éléments environnementaux affectent la croissance et la dynamique des populations des lichens. Ces éléments doivent être considérés lorsque l'âge d'un substrat est estimé à partir d'une étude lichénométrique.

4 MÉTHODOLOGIE

Une analyse des fluctuations actuelles des fronts glaciaires (XX^{ième} siècle) a été réalisée sur cinq glaciers dans le sud de la Passe d'Akshayuk. Il s'agit des glaciers Tête de Cirques (2), Glacier 12 (3), Windy Lake (4), Niflheim (5) et Glacier 20A (6). L'analyse a été faite à l'aide de photographies aériennes et obliques et d'images satellitaires. Les numéros associés aux noms des glaciers se trouvent indiqués à la **Figure 4.1** et leurs caractéristiques sont énumérées au **Tableau 4.1**. Deux saisons de terrain ont été conduites. En juillet 2002 et en juillet-août 2003, des études lichénométriques ont été faites pour déterminer les fluctuations modernes des fronts glaciaires de cette région. Les glaciers étudiés sont, du sud au nord, Turnweather (1), Tête de Cirques (2), Glacier 12 (3), Windy Lake (4), Niflheim (5), Glacier 20A (6) et Sivingavuk (7). Le choix de ces glaciers a été basé sur l'accessibilité des sites morainiques. Le choix a aussi été influencé par la distribution des glaciers et leurs caractéristiques environnementales, ainsi que par les études antérieures dans la région de la Passe d'Akshayuk.

Au total, 38 sites d'échantillonnage de populations de *Rhizocarpon geographicum* ont été analysés. Ces sites sont situés sur les 7 complexes morainiques des glaciers mentionnés ci-dessus. Ils sont répartis sur 12 moraines frontales et latérales. Il est important de prendre en considération que ce n'est pas la surface entière des moraines des 7 complexes morainiques qui a été analysée. Le **Tableau 4.2** regroupe les caractéristiques des sites d'échantillonnage 2002-2003, incluant l'aire des sites et leurs coordonnées géographiques. La **Figure 4.2** illustre quatre emplacements de sites d'échantillonnage et la localisation des sites d'échantillonnage est illustrée par la **Figure 4.1**. Les **Figures 4.3** et **4.4** montrent les glaciers étudiés.

4.1 FLUCTUATIONS ACTUELLES

La fluctuation de la position des fronts glaciaires a été analysée à l'aide des photographies aériennes, des images satellitaires et des photographies historiques. Les photographies aériennes employées afin d'établir une chronologie des fluctuations de chacun des glaciers étudiés sont les suivantes : T213C-210,214 (1948), A16984-163,165 (1960), A24200-148,150 (1975), A31157-19,30,36 (1977) (**Tableau 4.3**). De plus, les trois scènes satellitaires indiquées dans le **Tableau 4.4** ont été nécessaires pour compléter la chronologie actuelle des fronts des glaciers.

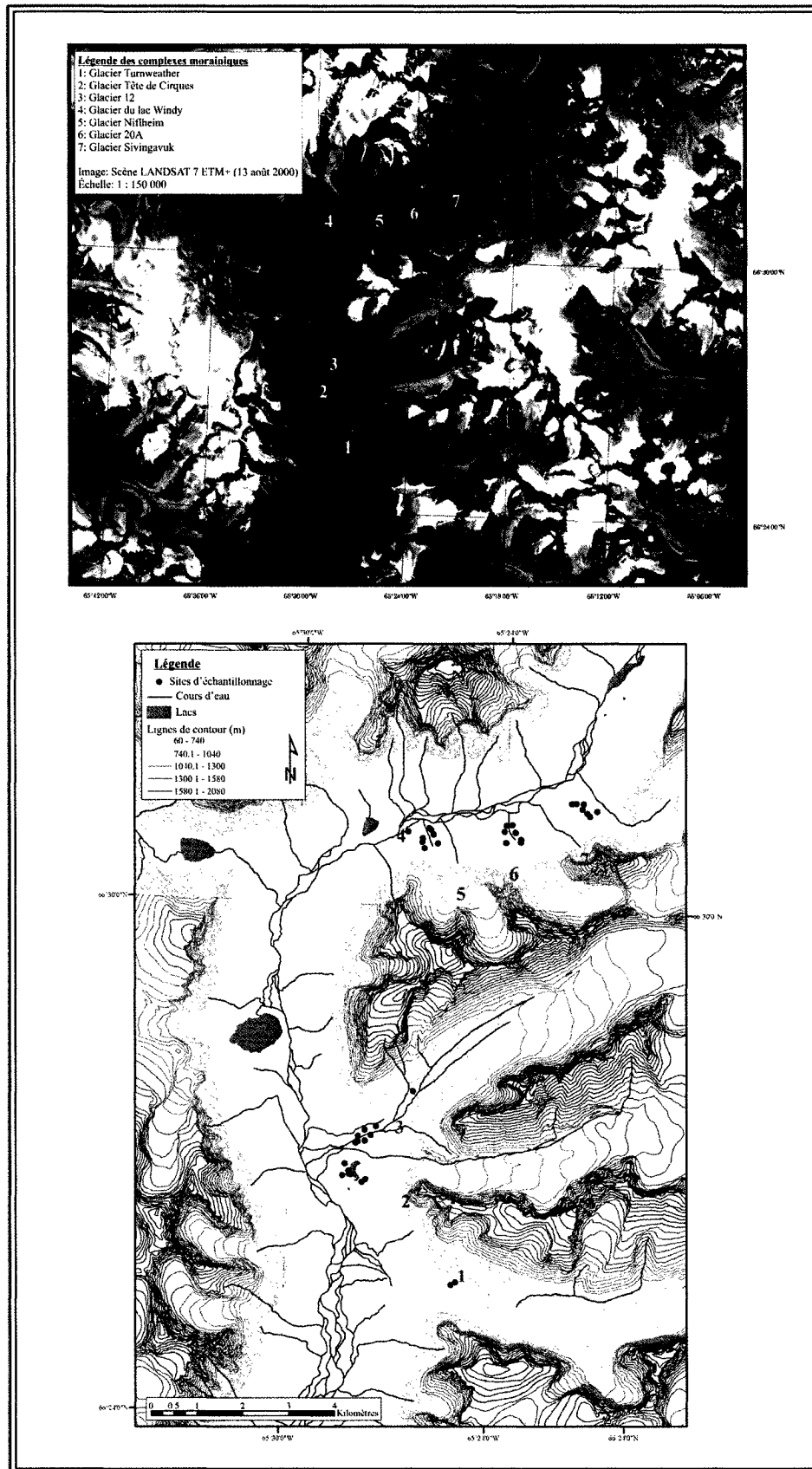


Figure 4.1: Localisation des glaciers étudiés et des sites d'échantillonnage 2002-2003 dans la Passe d'Akshayuk

Tableau 4.1 : Localisation et aire des glaciers étudiés en 2002-2003

| Glacier | Coordonnées géographiques (NAD83) Latitude | Coordonnées géographiques (NAD83) Longitude | Aire (km ²) |
|-----------------|--|---|-------------------------|
| Turnweather | 66°25'12"N | 65°23'14"W | 13 |
| Tête de Cirques | 66°27'1"N | 65°26'56"W | 9.9 |
| Glacier 12 | 66°28'3"N | 65°25'33"W | 8.9 |
| Windy Lake | 66°31'29"N | 65°28'42"W | 6.8 |
| Niflheim | 66°30'30"N | 65°25'56"W | 2.2 |
| Glacier 20A | 66°30'35"N | 65°23'34"W | 1.6 |
| Sivingavuk | 66°30'52"N | 65°20'22"W | 1.1 |

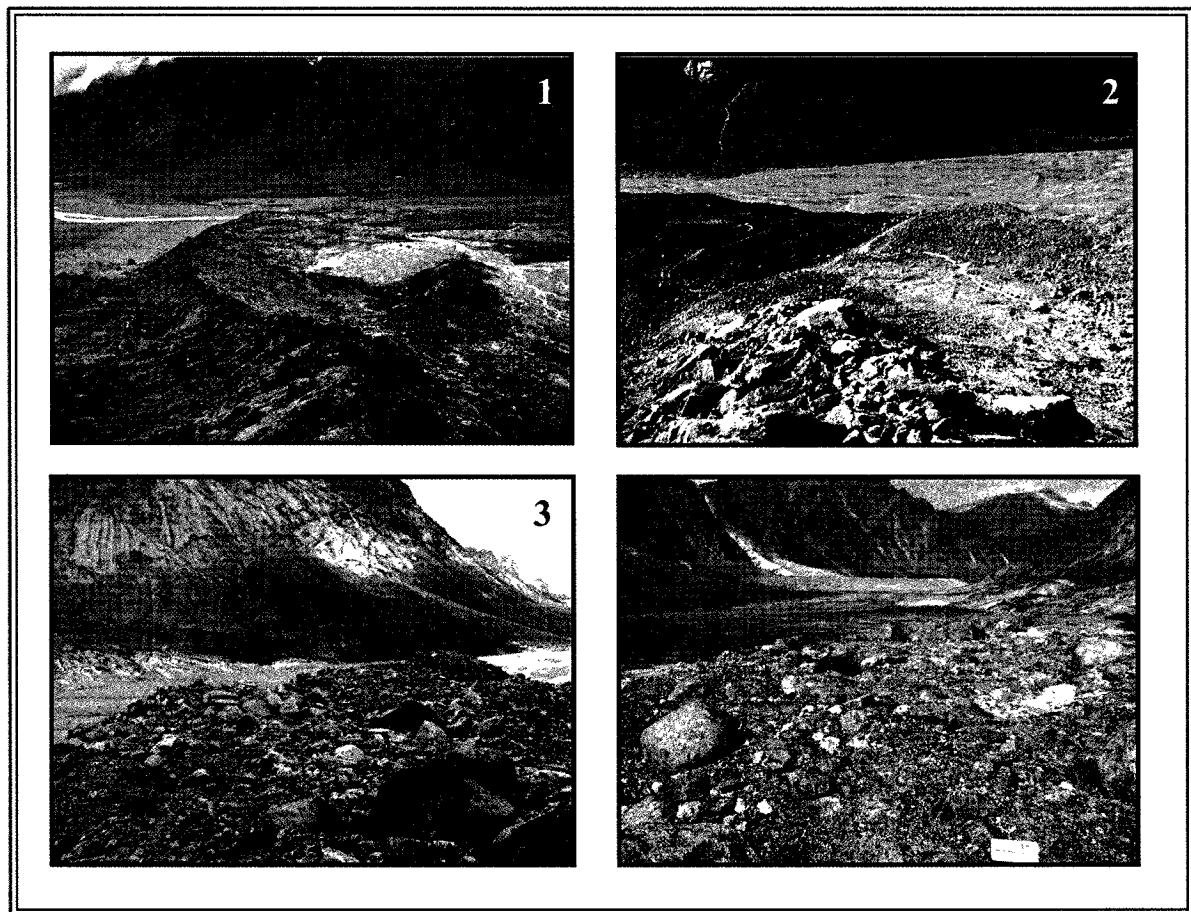


Figure 4.2: (1) Moraine latérale et interne (Sites 1A03 et 1B02) du complexe morainique du glacier Tête de Cirques; (2) Moraine latérale du complexe du Glacier 12; (3) Moraine latérale du complexe du Glacier 20A (4C03); Moraine frontale du complexe Tête de Cirques (Site 1C03)

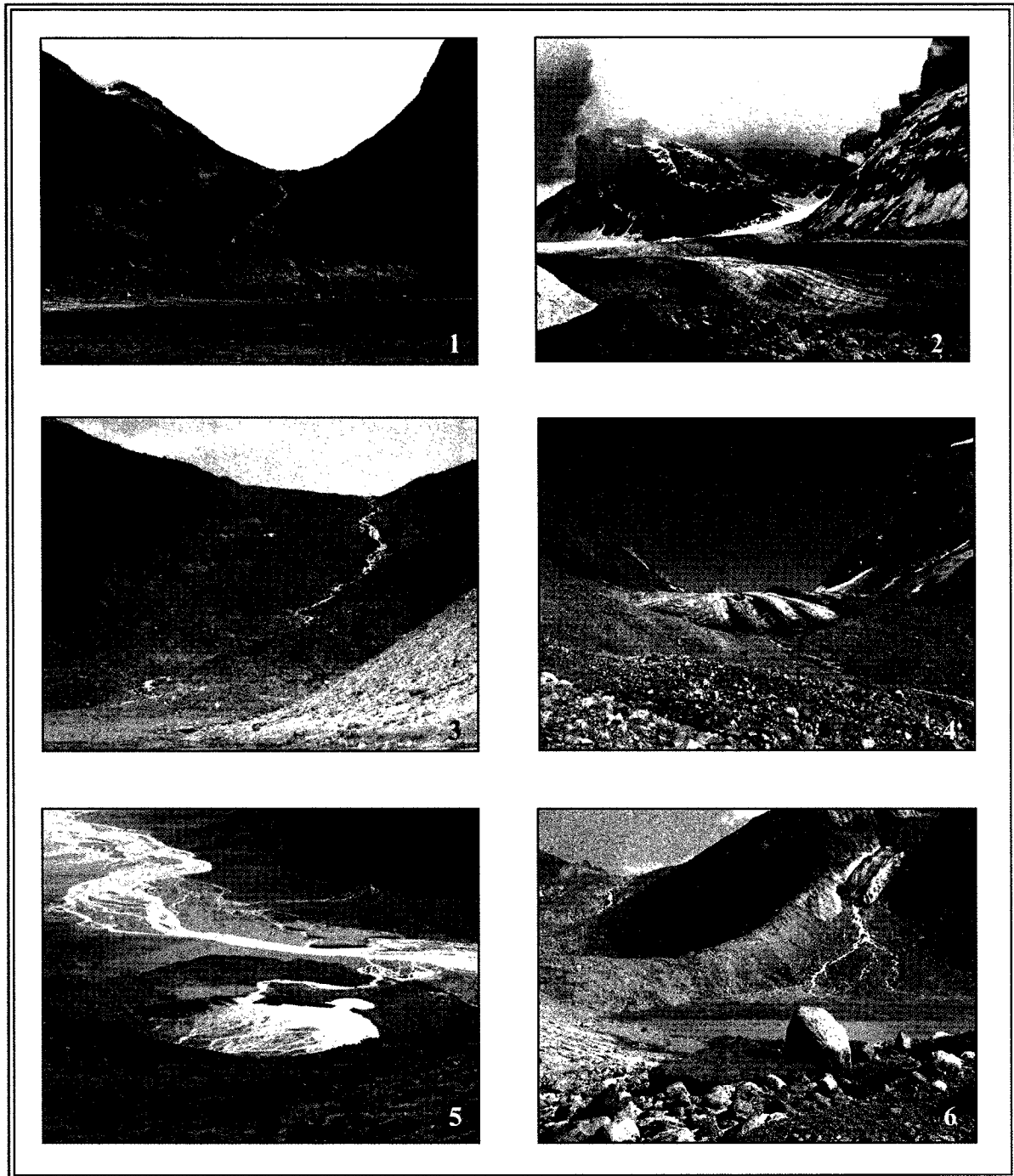


Figure 4.3: Complexe morainique du glacier Turnweather (1); Glacier Turnweather (2); Complexe morainique du Glacier 12 (3); Glacier 12 (4); Complexe morainique du glacier Tête de Cirques (5); Glacier Tête de Cirques

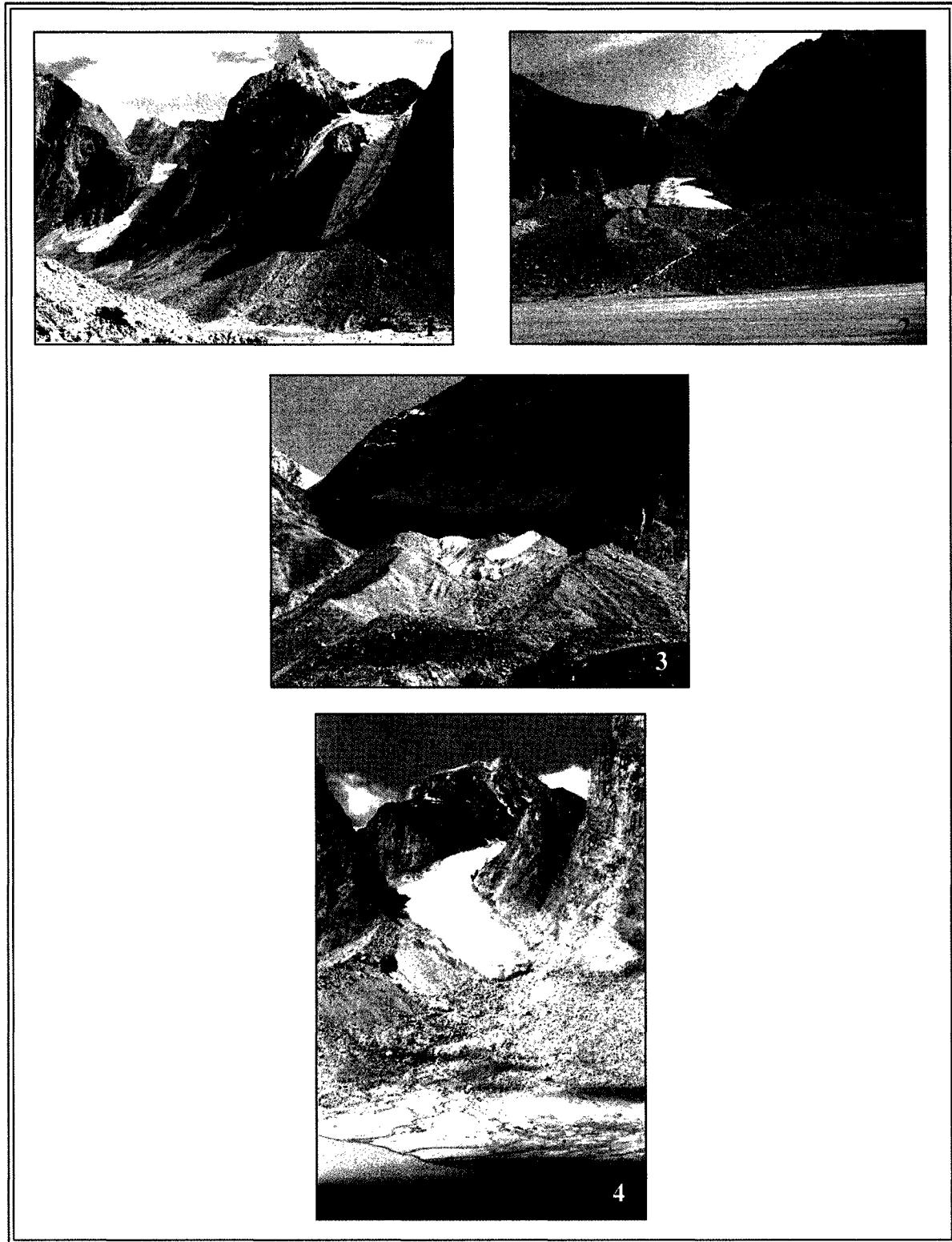


Figure 4.4: Complexe morainique du glacier Niflheim (1-à droite) et Glacier 20A (1-à gauche); Complexe morainique du Glacier 20A (2); Complexe morainique du glacier Sivingavuk (3); Glacier Windy Lake (4)

Tableau 4.2: Caractéristiques des sites d'échantillonnage 2002-2003 de la section sud de la Passe d'Akshayuk, Parc national d'Auyuittuq (Nunavut)

| Site | Glacier | Coordonnées géographiques Latitude, Longitude (NAD 83) | Aire des sites (m ²) | Altitude (m) |
|------|-----------------|---|----------------------------------|--------------|
| 1A02 | Tête de Cirques | 66°26'51"N, 65°28'10"W | 200 | 80 |
| 1B02 | Tête de Cirques | 66°26'46"N, 65°27'50"W | 1600 | 74 |
| 1A03 | Tête de Cirques | 66°26'48"N, 65°27'43"W | 100 | 81 |
| 1B03 | Tête de Cirques | 66°26'54"N, 65°28'13"W | 100 | 77 |
| 1C03 | Tête de Cirques | 66°26'50"N, 65°28'24"W | 100 | 80 |
| 1D03 | Tête de Cirques | 66°26'58"N, 65°28'20"W | 100 | 83 |
| 2A03 | Turnweather | 66°25'38"N, 65°24'58"W | 100 | 476 |
| 2B03 | Turnweather | 66°25'36"N, 65°25'06"W | 100 | 445 |
| 3A02 | Windy Lake | 66°31'23"N, 65°28'19"W | 400 | 295 |
| 3B02 | Windy Lake | 66°31'22"N, 65°28'17"W | 200 | 282 |
| 3A03 | Niflheim | 66°30'53"N, 65°26'13"W | 100 | 134 |
| 3B03 | Niflheim | 66°30'52"N, 65°26'10"W | 100 | 142 |
| 3C03 | Niflheim | 66°30'49"N, 65°26'06"W | 100 | 178 |
| 3D03 | Niflheim | 66°30'43"N, 65°25'57"W | 100 | 289 |
| 4A02 | Niflheim | 66°30'51"N, 65°26'51"W | 200 | 152 |
| 4B02 | Niflheim | 66°33'49"N, 65°25'19"W | 100 | 187 |
| 4C02 | Niflheim | 66°30'44"N, 65°26'24"W | 100 | 228 |
| 4D02 | Niflheim | 66°30'39"N, 65°26'20"W | 100 | 300 |
| 4A03 | Glacier 20 | 66°30'57"N, 65°23'58"W | 100 | 173 |
| 4B03 | Glacier 20 | 66°30'45"N, 65°23'58"W | 100 | 280 |
| 4C03 | Glacier 20 | 66°30'53"N, 65°24'01"W | 100 | 197 |
| 5A02 | Glacier 20 | 66°30'57"N, 65°23'48"W | 225 | 177 |
| 5B02 | Glacier 20 | 66°30'52"N, 65°23'42"W | 225 | 229 |
| 5C02 | Glacier 20 | 66°30'48"N, 65°23'32"W | 25 | 312 |
| 5A03 | Sivingavuk | 66°31'10"N, 65°21'48"W | 100 | 294 |
| 5B03 | Sivingavuk | 66°31'06"N, 65°21'34"W | 25 | 367 |
| 5C03 | Sivingavuk | 66°31'07"N, 65°21'39"W | 25 | 336 |
| 6A02 | Sivingavuk | 66°31'14"N, 65°22'06"W | 100 | 289 |
| 6B02 | Sivingavuk | 66°31'14"N, 65°21'58"W | 100 | 314 |
| 6C02 | Sivingavuk | 66°31'14"N, 65°21'46"W | 100 | 394 |
| 6A03 | Glacier 12 | 66°27'50"N, 65°26'25"W | 100 | 620 |
| 6B03 | Glacier 12 | 66°27'25"N, 65°27'28"W | 100 | 275 |
| 6C03 | Glacier 12 | 66°27'22"N, 65°27'48"W | 100 | 200 |
| 6D03 | Glacier 12 | 66°27'18"N, 65°27'59"W | 100 | 122 |
| 7A02 | Glacier 12 | 66°27'13"N, 65°28'03"W | 625 | 95 |
| 7B02 | Glacier 12 | 66°27'14"N, 65°26'25"W | 625 | 115 |
| 7C02 | Glacier 12 | 66°27'15"N, 65°27'46"W | 625 | 161 |
| 7D02 | Glacier 12 | 66°27'19"N, 65°27'37"W | 100 | 196 |

Tableau 4.3: Photographies aériennes disponibles pour les sites d'étude de la Passe d'Akshayuk

| Série des photographies aériennes | Numéro des photographies | Date | Échelle des images |
|-----------------------------------|----------------------------------|--------------------|--------------------|
| T213C | 209 à 217 (Ligne 58 S, 172-242) | 4 juillet 1948 | 1 : 40 000 |
| T213L | 205 à 217 (Ligne 58 S, 172-242) | 4 juillet 1948 | 1 : 40 000 |
| A16221 (Noir et blanc) | 165 (Ligne 15 SE, 91-182) | 12 juin 1958 | 1 : 60 000 |
| A16223 (Noir et blanc) | 6 à 9 (Ligne 16 NO, 1-83) | 12 juin 1958 | 1 : 60 000 |
| A16817 (Noir et blanc) | 28 à 29 (Ligne 16 N, 1-35) | 6 septembre 1959 | 1 : 60 000 |
| A16984 (Noir et blanc) | 162 à 165 (Ligne 15A-S, 125-165) | 24 août 1960 | 1 : 60 000 |
| A24200 (Infrarouge) | 150 à 152 (1-63) | 23 au 29 août 1975 | 1 : 43 000 |
| A30967 (Infrarouge) | 1 à 63 (1-97) | 28 juillet 1974 | 1 : 22 466 |
| A31157 (Infrarouge) | 14 à 23; 28 à 36 (1-36) | 23 juillet 1977 | 1 : 26 000 |

Source : Photothèque nationale de l'air, Ressources naturelles Canada.

Tableau 4.4: Images satellitaires employées pour la caractérisation et la cartographie des sites échantillonnés

| Satellites | LANDSAT 7 | IKONOS |
|------------------------------------|--|--|
| Capteurs | ETM + | IKONOS |
| Dates d'acquisition | 13 août 2000 | 13 & 31 juillet 2003 |
| Projection cartographique et datum | UTM ZONE 20, NAD 83 | UTM ZONE 20, NAD 83 |
| Identification médiatique | 017013_0100_000813_L7 | N/A |
| Distributeur des scènes satellites | Centre canadien d'information topographique (Sherbrooke), Géobase (www.geobase.ca) | Parcs Canada, Branche de l'intégrité écologique (Gatineau) |
| Canaux | 1, 2, 3, 4, 5, 6L, 6H, 7, 8 | 1, 2, 3, 4 et panchromatique |
| Résolution spatiale | 30 m (multispectral) et 15 m (panchromatique) | 4 m (multispectral) et 1 m (panchromatique) |

Il est important de noter que la résolution spatiale pour la scène du capteur ETM+ de LANDSAT 7 est de 30 m pour les bandes spectrales 1, 2, 3, 4, 5, 6L et 6H; la résolution spatiale pour les bandes panchromatiques est de 15 m. En ce qui concerne le satellite IKONOS, la résolution spatiale pour ces scènes est de 4 m pour les bandes spectrales 1, 2, 3 et 4 et de 1 m pour le panchromatique. Afin d'augmenter la précision de la cartographie de la chronologie des fronts glaciaires, les bandes panchromatiques des capteurs ETM+ et IKONOS ont été employées.

Les photographies aériennes ont été balayées électroniquement. Ensuite, pour relier les photographies aériennes avec les images satellitaires, ces photographies ont été corrigées géométriquement à l'aide du système d'informations géographiques ArcMap 8.3 ESRI et ce, à partir des deux scènes IKONOS à haute résolution spatiale. Les fronts des glaciers ont été identifiés et tracés sur l'image créée. Le document cartographique final permet d'observer la variation de la localisation des fronts glaciaires

pour la période de couverture des photographies aériennes et des images satellitaires ce qui permet aussi de calculer des taux de retrait. La méthode de calcul des taux de retrait a été basée sur la triangulation de la théorie de Pythagore où $R = \sqrt{(x^2 + y^2)}$: R représente la distance entre les fronts, x équivaut à la distance horizontale entre deux fronts et y équivaut à la différence d'altitude des positions de deux fronts.

En plus des photographies aériennes et des images satellitaires, des photographies historiques sont disponibles pour cette région d'étude. Dans le but d'effectuer une vérification de la chronologie de la fluctuation des fronts glaciaires, ces photographies historiques ont été employées. Deux sources importantes doivent être mentionnées. Tout d'abord, la thèse de doctorat de Thompson (1954) comporte des photographies de la Passe d'Akshayuk. Cette thèse non publiée décrit les aspects géomorphologiques de cette Passe, entre le fiord Pangnirtung Sud et le fiord Pangnirtung Nord. Elle contient de nombreuses photographies aériennes mentionnées ci-dessous, en plus de photographies prises sur le terrain. Ces dernières caractérisent la géographie physique; des photographies illustrent les glaciers et les complexes morainiques entre 1950 et 1953. Un autre document comportant des photographies historiques a été publié par Parcs Canada. Cet inventaire biophysique, réalisé par Blouin & al. (1975), illustre les différents écosystèmes et les différents types de végétation dans la Passe d'Akshayuk. Comme les écosystèmes sont influencés par la glace, l'eau et les différents environnements géologiques, quelques milieux glaciaires sont décrits et illustrés. Des photographies prises au début des années soixante-dix montrent ces glaciers et complexes morainiques.

4.2 FLUCTUATIONS MODERNES

4.2.1 Échantillonnage sur le terrain

La technique lichénométrique d'échantillonnage utilisée pour l'étude des fronts morainiques est celle de la distribution taille-fréquence. L'aire d'échantillonnage retenue a été de 100 m² pour la plupart des sites. Des sites distincts ont cependant été échantillonnés selon des aires variées de 200 m², 225 m², 400 m² et 1600 m². L'orientation, l'altitude, les coordonnées géographiques sont des paramètres qui ont été observés et notés pour chacun des sites d'échantillonnage. La lithologie des roches a été sensiblement la même pour tous les sites d'échantillonnage, ce qui a permis d'assurer une homogénéité du substrat des lichens analysés.

Un minimum d'un site a été analysé par substrat lequel représentait une moraine interne ou une moraine latérale ou encore une moraine frontale. Lorsque les moraines possédaient une grande

superficielle et qu'elles étaient stables, plus d'un site d'échantillonnage a été considéré. Lorsque les moraines étaient stables et possédaient une superficie moindre, un seul site d'échantillonnage était suffisant pour caractériser l'âge du substrat. Les coordonnées géographiques ont été notées à l'aide d'un système de positionnement global. La précision de la localisation des sites d'échantillonnage a varié entre 6 et 15 m.

Tous les lichens ont été mesurés à l'intérieur des aires d'échantillonnage. Entre 300 thalles et 1000 thalles ont été mesurés. Le diamètre le plus grand, c'est-à-dire l'axe le plus long d'un thalle, a été noté à l'aide d'un pied de coulisse digital (précision de 0.1 mm). La seule espèce de lichen prise en considération lors de l'étude des populations a été l'espèce *Rhizocarpon geographicum* spp.

Il est important de mentionner que Davis (1980) et Graham (1997) ont effectué des études lichénométriques en ne considérant que les diamètres maximaux des thalles de lichens. Ils ont étudiés cinq (5) complexes morainiques dans les fronts des glaciers Turnweather, Tête de Cirques, Crater Lake, Nerutusôq et Caribou. Deux des 5 complexes morainiques analysés par Davis (1980) et Graham (1997) ont été ré-échantillonnés selon la méthode d'analyse de la distribution taille-fréquence dans le but d'effectuer des comparaisons statistiques entre les deux techniques lichénométriques.

Dans le but d'effectuer des mesures du pourcentage de couverture des lichens de façon objective, la technique digitale développée par McCarthy & Zaniewski (2001) a été employée pour chacune des aires d'échantillonnage lichénométriques. À l'intérieur du périmètre d'échantillonnage, un minimum de 15 roches ont été photographiées à l'aide d'une caméra digitale. Une résolution de 1042 par 832 pixels a été sélectionnée; la compression des images sur la carte mémoire a été justifiée à « normale » et selon le mode « flash automatique » pour ne pas réduire la qualité des images prises.

Le choix des roches à photographier s'est effectué le long d'un trajet transversal à l'intérieur du périmètre d'échantillonnage. L'orientation des sites d'échantillonnage a été prise en considération pour l'analyse du pourcentage de couverture de lichens. De plus, tous les lichens ont été pris en considération pour l'analyse du pourcentage de couverture. Les principaux lichens ayant fait l'objet de l'analyse sont les suivants : *Alectoria minuscula*, *Rhizocarpon geographicum* spp. et *Xanthoria elegans*.

4.3 FLUCTUATIONS MODERNES – ANALYSES STATISTIQUES DES LICHENS

Une vérification des données a tout d'abord été effectuée par l'entremise de graphiques « nuage de points » puis cette vérification a été complétée par une analyse des paramètres statistiques de base telle que la moyenne, le minimum, le maximum et l'écart-type. Cette vérification a permis de corriger les erreurs d'entrée de données et de prendre connaissance rapidement du statut des échantillons de populations de lichens sur les substrats étudiés.

4.3.1 Analyses digitales et statistiques du pourcentage de couverture des lichens

L'analyse digitale en laboratoire consiste à distinguer les lichens de la surface nue de la roche (Figure 4.5) au moyen du programme Adobe Photoshop Elements 2.1. La méthode décrite ci-dessous est détaillée selon les techniques développées par McCarthy & Zaniewski (2001).

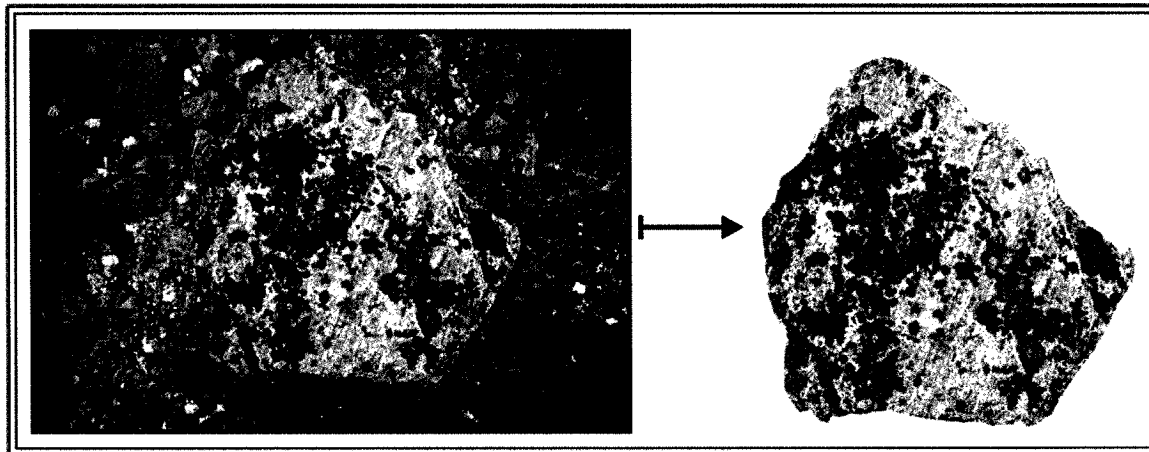


Figure 4.5: Analyse digitale du pourcentage de couverture des lichens (couverture de 55.47 %)

Le nombre de pixels qui composent la surface de la roche analysée est en premier lieu déterminé et ce, en utilisant l'outil « Marquee » pour déterminer l'aire de la surface. En deuxième lieu, le centre d'un thalle d'un lichen est sélectionné selon une tolérance de 5, 10 ou 15 à l'aide de l'outil « Magic Wand ». La tolérance est décrite comme étant la variance du niveau de gris originalement sélectionné par l'outil « Marquee ». Si la couleur des lichens se distingue grandement de la couleur de la roche, une tolérance plus élevée est acceptable. Si la couleur des lichens est similaire à la couleur de la roche ou que des minéraux présents dans la roche possèdent une pigmentation similaire aux lichens, une plus petite tolérance doit être prise en considération. De plus, la tolérance doit être ajustée à la variation des couleurs des lichens.

En troisième lieu, la fonction « Similar » permet de sélectionner les pixels de couleurs similaires situés en bordure de la sélection initiale. En quatrième lieu, la fonction « Grow » permet d'appliquer la sélection précédente à l'image entière et ce, selon la tolérance choisie. Finalement, le nombre de pixels total est connu en affichant l'histogramme pour les pixels sélectionnés et le calcul du pourcentage de couverture est par la suite effectué à l'aide d'un tableur.

Le choix des pixels selon leur couleur est influencé par la localisation de la sélection initiale des pixels de l'outil « Magic Wand ». Pour diminuer cette marge d'erreur du calcul du pourcentage de couverture des lichens, chacune des images est analysée cinq fois en choisissant un emplacement distinct de l'outil de sélection (McCarthy & Zaniewski, 2001).

Pour établir le pourcentage de couverture des lichens, la moyenne des cinq analyses du nombre de pixels représentant des lichens sur une même roche est calculée. Ensuite, plusieurs roches, de chacun des sites d'échantillonnage lichénométriques (en général 15 à 20 roches), ont été analysées à l'aide de cette technique. Une moyenne globale par site d'échantillonnage a été obtenue à partir de la moyenne du pourcentage de couverture de lichen sur chacune des roches analysées.

4.3.2 Histogrammes de fréquences

La vérification des types de distribution des échantillons de lichens a été la première analyse statistique à être effectuée. Deux conditions sont nécessaires pour l'analyse de la forme des distributions des échantillons mesurés. Premièrement, un minimum de 100 thalles doit être mesuré pour que ces valeurs soient représentatives de la population du substrat étudié (Farrar, 1974). Deuxièmement, le substrat étudié doit posséder un environnement uniforme, c'est-à-dire un microclimat homogène en ce qui concerne l'ombrage, l'exposition, l'orientation et ainsi de suite (Farrar, 1974). Si les deux critères précédents sont respectés pour tous les sites d'échantillonnage, il est possible d'analyser visuellement la forme des histogrammes et d'être informé de l'âge des lichens sur une surface (Farrar, 1974). Chacun des histogrammes est caractérisé par un intervalle fixe de 1 mm sur l'axe des abscisses.

4.3.3 Tests paramétriques

Les tests paramétriques impliquent que les variables soient normalement distribuées. Afin de vérifier si les distributions des échantillons des populations de lichens sont normalement distribuées,

des graphiques probabilité-probabilité ont été créés. De plus, une analyse du test de Kolmogorov-Smirnov a été effectuée.

Lorsque la variable quantitative X n'est pas distribuée normalement et que des tests paramétriques veulent être réalisés sur cette variable quantitative, deux situations se posent : (1) les données brutes asymétriques sont employées telles quelles ou (2) les données brutes asymétriques sont transformées pour obtenir un échantillon symétrique.

Lorsque la variable ne s'éloigne pas considérablement de la normalité, les tests paramétriques peuvent être appliqués. « Cette robustesse est liée au théorème de la limite centrale qui établit que si la VA X n'est pas distribuée normalement, sa moyenne X_N sur des échantillons aléatoires de taille N tend, quand N augmente, vers une distribution normale. La convergence est d'autant plus rapide que la variable N est, au départ, peu éloignée de la normalité » (Frontier & al., 2001; Kirk, 1995).

Les conclusions tirées par le test de Kolmogorov-Smirnov et les valeurs d'asymétrie des distributions des échantillons affirment que les échantillons ne sont pas distribués normalement. Toutefois, comme la taille des échantillons est supérieure à 300 individus, l'application du théorème de la limite centrale aurait pu être pris en considération mais un certain degré d'éloignement suggéra la transformation des données. Une transformation linéaire convenable fût donc appliquée sur les données brutes dans le but de réaliser une analyse de variance.

4.3.4 Transformation de la variable d'un échantillon

Deux transformations ont été appliquées aux données brutes, soit une transformation racine-carré ($Y' = \sqrt{Y+0.5}$) et une transformation logarithmique ($Y' = \log_{10} Y$). Afin de choisir la transformation appropriée, Kirk (1995) décrit une approche qui applique aux valeurs maximales et minimales chacune des transformations à vérifier. « The range within each treatment level is then determined, and the ratio of the largest to the smallest ranges is computed. The transformation that produces the smallest ratio is selected as the most appropriate one » (Kirk, 1995). Des graphiques probabilité-probabilité ont été créés à nouveau à partir des valeurs transformations et une vérification visuelle fût effectuée. De plus, une analyse du test de Kolmogorov-Smirnov a été effectuée de nouveau. Bref, il s'avéra que la transformation logarithmique fût plus appropriée que la transformation racine-carré et ce, selon les méthodes de vérification décrite ci-dessous.

L'importance de ces transformations est expliquée selon les deux raisons suivantes:

« [...] one important warning concerns making comparisons of the same type of average, for example the comparison of two means. It may well be that the means of two distributions are the same, but that the two distribution curves are very different in character [...]. » (Shaw & Wheeler, 1985)

« Fortunately many positively skewed distributions can have a measure of normality imposed upon them by being log-transformed, [...]. In mathematical terms the logs of such data have no lower cut-off value as smaller fractions simply become ever larger negative logarithms, and the log of zero is minus infinity. In statistical terms such conversions are valuable because one of the prerequisites for many of the analytical methods that follow is that the data be normally distributed. » (Shaw & Wheeler, 1985)

4.3.5 Analyse de variance de la moyenne des échantillons de populations de lichens

Une analyse de variance a été complétée dans le but de comparer les moyennes des sites d'échantillonnage lichénométriques afin de (1) déterminer si les échantillons appartiennent à une population spécifique et (2) d'essayer de comprendre l'influence des variations environnementales pouvant affecter la dynamique des populations de lichens. « L'analyse de variance présente l'avantage, sur le test t de vérifier en un seul test si les différences observées au niveau des moyennes d'un ensemble de k échantillons sont imputables aux fluctuations d'échantillonnage ou non » (Scherrer, 1984). Cette analyse permet de vérifier l'hypothèse principale (H_0) = $\mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \mu_i = \mu_k$ et l'hypothèse alternative (H_1) où μ_j ne sont pas tous égaux. L'analyse de variance représente un

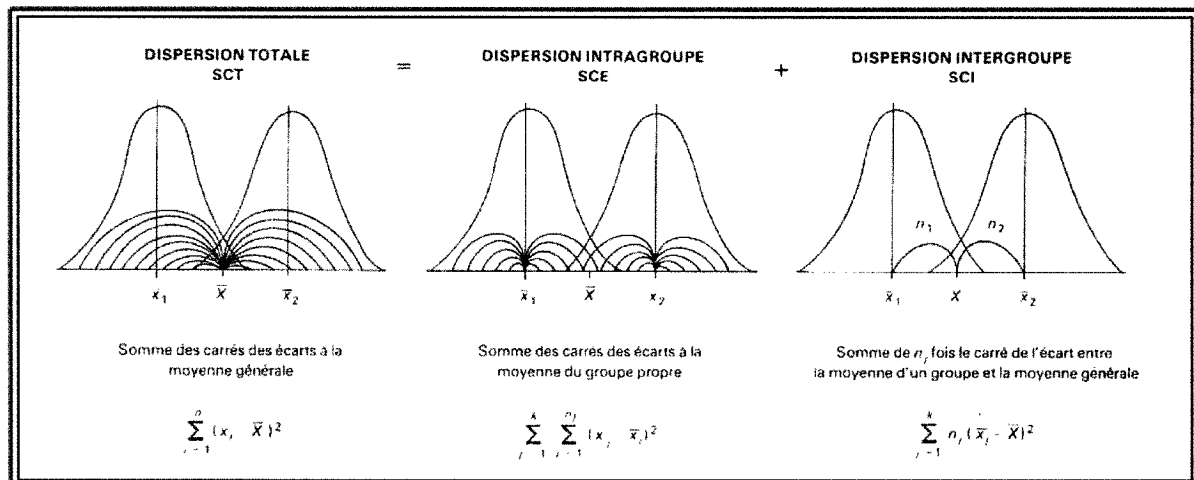


Figure 4.6: Illustration des différentes sources de variation des données de deux échantillons indépendants (Scherrer, 1984)

calcul de la dispersion totale de l'ensemble des données, cette dispersion totale étant partagée en deux composantes : (1) dispersion intergroupe ou factorielle et (2) dispersion intragroupe ou résiduelle (Scherrer, 1984; Sprinthal, 1987). La dispersion correspond à la somme des carrés des écarts entre une série de valeurs et leur moyenne. La Figure 4.6 illustre les différentes sources de variation des

données de deux échantillons indépendants (Scherrer, 1984). Ces hypothèses sont acceptées ou rejetées selon un seuil de signification (seuil de probabilité). Le seuil de signification employé pour les analyses de variance effectuées a été de $\alpha = 0.01$.

Si l'analyse de variance a confirmé un rejet de l'hypothèse principale, on accepte l'hypothèse alternative qui affirme qu'il existe une hétérogénéité au sein des k moyennes. Ainsi, cette deuxième étape consiste à identifier les moyennes qui diffèrent les unes des autres.

Plusieurs techniques existent dans le but de cerner les moyennes distinctes et la principale différence qui existe entre chacune de ces techniques est la définition de l'erreur de première espèce : α . Afin de clarifier les termes, l'erreur de première espèce ou de type I survient lorsque que l'hypothèse H_0 est rejetée alors qu'elle est vraie; l'erreur de deuxième espèce ou de type II survient lorsque l'hypothèse H_0 est acceptée alors qu'elle est fausse (Frontier & al., 2001).

Deux grands types d'erreur α qui correspondent à deux échelles de comparaisons différentes sont possibles lors d'analyses de variance de comparaisons multiples (Scherrer, 1984). Le premier type est la comparaison de deux moyennes et cette erreur α correspond à la probabilité de rejeter à tort l'hypothèse d'égalité :

(1) $\alpha_c = \text{Nombre de comparaisons déclarées par erreur significative} / \text{Nombre total de comparaisons}$

Le deuxième type d'erreur α se rapporte à l'ensemble des expériences (k moyennes) faisant l'objet de comparaisons multiples. Cette erreur correspond à la probabilité de rejeter au moins une fois à tort H_0 . Ce taux d'erreur expérimentale équivaut à :

(2) $\alpha_e = \text{Nombre d'expériences avec au moins une des comparaisons déclarées à tort significatives} / \text{Nombre total d'expériences}$

En choisissant le premier type d'erreur α_c , les tests de comparaisons multiples discriminent de très petites différences entre les moyennes mais fournissent un grand nombre de différences déclarées à tort significatives (Scherrer, 1984). En choisissant le deuxième type d'erreur α_e , les petites différences entre les moyennes ne sont pas aussi facilement discriminées. Frontier & al. (2001) expliquent :

« Utilisant α_1 , nous décelons les petites différences entre moyennes, mais risquons de déclarer significatives un nombre trop grand de différences. Utilisant α_2 , nous ne discernons pas les trop petites différences et, pour un α fixé, l'hypothèse d'égalité entre deux moyennes sera d'autant plus difficile à rejeter que le nombre de comparaisons est grand. Une méthode intermédiaire a été proposée, où l'analyse est réalisée pas à pas, la valeur α_2 variant en fonction du nombre de comparaisons restant à effectuer. »

Le test de comparaisons multiples (test *a posteriori*) « Honestly Significant Difference » HSD de Tukey selon des échantillons de tailles inégales a été employé pour vérifier les hypothèses principales et alternatives de comparaisons des moyennes pour chacun des sites d'échantillonnage lichénométriques. Ce type de test utilise le deuxième type d'erreur et repose sur la distribution d'échantillonnage de la variable aléatoire appelée étendue de Student (q). La probabilité α est fixée qu'une seule fois.

4.3.6 Moyenne des thalles maximums et chronologie de la stabilisation des moraines

Dans le but d'estimer un âge de stabilisation des moraines à partir des données lichénométriques, la moyenne des 10 thalles maximums a été calculée à l'intérieur de chacune des aires étudiées. La moyenne permet d'estimer un âge selon des conditions optimums de croissance et permet d'estimer un âge minimum de déposition des moraines. De plus, la moyenne des thalles les plus larges par aire d'échantillonnage permet de minimiser les valeurs extrêmes telles que la présence de thalles en provenance d'autres substrats (Innes, 1984; Locke & al., 1979; Matthews, 1974; 1975; Matthews & Shakesby, 1984; Mottershead & White, 1972). L'estimation des âges de stabilisation des moraines est basée sur les points de contrôle de la courbe de croissance de Davis (1980).

4.3.7 Points de contrôle et âges au radiocarbone

Comme la présence de matières organiques est minime dans les régions arctiques, l'obtention de point de contrôle pour le perfectionnement de la courbe de croissance des lichens de Davis (1980) est difficile. Néanmoins, deux âges au radiocarbone ont été obtenus dans la région sud de la Passe d'Akshayuk. De gros blocs de pierre se détachent des parois abruptes de cette Passe. Suivant l'âge de la chute des blocs de pierre, différentes populations de lichens ont colonisé leur surface. La tourbe sous deux blocs de pierre déposée de cette manière dans la vallée a été analysée et les lichens qui ont colonisé sa surface ont été mesurés. L'âge au radiocarbone obtenu sur la tourbe par la première analyse est de 1450 ± 50 ans (TO-11240) et le thalle le plus large à la surface de ce bloc est de 13.4 mm de diamètre. L'âge au radiocarbone obtenu sur la tourbe par la deuxième analyse est de 250 ± 50

ans (TO-11241) et le thalle le plus large sur ce bloc est de 9.9 mm de diamètre. Comme ces valeurs ne correspondent pas à la tendance des points de contrôle calculée par Davis (1980), ces âges au radiocarbone ne furent pas ajoutés à cette courbe de croissance et ils ne seront pas considérés pour le calcul de l'âge des moraines étudiées. La **Figure 4.7** montre la courbe de croissance des lichens organisée par Davis (1980) et cette dernière est employée pour cette étude. Les résultats illustrent la difficulté d'établir des points de contrôle dans la région.

La **Figure 4.8** illustre les mêmes points de contrôle définis par Davis (1980) selon une fonction transposée, où la variable indépendante (âge) est située sur l'ordonnée et où la variable dépendante (taille) est représentée par l'abscisse. La courbe de tendance, une régression exponentielle, est interpolée entre les points des plus jeunes âges et les points ayant des âges plus vieux. La précision de cette régression est plus ou moins adéquate, considérant le nombre de points de contrôle existants puisque seulement 10 points de contrôle sont employés. De plus, cinq de ces points de contrôle représentent des âges de moins de 110 ans (âge radiocarbone), corrélés à des diamètres de lichens de 5 à 11 mm.

Afin d'augmenter la précision des âges obtenus à partir de cette régression exponentielle et de ces points de contrôle, des âges sont aussi déterminés à partir de deux taux de croissance fixes. Le premier taux de croissance fixe représente le taux de croissance exponentielle des lichens, caractérisant les lichens de moins de 24 mm de diamètre et d'âge ^{14}C de 200 ans et moins. Ce taux de croissance exponentielle est évalué à 0.12 mm par an. Pour les lichens ayant un thalle plus large que 24 mm, un deuxième taux de croissance linéaire est employé, soit de 0.03 mm par an.

Ainsi, l'âge des moraines étudiées est déterminé par des intervalles de temps, ayant un âge au radiocarbone inférieur et supérieur. Ces intervalles présentent une précision adéquate considérant les points de contrôle disponibles pour évaluer l'âge des populations de lichens.

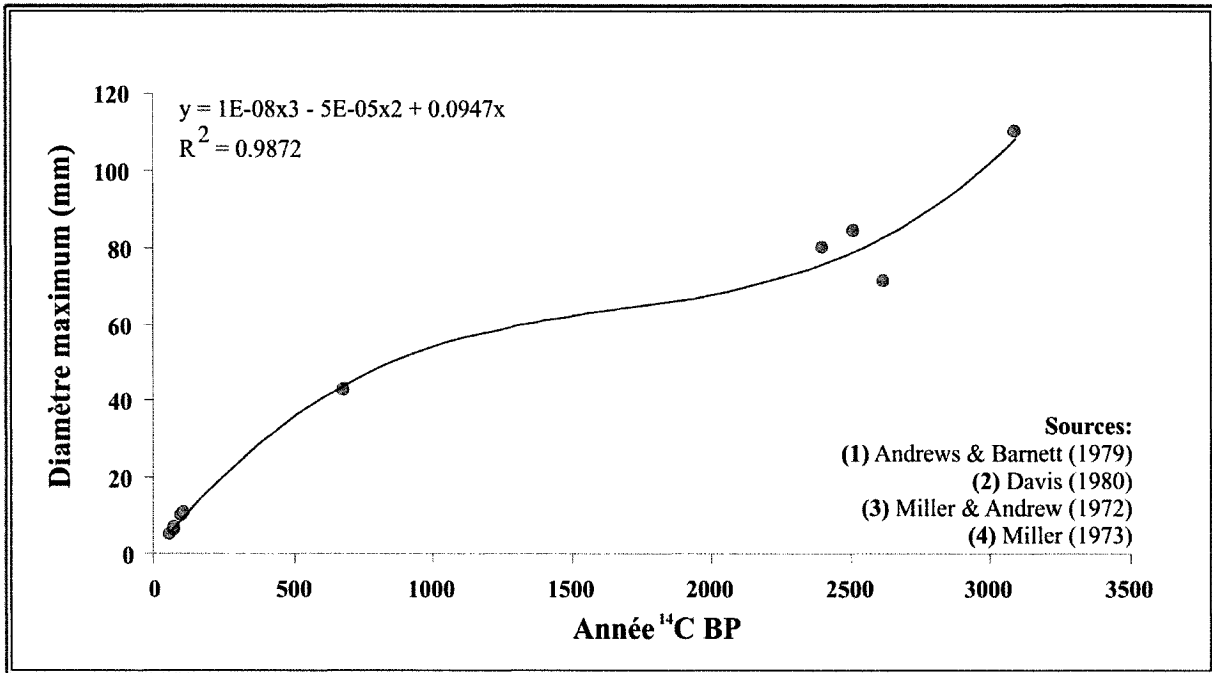


Figure 4.7: Courbe de croissance des lichens de la péninsule de Cumberland

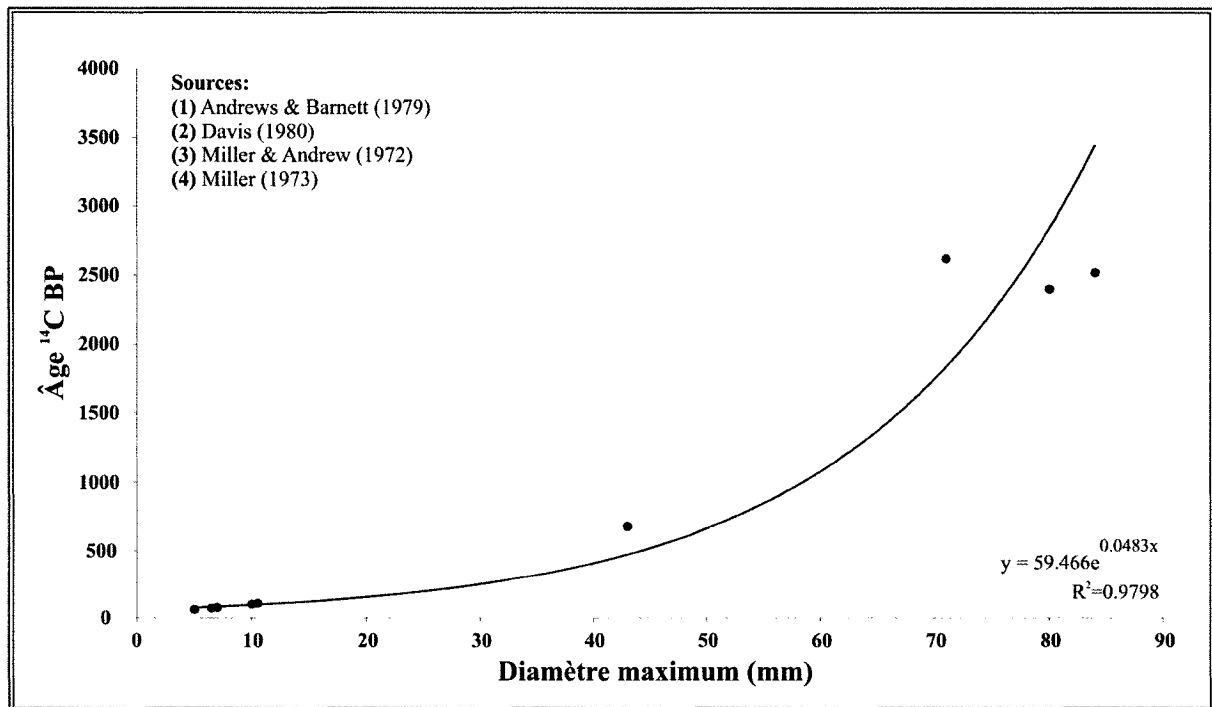


Figure 4.8: Courbe de croissance des lichens de la péninsule de Cumberland (fonction transposée)

4.4 INFLUENCE DE L'ENVIRONNEMENT

Les variations environnementales jouent un rôle important sur le taux de croissance des lichens. Ces variations sont importantes lorsqu'une courbe de croissance est appliquée sur un substrat dont l'âge est inconnu. De plus, ces variations doivent être prises en considération lorsque les échantillons sont pris à différents endroits sur une surface où les variations environnementales sont considérables.

4.4.1 Mesure du rayonnement solaire direct total annuel

Les mesures du rayonnement solaire direct total ont été effectuées à l'aide du système d'information géographique ArcView GIS (ESRI) et de l'extension Solar Analyst 1.0. Cette extension procède à l'analyse du rayonnement solaire direct total qu'une surface reçoit à l'intérieur d'une période de temps précise. La **Figure 4.9** illustre le procédé d'analyse. Un modèle digital d'élévation de terrain (GÉOBASE, 2004) d'une résolution de 90 mètres a été utilisé pour effectuer les mesures du rayonnement solaire (Wh/m^2). Voici les points importants à prendre en considération pour les résultats obtenus à l'aide de l'extension spécifiée.

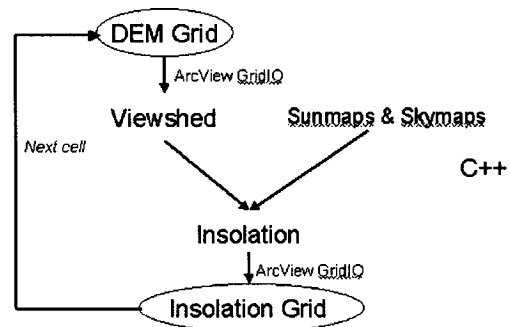


Figure 4.9: Procédé d'analyse du rayonnement solaire direct total annuel à partir de l'extension Solar Analyst 1.0, ArcView GIS ESRI (Fu & Rich, 2004)

En premier lieu, les étapes suivantes ont été complétées : (1) la création d'une classe solaire, (2) la création d'une classe pour les éphémérides et (3) la création d'une classe du ciel. Fu & Rich (2004) discutent de ces trois classes :

« (1) The solar class controls the main loop of the entire model. It reads the input DEM and calculates the horizon angles (including slope and aspect) for each pixel in a DEM. Then it passes the horizon angles to the other two classes for the calculation of insolation. (2) The sun class calculates local solar time, sun declination, sun position, sun rise/set time, day length, and solar constant. Also it calculates the day of year from solar declination values. (3) The sky class creates sky maps and sun maps, converts horizon angles to view sheds, overlays the sky maps and sun maps with view shed, and computes gap fraction and solar radiation for each sector. »

En deuxième lieu, le rayonnement solaire direct total représente la radiation solaire directe, la diffusion atmosphérique n'étant pas considérée dans cette analyse. Comme il n'existe que peu de données climatiques et atmosphériques pour cette région, ces conditions ont été négligées.

L'Équation (3) qu'utilise l'extension pour le modèle simplifié de la transmission atmosphérique prend en considération le rayonnement solaire direct pour une localisation précise au sol Dir_{tot} , étant directement proportionnelle à la somme du rayonnement solaire direct de tout les secteurs solaires pour la région étudiée $\Sigma Dir_{\theta, \alpha}$ (Fu & Rich, 2004) :

$$(3) Dir_{tot} = \Sigma Dir_{\theta, \alpha}$$

L'Équation (4) est utilisée afin de calculer le rayonnement solaire direct total selon un centroïde d'un angle zénithal θ et selon un angle azimuth α (Fu & Rich, 2004) :

$$(4) Dir_{q,a} = S_{const} * t^{m(\theta)} * SunDur_{\theta, \alpha} * SunGap_{\theta, \alpha} * \cos(AngIn_{\theta, \alpha})$$

où S_{const} équivaut au flux solaire à l'extérieur de l'atmosphère (1367 WM^{-2});
 t équivaut à la transmission de l'atmosphère;
 $m(\theta)$ équivaut à la longueur du trajet optique relatif;
 $SunDur_{\theta, \alpha}$ équivaut à la durée d'ensoleillement;
 $SunGap_{\theta, \alpha}$ équivaut à l'intervalle d'ensoleillement;
 $AngIn_{\theta, \alpha}$ équivaut à l'angle d'incidence entre le centroïde et la surface interceptée.

La Figure 4.10, illustrant les valeurs du rayonnement solaire direct total (Wh/m^2) a été créée. Cette carte sera employée afin de (1) caractériser le rayonnement moyen direct total à la surface des glaciers et de (2) caractériser les variations environnementales de luminosité entre les sites d'échantillonnage lichénométriques situés sur les différents complexes morainiques.

4.4.2 Mesure de la pente, de l'orientation, de l'altitude et de l'aire des glaciers

Dans le but de caractériser davantage les glaciers et les sites d'échantillonnage lichénométriques, la pente, l'orientation et l'altitude ont aussi été calculées selon le modèle digital d'élévation de terrain 1 : 250 000, à partir du système d'informations géographiques ArcMap 8.3 ESRI. Des cartes d'analyse de la pente, de l'orientation ont été créées (Figure 4.10). De plus, l'aire des glaciers a aussi été mesurée afin de caractériser la taille des glaciers de cirque et des glaciers de vallée où les moraines ont été échantillonnées. La mesure de l'aire des glaciers a été effectuée à partir du système d'informations géographiques ArcMap 8.3 ESRI.

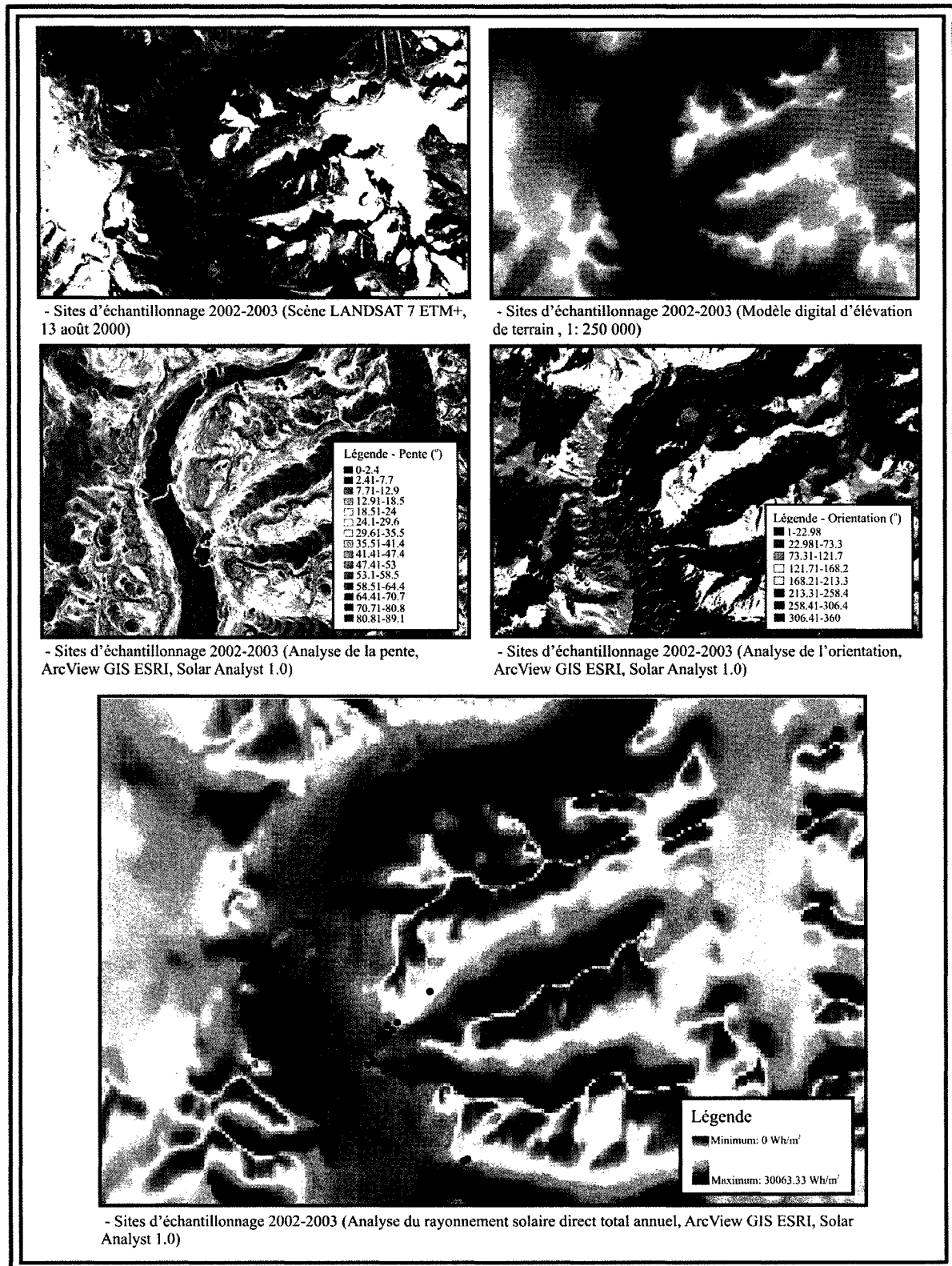


Figure 4.10: Cartes des mesures de la pente, de l'orientation et du rayonnement solaire direct total annuel dans la Passe d'Akshayuk

4.4.3 Température sur les complexes morainiques du glacier Tête de Cirques et du Glacier 12

Afin de comprendre davantage la variation du facteur environnemental de la température sur un complexe morainique versus son influence sur la dynamique d'une population de lichens, un suivi a été effectué sur les complexes morainiques du glacier Tête de Cirques et Glacier 12. À partir d'instruments d'enregistrement « HOBO H8 Data Logger » et « HOHO H8 Pro Series Data Logger », la température de quatorze sites a été enregistrée. Cette variable a été notée (1) du 9 juillet au 31 juillet 2002 pour les quatre stations sur le complexe morainique du glacier Tête de Cirques et (2) du 5 juillet au 2 août 2003 pour les dix stations sur le complexe morainique du Glacier 12. Cette analyse est employée pour démontrer les variations environnementales thermiques à l'intérieur d'un complexe morainique car beaucoup d'auteurs émettent l'hypothèse que la croissance des lichens est influencée par la température (Jochimsen, 1973; Innes, 1985a).

4.4.4 Effet de l'orientation des sites d'échantillonnage

En ajout aux calculs du rayonnement solaire direct total, de la pente, de l'orientation, de l'altitude et de la température, l'analyse suivante permet de déterminer si l'orientation a un impact sur la moyenne de la taille des lichens à l'intérieur d'un site d'échantillonnage. Trois sites lichénométriques ont été échantillonnés selon deux quadrants : 1A03, 2A03 et 3B03. Les deux quadrants établis représentent deux aspects différents des sites d'échantillonnage : 1A03 (Nord-est et Sud-ouest), 2A03 (Nord-est et Sud-ouest) et 3B03 (Nord et Sud). Ainsi, en analysant les paramètres des distributions taille-fréquence des échantillons, il est possible de vérifier si l'orientation influence la croissance des lichens. Pour vérifier si ce facteur engendre une différence entre la moyenne des populations de lichens, le test- t a été utilisé. Ce test paramétrique a été effectué sur des ensembles de données transformées selon des distributions normales.

Les échantillons analysés des populations de lichen sur les différents complexes morainiques représentent des ensembles indépendants. Pour vérifier la similarité ou la différence statistique des moyennes entre deux échantillons, le test- t pour deux échantillons distincts et indépendants a été employé.

Voici le concept général pour le test- t . Deux populations avec des moyennes inconnues μ_1 et μ_2 sont considérées. Les variances des populations, σ_1^2 et σ_2^2 , sont connues mais pas nécessairement égales et ces échantillons aléatoires de taille n_1 et n_2 sont obtenues à partir des deux populations respectives. Si la distribution des populations X_1 et X_2 est normale ou si les échantillons sont suffisamment larges, l'échantillonnage de la distribution de la différence entre l'échantillon, donc, la moyenne $X_1 - X_2$ est

normale. Il est possible de démontrer que la probabilité que la différence entre les moyennes des échantillons, $E(X_1 - X_2)$, est égale à $\mu_1 - \mu_2$. De plus, la variance de la différence entre deux moyennes d'échantillons est,

$$(5) \quad s^2_{X_1 - X_2} = (s^2_1 / n_1) + (s^2_2 / n_2).$$

Finalement, la statistique t , quand les valeurs de deux échantillons sont indépendantes, est obtenue par,

$$(6) \quad t = \frac{|X_1 - X_2| - \delta_0}{\sqrt{s^2_{X_1 - X_2}}}$$

lorsque l'hypothèse principale est $H_0 : \mu_1 - \mu_2 = \delta_0$ et que l'hypothèse alternative est $H_1 : \mu_1 - \mu_2 \neq \delta_0$ (Kirk, 1999).

4.5 CONCLUSION

Les principaux points méthodologiques utilisés dans cette étude sont les suivants :

- Pour déterminer les fluctuations actuelles, on a utilisé les photographies aériennes et les images satellitaires qui illustrent la région d'étude entre 1948 et 2003;
- Pour mesurer la taille des lichens, on a utilisé un pied à coulisse digital et on a mesuré 300 à 1000 thalles à l'intérieur d'aires d'échantillonnage entre 100 m² et 1600 m²;
- Les populations lichénométriques de chaque aire ont été analysées de manière statistique pour déterminer la qualité des mesures;
- La couverture lichénométrique des moraines a été évaluée à partir de photographies de blocs de pierre et du programme Adobe Photoshop Element 2.1, employant la méthode décrite par McCarthy & Zaniewski (2001);
- L'âge des moraines a été déterminé à partir de la moyenne de 10 thalles maximaux, et à partir de la courbe de croissance de Davis (1980);
- Une évaluation de l'impact des facteurs environnementaux sur la croissance des lichens a été ébauchée, notamment pour vérifier l'influence de la radiation, de la pente et de l'exposition.

5 RÉSULTATS GÉNÉRAUX DES FLUCTUATIONS DES FRONTS GLACIAIRES

5.1 FLUCTUATIONS ACTUELLES

L'analyse des taux de retrait des fronts glaciaires actuels a été fait pour les glaciers Tête de Cirques, Glacier 12, Windy Lake, Niflheim et Glacier 20A. Les résultats de l'analyse des fluctuations glaciaires actuelles sont énumérés pour chacun de ces cinq glaciers. Le **Tableau 5.1** ci-dessous regroupe les caractéristiques des glaciers et la **Figure 5.1** les illustrent.

Tableau 5.1: Caractéristiques des glaciers étudiés en 2002-2003

| Glacier | Coordonnées géographiques Latitude, Longitude (NAD 83) | | Aire (km ²) | Rayonnement solaire direct total (moyenne annuelle Wh/m ²) | Pente moyenne (°) | Orientation moyenne (°) |
|-----------------|---|------------|----------------------------|---|----------------------|----------------------------|
| Turnweather | 66°25'12"N | 65°23'14"W | 13 | 12833 | 14 | Sud-ouest |
| Tête de Cirques | 66°27'1"N | 65°26'56"W | 9.9 | 15226 | 15 | Sud-ouest |
| Glacier 12 | 66°28'3"N | 65°25'33"W | 8.9 | 14766 | 8 | Sud-ouest |
| Windy Lake | 66°31'29"N | 65°28'42"W | 6.8 | 19025 | 14 | Sud |
| Niflheim | 66°30'30"N | 65°25'56"W | 2.2 | 9134 | 24 | Nord |
| Glacier 20A | 66°30'35"N | 65°23'34"W | 1.6 | 7817 | 21 | Nord-ouest |
| Sivingavuk | 66°30'52"N | 65°20'22"W | 1.1 | 8017 | 25 | Ouest |

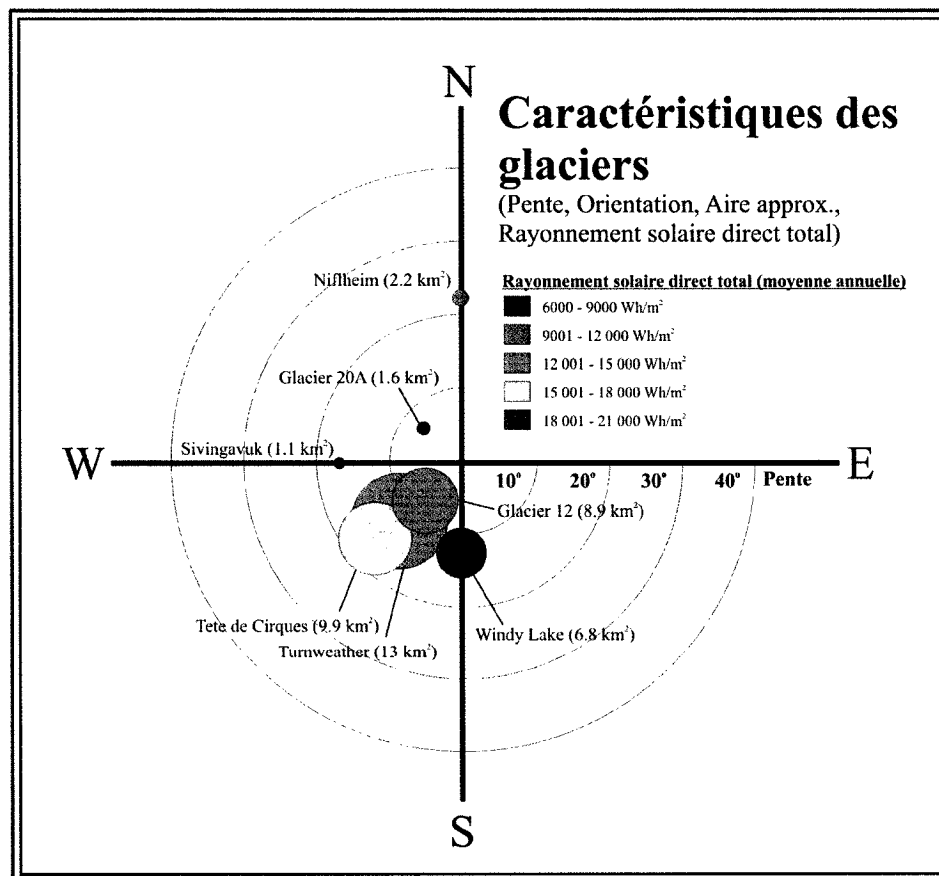


Figure 5.1: Caractéristiques environnementales des glaciers étudiés en 2002-2003

Le glacier qui possède l'aire la plus élevée est le glacier Turnweather (13 km²) et le glacier qui possède l'aire la moins élevée est le glacier Sivingavuk (1.1 km²). Les glaciers sont tous situés sur une pente moyennement abrupte, entre 8° et 25°. Les glaciers qui perçoivent le plus grand montant de rayonnement solaire direct total sont le glacier Windy Lake (19 025 Wh/m²) et le glacier Tête de Cirques (15 226 Wh/m²). La surface de ces deux glaciers est orientée vers le sud et le sud-ouest.

Pour comparer les photographies aériennes avec les images satellitaires et pour mesurer les distances de retrait des fronts glaciaires, les photographies ont été corrigées géométriquement. Un point important doit être mentionné concernant cette correction géométrique, celui de la faible disponibilité des points de contrôle à l'intérieur de la région d'étude. Le nombre de points de contrôle employé lors de cette étape varia entre 12 et 28 points et ces points de contrôle étaient pour la plupart du temps de gros blocs de pierre, situés dans la vallée ou à l'intérieur des complexes morainiques. Ainsi, la précision de cette correction géométrique des photographies aériennes varie entre 26.7 et 63.5 m. Le **Tableau 5.2** présente les résultats reliés à la correction géométrique de chacune des photographies et le **Tableau 5.3** présente les résultats des taux de retrait de chacun des fronts glaciaires analysés entre la date de prise des photographies aériennes et l'année 2003, date de l'acquisition de l'image satellite IKONOS. Les résultats indiquent un recul moyen de 8.9 m/an avec comme valeurs extrêmes 1.6 m/an au Glacier 20A et 17.3 m/an au Glacier 12. Au cours des dernières décennies, il est possible de noter que le retrait a pu fluctuer : par exemple, au Glacier 12, le taux de retrait a été de 2.3 m/an entre 1948 et 1960, puis de 22.7 m/an entre 1960 et 1975 et de 23 m/an entre 1975 et 2003.

Quel facteur possède la plus grande influence sur le taux de retrait des cinq glaciers étudiés? Le rayonnement solaire direct total annuel reçu à la surface d'un glacier et l'orientation de la pente du glacier semblent être les deux facteurs qui influencent le plus les taux de retrait des cinq glaciers étudiés. En ce qui concerne l'aire des glaciers, ce facteur semble aussi être relié au taux de retrait calculé. Toutefois, les plus petits glaciers possèdent une orientation vers le nord où le rayonnement solaire direct total annuel est moindre, tandis que les glaciers les plus larges sont orientés vers le sud et le sud-ouest, où le rayonnement solaire est plus élevé. Il faut donc prendre en compte cette observation importante. En ce qui concerne la pente des glaciers, il semble que les glaciers dont la surface est la plus abrupte connaissent les taux de retrait les moins élevés et que les glaciers dont la surface est moins abrupte sont caractérisés par les taux de retrait les plus élevés.

Tableau 5.2: Caractéristiques de la correction géométrique des photographies aériennes

| Numéro de la photographie aérienne | Glaciers illustrés | Année | Degré de la correction géométrique | Nombre de points de contrôle | Précision des résidus (m) |
|------------------------------------|--|-------|------------------------------------|------------------------------|---------------------------|
| T213-210 | Windy Lake, Niflheim | 1948 | 3 ^{ème} degré | 22 | 63.5 |
| T213-214 | Tête de Cirques, 12 | 1948 | 2 ^{ème} degré | 12 | 38.8 |
| A16984-163 | Tête de Cirques, 12, Windy Lake, Niflheim, 20A | 1960 | 1 ^{er} degré | 12 | 26.7 |
| A16984-165 | Tête de Cirques, 12 | 1960 | 2 ^{ème} degré | 15 | 37.4 |
| A24200-150 | Windy Lake, Niflheim, 20A | 1975 | 3 ^{ème} degré | 23 | 60.7 |
| A31157-19 | Tête de Cirques, 12 | 1977 | 2 ^{ème} degré | 28 | 35.6 |
| A31157-36 | Niflheim, 20A | 1977 | 2 ^{ème} degré | 12 | 44 |

Tableau 5.3: Caractéristiques des fluctuations des fronts glaciaires et taux de retrait calculés pour les cinq glaciers étudiés (1948-2003)

| Glacier | Année | Distance par rapport à 2003 (m) | Taux de retrait annuel moyen (m) | Taux de retrait annuel moyen (m) : (1) 1948-1960; (2) 1960-1975, 1977; (3) 1975, 1977-2003 |
|------------------------|-------|---------------------------------|----------------------------------|--|
| Windy Lake | 1948 | 452.8 ± 63.5 | 10.8 | (1) 20 |
| | 1960 | 213.17 ± 26.7 | | (2) 10 |
| | 1975 | 64.2 ± 60.7 | | (3) 2.3 |
| Niflheim | 1948 | 86.3 ± 63.5 | 1.6 | (1) 0.5 |
| | 1960 | 79.6 ± 26.7 | | (2) 3.1 |
| | 1975 | 33.5 ± 60.7 | | (3) 1.2 |
| 20A | 1960 | 87.9 ± 26.7 | 2.6 | (2) 4.3 |
| | 1975 | 23.7 ± 60.7 | | (3) 0.9 |
| Tête de Cirques | 1948 | 569 ± 38.8 | 12.4 | (1) 28.3 |
| | 1960 | 229.1 ± 37.4 | | (2) 0.3 |
| | 1977 | 224.2 ± 35.6 | | (3) 8.6 |
| 12 | 1948 | 1077.6 ± 38.8 | 17.3 | (1) 2.3 |
| | 1960 | 1050.6 ± 37.4 | | (2) 26.7 |
| | 1977 | 597.4 ± 35.6 | | (3) 23 |
| Moyenne | | | 8.9 | |

Comme seulement les fluctuations actuelles des cinq glaciers présentés ci-dessous ont été étudiées dans la région de la Passe d'Akshayuk, on ne dispose pas assez de données pour effectuer des analyses de régression linéaire entre les facteurs pouvant influencer les taux de retrait. De plus, plusieurs autres facteurs qui influencent le taux de retrait des fronts glaciaires n'ont pas été pris en considération.

Nesje & Dahl (2000) indiquent que le bilan de masse glaciaire et les taux de retrait d'un front glaciaire reflètent le climat de la région, en plus de la morphologie du glacier et de la topographie locale. Benn & Evans (1998) discutent des différents facteurs affectant la formation et la fonte des glaciers. L'influence de l'orientation, de la topographie et la distance du glacier d'une source d'humidité sont trois facteurs discutés. Le rôle de l'orientation n'est pas particulièrement évident à des échelles régionale et continentale. L'orientation joue cependant un rôle important à une échelle locale, reliée au rayonnement solaire. Ensuite, la topographie et la pente sont deux facteurs permettant à des sommets et des plateaux d'être englacés ou non et le degré de continentalité contrôle les précipitations influençant le bilan de masse glaciaire. Ces trois facteurs, excluant le degré de continentalité, sont considérés dans l'analyse précédente des fluctuations glaciaires actuelles de la Passe d'Akshayuk.

L'ablation des glaciers étudiés est aussi associée à différents procédés, tels les avalanches, la fonte, et l'évaporation. La fonte du glacier est associée à un élément bien important, le bilan d'énergie. Ce bilan d'énergie est contrôlé par la radiation solaire, cet élément ayant aussi été pris en considération. Toutefois, l'albédo de la surface des glaciers n'a pas été considéré. De plus, la fonte du glacier est aussi caractérisée par la radiation de grandes ondes, d'un transfert de chaleur sensible et d'un transfert de chaleur latente (Benn & Evans, 1998). Ces trois derniers éléments ne sont pas pris en considération dans l'analyse des fluctuations glaciaires actuelles. Ils permettraient sans doute une meilleure compréhension des taux de fluctuations glaciaires des glaciers étudiés.

5.2 FLUCTUATIONS MODERNES

Les résultats et l'interprétation des fluctuations modernes à partir de la lichénométrie ont été traités pour chacun des glaciers. Mais avant de présenter les données pour chacun des glaciers, on présente une synthèse des mesures lichénométriques et du pourcentage de couverture des lichens pour l'ensemble des sites.

5.2.1 Les paramètres statistiques des populations de *Rhizocarpon geographicum*

Les résultats de l'analyse statistique des populations de lichens échantillonnées (**Tableau 5.4**) indiquent que toutes les populations sont positivement asymétriques. D'après Farrar (1974), cette forme d'histogramme indique que la colonisation de la population de lichens est récente et qu'elle a toujours lieu. Cependant, la forme des histogrammes pourrait aussi indiquer un fort taux de mortalité pour les thalles déjà établis sur le substrat (Innes, 1985a). En observant la **Figure 5.3 (A)**, on note que les communautés étudiées possèdent des structures positivement asymétriques, tel que mentionné précédemment. Ce graphique de l'asymétrie versus le diamètre moyen des thalles de lichens, étant une fonction de l'âge, illustre que l'asymétrie est positive pour les jeunes communautés mais aussi positive pour les trois populations de lichens plus âgées (sites 2A03, 6A02 et 6B02). Cette asymétrie positive de la structure des populations de *Rhizocarpon geographicum* des surfaces étudiées indique que les thalles n'entrent pas en compétition entre eux. Farrar (1974) et Innes (1985a) discutent qu'un fort taux d'établissement de nouveaux thalles sur un substrat indique qu'il n'y a aucune compétition entre les thalles de lichens.

L'écart-type des échantillons de *Rhizocarpon geographicum* étudiés varie linéairement en fonction de la taille moyenne des thalles (âges des communautés). En d'autres mots, l'étendue de l'âge des individus de *Rhizocarpon geographicum* augmente proportionnellement avec l'augmentation de l'âge moyen. La **Figure 5.3 (B)** illustre cette observation. Dyke (1990) affirme qu'une telle observation indique qu'il y a constamment de l'espace inoccupée sur le substrat pour la colonisation et la croissance des jeunes thalles de lichens.

La relation entre la variable dépendante de la moyenne des thalles de lichens versus la variable indépendante du thalle le plus large est illustrée par la **Figure 5.3 (C)**. On remarque que plus la moyenne des thalles de lichens augmente, plus la taille des thalles les plus larges augmente. Ceci est vraie aussi pour les communautés de *Rhizocarpon geographicum* plus vieilles (sites 2A03, 6A02 et 6B02).

Il est important de considérer que la forme des histogrammes des échantillons des populations de *Rhizocarpon geographicum* et leurs paramètres statistiques étudiés résultent de différents processus. L'analyse de la forme des distributions taille-fréquence est limitée et ne pourrait être véritablement interprétée que si des données additionnelles étaient disponibles, telles que les taux de colonisation, les effets de la densité sur la compétition entre thalles et la relation taille-densité (Haines – Young, 1988).

5.2.2 Relation entre le pourcentage de couverture des lichens et la moyenne des échantillons des sites lichénométriques

La littérature indique que le pourcentage de couverture des lichens sur un substrat est représentatif de l'âge de ce dernier; le pourcentage de couverture augmente avec l'âge du substrat morainique, représenté par la taille moyenne des thalles de *Rhizocarpon geographicum*. La **Figure 5.3 (D)** illustre la relation entre le pourcentage de couverture des lichens et la moyenne des échantillons des sites lichénométriques.

On note de manière générale que lorsque la taille moyenne des thalles de lichens augmente, le pourcentage de couverture des lichens augmente aussi. Cette fonction est toutefois produite par les thalles ayant une taille plus grande, représentant des surfaces plus âgées où la couverture des lichens est supérieure. En observant plus précisément le pourcentage de couverture des communautés ayant comme taille moyenne des thalles entre 1 à 6 mm, on remarque qu'il n'existe pas de relation directe entre ces deux variables. Il est impossible d'affirmer pour les thalles plus jeunes si une relation existe entre leur taille et le pourcentage de couverture.

Ainsi, il existe surtout une relation entre le pourcentage de couverture et les substrats les plus âgés. Par contre, il est difficile de noter une tendance quand les lichens sont de petites tailles (une moyenne des thalles de lichens entre 1 et 6 mm).

5.2.3 L'âge des moraines

Le **Tableau 5.6** et la **Figure 5.2** illustrent les distributions des âges des moraines étudiées. On constate que 90 % des âges (en années calendrier) se situent entre 1800 et 1900. Il y a un pic notable vers 1840-1860, c'est-à-dire à la fin du Petit Âge Glaciaire. Certains âges représentent des valeurs extrêmes, tels l'âge des substrats morainiques latéraux du glacier Turnweather (2A03 et 2B03) et du substrat morainique frontal du glacier Sivingavuk (5C03 et 6A02).

Les âges de stabilisation et de déposition des moraines, présentés dans le **Tableau 5.6**, ne prennent nullement en considération la période de temps de colonisation de *Rhizocarpon geographicum* sur les substrats analysés et mesurés. Le temps de colonisation sur des surfaces déglacées et le taux de croissance durant cette phase n'est pas encore très bien compris (Topham, 1977). Toutefois, il est possible d'estimer ce temps de colonisation en observant des surfaces où le moment de la déglaciation est connu. La position du front glaciaire de 1948 pour les glaciers Tête de Cirques, Glacier 12 et Windy Lake, à partir des photographies historiques, aériennes et obliques, permet

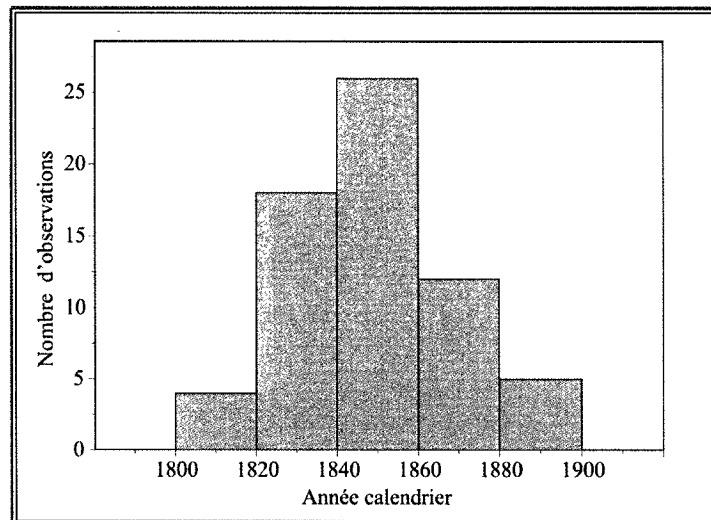


Figure 5.2: Distribution de l'âge des substrats morainiques étudiés en 2002-2003

d'estimer le temps de colonisation de *Rhizocarpon geographicum*. Le temps de colonisation de *Rhizocarpon geographicum* est estimé à un minimum de cinquante ans, cette affirmation étant basée par l'absence complète de cette espèce sur les surfaces récemment déglacées des glaciers mentionnés ci-dessus.

De plus, ces âges de stabilisation et de déposition des moraines sont basés sur les points de contrôle présentés par Davis (1980). Cette courbe de croissance a été établie pour des régions distinctes et elle n'inclut pas de points de contrôle originaires de la Passe d'Akshayuk. Les taux de croissance associés aux points de contrôle de la courbe ne considère donc pas les variations environnementales affectant la croissance des lichens d'une région à l'autre; ces variations sont engendrées par des différences climatiques et topographiques (Topham, 1977). Ainsi, en utilisant cette courbe de croissance, on émet l'hypothèse que les caractéristiques climatiques de la Passe d'Akshayuk sont semblables aux régions de provenance des points de contrôle et que l'utilisation de cette courbe de croissance permet d'estimer l'âges des moraines étudiées.

5.3 CONCLUSION

En conclusion, les résultats généraux des fluctuations des fronts glaciaires sont :

- Le glacier Niflheim et le Glacier 20A possèdent les taux de retrait annuel moyen les moins importants (1.6 et 2.6 m par an) entre 1948 et 2003. Le glacier Windy Lake et le glacier Tête de Cirques connaît un recul de 10.8 et 12.4 m par an durant cette même période de temps. Quant au Glacier 12, celui-ci possède le taux de retrait annuel moyen le plus élevé entre 1948

et 2003, étant de 17.3 m par an. Le taux de retrait annuel moyen de ces cinq glaciers entre 1948 et 2003 a été de 8.9 m par an;

- La distribution des histogrammes taille-fréquence est positivement asymétrique. Cette asymétrie et l'écart-type des échantillons suggèrent qu'il n'existe pas de compétition entre les thalles à l'intérieur des sites d'échantillonnage étudiés en 2002-2003;
- La relation entre le pourcentage de couverture des lichens et la taille moyenne des échantillons mesurés indique que ce paramètre lichénométrique est plus ou moins adéquat sur les substrats morainiques de jeunes âges;
- L'avancée maximale des fronts glaciaires dans le sud de la Passe d'Akshayuk a eu lieu principalement à la fin du Petit Âge Glaciaire, soit entre 1840 et 1860.

Tableau 5.4: Paramètres statistiques des données brutes des sites d'échantillonnage lichénométriques 2002-2003

| Sites | N | Moyenne | Limite de confiance -0.95% | Limite de confiance 0.95% | Médiane | Minimum | Maximum | 25 ^{ème} Quartile | 75 ^{ème} Quartile | Variance | Écart-type | Erreur-type | Asymétrie | Aplatissement |
|-------|------|---------|----------------------------|---------------------------|---------|---------|---------|----------------------------|----------------------------|----------|------------|-------------|-----------|---------------|
| 1A02 | 336 | 5.05 | 4.80 | 5.30 | 4.62 | 1.23 | 16.37 | 3.37 | 6.21 | 5.38 | 2.32 | 0.13 | 1.10 | 2.22 |
| 1B02 | 254 | 4.95 | 4.62 | 5.28 | 4.32 | 1.00 | 16.74 | 2.96 | 6.81 | 7.17 | 2.68 | 0.17 | 0.98 | 1.22 |
| 1A03 | 932 | 4.14 | 3.99 | 4.29 | 3.63 | 1.00 | 14.76 | 2.46 | 5.27 | 5.21 | 2.28 | 0.07 | 1.36 | 2.17 |
| 1B03 | 649 | 3.37 | 3.22 | 3.51 | 2.87 | 1.00 | 14.48 | 2.01 | 4.33 | 3.56 | 1.89 | 0.07 | 1.45 | 2.88 |
| 1C03 | 508 | 3.13 | 2.96 | 3.30 | 2.52 | 1.00 | 14.51 | 1.93 | 3.69 | 3.71 | 1.93 | 0.09 | 2.47 | 8.44 |
| 1D03 | 174 | 3.23 | 2.88 | 3.58 | 2.46 | 1.00 | 15.73 | 1.60 | 4.01 | 5.40 | 2.32 | 0.18 | 2.02 | 5.56 |
| 2A03 | 767 | 15.85 | 15.24 | 16.46 | 14.91 | 1.03 | 51.47 | 9.77 | 20.69 | 74.20 | 8.61 | 0.31 | 0.77 | 0.72 |
| 2B03 | 753 | 5.74 | 5.43 | 6.06 | 4.83 | 1.00 | 28.31 | 2.50 | 7.49 | 18.91 | 4.35 | 0.16 | 1.77 | 4.34 |
| 3A02 | 148 | 3.95 | 3.59 | 4.32 | 3.29 | 1.02 | 11.28 | 2.29 | 4.95 | 5.06 | 2.25 | 0.18 | 1.23 | 1.01 |
| 3B02 | 172 | 3.59 | 3.31 | 3.86 | 3.12 | 1.00 | 9.78 | 2.28 | 4.70 | 3.30 | 1.82 | 0.14 | 0.96 | 0.50 |
| 3A03 | 741 | 3.46 | 3.32 | 3.61 | 2.92 | 1.00 | 14.81 | 2.11 | 4.22 | 4.06 | 2.01 | 0.07 | 1.95 | 5.18 |
| 3B03 | 824 | 2.89 | 2.78 | 2.99 | 2.48 | 1.00 | 14.26 | 1.84 | 3.52 | 2.22 | 1.49 | 0.05 | 1.92 | 6.55 |
| 3C03 | 668 | 3.00 | 2.88 | 3.13 | 2.60 | 1.00 | 14.90 | 1.87 | 3.65 | 2.69 | 1.64 | 0.06 | 2.03 | 7.16 |
| 3D03 | 88 | 1.91 | 1.76 | 2.06 | 1.82 | 1.00 | 4.35 | 1.36 | 2.25 | 0.53 | 0.73 | 0.08 | 1.09 | 1.14 |
| 4A02 | 286 | 4.33 | 4.03 | 4.62 | 3.73 | 1.00 | 15.85 | 2.43 | 5.65 | 6.43 | 2.54 | 0.15 | 1.39 | 2.43 |
| 4B02 | 311 | 3.65 | 3.45 | 3.85 | 3.26 | 1.00 | 12.82 | 2.42 | 4.47 | 3.26 | 1.81 | 0.10 | 1.66 | 4.21 |
| 4C02 | 273 | 3.16 | 2.98 | 3.33 | 2.93 | 1.00 | 10.91 | 2.15 | 3.83 | 2.11 | 1.45 | 0.09 | 1.53 | 4.21 |
| 4D02 | 212 | 3.18 | 2.96 | 3.39 | 2.95 | 1.00 | 10.72 | 1.92 | 4.03 | 2.53 | 1.59 | 0.11 | 1.11 | 2.27 |
| 4A03 | 895 | 3.29 | 3.13 | 3.45 | 2.57 | 1.00 | 21.64 | 1.87 | 3.71 | 5.82 | 2.41 | 0.08 | 3.03 | 12.32 |
| 4B03 | 839 | 3.34 | 3.19 | 3.49 | 2.66 | 1.00 | 20.66 | 1.87 | 3.97 | 5.02 | 2.24 | 0.08 | 2.27 | 7.80 |
| 4C03 | 1001 | 3.19 | 3.05 | 3.32 | 2.55 | 1.01 | 15.97 | 1.90 | 3.68 | 4.70 | 2.17 | 0.07 | 2.79 | 10.08 |
| 5A02 | 315 | 3.78 | 3.52 | 4.03 | 3.19 | 1.00 | 17.03 | 2.22 | 4.69 | 5.39 | 2.32 | 0.13 | 2.25 | 7.83 |
| 5B02 | 175 | 2.53 | 2.32 | 2.74 | 2.15 | 1.00 | 11.62 | 1.65 | 2.98 | 1.98 | 1.41 | 0.11 | 2.49 | 10.61 |
| 5C02 | 77 | 2.94 | 2.66 | 3.23 | 2.62 | 1.34 | 6.68 | 2.05 | 3.35 | 1.55 | 1.25 | 0.14 | 1.26 | 1.28 |
| 5A03 | 1003 | 3.40 | 3.26 | 3.54 | 2.78 | 1.00 | 18.98 | 1.94 | 4.11 | 4.93 | 2.22 | 0.07 | 2.40 | 8.54 |
| 5B03 | 398 | 3.72 | 3.44 | 3.99 | 2.57 | 1.00 | 18.95 | 1.74 | 4.81 | 7.79 | 2.79 | 0.14 | 1.79 | 4.10 |
| 5C03 | 506 | 2.45 | 2.32 | 2.58 | 2.09 | 1.00 | 15.00 | 1.54 | 2.89 | 2.20 | 1.48 | 0.07 | 3.44 | 19.38 |
| 6A02 | 300 | 22.31 | 20.08 | 24.54 | 16.34 | 1.93 | 146.17 | 9.61 | 29.63 | 385.13 | 19.62 | 1.13 | 2.48 | 8.89 |
| 6B02 | 300 | 16.94 | 15.71 | 18.17 | 14.76 | 2.27 | 76.55 | 10.02 | 20.87 | 116.55 | 10.80 | 0.62 | 1.96 | 5.96 |
| 6C02 | 310 | 4.97 | 4.67 | 5.27 | 4.28 | 1.20 | 19.22 | 3.16 | 5.94 | 7.18 | 2.68 | 0.15 | 1.75 | 4.58 |
| 6A03 | 1016 | 2.78 | 2.68 | 2.89 | 2.27 | 1.00 | 13.05 | 1.75 | 3.26 | 2.87 | 1.70 | 0.05 | 2.61 | 9.29 |
| 6B03 | 995 | 2.97 | 2.85 | 3.10 | 2.32 | 1.00 | 13.97 | 1.66 | 3.52 | 4.00 | 2.00 | 0.06 | 2.06 | 4.93 |
| 6C03 | 912 | 4.04 | 3.84 | 4.24 | 3.00 | 1.00 | 21.86 | 1.93 | 5.34 | 9.12 | 3.02 | 0.10 | 1.86 | 4.45 |
| 6D03 | 831 | 2.94 | 2.80 | 3.07 | 2.35 | 1.00 | 18.30 | 1.76 | 3.37 | 4.08 | 2.02 | 0.07 | 3.04 | 13.27 |
| 7A02 | 299 | 5.67 | 5.22 | 6.11 | 4.27 | 1.22 | 21.78 | 3.11 | 6.97 | 15.13 | 3.89 | 0.22 | 1.92 | 3.88 |
| 7B02 | 300 | 4.45 | 4.09 | 4.80 | 3.35 | 1.00 | 17.75 | 2.29 | 5.60 | 9.70 | 3.11 | 0.18 | 1.66 | 2.80 |
| 7C02 | 295 | 4.30 | 4.00 | 4.60 | 3.51 | 1.01 | 18.81 | 2.31 | 5.76 | 6.91 | 2.63 | 0.15 | 1.58 | 3.58 |
| 7D02 | 300 | 4.37 | 4.06 | 4.68 | 3.57 | 1.07 | 16.95 | 2.55 | 5.29 | 7.56 | 2.75 | 0.16 | 1.81 | 4.00 |

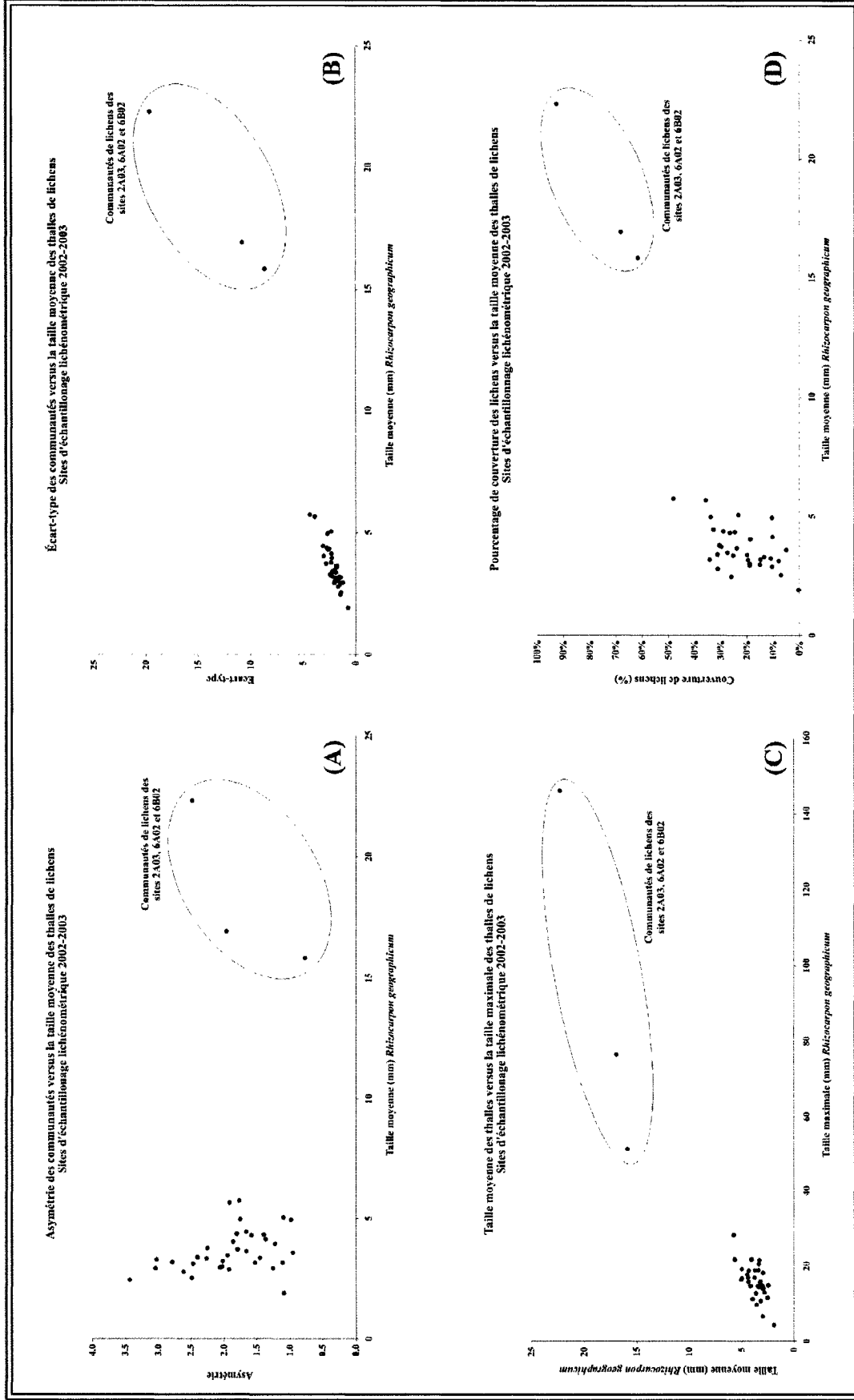


Figure 5.3: Paramètres statistiques des communautés de lichens (A,B,C) et relation entre le pourcentage de couverture des lichens et la taille moyenne des thalles de lichens (D)

Tableau 5.5: Valeurs du pourcentage de couverture des lichens, 2002-2003

| Sites | Moyenne du pourcentage de couverture | Moyenne des thalles (mm) |
|-------|--------------------------------------|--------------------------|
| 1A02 | 23% | 5.05 |
| 1B02 | 11% | 4.95 |
| 1A03 | 10% | 4.14 |
| 1B03 | 20% | 3.37 |
| 1C03 | 8% | 3.13 |
| 1D03 | 11% | 3.23 |
| 2A03 | 62% | 15.85 |
| 2B03 | 48% | 5.74 |
| 3B02 | 5% | 3.59 |
| 3A03 | 27% | 3.46 |
| 3B03 | 10% | 2.89 |
| 3C03 | 19% | 3.00 |
| 3D03 | 0% | 1.91 |
| 4A02 | 25% | 4.33 |
| 4B02 | 24% | 3.65 |
| 4C02 | 20% | 3.16 |
| 4D02 | 15% | 3.18 |
| 4A03 | 13% | 3.29 |
| 4B03 | 25% | 3.34 |
| 4C03 | 34% | 3.19 |
| 5A02 | 31% | 3.78 |
| 5B02 | 7% | 2.53 |
| 5A03 | 31% | 3.40 |
| 5B03 | 30% | 3.72 |
| 5C03 | 26% | 2.45 |
| 6A02 | 92% | 22.31 |
| 6B02 | 68% | 16.94 |
| 6C02 | 34% | 4.97 |
| 6A03 | 31% | 2.78 |
| 6B03 | 15% | 2.97 |
| 6C03 | 19% | 4.04 |
| 6D03 | 19% | 2.94 |
| 7A02 | 36% | 5.67 |
| 7B02 | 33% | 4.45 |
| 7C02 | 27% | 4.30 |
| 7D02 | 29% | 4.37 |

Tableau 5.6: L'âge des sites d'échantillonnage basé sur la moyenne des dix thalles les plus larges

| Glaciers | Sites | Moyenne des dix thalles maximaux (mm) | Age ¹⁴ C (Année BP) * | Age ¹⁴ C (Année BP) ** | Année AD * | Année AD ** |
|-----------------|-------|---------------------------------------|----------------------------------|-----------------------------------|-------------|-------------|
| Tête de Cirques | 1A02 | 11.89 | 99 | 105 | 1851 | 1845 |
| Tête de Cirques | 1B02 | 11.90 | 99 | 106 | 1851 | 1844 |
| Tête de Cirques | 1A03 | 12.93 | 108 | 111 | 1842 | 1839 |
| Tête de Cirques | 1B03 | 10.06 | 84 | 97 | 1866 | 1853 |
| Tête de Cirques | 1C03 | 11.50 | 96 | 104 | 1854 | 1846 |
| Tête de Cirques | 1D03 | 9.91 | 83 | 96 | 1867 | 1854 |
| Turnweather | 2A03 | 43.49 | ⁽¹⁾ 1450 | 484 | 500 | 1466 |
| Turnweather | 2B03 | 24.22 | ⁽¹⁾ 807 | 191 | 1143 | 1759 |
| Windy Lake | 3A02 | 9.72 | 81 | 95 | 1869 | 1855 |
| Windy Lake | 3B02 | 7.97 | 66 | 87 | 1884 | 1863 |
| Niflheim | 3A03 | 12.02 | 100 | 106 | 1850 | 1844 |
| Niflheim | 3B03 | 9.41 | 78 | 94 | 1872 | 1856 |
| Niflheim | 3C03 | 10.19 | 85 | 97 | 1865 | 1853 |
| Niflheim | 3D03 | 3.43 | 29 | 70 | 1921 | 1880 |
| Niflheim | 4A02 | 12.27 | 102 | 107 | 1848 | 1843 |
| Niflheim | 4B02 | 9.76 | 81 | 95 | 1869 | 1855 |
| Niflheim | 4C02 | 7.73 | 64 | 86 | 1886 | 1864 |
| Niflheim | 4D02 | 7.27 | 61 | 84 | 1889 | 1866 |
| Glacier 20A | 4A03 | 16.05 | 134 | 129 | 1816 | 1821 |
| Glacier 20A | 4B03 | 13.51 | 113 | 114 | 1837 | 1836 |
| Glacier 20A | 4C03 | 14.87 | 124 | 122 | 1826 | 1828 |
| Glacier 20A | 5A02 | 12.22 | 102 | 107 | 1848 | 1843 |
| Glacier 20A | 5B02 | 6.48 | 54 | 81 | 1896 | 1869 |
| Glacier 20A | 5C02 | 5.51 | 46 | 78 | 1904 | 1872 |
| Sivingavuk | 5A03 | 14.59 | 122 | 120 | 1828 | 1830 |
| Sivingavuk | 5B03 | 13.27 | 111 | 113 | 1839 | 1837 |
| Sivingavuk | 5C03 | 9.57 | 80 | 94 | 1870 | 1856 |
| Sivingavuk | 6A02 | 94.77 | ⁽¹⁾ 3159 | 5728 | 3159 ans BP | 5728 ans BP |
| Sivingavuk | 6B02 | 54.10 | ⁽¹⁾ 1803 | 807 | 147 | 1143 |
| Sivingavuk | 6C02 | 13.71 | 114 | 115 | 1836 | 1835 |
| Glacier 12 | 6A03 | 11.75 | 98 | 105 | 1852 | 1845 |
| Glacier 12 | 6B03 | 11.81 | 98 | 105 | 1852 | 1845 |
| Glacier 12 | 6C03 | 16.98 | 141 | 135 | 1809 | 1815 |
| Glacier 12 | 6D03 | 13.76 | 115 | 115 | 1835 | 1835 |
| Glacier 12 | 7A02 | 19.29 | 161 | 151 | 1789 | 1799 |
| Glacier 12 | 7B02 | 14.28 | 119 | 118 | 1831 | 1832 |
| Glacier 12 | 7C02 | 12.30 | 103 | 108 | 1847 | 1842 |
| Glacier 12 | 7D02 | 13.47 | 112 | 114 | 1838 | 1836 |

* Taux de croissance fixe de 0.12 mm par an ou taux de croissance fixe de 0.03 mm par an¹

** Age selon la tendance de la régression exponentielle de la courbe de croissance (Figure 4.6)

6 LE GLACIER TURNWEATHER

6.1 FLUCTUATIONS MODERNES

6.1.1 Mesures lichénométriques et pourcentage de couverture des lichens

Deux sites d'échantillonnage lichénométriques, 2A03 et 2B03, ont été analysés durant l'été 2003 sur le complexe morainique du glacier Turnweather (**Figure 6.1**). Chacun de ces sites est situé sur une moraine latérale distincte, localisée au nord du glacier. L'emplacement de ces deux sites complète l'échantillonnage de Davis (1980) sur la moraine frontale.

Le site 2A03, sur la moraine latérale la plus externe au nord, est caractérisé par un échantillon de 767 individus. La moyenne du diamètre des thalles de lichens de ce site est de 15.85 mm; le diamètre minimum mesuré est de 1 mm et le diamètre maximum est de 51.5 mm. Le pourcentage de couverture à ce site est de 62 %. Le site 2B03, localisé au sud-ouest du site 2A03, est caractérisé par un échantillonnage de 753 individus. La moyenne du diamètre des thalles de lichens de ce site est de 5.74 mm; le diamètre minimum est de 1 mm et le diamètre maximum est de 28.3 mm. Le pourcentage de couverture de ce site est de 48 %.

6.1.2 Caractéristiques des histogrammes des données brutes et des données transformées

La forme des histogrammes est distincte pour les sites 2A03 et 2B03 (**Figure 6.2**). L'histogramme 2A03 est plus ou moins symétrique (coefficient d'asymétrie de 0.77) et plus ou moins concentré (coefficient d'aplatissement de 0.72), tandis que l'histogramme 2B03 est étalé vers la droite (coefficient d'asymétrie de 1.77) et fortement concentré (coefficient d'aplatissement de 4.34). Le graphique probabilité-probabilité pour ces deux sites démontre visuellement la position des valeurs de distribution vis-à-vis une distribution normale (**Figure 6.3**).

Suite à la transformation logarithmique, les deux sites d'échantillonnage lichénométriques du complexe morainique du glacier Turnweather (2A03 et 2B03) sont caractérisés par une moyenne de 1.12 et 0.65 mm (\log_{10}). Le diamètre des thalles maximaux est de 1.71 et 1.45 mm (\log_{10}). La transformation logarithmique faite aux données brutes du site 2A03 n'a pas permis d'obtenir une distribution normale (**Figures 6.4 & 6.5**); le coefficient d'asymétrie de la distribution transformée étant de -1.12 (étalement vers la gauche) et le coefficient d'aplatissement de cette même distribution étant de 1.57 (plus forte concentration). Cette distribution est plus ou moins normale, étant asymétrique vers la gauche et plus ou moins fortement concentrée. La transformation logarithmique des données brutes du site 2B03 a permis une distribution normale; le coefficient d'asymétrie étant

désormais de 0 et le coefficient d'aplatissement étant de -0.66 (Voir **Annexe 1** pour le tableau des statistiques des données transformées). La valeur d des résultats du test Kolmogorov-Smirnov indique que les distributions des données transformées ne présentent pas des distributions normales. (**Annexe 2**)

6.1.3 Analyse de variance et comparaisons *a posteriori*

L'analyse de variance entre les sites 2A03 et 2B03 affirme que les deux groupes de données sont significativement différents, où la valeur F est de 914.05 et que le F critique est de 6.65. La valeur- P , étant de 1.4^E-157 , affirme que l'hypothèse H_0 est rejetée et que l'hypothèse H_1 est acceptée (**Annexe 3**).

Les comparaisons multiples entre ces deux groupes de données définissent qu'ils sont statistiquement distincts. La **Figure 6.1** illustre aucun regroupement entre ces deux sites d'échantillonnage, situés sur deux moraines latérales externes.

6.1.4 Chronologie de l'âge des moraines

Les deux sites lichénométriques sur le complexe morainique du glacier Turnweather, 2A03 et 2B03, indiquent que les moraines se seraient stabilisées entre l'an 500 et 1466, et l'an 1143 et 1759 (**Figure 6.6**). Ces résultats rejoignent ceux de Davis (1980), qui affirme que la moraine frontale sud et la moraine latérale sud du glacier Turnweather ont été déposées entre l'an 800 et 1050 de notre ère. Les moraines frontales internes et latérales auraient été formées entre l'an 1550 et 1750. Par la suite, la stabilisation de certaines moraines internes est estimée aux alentours des années 1850. Les chronologies établies par Davis (1980) et celles de ce présent travail concordent bien, malgré les différences des paramètres d'échantillonnage.

6.1.5 Variations environnementales affectant la logique de la chronologie des moraines

L'analyse de variance et la comparaison *a posteriori* des deux sites d'échantillonnage du glacier Turnweather indique que ces derniers sont statistiquement différents. De plus, la chronologie des moraines latérales externes présente des âges distincts selon une chronologie logique.

La chronologie des moraines ne semblent pas être affectée par la morphologie des sites d'échantillonnage (**Tableau 6.1 & Figure 6.7**). Les sites 2A03 et 2B03 sont situés sur une pente moyenne entre 24° et 29° et cette dernière est orientée vers le sud. Il n'existe pas une différence

considérable entre le rayonnement solaire direct total entre ces deux sites, bien que le site 2A03 perçoit un montant plus élevé de rayonnement solaire direct que le site 2B03. En ce qui concerne les résultats du test-*t* dans le but de vérifier si l'orientation du site d'échantillonnage a un impact sur la dynamique de croissance des lichens, ils semblent positifs. Comme l'hypothèse principale H0 a été rejetée pour les comparaisons des sites NE-2A03 et SW-2A03, l'hypothèse alternative H1 a été acceptée, signifiant qu'il existe une différence significative entre la moyenne des deux quadrants du site 2A03 (**Annexe 4**). Donc, même si les communautés de lichens entre les deux sites peuvent être comparées, l'orientation des sites d'échantillonnage a un léger impact sur la dynamique des populations de lichens.

Tableau 6.1: Caractéristiques des sites d'échantillonnage du complexe morainique du glacier Turnweather

| Site | Glacier | Coordonnées géographiques Latitude, Longitude (NAD 83) | Aire des sites (m ²) | Altitude (m) | Rayonnement solaire direct total (moyenne annuelle Wh/m ²) | Orientation de la moraine |
|------|-------------|---|----------------------------------|--------------|---|---------------------------|
| 2A03 | Turnweather | 66°25'38"N, 65°24'58"W | 100 | 476 | 15 550 | Nord-ouest |
| 2B03 | Turnweather | 66°25'36"N, 65°25'06"W | 100 | 445 | 14 540 | Nord-ouest |

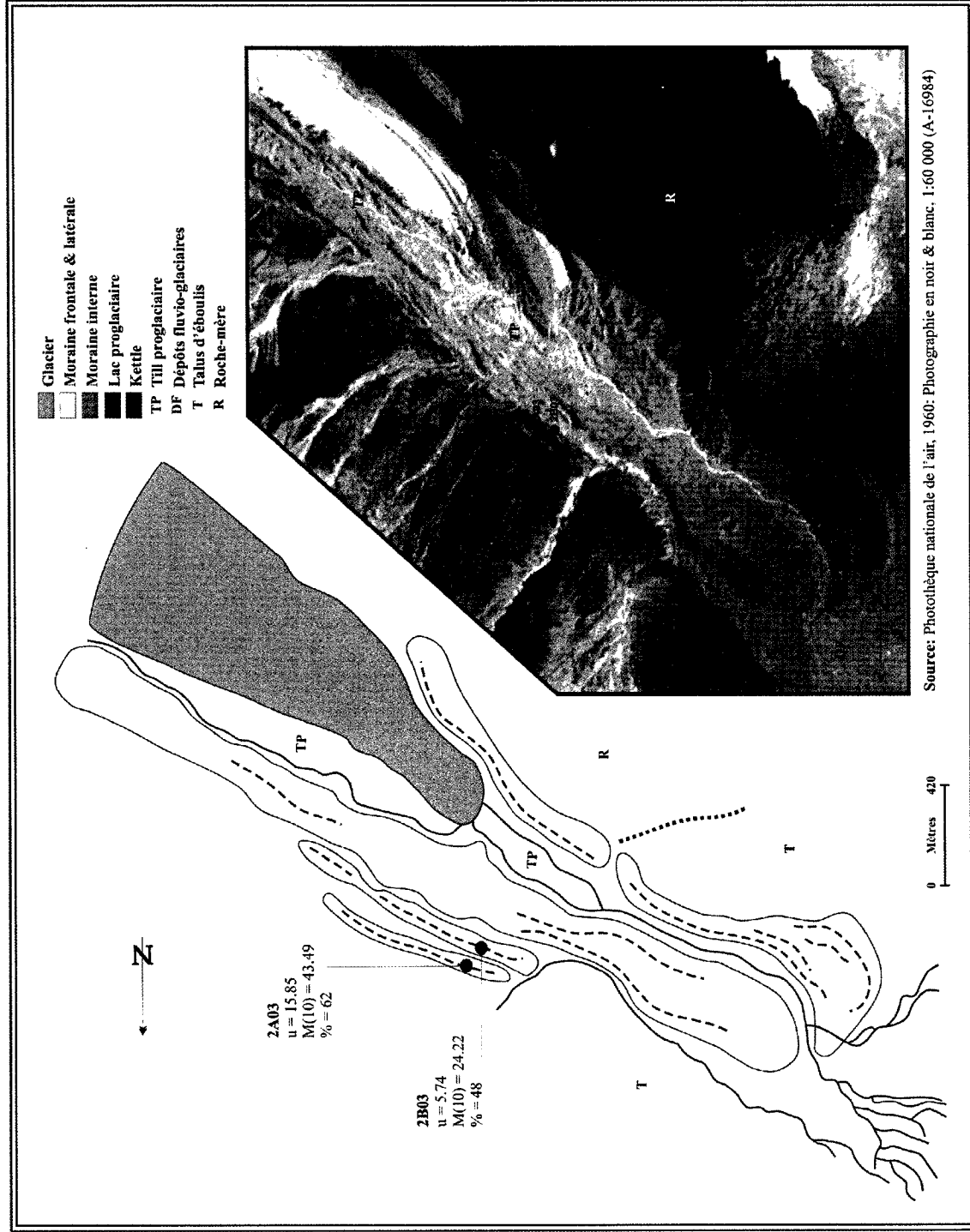


Figure 6.1: Localisation des sites d'échantillonnage et paramètres statistiques du complexe morainique du glacier Turnweather

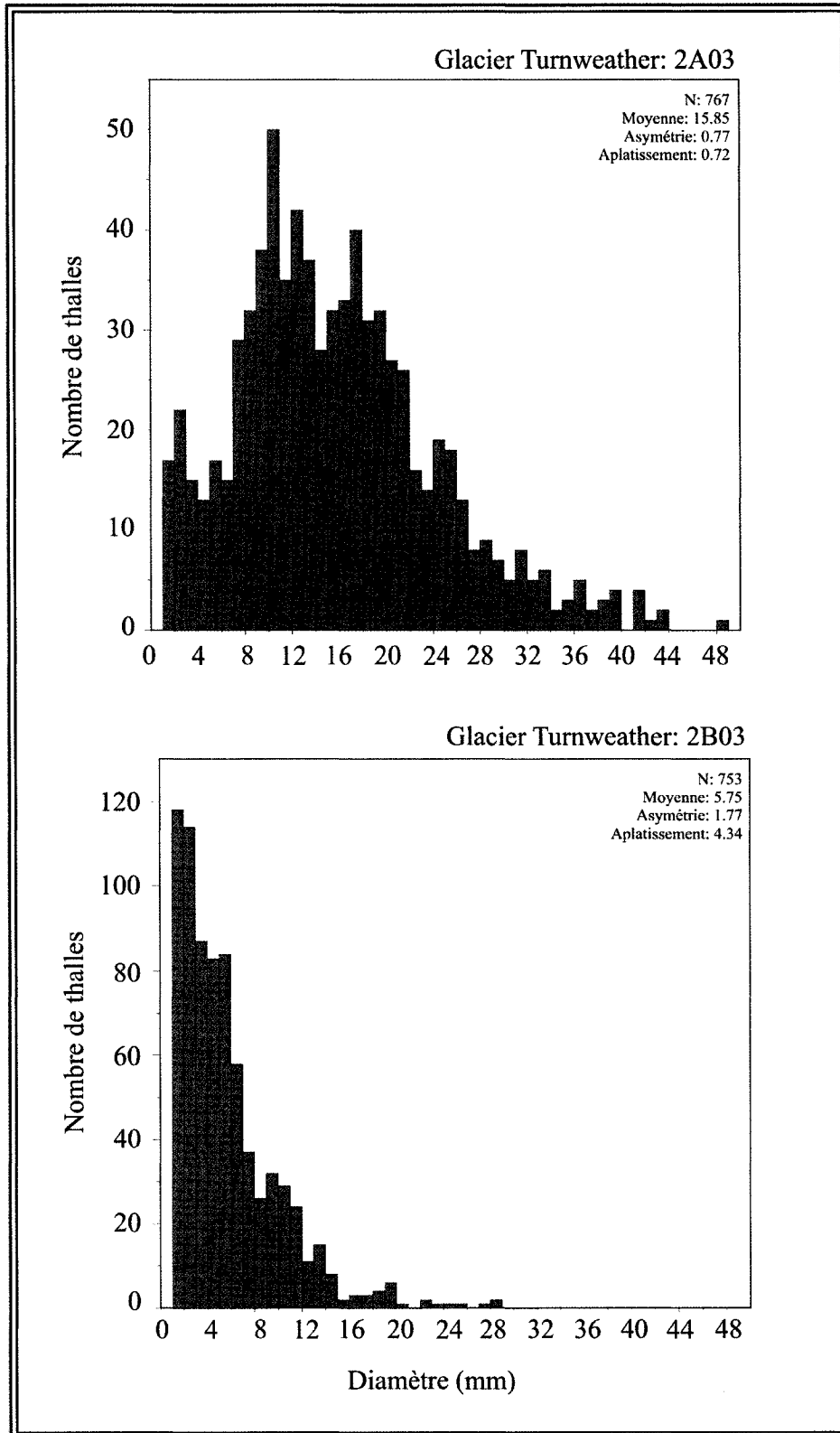


Figure 6.2: Histogrammes de la distribution taille-fréquence des données brutes du glacier Turnweather

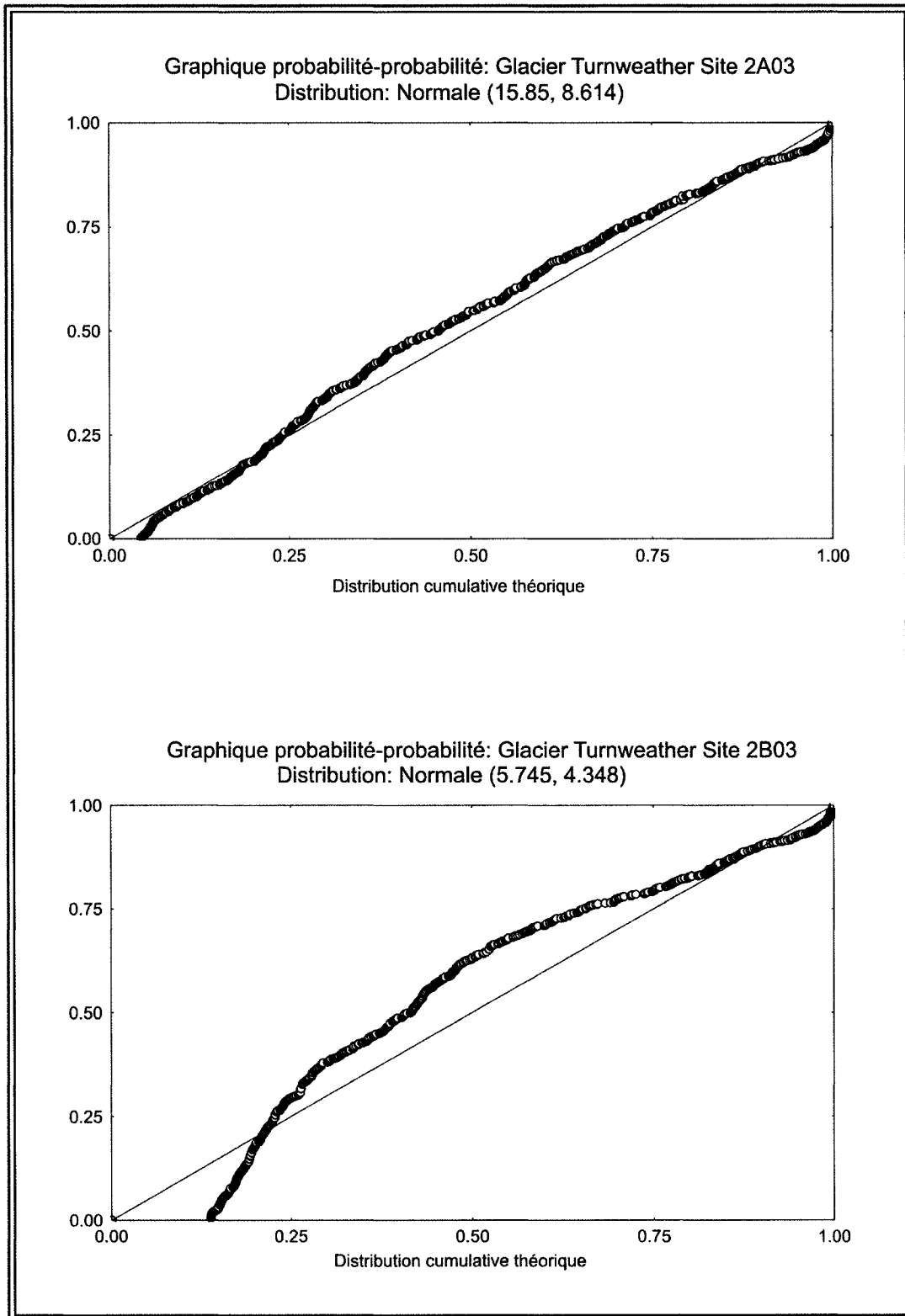


Figure 6.3: Graphique probabilité-probabilité des données brutes du glacier Turnweather

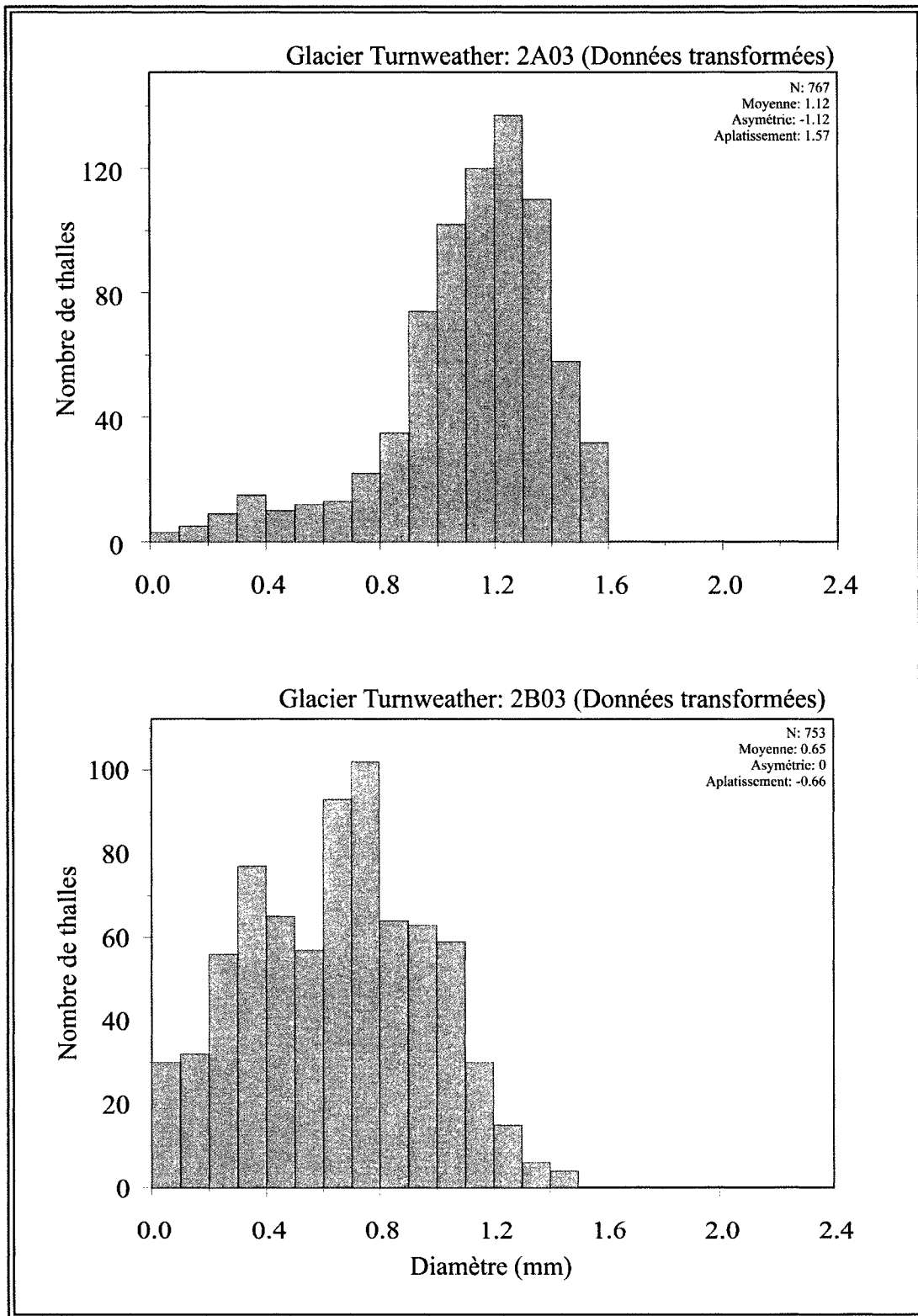


Figure 6.4: Histogrammes de la distribution taille-fréquence des données transformées du glacier Turnweather

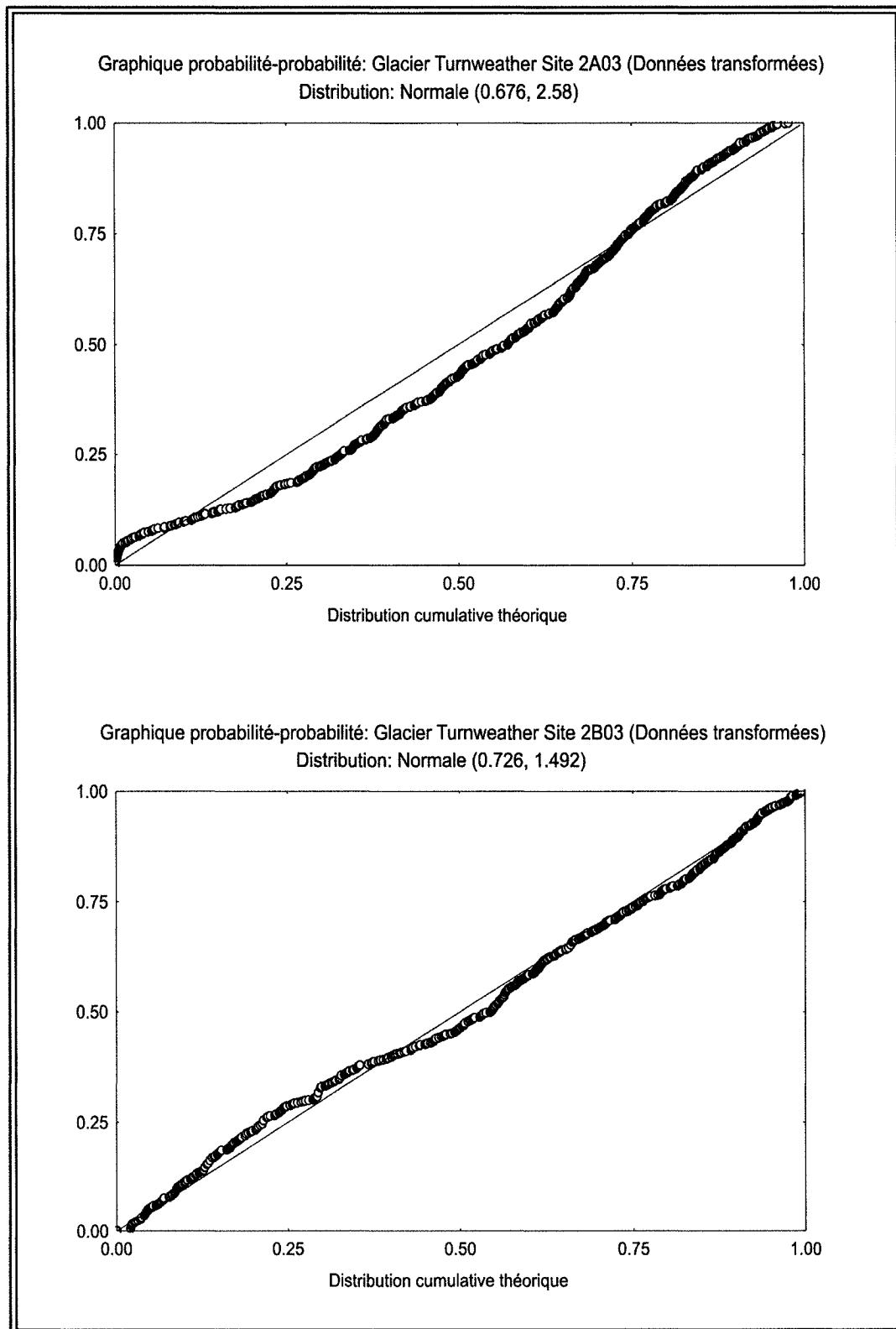


Figure 6.5: Graphiques probabilité-probabilité des données transformées du glacier Turnweather

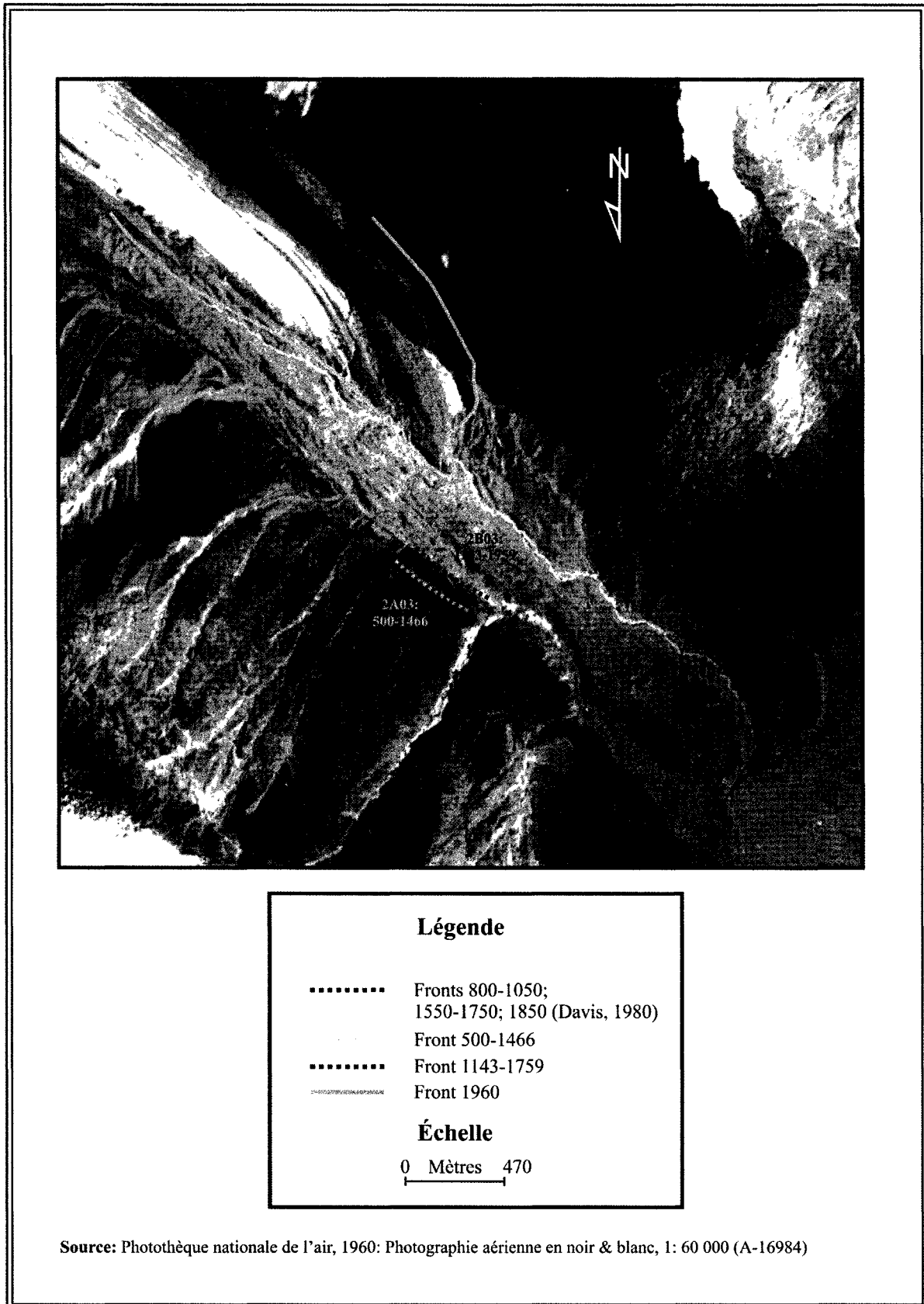


Figure 6.6: Age des moraines étudiées du glacier Turnweather

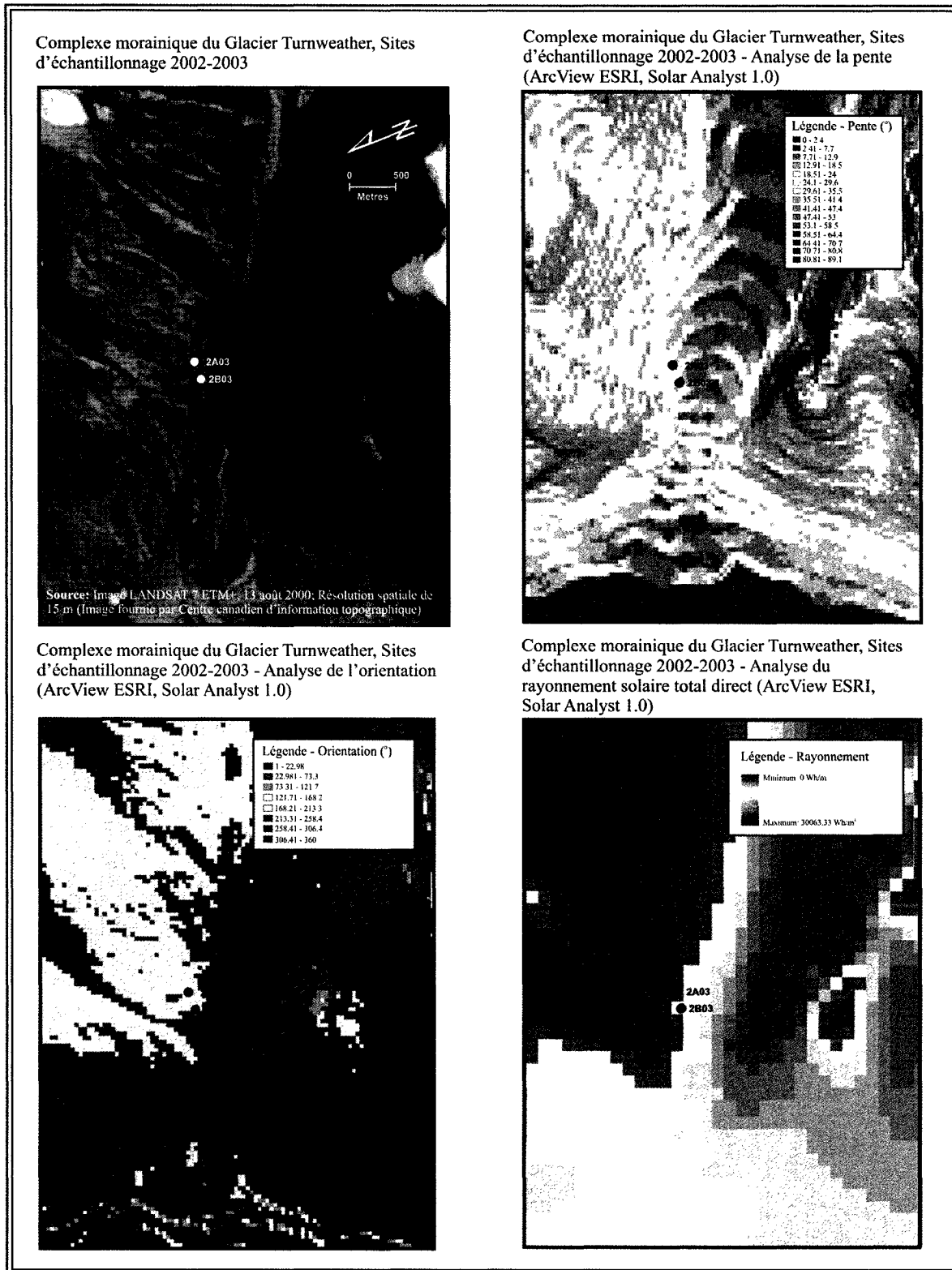


Figure 6.7: Caractéristiques des sites d'échantillonnage du complexe morainique du glacier Turnweather

7 LE GLACIER TÊTE DE CIRQUES

7.1 FLUCTUATIONS ACTUELLES

La morphologie du glacier Tête de Cirques est illustrée à la **Figure 7.5** et les caractéristiques de la pente, de la superficie, de l'orientation et du rayonnement solaire sont regroupées dans le **Tableau 5.1**. Les différentes positions du front glaciaire sont aussi illustrées pour les années 1948, 1960, 1977 et 2003. On note que le front a reculé approximativement de 569 m entre 1948 et 2003. Les fronts de 1960 et de 1977 sont toutefois situés plus ou moins au même endroit, soit à une distance de 229 et 224 m par rapport à la position du front en 2003. Suivant la tendance de retrait pour les autres années analysées, le front de 1977 est probablement situé entre les fronts de 1960 et 2003. Or, on observe que le front de 1977 est déplacé vers le nord. Ceci est occasionné par une mauvaise correction géométrique de la photographie aérienne A31157-19, car ce glacier était en bordure de la photographie. En observant la position des fronts entre 1960 et 2003, on note un retrait de 229 m. Ainsi, on peut affirmer que le front du glacier Tête de Cirques a connu un taux de retrait annuel moyen de 12.4 m par an entre 1948 et 2003.

Il est aussi possible d'examiner le taux de retrait entre chaque période de temps. Un taux de retrait moyen entre 1948 et 1960 a été estimé à 28.3 m/an. Par la suite, un taux de retrait annuel moyen entre 1960 et 1977 a été estimé à 0.3 m par an; entre 1977 et 2003, ce taux est de 8.6 m par an. Le taux de retrait et la distance entre les positions des fronts des différentes années sont regroupés dans le **Tableau 5.3**.

7.2 FLUCTUATIONS MODERNES

7.2.1 Mesures lichénométriques et pourcentage de couverture des lichens

Les six sites d'échantillonnage lichénométriques mesurés sur le complexe morainique du glacier Tête de Cirques sont 1A02, 1B02, 1A03, 1B03, 1C03 et 1D03 (**Figure 7.1**). Les sites 1A03, 1A02, 1B02 et 1B03 sont localisés sur la moraine interne du complexe, tandis que les sites 1C03 et 1D03 sont sur la moraine frontale. La localisation de ces sites d'échantillonnage permet de comparer la technique lichénométrique de ce présent travail avec celle de Davis (1980).

Chacun des sites lichénométriques du glacier Tête de Cirques se caractérise par des tailles d'échantillonnage distinctes; 336 individus au 1A02, 254 individus au site 1B02, 932 individus au site 1A03, 649 individus au site 1B03, 508 individus au site 1C03 et 174 individus au site 1D03. La moyenne du diamètre des thalles de lichens pour chacun des sites est de 5.05, 4.95, 4.14, 3.37, 3.13 et

3.23 mm. Le diamètre minimal mesuré à l'intérieur de chacun de ces sites d'échantillonnage a été de 1 mm, à l'exception du site 1A03 (1.2 mm). Le diamètre maximal mesuré à l'intérieur de ces mêmes sites est de 16.4, 16.7, 14.8, 14.5, 14.5 et de 15.7 mm.

Les sites 1A02 et 1B02 et les sites 1A03 à 1D03 du complexe morainique du glacier Tête de Cirques possèdent les pourcentages de couverture des lichens suivants : 23 et 11 % pour les sites 1A02 et 1B02 et 10, 20, 8 et 11 % pour les sites 1A03 à 1D03. (**Figure 7.1**)

7.2.2 Caractéristiques des histogrammes des données brutes et des données transformées

La forme des histogrammes (**Figure 7.2**) de chacun des six sites d'échantillonnage du glacier Tête de Cirques est similaire. L'histogramme des sites 1A03, 1B03, 1C03 et 1D03 est étalé vers la droite; le coefficient d'asymétrie des sites est de 1.36, 1.45, 2.47 et de 2.02. L'histogramme des sites 1A02 et 1B02 se rapproche davantage d'une distribution normale et leur coefficient d'asymétrie est de 1.1 et 0.98. En ce qui concerne l'aplatissement des histogrammes, chacun des sites possède une forte concentration, à l'exception du site 1B02 qui est moins fortement concentré (coefficient d'aplatissement de 1.22). Les graphiques probabilité-probabilité illustrent ces observations qui indiquent que les distributions sont plus ou moins normales (**Figure 7.3**).

L'application d'une transformation logarithmique aux données des six sites d'échantillonnage sur le complexe morainique du glacier Tête de Cirques (1A02, 1B02, 1A03, 1B03, 1C03 et 1D03) montre que les distributions taille-fréquence présentent par la suite des formes considérées normales (**Figures 7.4 & 7.5**). La moyenne des six sites est de 0.65, 0.63, 0.56, 0.47, 0.44 et 0.42 mm (\log_{10}). Les coefficients d'asymétrie sont de -0.26, -0.36, 0.05, 0.16, 0.59 et 0.48, tandis que les coefficients d'aplatissement sont de -0.12, -0.16, -0.41, -0.52, 0.39 et -0.51 (Voir **Annexe 1** pour le tableau des statistiques des données transformées). La valeur d des résultats du test Kolmogorov-Smirnov indique que les distributions des données transformées présentent des distributions normales. (**Annexe 2**)

7.2.3 Analyse de variance et comparaisons *a posteriori*

L'analyse de variance entre les sites 1A02, 1B02, 1A03, 1B03, 1C03 et 1D03 montre qu'il y a au moins deux échantillons qui sont statistiquement différents. La valeur F est de 68.39 et le F critique est de 3.02. La valeur- P , étant de 1.09^E-67 , indique que l'hypothèse H_0 est rejetée et que l'hypothèse H_1 est acceptée (**Annexe 3**).

Les comparaisons multiples entre ces échantillons permettent d'affirmer que les sites suivants ne possèdent pas de différences significatives : 1A02 et 1B02; 1B03 et 1C03; 1D03 et 1B03; 1C03 et 1D03. La **Figure 7.1** montre ces regroupements.

7.2.4 Chronologie de l'âge des moraines

La chronologie du front du glacier Tête de Cirques (**Figure 7.6**), basée sur la lichénométrie, est la suivante. La moraine frontale, où se situent les sites d'échantillonnage 1C03 et 1D03, s'est stabilisée entre l'an 1846 et 1854 et entre l'an 1854 et 1867. Même si ces deux sites sont situés sur la même moraine, on note que la section de la moraine située au site 1C03 est légèrement plus âgée que la section du site 1D03. De plus, le diamètre des thalles de lichens noté par Davis (1980) correspond aux mesures des thalles de cette présente recherche. Par la suite, la moraine interne, où sont localisés quatre sites d'échantillonnage, s'est stabilisée approximativement durant la même période de temps que la moraine frontale. Ceci n'est pas vraiment raisonnable puisque logiquement, cette moraine interne aurait dû être déposée plus récemment que la moraine frontale. Les années de stabilisation pour les sites 1A02, 1A03, 1B02 et 1B03 sont entre l'an 1845 et 1851, 1839 et 1842, 1844 et 1851 et entre l'an 1853 et 1866. La moraine interne se serait donc déposée entre l'an 1839 et 1866. On note que le site 1C03 est similaire aux sites de la moraine interne, à l'exception du site 1B03 qui correspond davantage au site 1D03.

7.2.5 Variations environnementales affectant la logique de la chronologie des moraines

L'analyse de variance et les comparaisons multiples des sites lichénométriques situés sur la moraine frontale et interne du glacier Tête de Cirques indiquent que les sites 1B03, 1C03 et 1D03 sont statistiquement semblables, ainsi que les sites 1A02 et 1B02. Ces deux groupes suggèrent des âges comparables pour la déposition des moraines, soit entre 1846 et 1867 (1B03 et 1D03), et entre 1844 et 1851 (1A02, 1A03, 1B02 et 1C03). Le site 1A03 possède un âge entre 1839 et 1842. Il est un peu plus jeune que les sites 1A02 et 1B02. Bref, la moraine frontale possède un âge plus ou moins équivalent à celui de la moraine interne même si l'étendue des âges montre que la moraine frontale est légèrement plus âgée. Toutefois, la moraine frontale devrait se démarquer davantage selon un âge plus ancien et l'âge du site 1C03 devrait correspondre davantage avec l'âge du site 1D03.

Les sites du complexe morainique du glacier Tête de Cirques possèdent approximativement les mêmes caractéristiques, en ce qui concerne le rayonnement solaire, la pente et l'orientation (**Tableau 7.1 & Figure 7.7**). La pente de ces sites se situe entre 0° et 2.4°, à l'exception du site 1C03 qui se

trouve sur une pente entre 13° et 18.5°. L'orientation de ces pentes est vers le nord pour les sites 1A03 et 1A02, vers le sud-est pour les sites 1B02 et 1B03, vers l'ouest pour le site 1D03 et vers le sud-ouest pour le site 1C03. En ce qui concerne les résultats du test-*t* dans le but de vérifier si l'orientation du site d'échantillonnage a un impact sur la dynamique de croissance des lichens, il semble que ce facteur ne possède pas d'influence à l'échelle de notre étude. L'hypothèse principale H0 ayant été acceptée pour la comparaison des sites NE-1A03 et SW-1A03, il n'y a pas de différences significatives entre la moyenne des deux quadrants du site 1A03 (**Annexe 4**).

Tableau 7.1: Caractéristiques des sites d'échantillonnage du complexe morainique du glacier Tête de Cirques

| Site | Glacier | Coordonnées géographiques Latitude, Longitude (NAD 83) | Aire des sites (m ²) | Altitude (m) | Rayonnement solaire direct total (moyenne annuelle Wh/m ²) | Orientation de la moraine |
|------|-----------------|---|----------------------------------|--------------|---|---------------------------|
| 1A02 | Tête de Cirques | 66°26'51"N, 65°28'10"W | 200 | 80 | 12 536 | Ouest |
| 1B02 | Tête de Cirques | 66°26'46"N, 65°27'50"W | 1600 | 74 | 12 804 | Nord-ouest |
| 1A03 | Tête de Cirques | 66°26'48"N, 65°27'43"W | 100 | 81 | 11 973 | Ouest |
| 1B03 | Tête de Cirques | 66°26'54"N, 65°28'13"W | 100 | 77 | 12 670 | Nord |
| 1C03 | Tête de Cirques | 66°26'50"N, 65°28'24"W | 100 | 80 | 13 360 | Sud |
| 1D03 | Tête de Cirques | 66°26'58"N, 65°28'20"W | 100 | 83 | 21 533 | Ouest |

Tableau 7.2: Caractéristiques des sites d'emplacement des instruments d'enregistrement – Glacier Tête de Cirques

| Numéro de l'instrument | Glacier | Coordonnées géographiques (Latitude, Longitude) | Altitude (m) | Rayonnement solaire direct total (moyenne annuelle Wh/m ²) |
|------------------------|-----------------|--|--------------|---|
| 1 | Tête de Cirques | 66°26'63.5"N 65°27'96"W | 81 | 12608 |
| 2 | Tête de Cirques | 66°26'51.9"N 65°28'24.4"W | 81 | 13126 |
| 3 | Tête de Cirques | 66°26'38.8"N 65°28'26.2"W | 40 | 11805 |
| 4 | Tête de Cirques | 66°26'46.4"N 65°27'50"W | 80 | 11973 |

On note que le rayonnement solaire direct total pour les sites du complexe morainique du glacier Tête de Cirques est comparable pour tous les sites. Il est entre 11 970 et 13 360 Wh/m². Le site 1C03 est celui qui perçoit le plus de rayonnement solaire, tandis que le site 1A03 est celui qui en perçoit le moins. En ajout, voyons les mesures de la température sur le complexe morainique du glacier Tête de Cirques (**Figures 7.8 & 7.9; Tableau 7.2**). Les stations 1 et 3 sont localisées sur la moraine externe du côté sud du complexe. La moyenne de la température (8.59 et 8.89°C) est similaire pour ces deux emplacements, ainsi que le montant du rayonnement solaire (12 608 et 11 805 Wh/m²) et les écarts thermiques (15.3 et 17.16°C). Les stations 2 et 4 sont localisées à l'intérieur du complexe. La température moyenne de la station 2 (10.14°C) est plus élevée, comparativement à la station 4 (8.58°C), car cette station est protégée par la crête de la moraine externe. En ce qui concerne le facteur du rayonnement solaire direct total, celui-ci semble influencer la température des stations. Le rayonnement le plus élevé est associé à la température la plus élevée (station 2) et vice-versa (stations 1, 3 et 4). On conclut qu'il existe une petite variation de la température sur le complexe morainique

du glacier Tête de Cirques, même en l'absence d'une influence altitudinale. Cependant, il semble que le rayonnement solaire, la pente et l'orientation ne sont pas des facteurs qui fournissent une explication concernant les âges similaires de la moraine interne et frontale. Toutefois, on peut soutenir que les sites 1C03 et 1D03 possèdent un âge inférieur plutôt que supérieur, puisqu'ils sont exposés davantage que les autres sites situés à l'intérieur du complexe morainique, ceci étant démontré par la variation thermique. L'exposition au vent, la disponibilité de l'humidité et les microclimats sont d'autres facteurs environnementaux qui devraient être pris en considération pour l'analyse lichénométrique et la compréhension de la dynamique de la population des lichens étudiés.

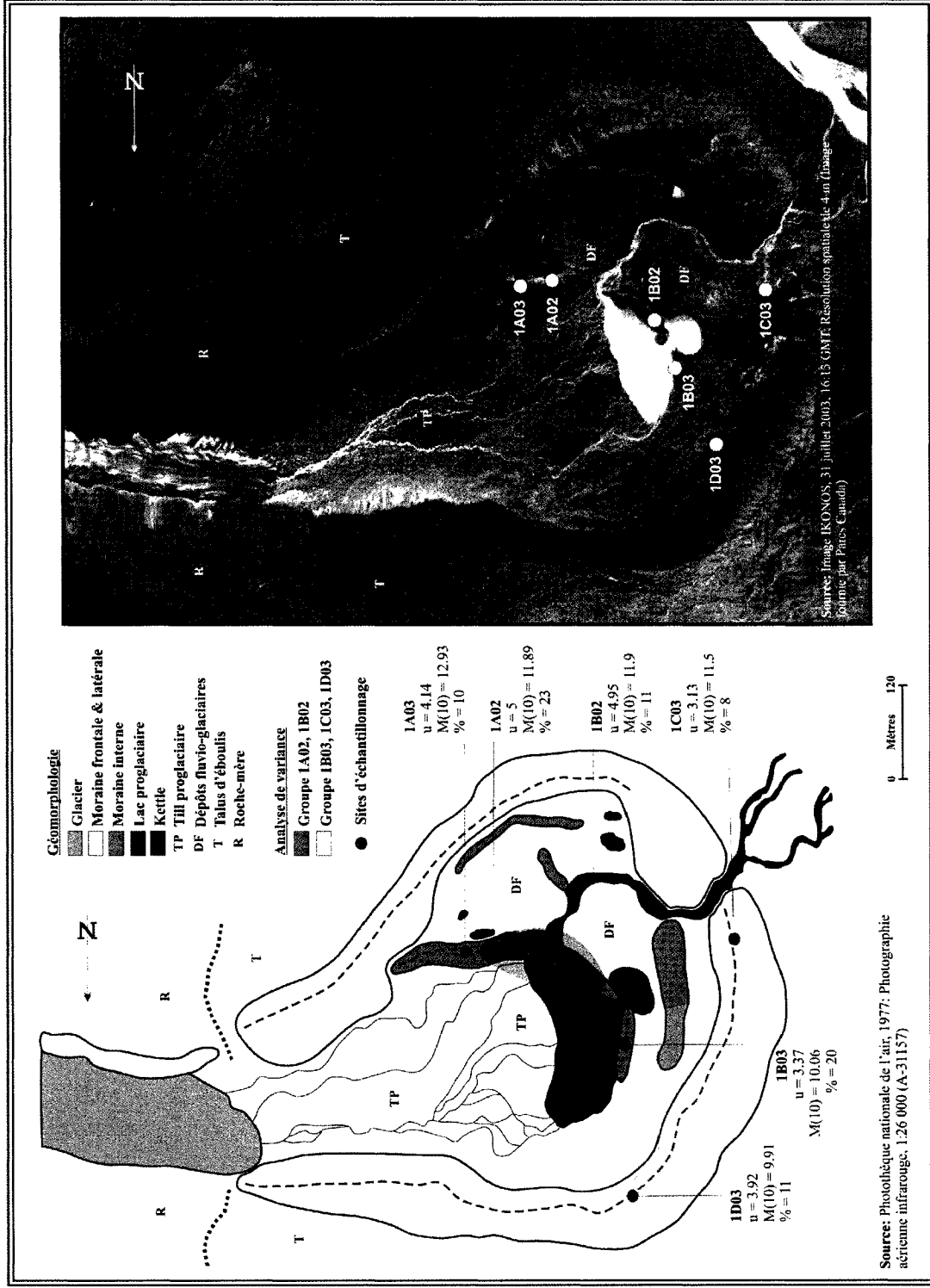


Figure 7.1: Localisation des sites d'échantillonnage et paramètres statistiques du complexe morainique du glacier Tête de Cirques

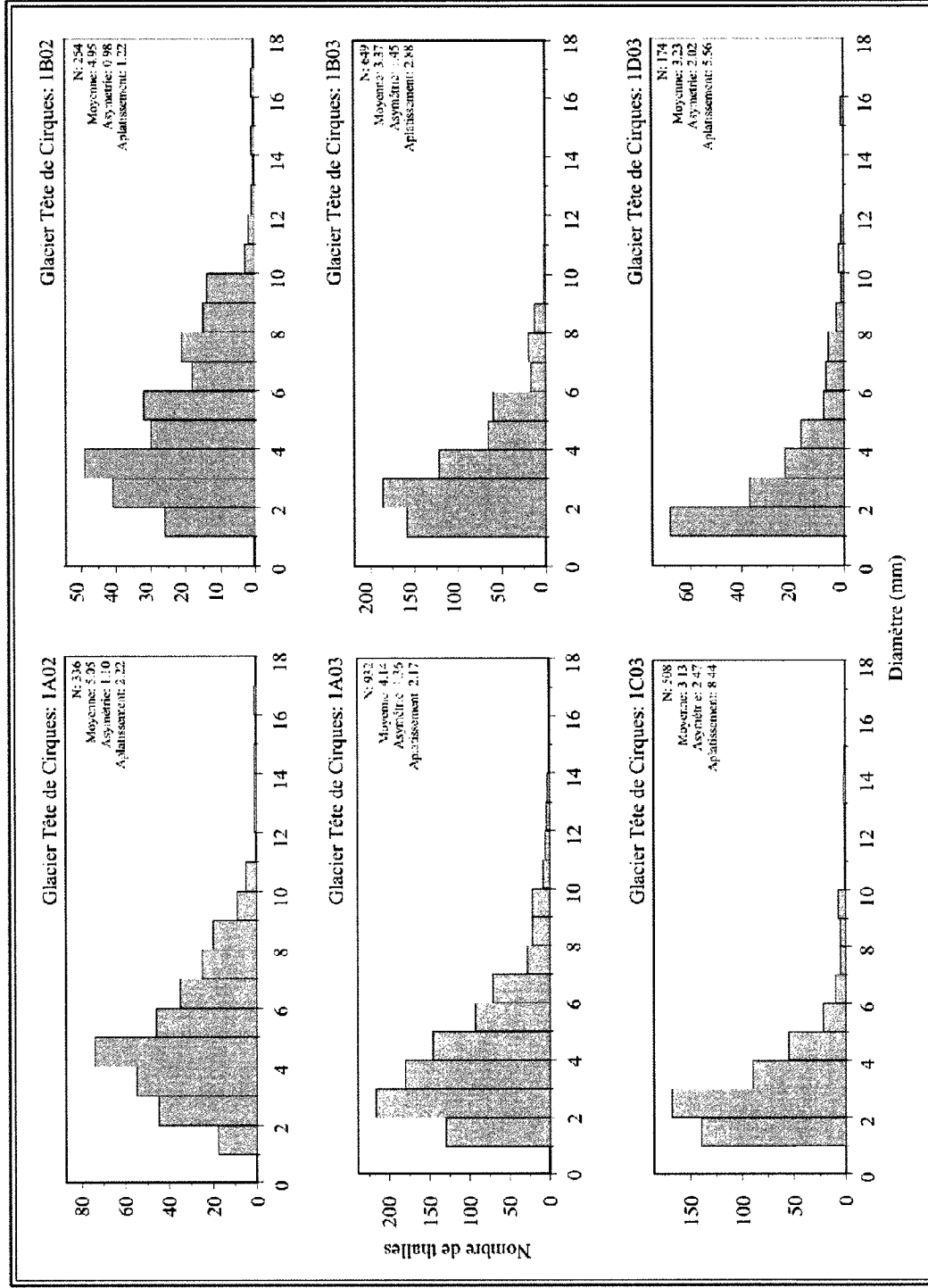


Figure 7.2: Histogrammes de la distribution taille-fréquence des données brutes du glacier Tête de Cirques

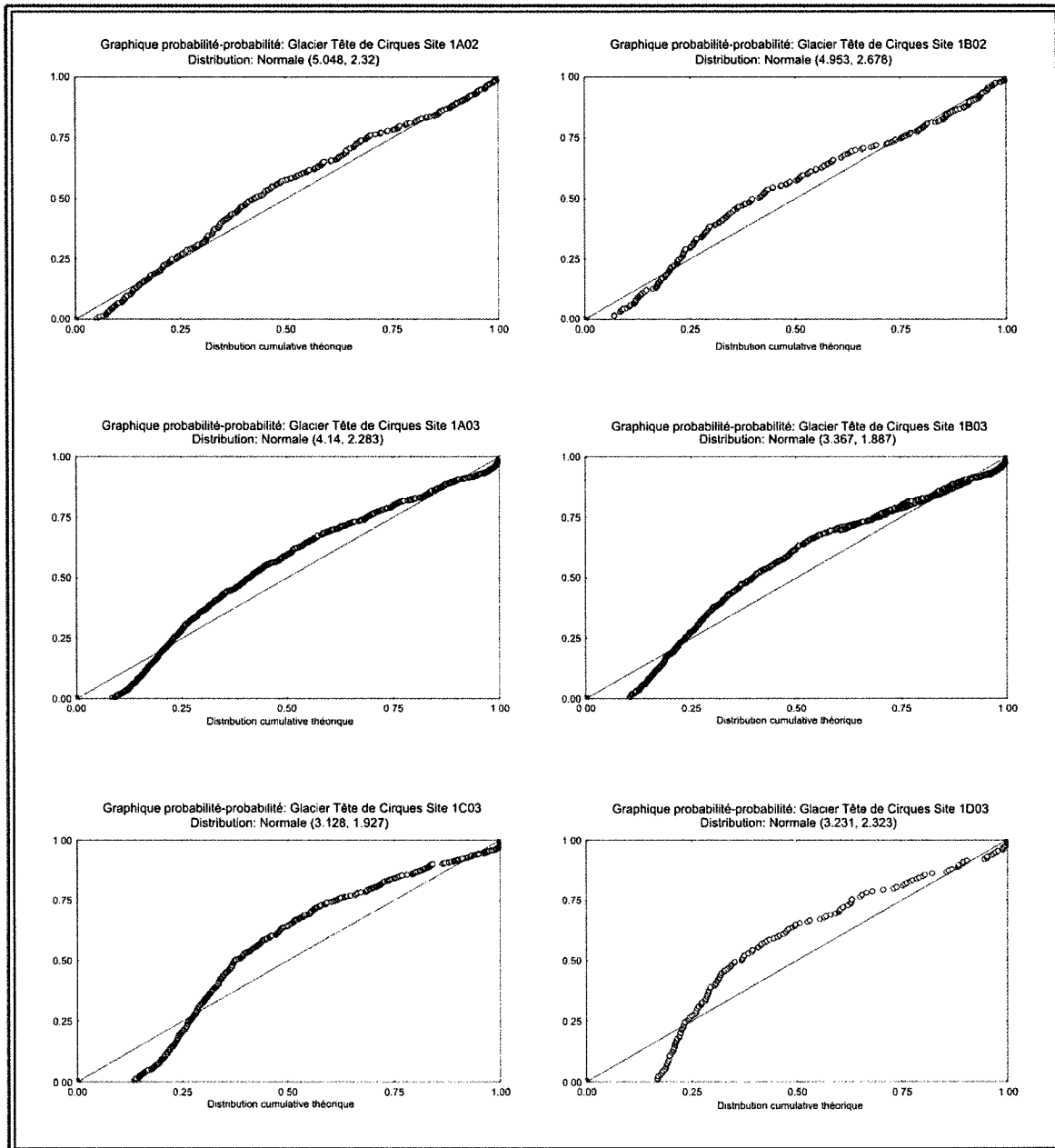


Figure 7.3: Graphique probabilité-probabilité des données brutes du glacier Tête de Cirques

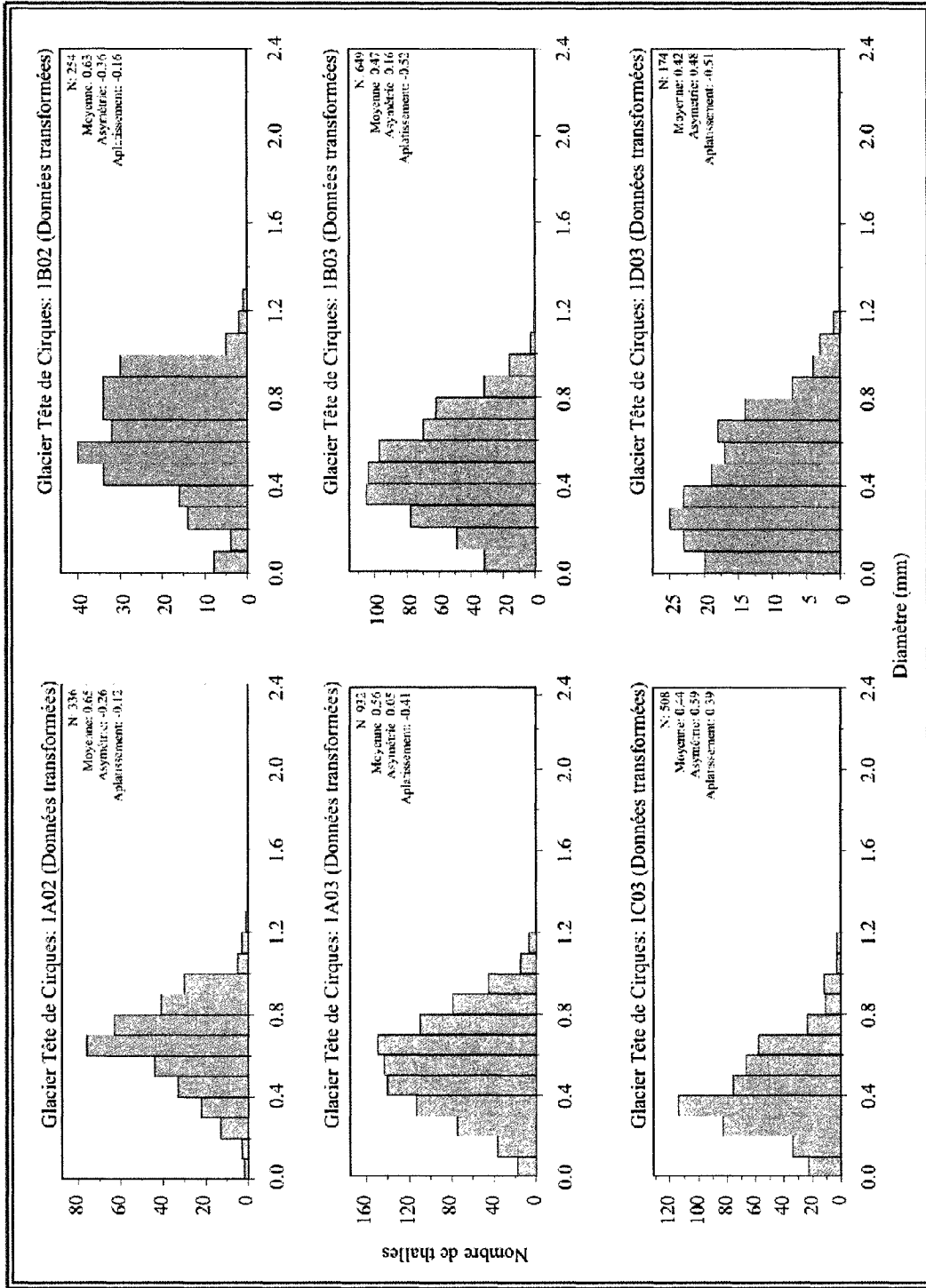


Figure 7.4: Histogrammes de la distribution taille-fréquence des données transformées du glacier Tête de Cirques

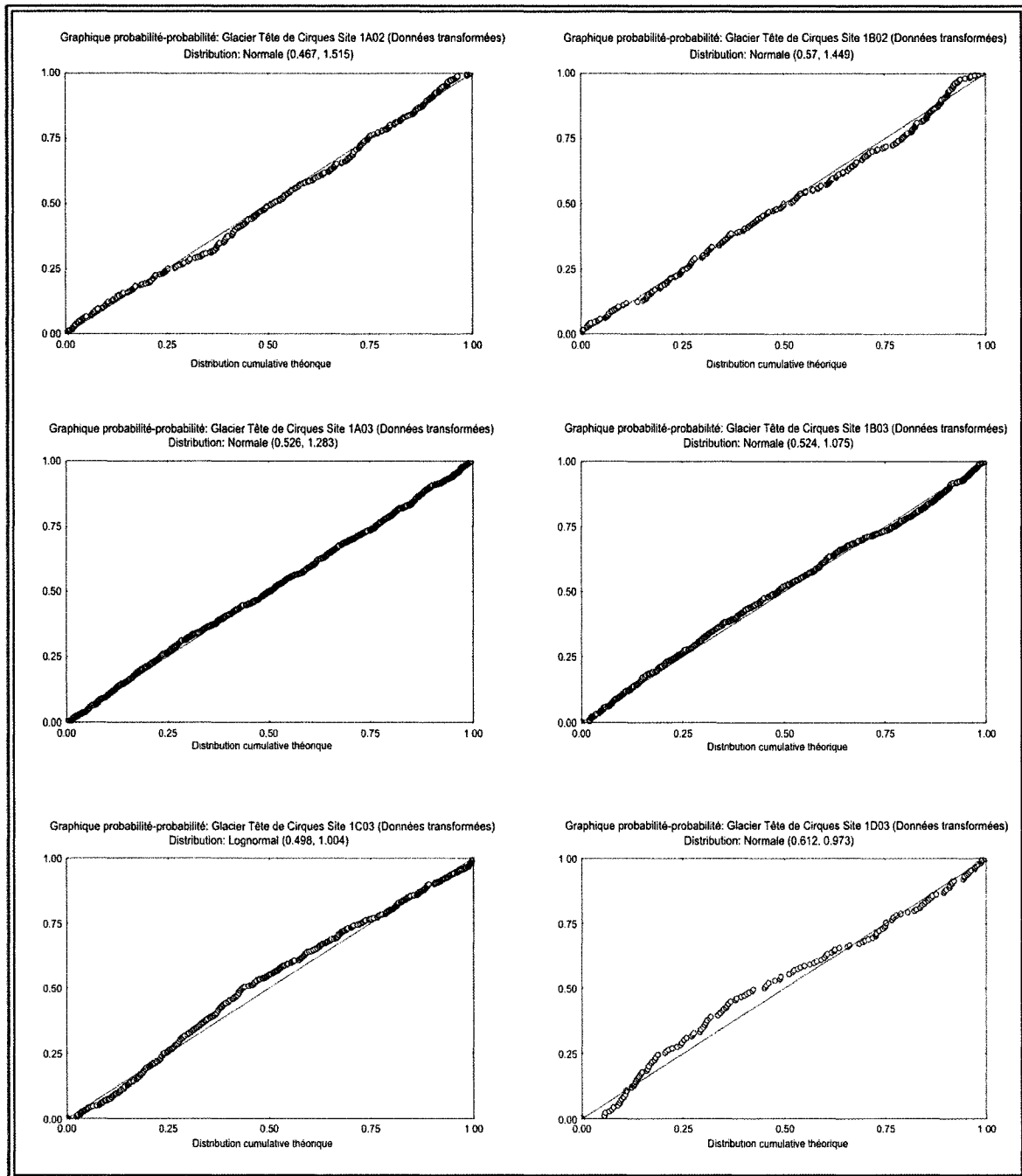


Figure 7.5: Graphique probabilité-probabilité des données transformées du glacier Tête de Cirques

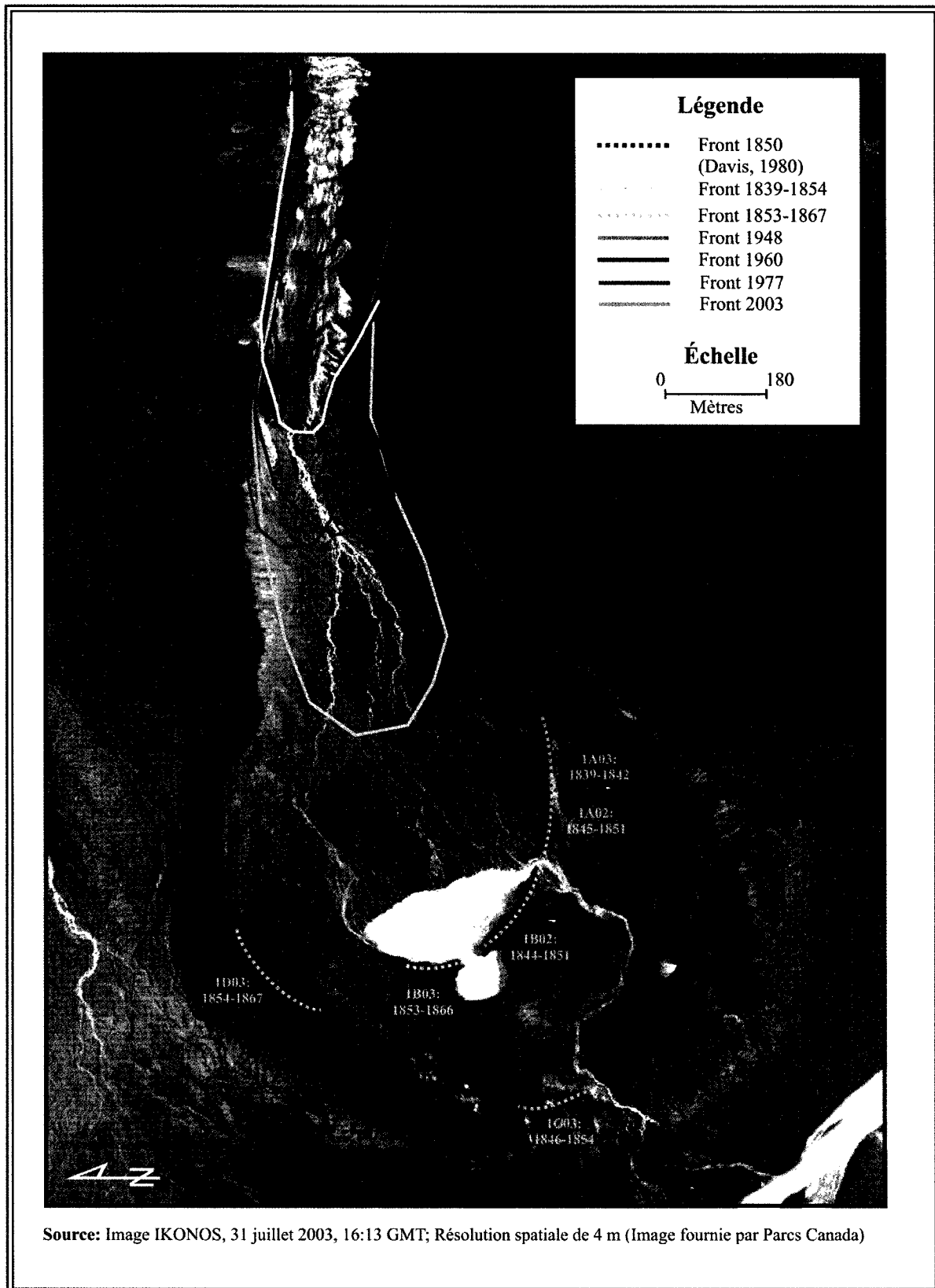


Figure 7.6: Age des moraines étudiées du glacier Tête de Cirques

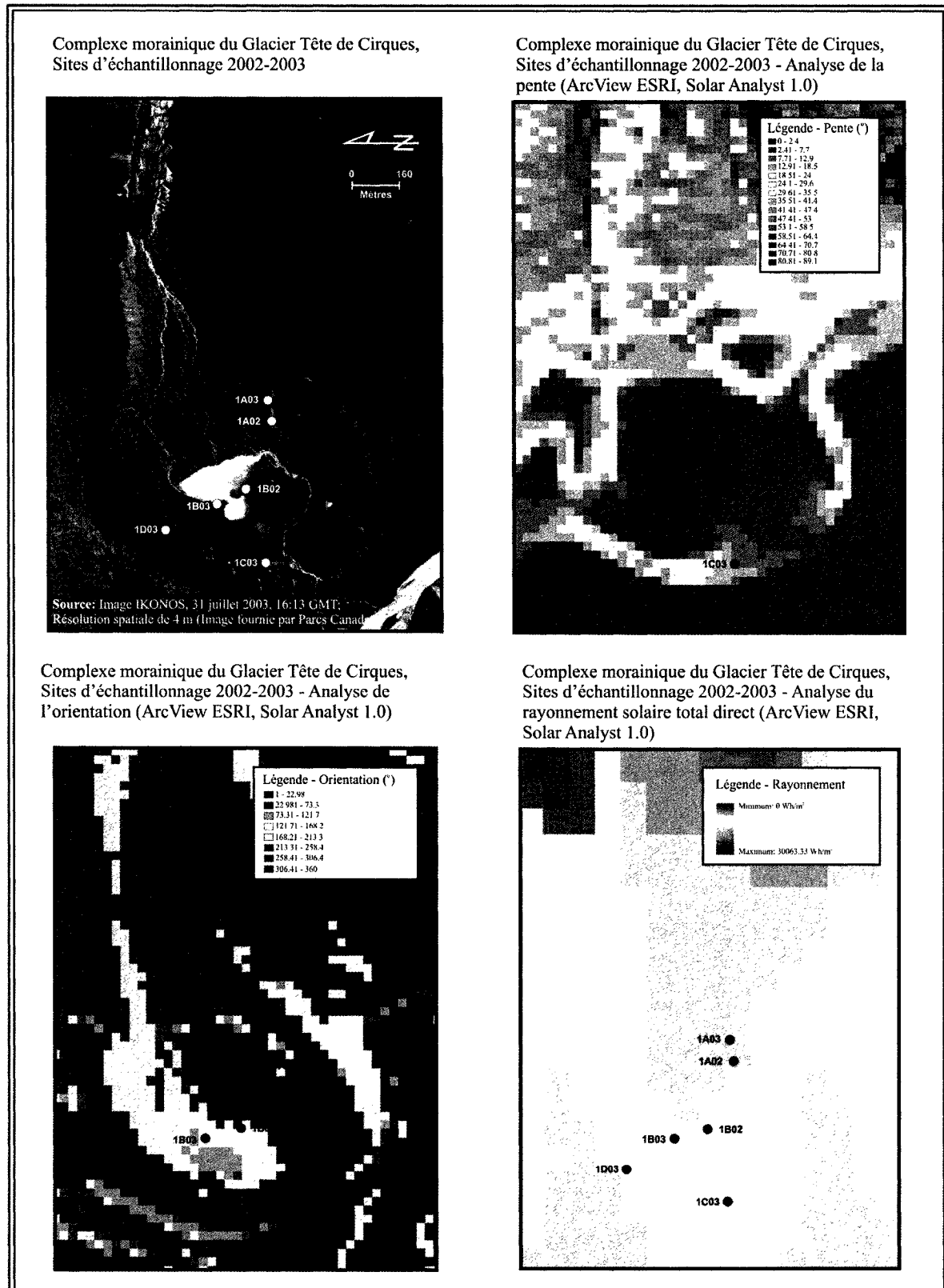


Figure 7.7: Caractéristiques des sites d'échantillonnage du complexe morainique du glacier Tête de Cirques

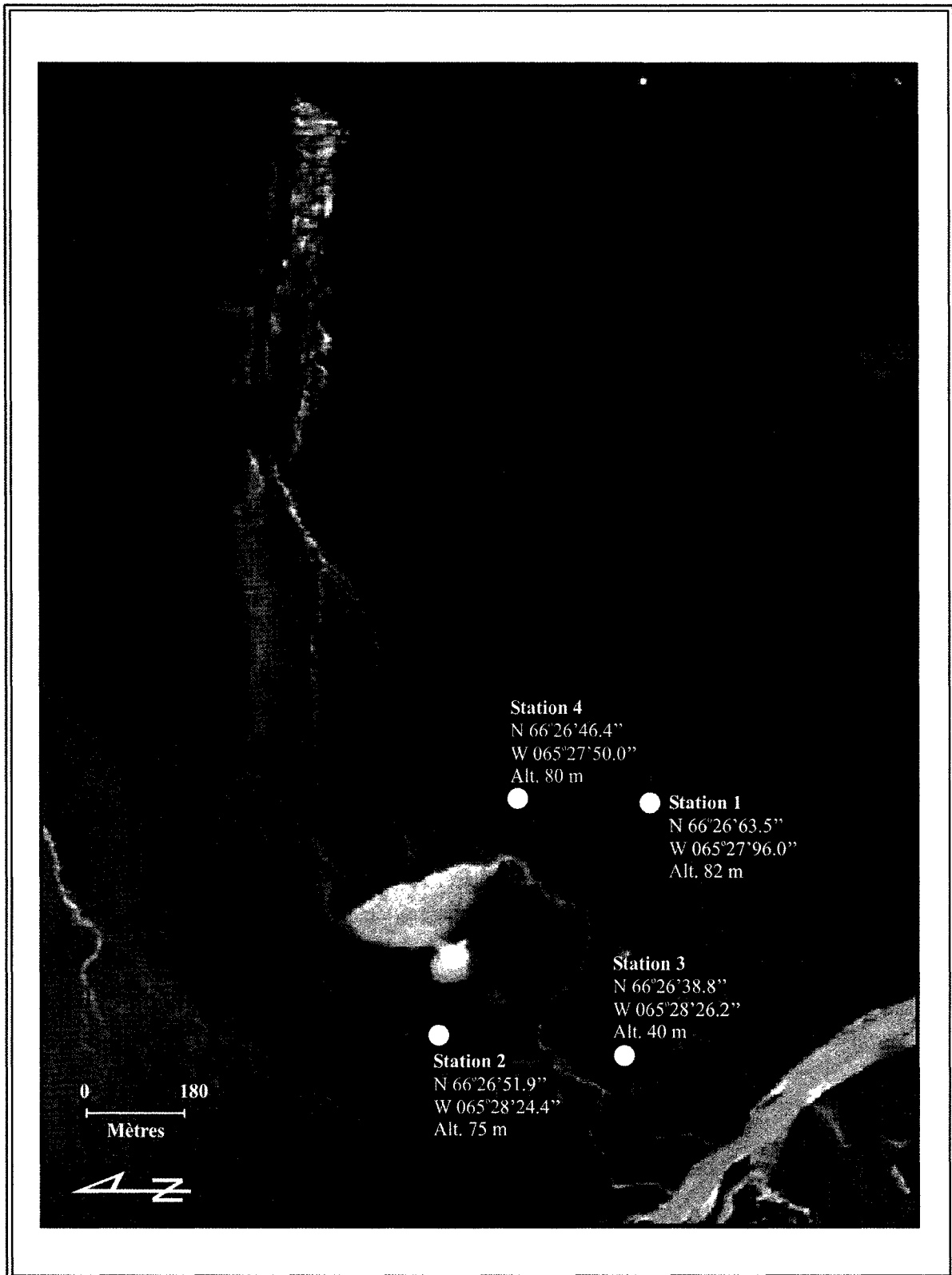


Figure 7.8: Localisation des instruments d'enregistrement de la température sur le complexe morainique du glacier Tête de Cirques

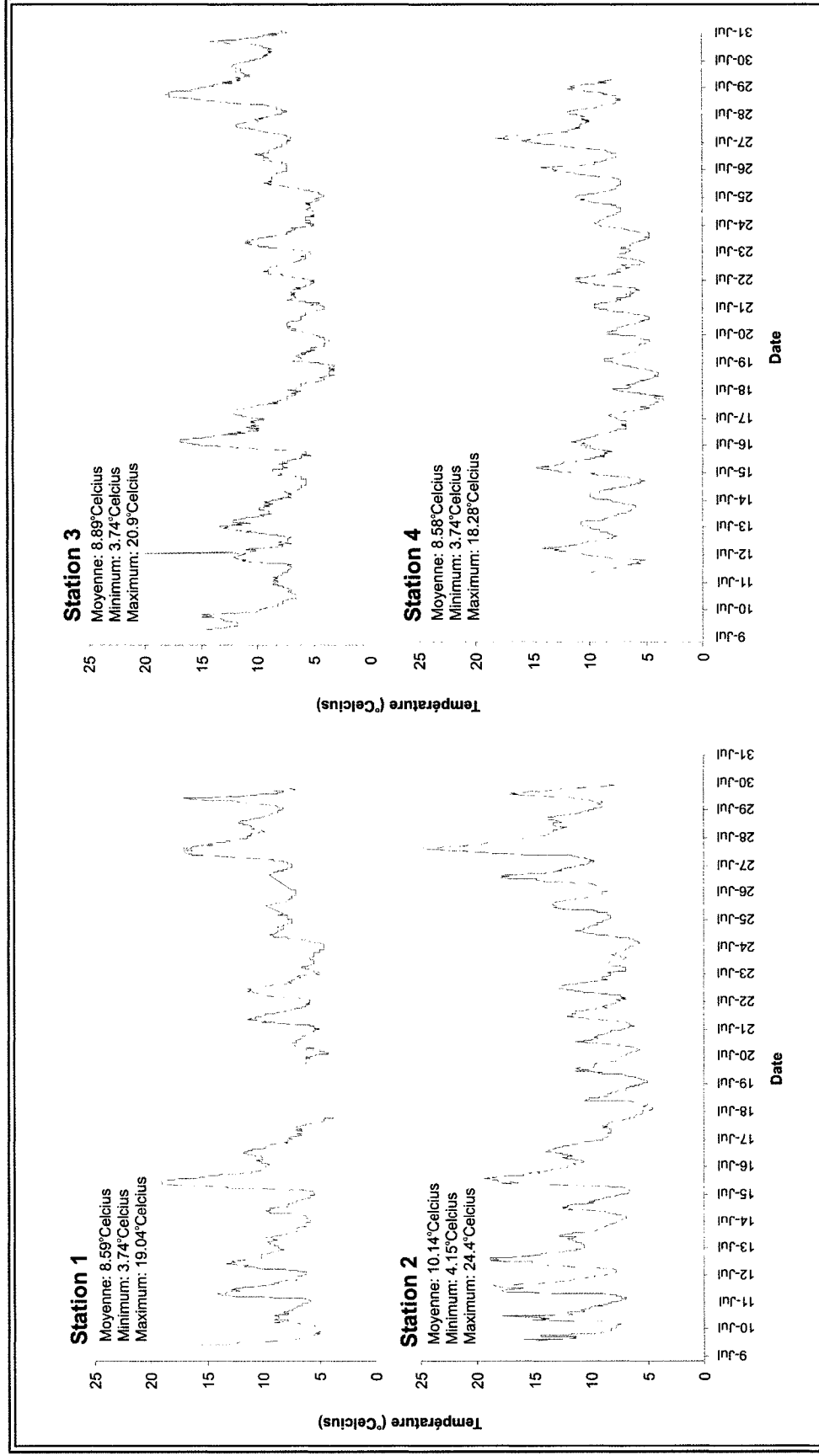


Figure 7.9: Données de température enregistrées sur le complexe morainique du glacier Tête de Cirques (Juillet 2002)

8 LE GLACIER 12

8.1 FLUCTUATIONS ACTUELLES

La morphologie du Glacier 12 est illustrée par la **Figure 8.1**. On y observe aussi la position des fronts glaciaires des années 1948, 1960, 1977 et 2003. Ce glacier a connu de grandes fluctuations entre 1948 et 2003. Approximativement 1078 m séparent les positions des fronts de 1948 et 2003; 1051 m entre les positions des fronts de 1960 et 2003; et 594 m entre les positions des fronts de 1977 et 2003. Un taux de retrait moyen annuel pour chacune des périodes de temps a été estimé. Entre 1948 et 1960, le front du glacier 12 est caractérisé par un taux de retrait annuel moyen de 2.3 m par an. Entre 1960 et 1977, ce même front connût un taux de 26.7 m par an et entre 1977 et 2003, un taux de 23 m par an a été mesuré. Un taux de retrait annuel moyen de 17.3 m a été calculé.

8.2 FLUCTUATIONS MODERNES

8.2.1 Mesures lichénométriques et pourcentage de couverture des lichens

Huit sites d'échantillonnage lichénométriques ont été étudiés sur les moraines latérales du Glacier 12. Les sites 7A02 à 7D02 se situent sur la moraine latérale du sud, en ordre du moins élevé au plus élevé en altitude; les sites 6A03 à 6D03 sont localisés sur la moraine latérale du nord, en ordre du plus élevé au moins élevé en altitude (**Figure 8.1**).

En débutant par les sites d'échantillonnage de la moraine latérale du sud, on observe différentes moyennes du diamètre des thalles mesurés; 5.65 mm pour le site 7A02, 4.45 mm pour le site 7B02, 4.23 mm pour le site 7C02 et 4.37 mm le site 7D02. La moyenne est basée sur la taille des échantillons; 299 individus pour le site 7A02, 300 individus pour le site 7B02, 295 individus pour le site 7C02 et 300 individus pour le site 7D02. Les thalles minimaux mesurés sont de 1.2, 1, 1 et 1.1 mm et les thalles maximaux sont de 21.8, 17.8, 18.8 et 17 mm.

En ce qui concerne les sites d'échantillonnage de la moraine latérale du nord, la moyenne des diamètres des thalles mesurés est de 2.94, 4.04, 2.97 et 2.78 mm pour les sites 6D03 à 6A03. Ces moyennes sont basées sur des échantillons de 831, 912, 995 et 1016 individus. Les thalles minimaux mesurés sont tous de 1 mm et les thalles maximaux sont de 18.3, 21.9, 14 et 13.1 mm.

Les sites 7A02 à 7D02 de la moraine latérale sud du complexe morainique du Glacier 12 sont caractérisés par les pourcentages suivants : 36, 33, 27 et 29 %. Les sites 6A03 à 6D03, situés sur la

moraine latérale nord du complexe morainique du Glacier 12, possèdent des pourcentages de couverture de 31, 15, 19 et 19 %. (**Figure 8.1**)

8.2.2 Caractéristiques des histogrammes des données brutes et des données transformées

La forme des histogrammes est similaire pour tous les sites (**Figure 8.2**). Les sites d'échantillonnage sont caractérisés par des distributions taille-fréquence étalées vers la droite; le coefficient d'asymétrie est de 1.92, 1.66, 1.58 et de 1.81 pour les sites 7A02 à 7D02 et de 2.62, 2.06, 1.86 et de 3.04 pour les sites 6A03 à 6D03. Les sites 7A02 à 7D02 possèdent une forte concentration et leur coefficient d'aplatissement est de 3.88, 2.8, 3.58 et 4. Les sites 6A03 à 6D03 sont caractérisés par les coefficients d'aplatissement suivants : 9.29, 4.93, 4.45 et 13.27. Les histogrammes sont eux aussi fortement concentrés. Les graphiques probabilité-probabilité confirment que les valeurs des sites d'échantillonnage ne représentent pas des distributions normales (**Figure 8.3**).

Les sites 7A02 à 7D02, situés sur la moraine latérale du sud, démontrent après transformations logarithmiques que les distributions taille-fréquence correspondent à des distributions normales. La moyenne des sites 7A02 à 7D02 est de 0.39, 0.4, 0.51 et 0.4 mm (\log_{10}). Le coefficient d'asymétrie est de 0.79, 1.77, 0.36 et 0.78 et le coefficient d'aplatissement est de 0.61, 13.13, -0.66 et 0.73

Les sites 6A03 à 6D03 localisés sur la moraine latérale du nord illustrent après la transformation des données appartenant à des distributions normales, d'après les histogrammes taille-fréquence (**Figure 8.4**) et les graphiques probabilité-probabilité (**Figure 8.5**). La moyenne des sites est de 0.67, 0.56, 0.56 et 0.57 mm (\log_{10}). Le coefficient d'asymétrie est de 0.44, 0.39, 0.26 et 0.32 et le coefficient d'aplatissement est de -0.12, -0.54, -0.63 et -0.21 (Voir **Annexe 1** pour le tableau des statistiques des données transformées). D'après les résultats du test Kolmogorov-Smirnov, les sites 6A03 à 6D03 possèdent une distribution plus ou moins normale, tandis que les sites 7A02 à 7D02 possèdent une distribution normale. (Voir **Annexe 2**)

8.2.3 Analyse de variance et comparaisons *a posteriori*

Il existe au moins deux échantillons ayant des différences significatives et ce, entre les échantillons 6A03, 6B03, 6C03, 6D03, 7A02, 7B02, 7C02 et 7D02; la valeur F étant de 87.49 et le F critique étant de 2.64. La valeur $-P$, étant de 1.6^E-120 , indique que l'hypothèse H_0 est rejetée et que l'hypothèse H_1 est acceptée (**Annexe 3**). Les sites suivants ont été caractérisés comme n'ayant pas de différences significatives, suite à l'analyse de comparaisons multiples : 6B03 et 6A03; 6D03 et 6A03; 6D03 et 6B03; 7C02 et 6C03; 6C03 et 7D02; 7B02 et 6C03; 7C02 et 7B02; 7D03 et 7B02; 7C02 et

7D02. La **Figure 8.1** montre ces regroupements. Tous les autres sites possèdent des différences significatives.

8.2.4 Chronologie de l'âge des moraines

La position la plus ancienne du front du Glacier 12 (**Figure 8.6**), calculée selon la taille moyenne des dix plus gros thalles, est celle du site 7A02 située sur la moraine latérale sud (section frontale). La stabilisation de la section de cette moraine a eu lieu entre l'an 1789 et 1799. Par la suite, le front s'est retiré et les moraines latérales nord et sud, où se situent les sites 7B02 et 6D03, se sont stabilisées entre 1831 et 1835. L'âge associé au site 6C03 indique que la section de cette moraine est plus vieille (stabilisation de la moraine entre 1808 et 1815), tandis que cette stabilisation devrait être plus récente qu'à la section des sites 7B02 et 6D03. Finalement, les mesures des thalles de lichens des sites 7C02, 7D02 et 6B03 suggèrent que cette section des moraines latérales nord et sud s'est stabilisée il y a entre 1836 et 1852. En ajout, le site 6A03, situé à proximité du front de 1948 sur une moraine latérale, permet de penser que cette surface se serait stabilisée entre 1854 et 1852. Cette période de temps correspond à la stabilisation des moraines des sites 7C02, 7D02 et 6B03.

8.2.5 Variations environnementales affectant la logique de la chronologie des moraines

L'analyse de variance et les comparaisons multiples des sites d'échantillonnage du complexe morainique du Glacier 12 suggèrent que les groupes de sites suivants sont statistiquement semblables : (1) 6D03, 6B03 et 6A03, (2) 7B02, 7C02, 7D02 et 6C03, (3) 7B02, 7C02 et 7D02. La chronologie de la déposition des moraines latérales est cohérente, à l'exception du site 6C03 qui est plus âgé que les sites qui l'entourent. Mais cette différence n'est pas très nuancée. Les regroupements des sites selon les comparaisons multiples ne correspondent pas parfaitement aux groupes de sites caractérisés par des âges semblables.

Les caractéristiques environnementales (**Tableau 8.1**) ne semblent pas pouvoir expliquer la dynamique de l'échantillon de lichens du site 6C03, dont l'âge se distingue de la chronologie des moraines. De plus, les facteurs environnementaux suivants n'affectent pas la logique de la chronologie basée sur la dynamique des populations de lichens. En effet, la pente des sites se situe entre 2° et 27° et l'orientation de ces pentes est vers le sud, le sud-ouest et l'ouest (**Figure 8.7**). Le rayonnement solaire est similaire pour tous les sites à l'exception des sites 6B03 et 6A03, situés plus haut en altitude. En ce qui concerne la variation thermique sur le complexe morainique du Glacier 12, examinons les données des stations situées sur ce complexe (**Figure 8.8 & Tableau 8.2**). Les stations

66 à 70 sont localisées sur la moraine latérale sud, en ordre de la plus élevée à la moins élevée (altitude de 532 m à 145 m). On remarque que la température baisse légèrement avec l'élévation (**Figure 8.9**). Il en est de même pour les stations 71 à 75 localisées sur la moraine latérale nord (altitude de 692 m à 352 m). Le rayonnement solaire direct total est plus grand sur les stations plus élevées, et diminue pour les stations moins élevées. Ainsi, le rayonnement solaire direct total ne semble pas être le facteur déterminant de la température sur le complexe du Glacier 12. Ce facteur est plutôt influencé par l'altitude de l'emplacement des stations. On note toutefois que la diminution de la température avec l'élévation est plus ou moins représentatif du ratio de la température adiabatique de 0.6° Celsius par 100 m. Bref, il existe une variation de la température sur le complexe morainique du Glacier 12.

Dans le but de comprendre la situation de la chronologie du site 6B03 par rapport aux autres sites du complexe, un second échantillonnage devrait être effectué à proximité de ce site. De plus, l'exposition au vent, la disponibilité de l'humidité, la couverture de neige et les microclimats sont des facteurs qui devraient être pris en considération pour l'analyse lichénométrique.

Tableau 8.1: Caractéristiques des sites d'échantillonnage du complexe morainique du Glacier 12

| Site | Glacier | Coordonnées géographiques Latitude, Longitude (NAD 83) | Aire des sites (m ²) | Altitude (m) | Rayonnement solaire direct total (moyenne annuelle Wh/m ²) | Orientation de la moraine |
|------|------------|---|----------------------------------|--------------|---|---------------------------|
| 6A03 | Glacier 12 | 66°27'50"N, 65°26'25"W | 100 | 620 | 18 332 | Sud-ouest |
| 6B03 | Glacier 12 | 66°27'25"N, 65°27'28"W | 100 | 275 | 17 072 | Sud-ouest |
| 6C03 | Glacier 12 | 66°27'22"N, 65°27'48"W | 100 | 200 | 13 653 | Sud-ouest |
| 6D03 | Glacier 12 | 66°27'18"N, 65°27'59"W | 100 | 122 | 13 090 | Sud-ouest |
| 7A02 | Glacier 12 | 66°27'13"N, 65°28'03"W | 625 | 95 | 12 576 | Sud-ouest |
| 7B02 | Glacier 12 | 66°27'14"N, 65°26'25"W | 625 | 115 | 12 441 | Sud-ouest |
| 7C02 | Glacier 12 | 66°27'15"N, 65°27'46"W | 625 | 161 | 13 179 | Sud-ouest |
| 7D02 | Glacier 12 | 66°27'19"N, 65°27'37"W | 100 | 196 | 14 702 | Sud-ouest |

Tableau 8.2: Caractéristiques des sites d'emplacement des instruments d'enregistrement – Glacier 12

| Numéro de l'instrument | Glacier | Coordonnées géographiques (Latitude, Longitude) | Altitude (m) | Rayonnement solaire direct total (moyenne annuelle Wh/m ²) |
|------------------------|------------|--|--------------|---|
| 66 | Glacier 12 | 66°27'28"N 65°26'33"W | 532 | 11539 |
| 67 | Glacier 13 | 66°27'24"N 65°26'57"W | 440 | 11711 |
| 68 | Glacier 14 | 66°27'21"N 65°27'10"W | 352 | 11428 |
| 69 | Glacier 15 | 66°27'19"N 65°27'26"W | 240 | 14161 |
| 70 | Glacier 16 | 66°27'15"N 65°27'51"W | 145 | 13179 |
| 71 | Glacier 17 | 66°27'55"N 65°26'41"W | 692 | 19870 |
| 72 | Glacier 18 | 66°27'46"N 65°26'45"W | 595 | 18512 |
| 73 | Glacier 19 | 66°27'42"N 65°26'49"W | 548 | 18001 |
| 74 | Glacier 20 | 66°27'32"N 65°27'02"W | 445 | 17836 |
| 75 | Glacier 21 | 66°27'27"N 65°27'17"W | 352 | 17863 |

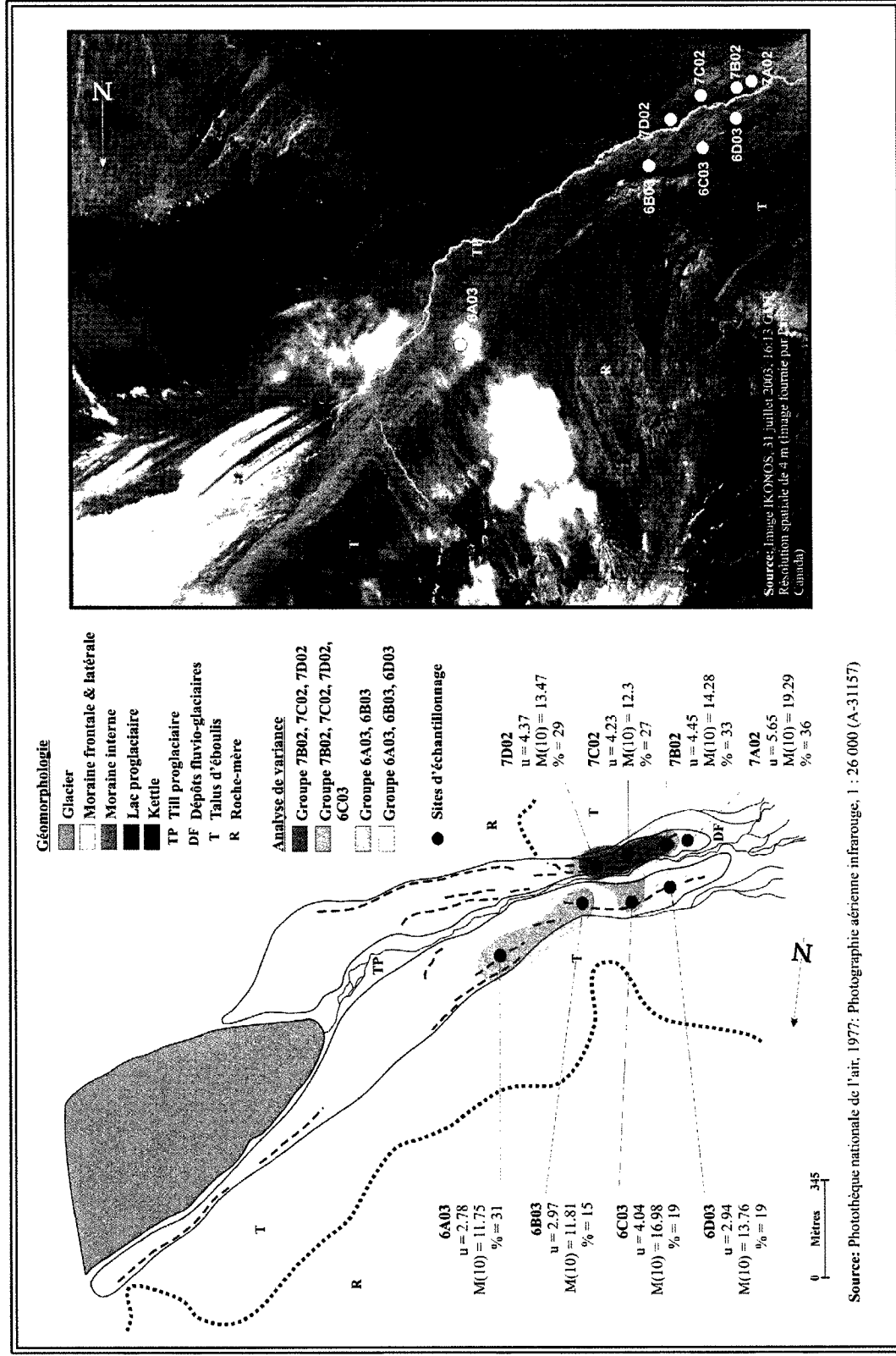


Figure 8.1: Localisation des sites d'échantillonnage et paramètres statistiques du complexe morainique du Glacier 12

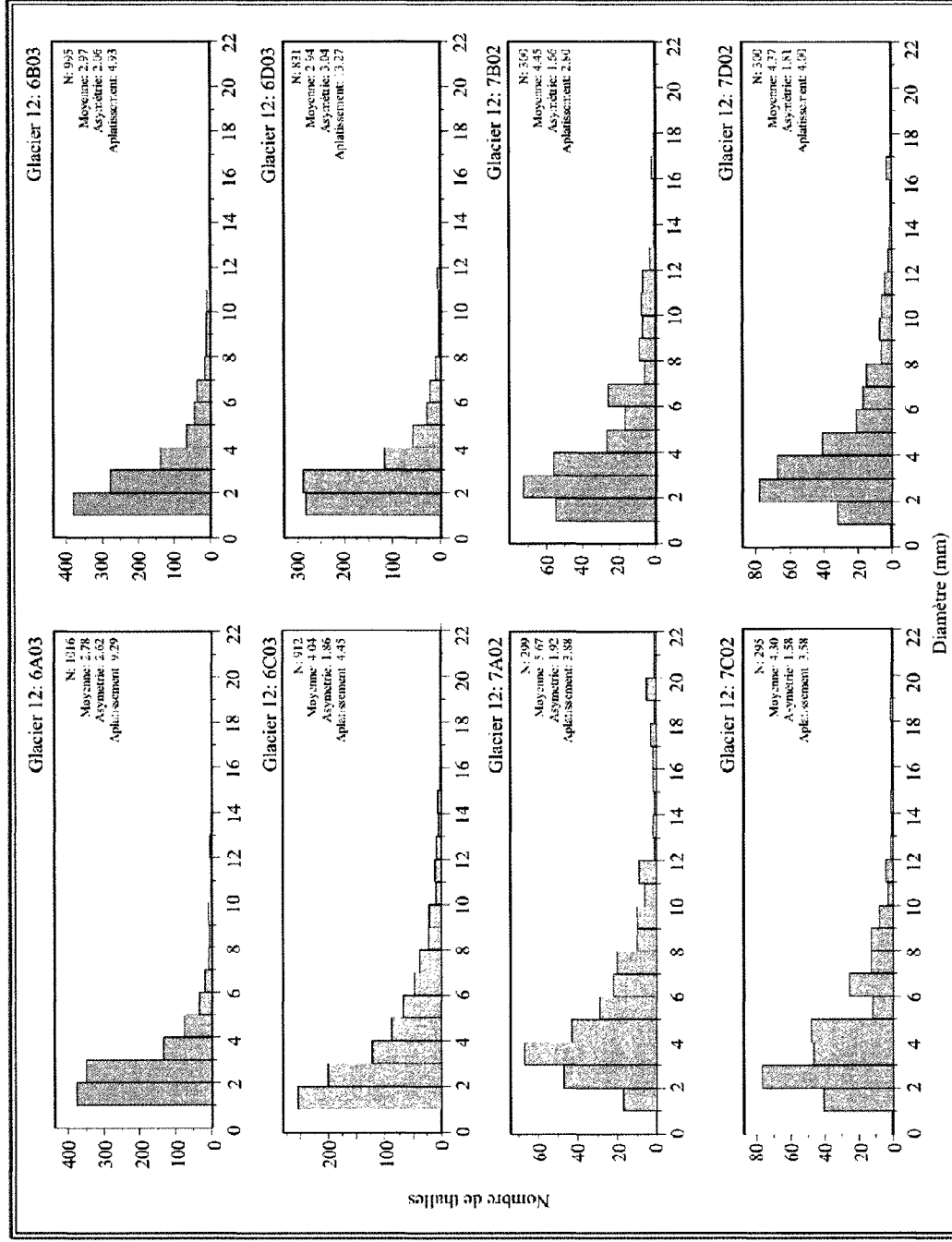


Figure 8.2: Histogrammes de la distribution taille-fréquence des données brutes du Glacier 12

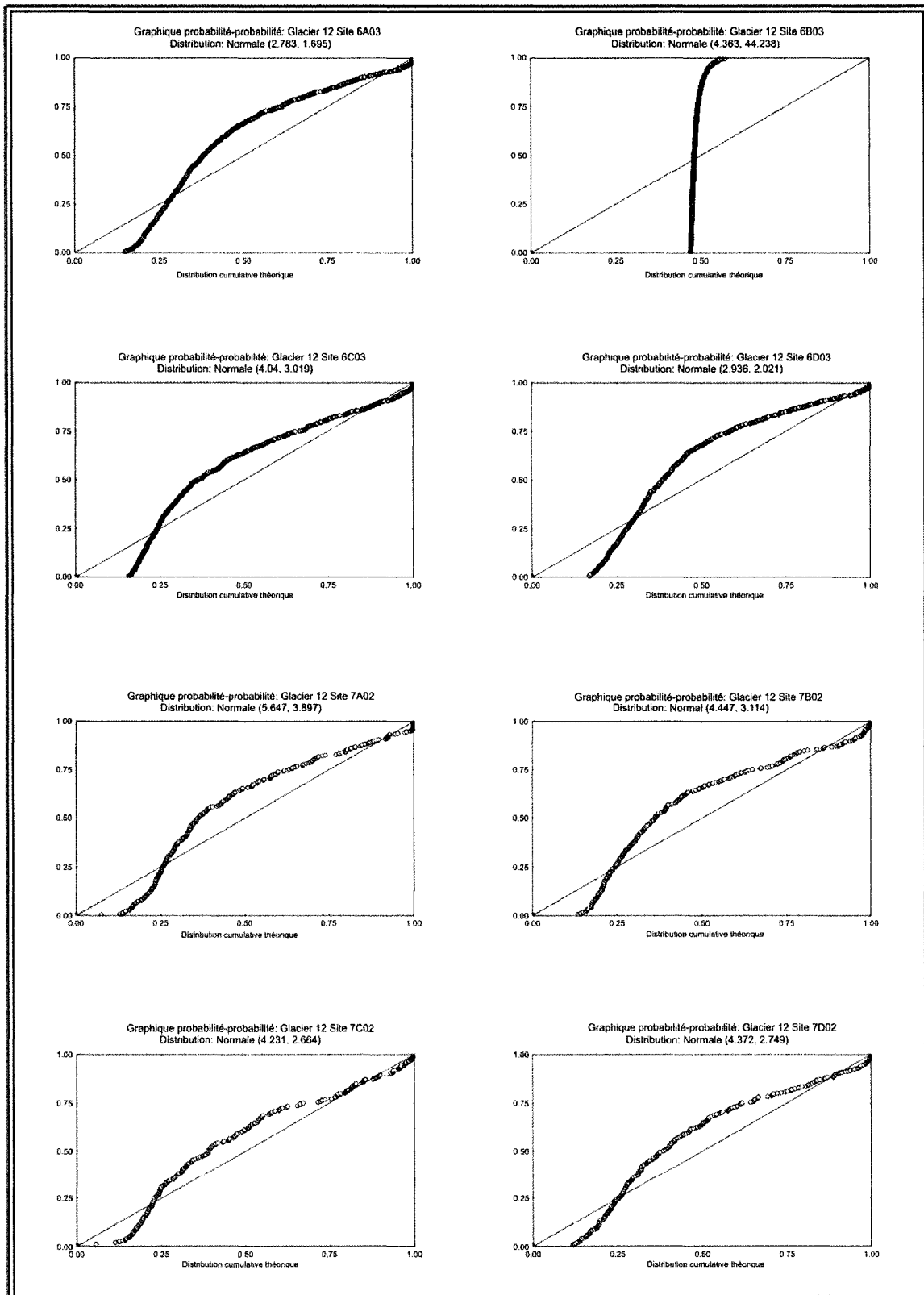


Figure 8.3: Graphique probabilité-probabilité des données brutes du Glacier 12

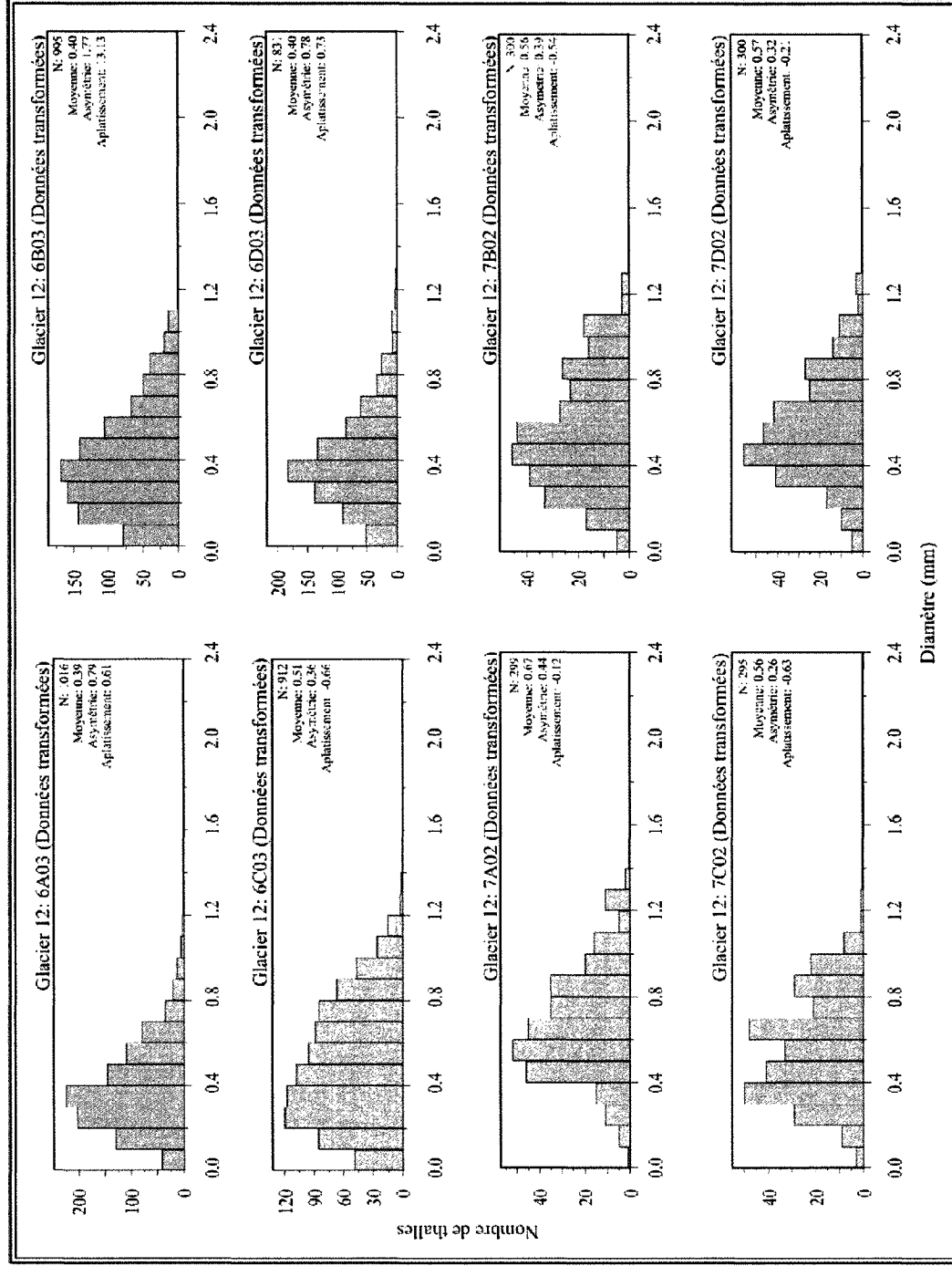


Figure 8.4: Histogrammes de la distribution taille-fréquence des données transformées du Glacier 12

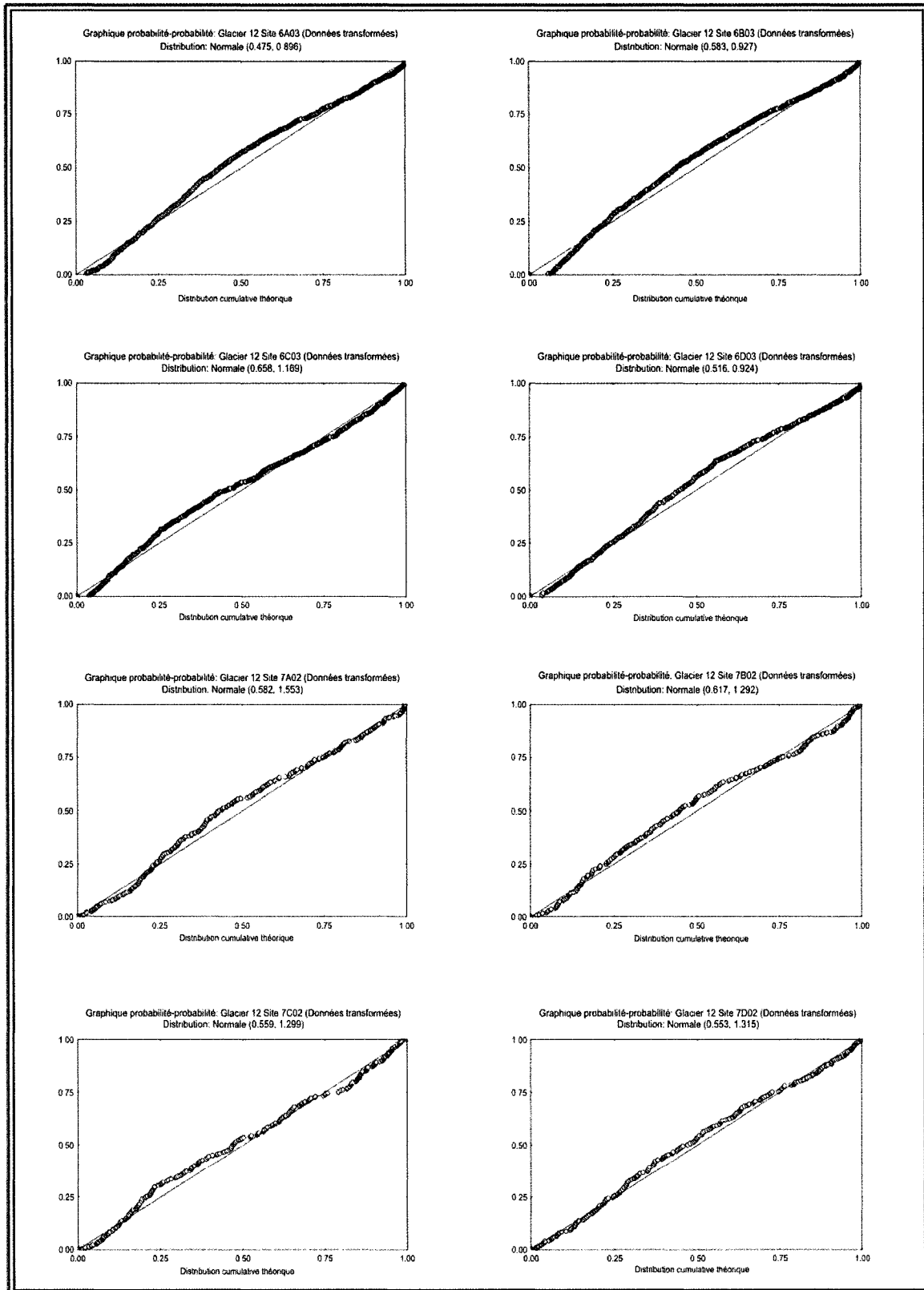


Figure 8.5: Graphique probabilité-probabilité des données transformées du Glacier 12

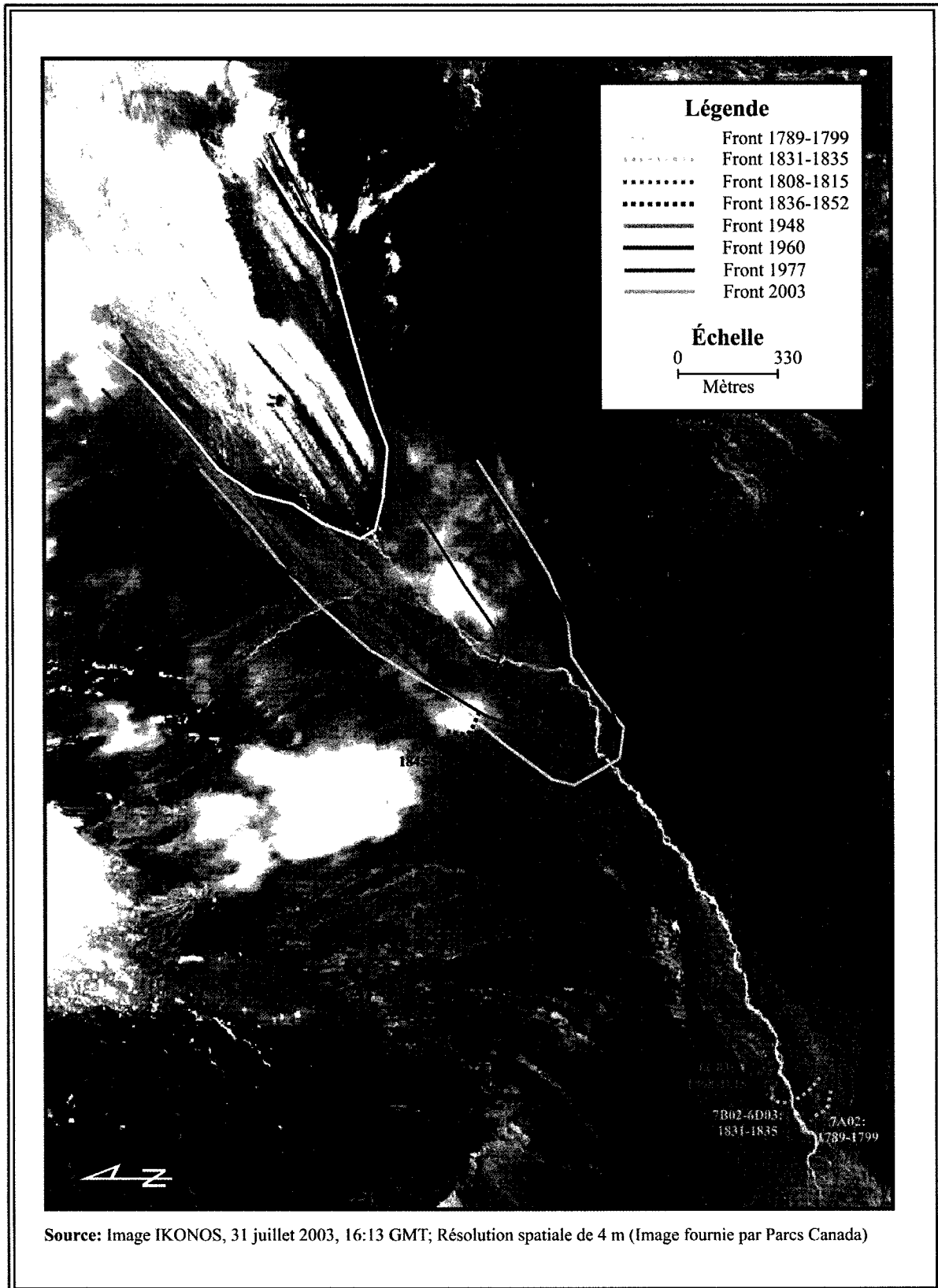


Figure 8.6: Age des moraines étudiées du Glacier 12

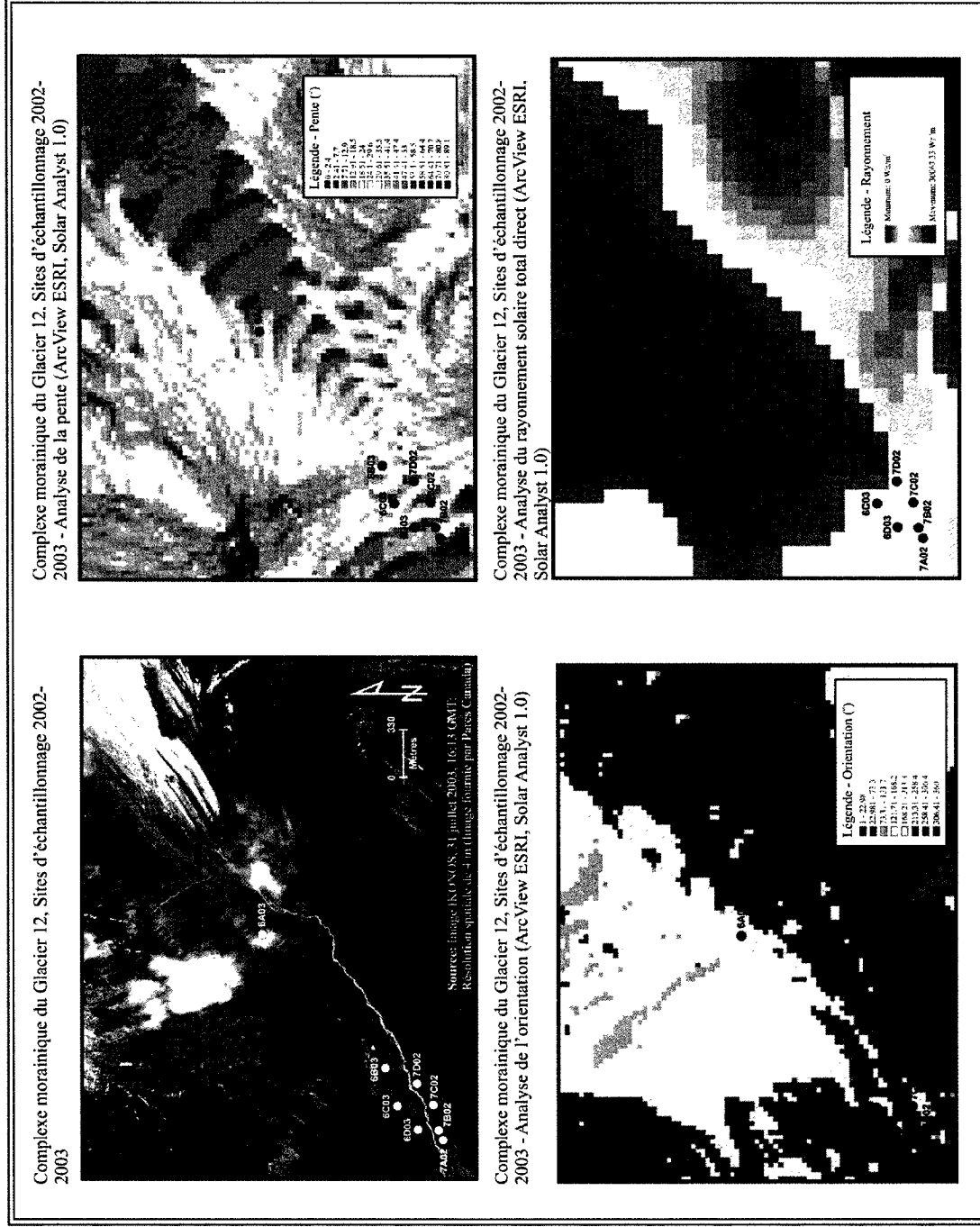


Figure 8.7: Caractéristiques des sites d'échantillonnage du complexe morainique du Glacier 12

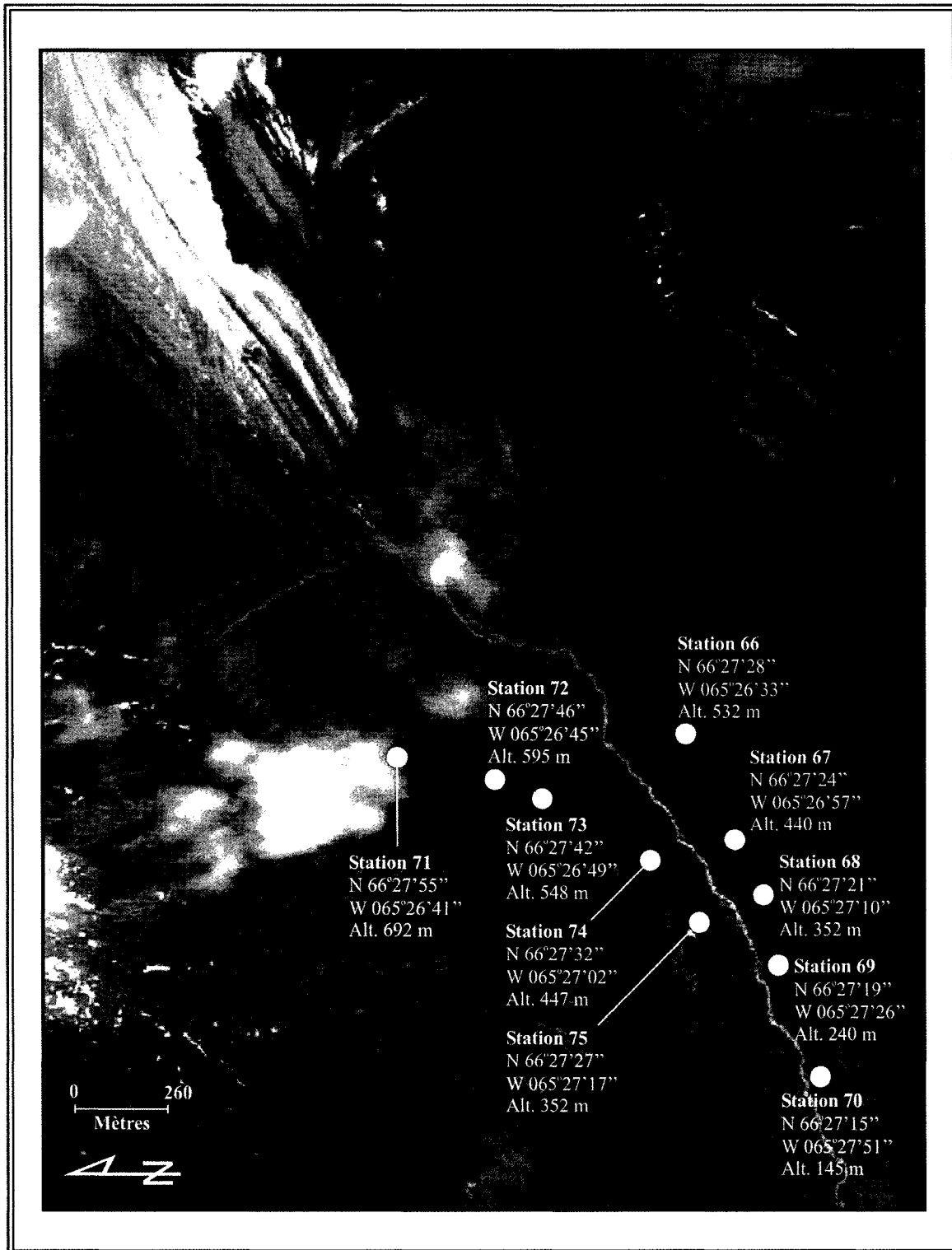


Figure 8.8: Localisation des instruments d'enregistrement de la température sur le complexe morainique du Glacier 12

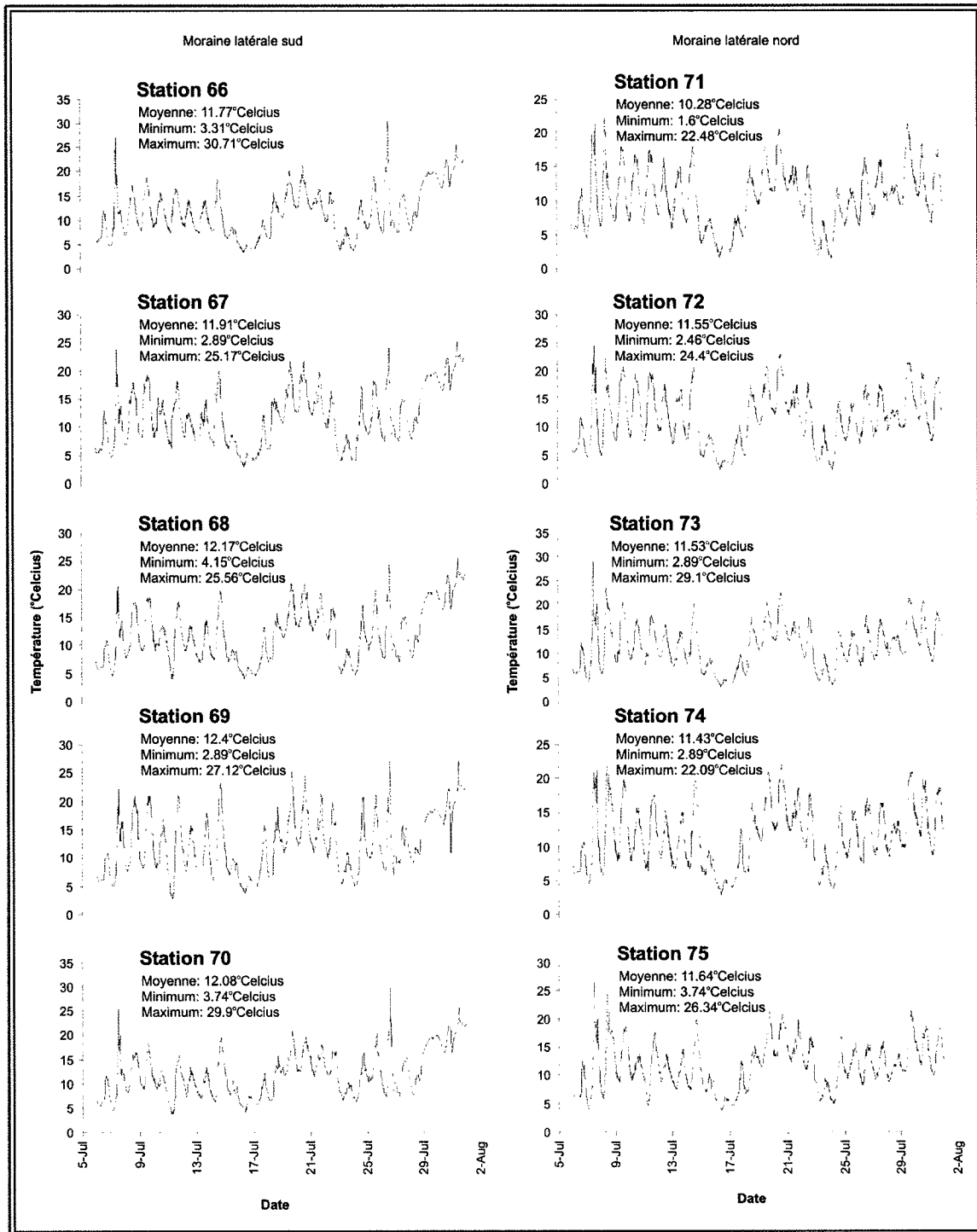


Figure 8.9: Données de température enregistrées sur le complexe morainique du Glacier 12 (Juillet 2003)

9 LE GLACIER WINDY LAKE

9.1 FLUCTUATIONS ACTUELLES

La morphologie du glacier Windy Lake est illustrée par la **Figure 9.1**. Les fluctuations du glacier entre les fronts de 1948, 1960, 1975 et 2003 ont été calculées (**Figure 9.6**). Une distance approximative de 453 m sépare la position du front de 1948 de celle du front de 2003; une distance de 213 m sépare la position des fronts de 1960 et 2003 et une distance de 64 m sépare la position des fronts de 1977 et 2003. On remarque une diminution du taux de retrait annuel moyen entre 1948 et 2003. Entre 1948 et 1960, le front du glacier Windy Lake a connu un taux de retrait annuel moyen de plus ou moins 20 m. Entre 1960 et 1977, le taux de retrait a diminué à 10 m par an par an et entre 1977 et 2003, le taux de retrait est estimé à 2.3 m par an. Un taux de retrait annuel moyen a été estimé à 10.8 m entre 1948 et 2003.

9.2 FLUCTUATIONS MODERNES

9.2.1 Mesures lichénométriques et pourcentage de couverture des lichens

Deux sites d'échantillonnage lichénométriques (3A02 et 3B02) ont été étudiés sur le glacier d'accumulation, à l'intérieur du complexe morainique du glacier Windy Lake. Les deux seuls sites 3A02 et 3B02 sont situés à proximité du front du glacier, plus précisément au sud-est du front glaciaire actuel (**Figure 9.1**).

Le site 3A02, localisé le plus près du front glaciaire, est représenté par un échantillon de 148 individus. La moyenne des diamètres des thalles de lichens de ce site est de 3.95 mm; le diamètre minimum mesuré est de 1 mm et le diamètre maximum est de 11.3 mm. Le site 3B02, localisé au sud-est du site 3A02, est caractérisé par un échantillon formé de 172 individus. La moyenne du diamètre des thalles de lichens de ce site est de 3.59 mm, tandis que le diamètre minimum mesuré est de 1 mm et que le diamètre maximum est de 9.8 mm.

Seulement le site 3B02 du complexe morainique du glacier Windy Lake possède une valeur du pourcentage de couverture des lichens. Ce pourcentage de couverture caractérisant ce site est de 5 %. (**Figure 9.1**)

9.2.2 Caractéristiques des histogrammes des données brutes et des données transformées

La forme des histogrammes est similaire pour les deux sites (**Figure 9.2**). L'histogramme 3A02 est étalé vers la droite (coefficient d'asymétrie de 1.23) et plus ou moins fortement concentré (coefficient d'aplatissement de 1.01). L'histogramme 3B02 est aussi étalé vers la droite (coefficient d'asymétrie de 0.96) et possède plus ou moins une concentration normale (coefficient d'aplatissement de 0.5). Ces observations sont aussi supportées par les graphiques probabilité-probabilité présentés à la **Figure 9.3**.

La distribution taille-fréquence des sites 3A02 et 3B02 situés sur le complexe morainique du glacier Windy Lake montre une forme normale après la transformation logarithmique (**Figure 9.4 & Figure 9.5**). La moyenne des sites 3A02 et 3B02 est de 0.53 et 0.5 mm (\log_{10}). Le coefficient d'asymétrie de ces deux sites est de 0.16 et -0.08 et le coefficient d'aplatissement est de -0.6 et -0.53 (Voir **Annexe 1** pour le tableau des statistiques des données transformées). D'après les résultats du test Kolmogorov-Smirnov, les sites 3A02 et 3B02 possèdent une distribution normale. (Voir **Annexe 2**)

9.2.3 Analyse de variance et comparaisons *a posteriori*

Selon les résultats de l'analyse de variance entre les deux groupes de données des sites d'échantillonnage 3A02 et 3B02, H_0 est acceptée et indique qu'il n'existe pas de différences significatives entre les moyennes de ces deux groupes. La valeur F est de 1.64 et le F critique est de 6.72; la valeur- P , étant de 0.2 (**Annexe 3**). La **Figure 9.1** illustre le regroupement de cette affirmation. Aucun test *a posteriori* n'est nécessaire comme H_0 est acceptée.

9.2.4 Chronologie de l'âge des moraines

Les deux sites d'échantillonnage du glacier Windy Lake, 3A02 et 3B02, suggèrent que les lichens ont colonisé la surface analysée entre 1855 et 1884 (**Figure 9.6**). Davis (1980) affirme aussi que cette région du complexe morainique s'est stabilisée il y a moins de 100 années ^{14}C BP. De plus, il indique que la moraine externe de l'est s'est immobilisée entre 900 et 1150 années ^{14}C BP, tandis que la moraine externe de l'ouest s'est immobilisée il y a entre 200 et 400 années ^{14}C BP. Davis affirme aussi que le glarier d'accumulation en amont du front glaciaire actuelle n'a pas de lichens. Cette observation est confirmée par les observations effectuées dans le cadre de cette recherche.

9.2.5 Variations environnementales affectant la logique de la chronologie des moraines

L'analyse de variance et la comparaison *a posteriori* des sites d'échantillonnage du glarier du glacier Windy Lake indique que ces derniers sont statistiquement semblables. De plus, la chronologie de la surface étudiée présente des âges similaires pour les deux sites situés à proximité.

Ces observations sont appuyées par les caractéristiques des sites d'échantillonnage (**Tableau 9.1 & Figure 9.7**). Les sites 3A02 et 3B02 sont situés sur une pente moyenne entre 12° et 24° et cette dernière est orientée vers le sud-est. Il n'existe pas une différence considérable entre le rayonnement solaire direct total entre ces deux sites. Au total, les communautés de lichens entre les deux sites peuvent être comparées sans tenir compte des facteurs environnementaux spécifiés.

Tableau 9.1: Caractéristiques des sites d'échantillonnage du glarier d'accumulation du glacier Windy Lake

| Site | Glacier | Coordonnées géographiques Latitude, Longitude (NAD 83) | Aire des sites (m ²) | Altitude (m) | Rayonnement solaire direct total (moyenne annuelle Wh/m ²) | Orientation de la moraine |
|------|------------|---|----------------------------------|--------------|---|---------------------------|
| 3A02 | Windy Lake | 66°31'23"N, 65°28'19"W | 400 | 295 | 15 900 | N/A |
| 3B02 | Windy Lake | 66°31'22"N, 65°28'17"W | 200 | 282 | 15 602 | N/A |

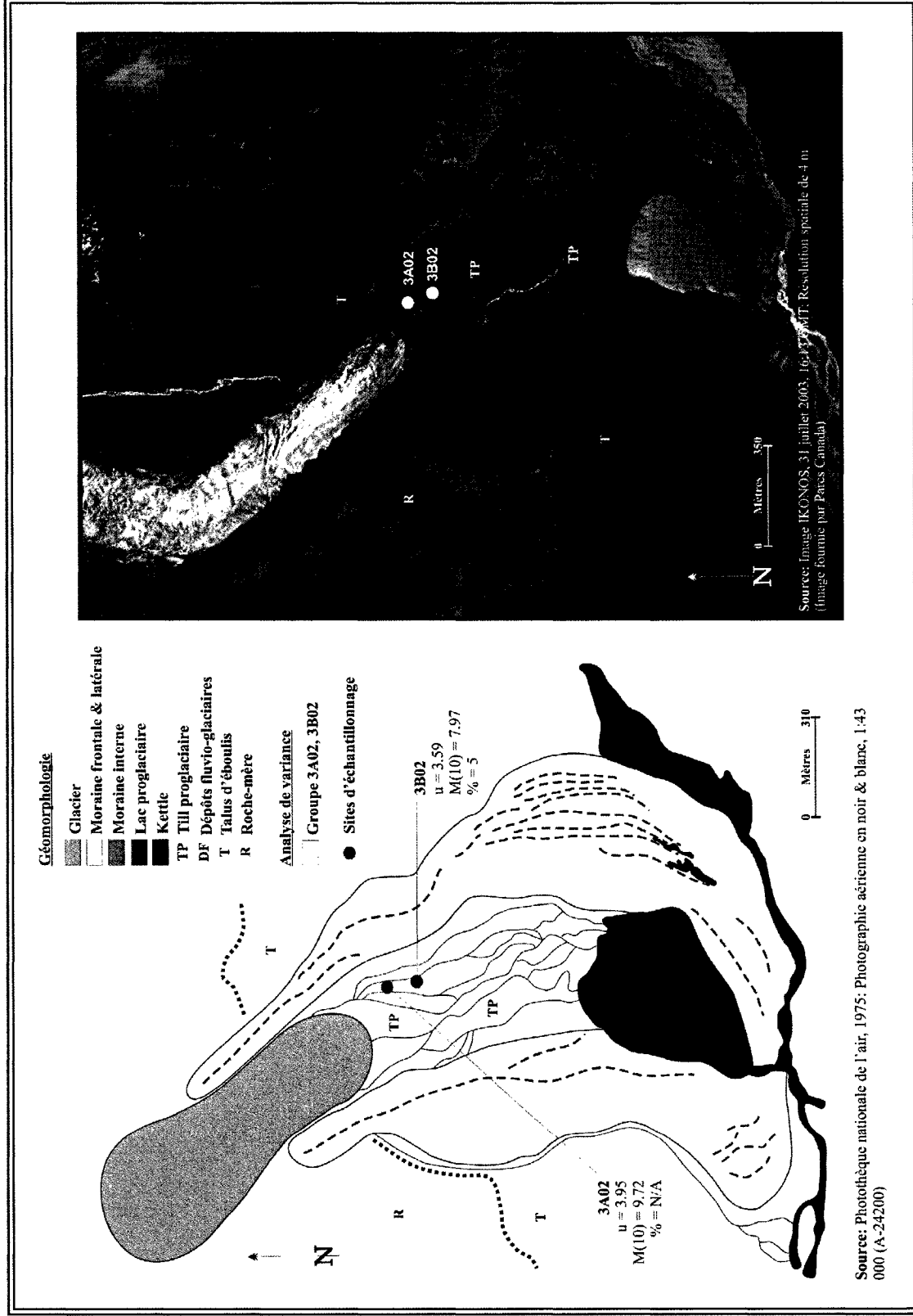


Figure 9.1: Sites d'échantillonnage des paramètres statistiques du complexe morainique du glacier Windy Lake

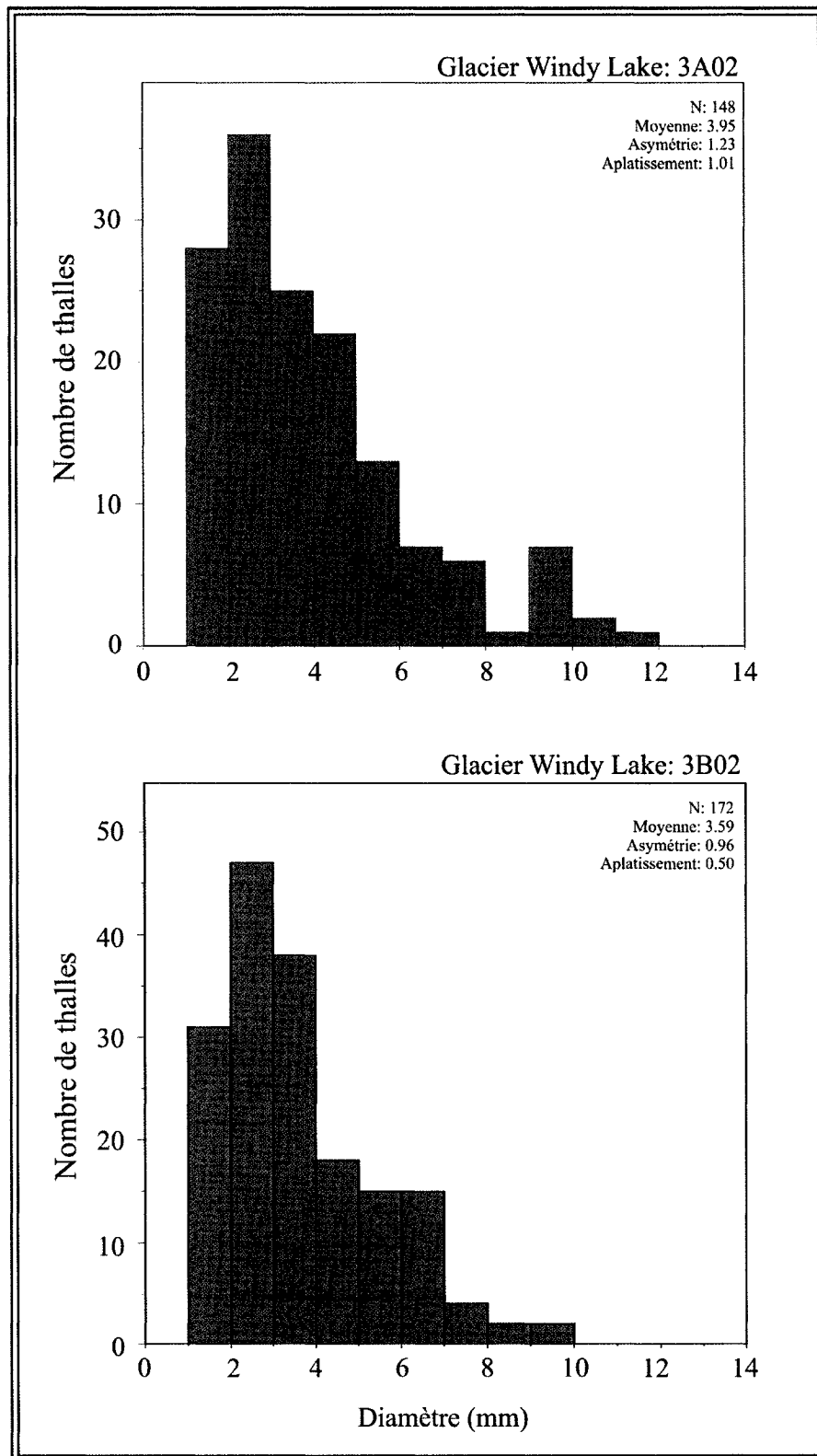


Figure 9.2: Histogrammes de la distribution taille-fréquence des données brutes du glacier Windy Lake

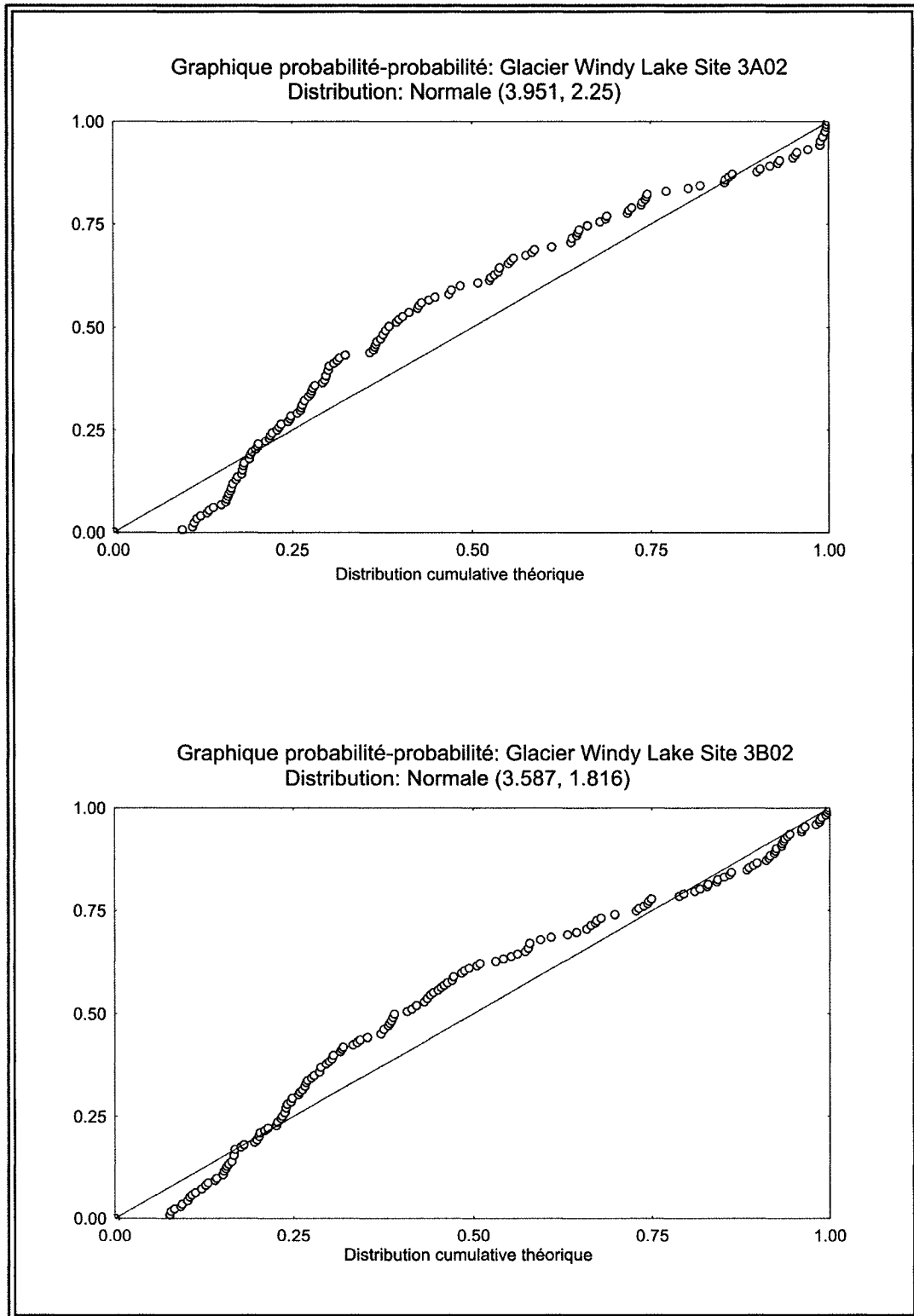


Figure 9.3: Graphique probabilité-probabilité des données brutes du glacier Windy Lake

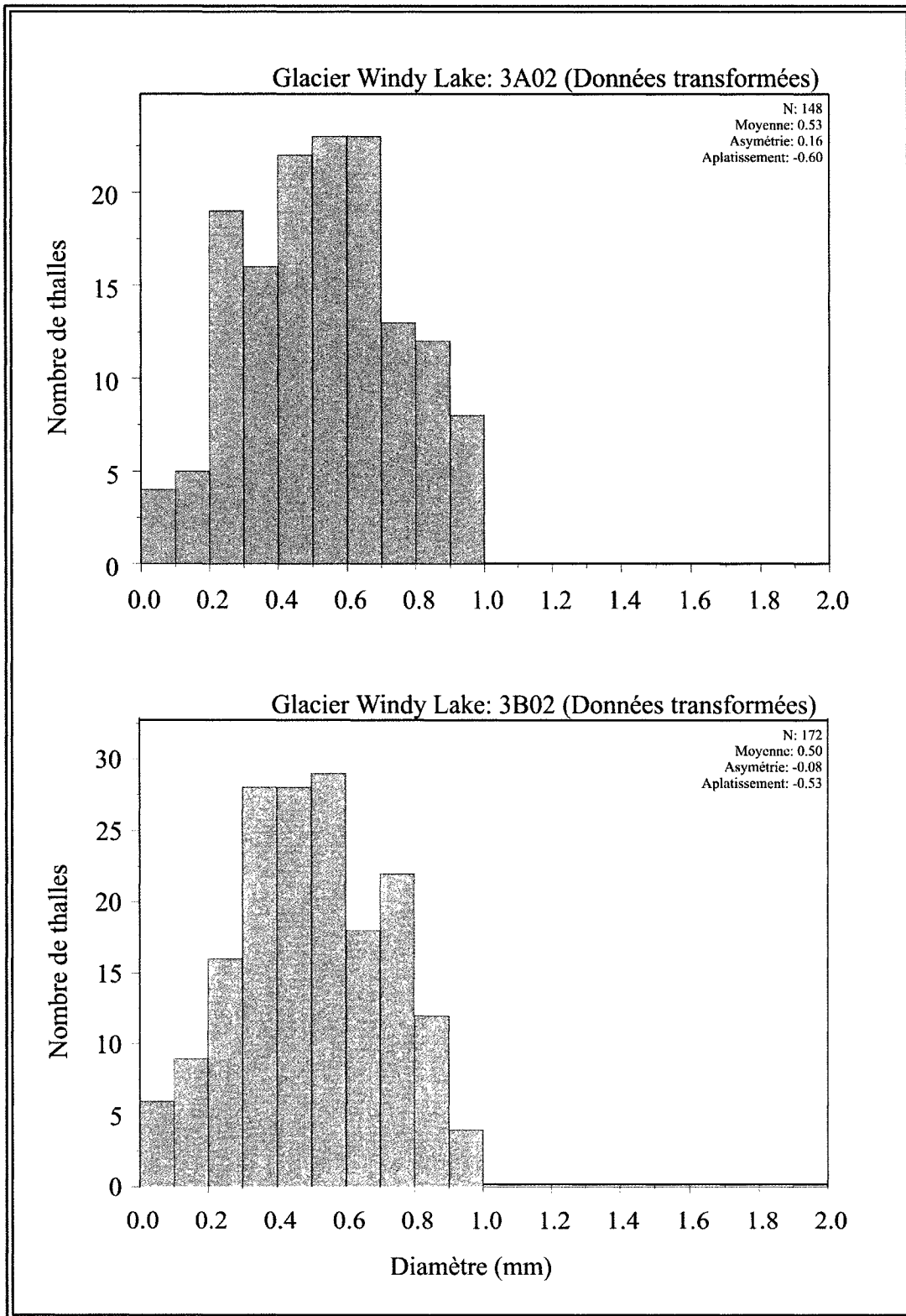


Figure 9.4: Histogrammes de la distribution taille-fréquence des données transformées du glacier Windy Lake

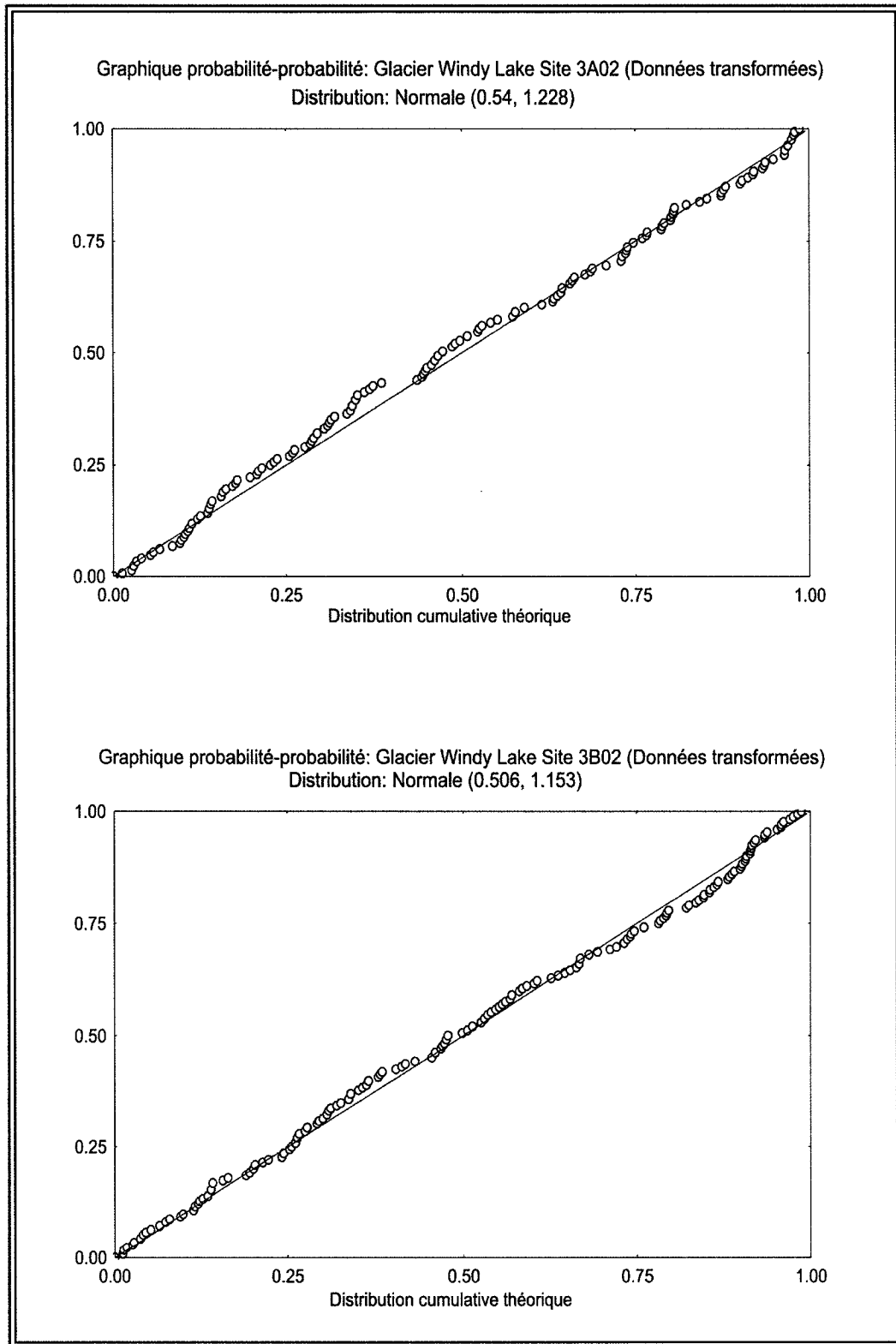


Figure 9.5: Graphique probabilité-probabilité des données transformées du glacier Windy Lake

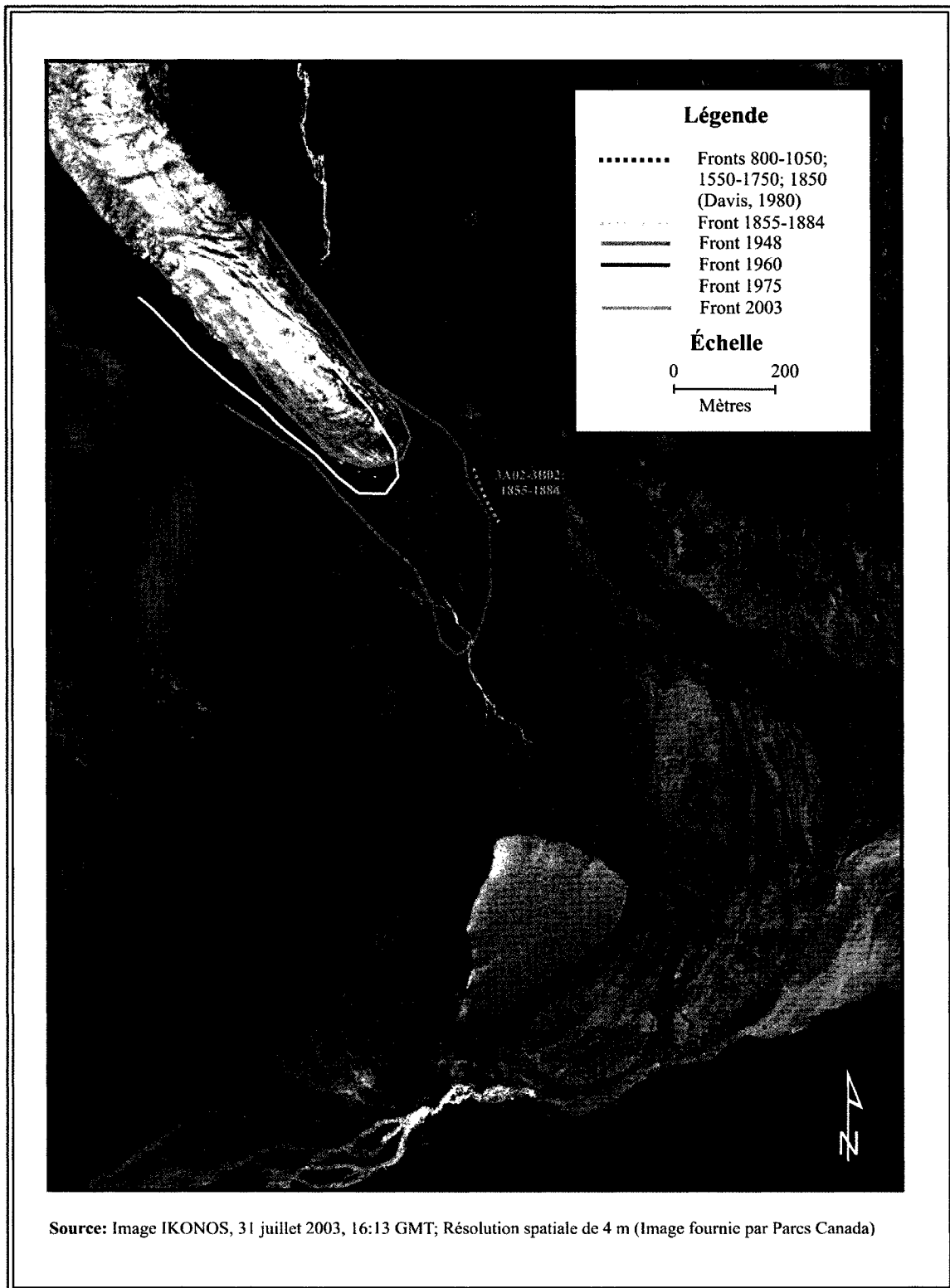


Figure 9.6: Age des moraines et du glarier d'accumulation étudiés du glacier Windy Lake

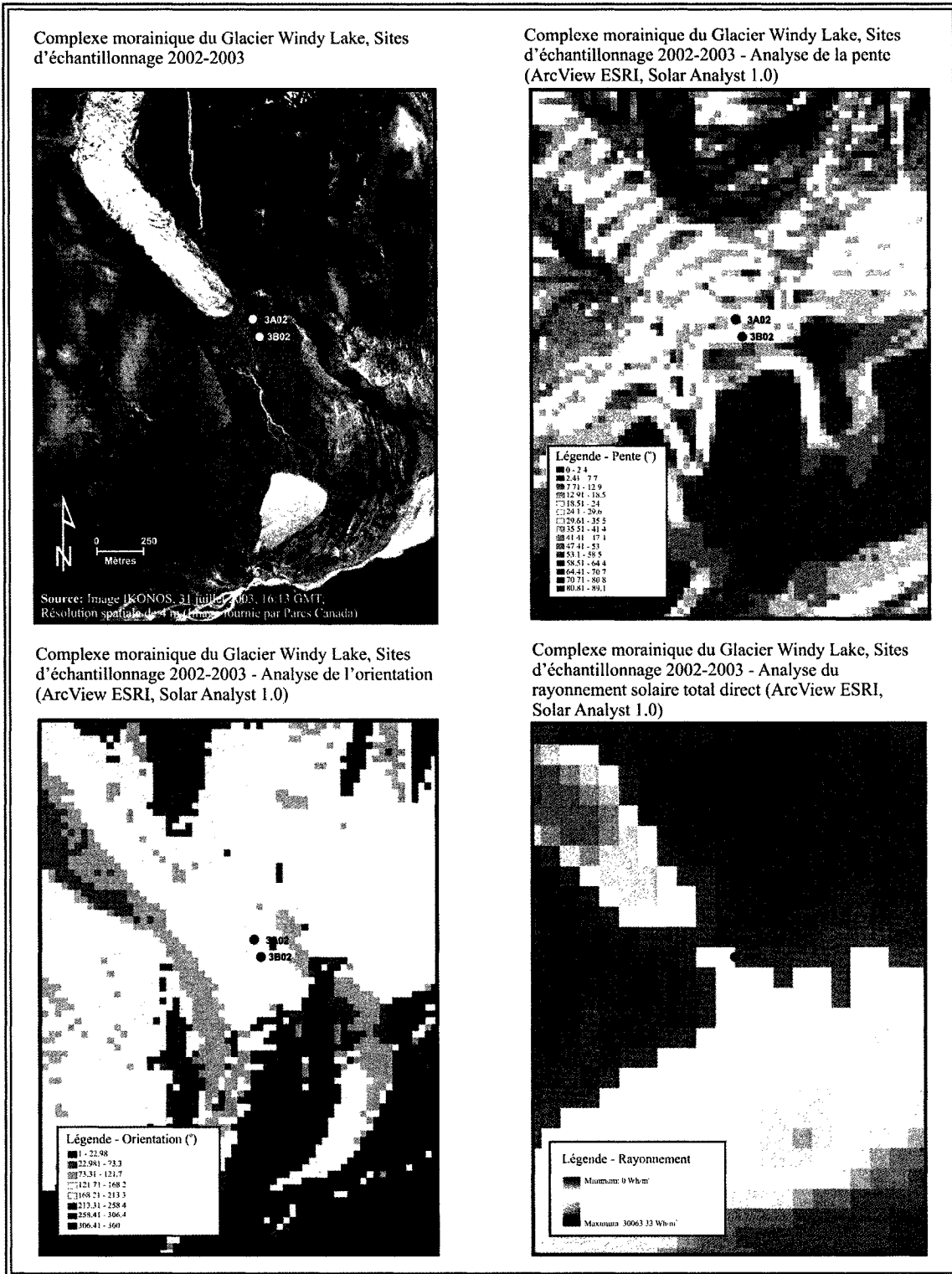


Figure 9.7: Caractéristiques des sites d'échantillonnage du complexe morainique du glacier Windy Lake

10 LE GLACIER NIFLHEIM

10.1 FLUCTUATIONS ACTUELLES

La morphologie du glacier Niflheim est illustrée par la **Figure 10.1**. Les fluctuations du glacier entre les fronts de 1948, 1960, 1975 et 2003 ont été calculées (**Figure 10.6**). Les fluctuations du front du glacier Niflheim ont été très modestes. En effet, il n'y a qu'une distance approximative de 86 m entre la position du front de 1948 et le front de 2003, représentant un taux de retrait annuel moyen de 1.6 m par an. La distance entre les fronts de 1960-2003 et de 1975-2003 est aussi minime, étant de 80 et 34 m. Les taux de retrait associés aux trois périodes de temps analysées sont de 0.5 m entre 1948 et 1960, 3.1 m entre 1960 et 1975 et de 1.2 m par an entre 1975 et 2003.

Un point important doit être noté pour la position du front de 1960. Ce dernier est situé plus ou moins au même endroit que la position du front de 1948. Il serait sans doute possible de considérer cette position plus ou moins exacte comme les fluctuations de ce glacier sont minimales pour la période de temps analysée. La comparaison avec les photographiques de Thompson (1954) confirme que le front de ce glacier est stable.

10.2 FLUCTUATIONS MODERNES

10.2.1 Mesures lichénométriques et pourcentage de couverture des lichens

Huit sites d'échantillonnage lichénométriques ont été analysés sur le complexe morainique frontal du glacier Niflheim. Les sites d'échantillonnage 4A02 à 4D02 sont localisés sur la moraine latérale de l'ouest en ordre du moins élevé au plus élevé en altitude. Les sites d'échantillonnage 3A03 à 3D03 sont situés sur la moraine latérale de l'est en ordre du moins élevé au plus élevé en altitude (**Figure 10.1**).

En débutant par les sites d'échantillonnage de la moraine latérale de l'ouest, on observe différentes moyennes du diamètre des thalles mesurés; 4.33, 3.65, 3.16 et 3.18 mm pour les sites de 4A02 à 4D02. Ce paramètre statistique est basé sur des échantillons formés de 286, 311, 273 et 212 individus. Les thalles minimaux ayant été mesurés sont tous de 1 mm et les thalles maximaux sont de 15.9, 12.8, 10.9 et 10.7 mm.

En ce qui concerne les sites d'échantillonnage de la moraine latérale de l'est, la moyenne du diamètre des thalles est de 3.47, 2.89, 3 et 1.91 mm pour les sites 3A03 à 3D03. Ces moyennes sont basées sur des échantillons formés de 741, 824, 668 et 88 individus. Les thalles minimaux sont tous de 1 mm et

les thalles maximaux sont de 14.8, 14.3, 15 et 4.4 mm. Les sites 4A02 à 4D02 localisés sur la moraine latérale de l'ouest sont caractérisés par les pourcentages de couverture suivants : 25, 24, 20 et 15 %. Les sites 3A03 à 3D03 situés sur la moraine latérale de l'est possèdent les valeurs de couverture respectives suivantes : 27, 10, 19 et 0 %. (**Figure 10.1**)

10.2.2 Caractéristiques des histogrammes des données brutes et des données transformées

La forme des histogrammes est plus ou moins similaire pour tous les sites (**Figure 10.2**) et les graphiques probabilité-probabilité illustrent que les distributions ne sont pas normales (**Figure 10.3**). Les sites d'échantillonnage sont caractérisés par une distribution taille-fréquence étalée vers la droite; les coefficients d'asymétrie sont de 1.39, 1.66, 1.53 et de 1.11 pour les sites 4A02 à 4D02 et de 1.95, 1.92, 2.03 et de 1.09 pour les sites 3A03 à 3D03. Les sites 4A02 à 4D02 possèdent une forte concentration et leur coefficient d'aplatissement sont de 2.43, 4.21, 4.21 et 2.17, tandis que les sites 3A03 à 3D03 sont caractérisés par les coefficients d'aplatissement suivants : 5.18, 6.55, 7.16 et 1.14. Ces histogrammes sont eux aussi fortement concentrés à l'exception du site 3D03.

En débutant par les sites d'échantillonnage de la moraine latérale de l'ouest (4A02 à 4D02), on note que les distributions sont normales après une transformation (**Figures 10.4 & 10.5**). La moyenne de ces sites est de 0.57, 0.52, 0.46 et 0.45 mm (\log_{10}). Le coefficient d'asymétrie est de -0.01, 0.08, -0.04 et -0.17 et le coefficient d'aplatissement est de -0.48, 0.11, 0.01 et -0.63. En ce qui concerne les sites d'échantillonnage de la moraine latérale de l'est (3A03 à 3D03), on observe que les distributions sont toutes normales, mis à part celles du site 3B03. La moyenne des sites 3A03, 3B03, 3C03 et 3D03 est de 0.48, 0.42, 0.43 et 0.25 mm (\log_{10}). Le coefficient d'asymétrie est de 0.36, 2.15, 0.28 et 0.26 et le coefficient d'aplatissement est de -0.09, 16.85, -0.15 et -0.51 (Voir **Annexe 1** pour le tableau des statistiques des données transformées). D'après les résultats du test Kolmogorov-Smirnov, les sites d'échantillonnage du complexe morainique du glacier Niflheim possèdent une distribution normale. (Voir **Annexe 2**)

10.2.3 Analyse de variance et comparaisons *a posteriori*

L'analyse de variance entre les sites d'échantillonnage 3A03, 3B03, 3C03, 4A02, 4B02, 4C02 et 4D02 indique qu'une moyenne au moins est significativement différente des autres. Ceci est appuyé par ces résultats d'analyse, la valeur F étant de 196.62; le F critique étant de 2.52; et la valeur- P , étant de 7.6^E-275 (**Annexe 3**).

Le test *a posteriori* soutient que la moyenne des sites d'échantillonnage suivants n'est pas significativement différente : 3A03 et 4B02-4C02-4D02; 3B03 et 3C03-4C02-4D02; 3C03 et 4C02-4D02; 4A02 et 4B02; 4B02 et 4C02-4D02; 4C02 et 4D02. La **Figure 10.1** montre les regroupements des sites qui ne sont pas statistiquement différents.

10.2.4 Chronologie de l'âge des moraines

Les moraines latérales frontales du glacier Niflheim (**Figure 10.6**) se seraient stabilisées entre l'an 1843 et 1850, plus précisément où se situent les sites 4A02 et 3A03. Les mesures des sites 4B02, 3B03 et 3C03 indiquent quant à eux la position du front glaciaire entre 1853 et 1872. Par la suite, sur la moraine latérale ouest, les mesures sur les sites 4C02 et 4D02 suggèrent que cette moraine a été construite entre 1864 et 1889, tandis que pour la moraine latérale de l'est, les données du site permettent de dater sa formation entre 1880 et 1921.

10.2.5 Variations environnementales affectant la logique de la chronologie des moraines

L'analyse de variance et les comparaisons multiples entre les sites d'échantillonnage du complexe morainique du glacier Niflheim suggère les groupes suivants : (1) 4A02 et 4B02, (2) 3A03, 4C02 et 4D02, (C) 3B02, 3C03, 4C02 et 4D02. Ces regroupements de sites ne correspondent pas aux groupes d'âges établis par la lichénométrie qui suivent: (1) 4A02 et 3A03 (1843-1850), (2) 4B02, 3B03 et 3C03 (1853-1872), (3) 4C02 et 4D02 (1864-1889) et (4) 3D03 (1880-1921). Les causes de ces différences sont probablement environnementales. Les sites de ce complexe sont situés sur une pente abrupte, entre 12° et 42°, orientés vers le nord (**Tableau 10.1 & Figure 10.7**). En ce qui concerne l'orientation des sites d'échantillonnage, le test-*t* effectué sur le site 3B03 indique que l'orientation a un impact sur la dynamique de la population de lichens (**Annexe 4**). L'hypothèse principale H0 a été rejetée pour les comparaisons des sites N-3B03 et S-3B03 et l'hypothèse alternative H1 a donc été acceptée. Ceci signifie qu'il existe des différences significatives entre les moyennes de la comparaison des deux quadrants de ce site. On remarque que le rayonnement solaire direct diminue lorsque l'altitude des sites augmente, allant de 7859 à 974 Wh/m². Or, les caractéristiques géographiques ne semblent pas avoir de conséquences soit sur les groupements des comparaisons multiples ou soit sur la chronologie logique de la déposition des moraines. Toutefois, il est important de considérer que les sites stabilisés plus récemment sont caractérisés par un rayonnement solaire inférieur aux autres sites, pouvant dans ce cas sous-estimer l'âge. De plus, il faut considérer que l'orientation des sites d'échantillonnage a un impact sur la croissance des lichens. Malgré ces deux observations, la chronologie des moraines latérales reste cohérente.

Tableau 10.1: Caractéristiques des sites d'échantillonnage du complexe morainique du glacier Niflheim

| Site | Glacier | Coordonnées géographiques Latitude, Longitude (NAD 83) | Aire des sites (m ²) | Altitude (m) | Rayonnement solaire direct total (moyenne annuelle Wh/m ²) | Orientation de la moraine |
|------|----------|---|----------------------------------|--------------|---|---------------------------|
| 3A03 | Niflheim | 66°30'53"N, 65°26'13"W | 100 | 134 | 7859 | Nord |
| 3B03 | Niflheim | 66°30'52"N, 65°26'10"W | 100 | 142 | 7799 | Nord |
| 3C03 | Niflheim | 66°30'49"N, 65°26'06"W | 100 | 178 | 6260 | Nord |
| 3D03 | Niflheim | 66°30'43"N, 65°25'57"W | 100 | 289 | 4123 | Nord |
| 4A02 | Niflheim | 66°30'51"N, 65°26'51"W | 200 | 152 | 7158 | Nord |
| 4B02 | Niflheim | 66°33'49"N, 65°25'19"W | 100 | 187 | 5266 | Nord |
| 4C02 | Niflheim | 66°30'44"N, 65°26'24"W | 100 | 228 | 3265 | Nord |
| 4D02 | Niflheim | 66°30'39"N, 65°26'20"W | 100 | 300 | 975 | Nord |

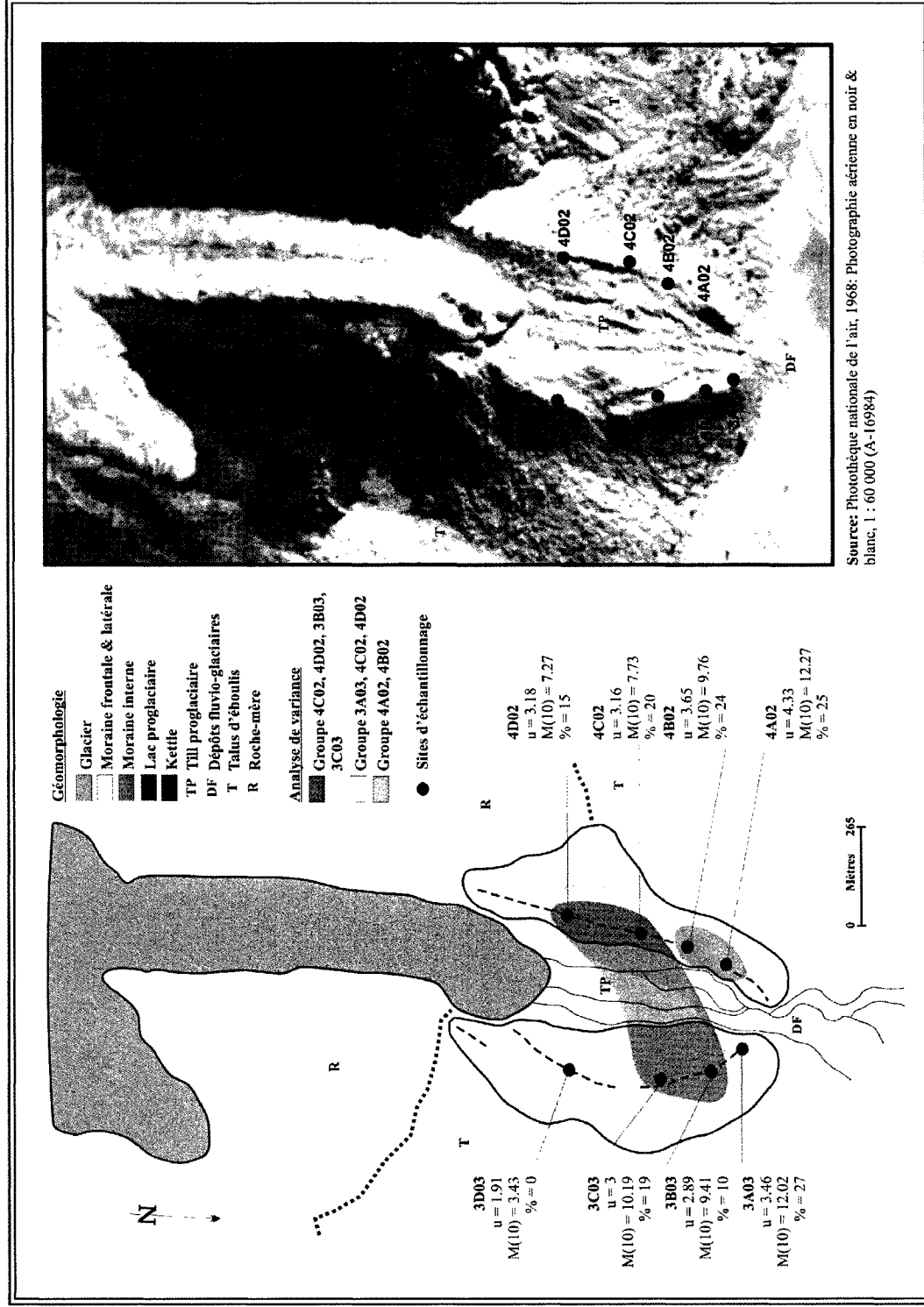


Figure 10.1: Sites d'échantillonnage et paramètres statistiques du complexe morainique du glacier Nifheim

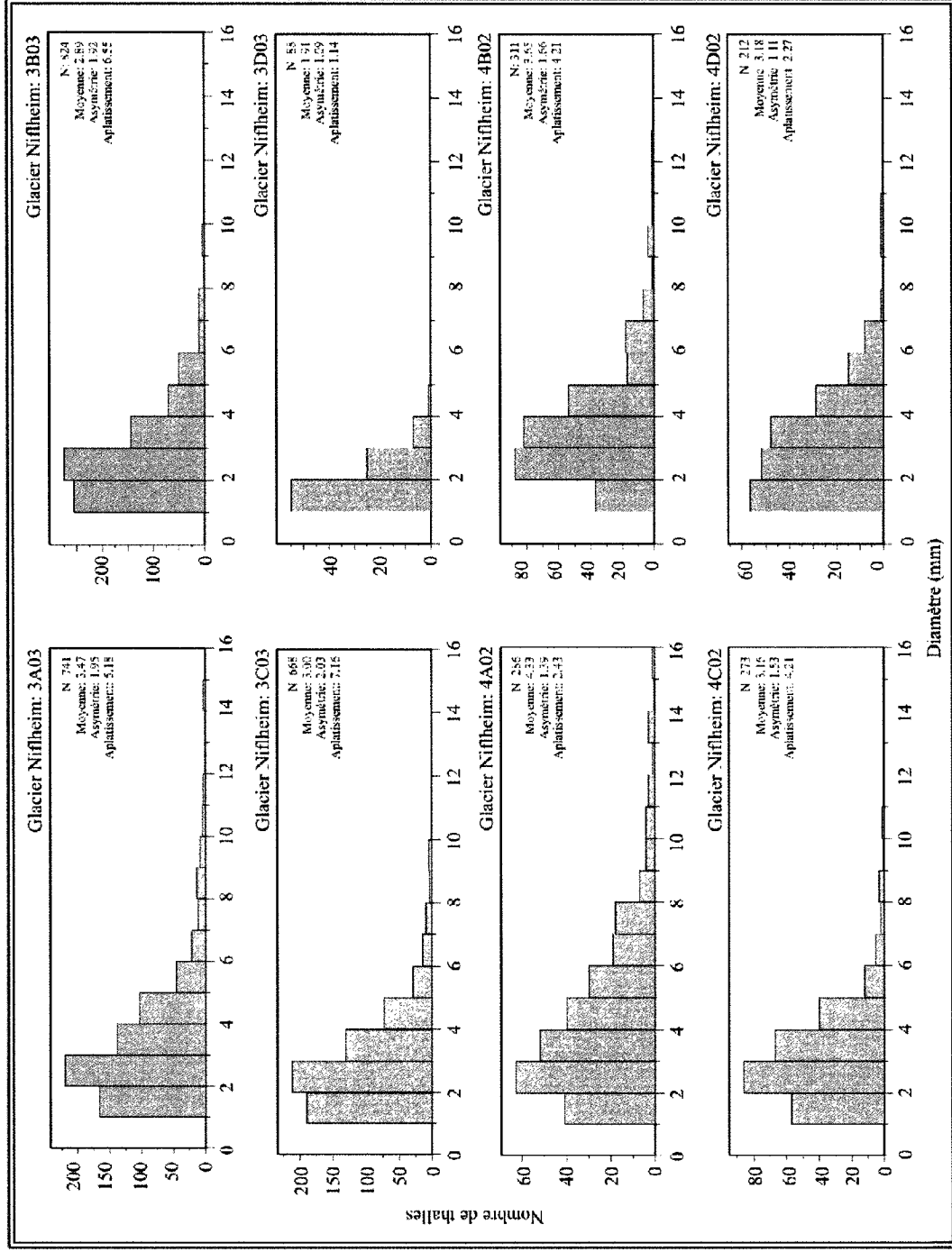


Figure 10.2: Histogrammes de la distribution taille-fréquence des données brutes du glacier Niflheim

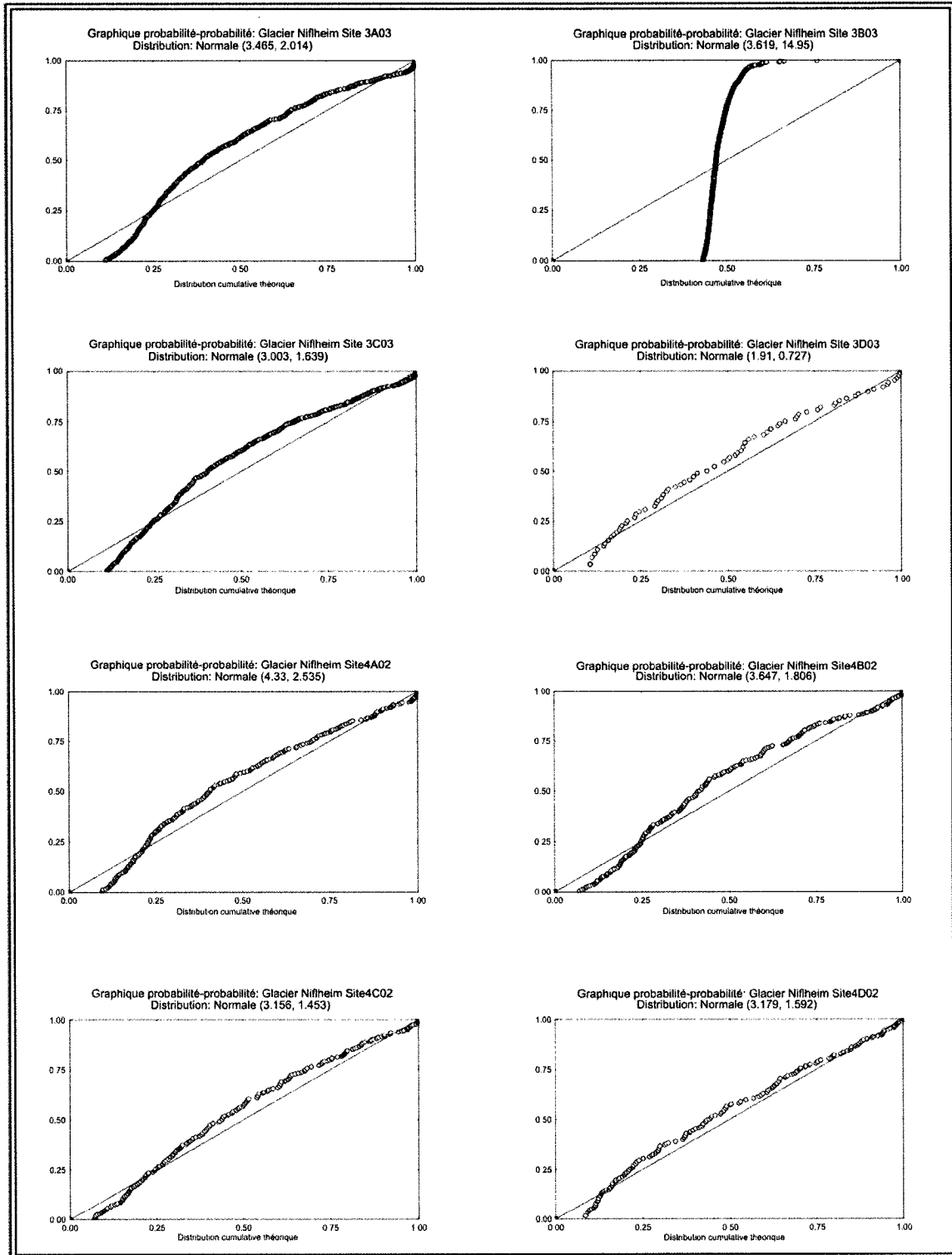


Figure 10.3: Graphique probabilité-probabilité des données brutes du glacier Nifheim

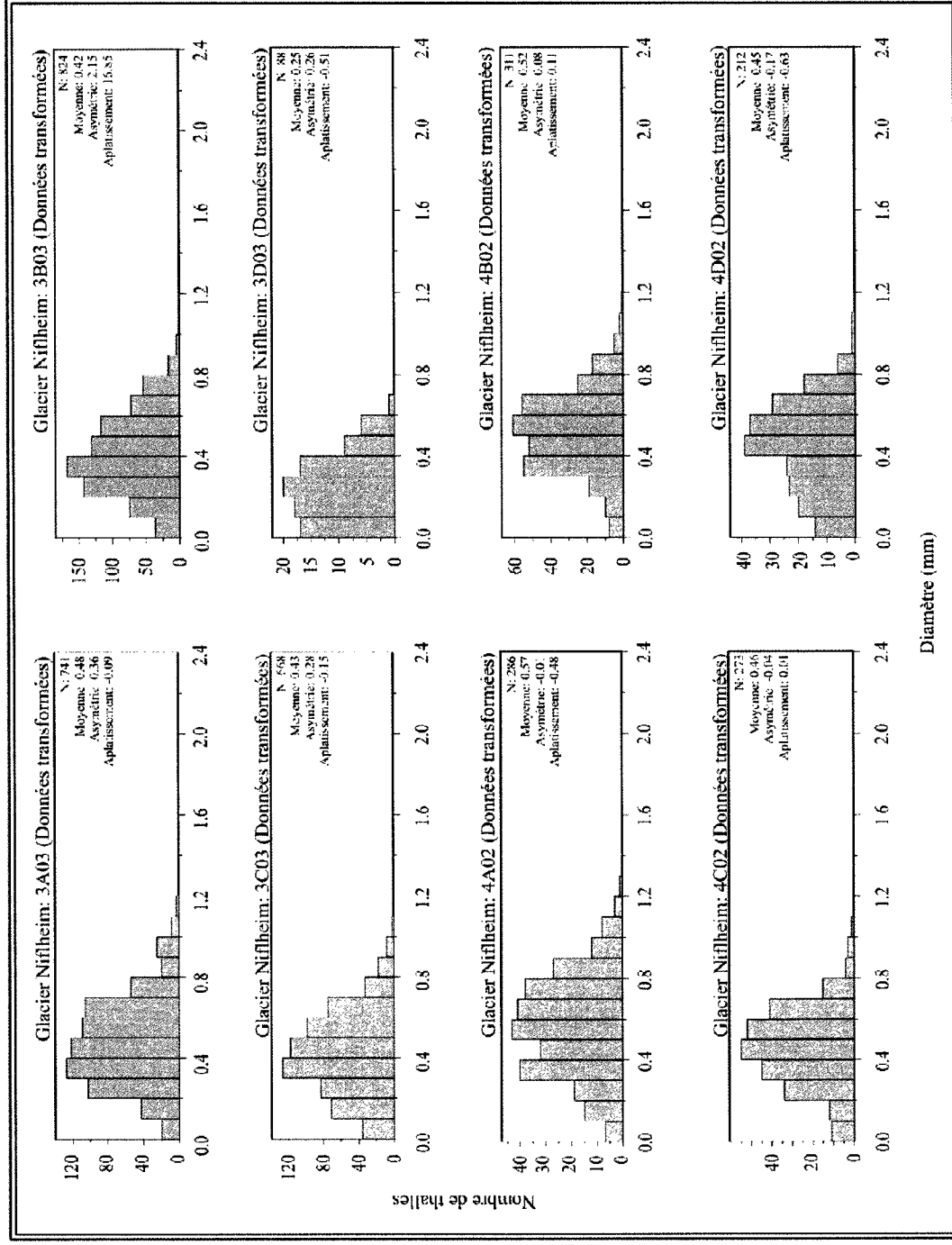


Figure 10.4: Histogrammes de la distribution taille-fréquence des données transformées du glacier Niflheim

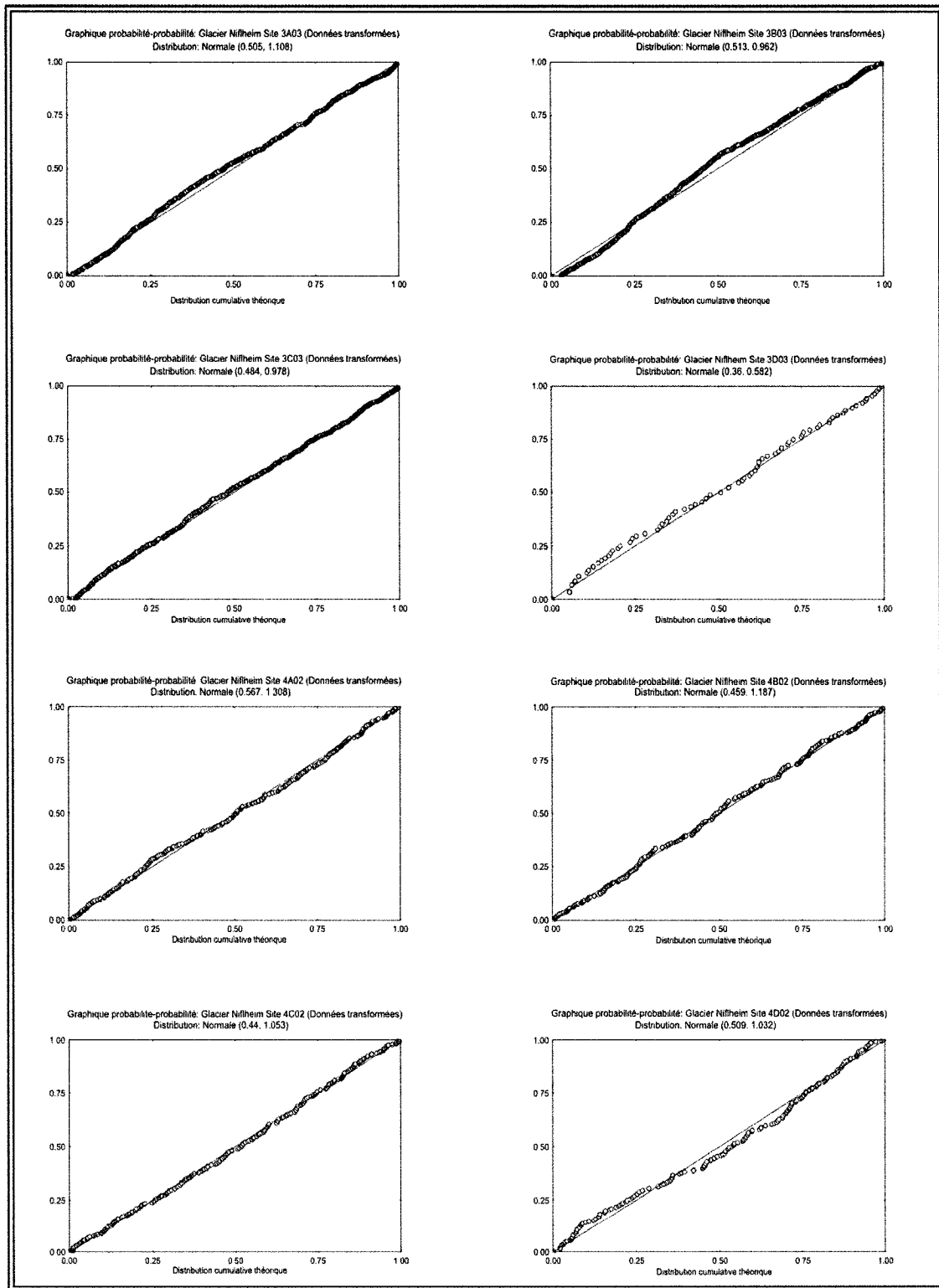


Figure 10.5: Graphique probabilité-probabilité des données transformées du glacier Niflheim

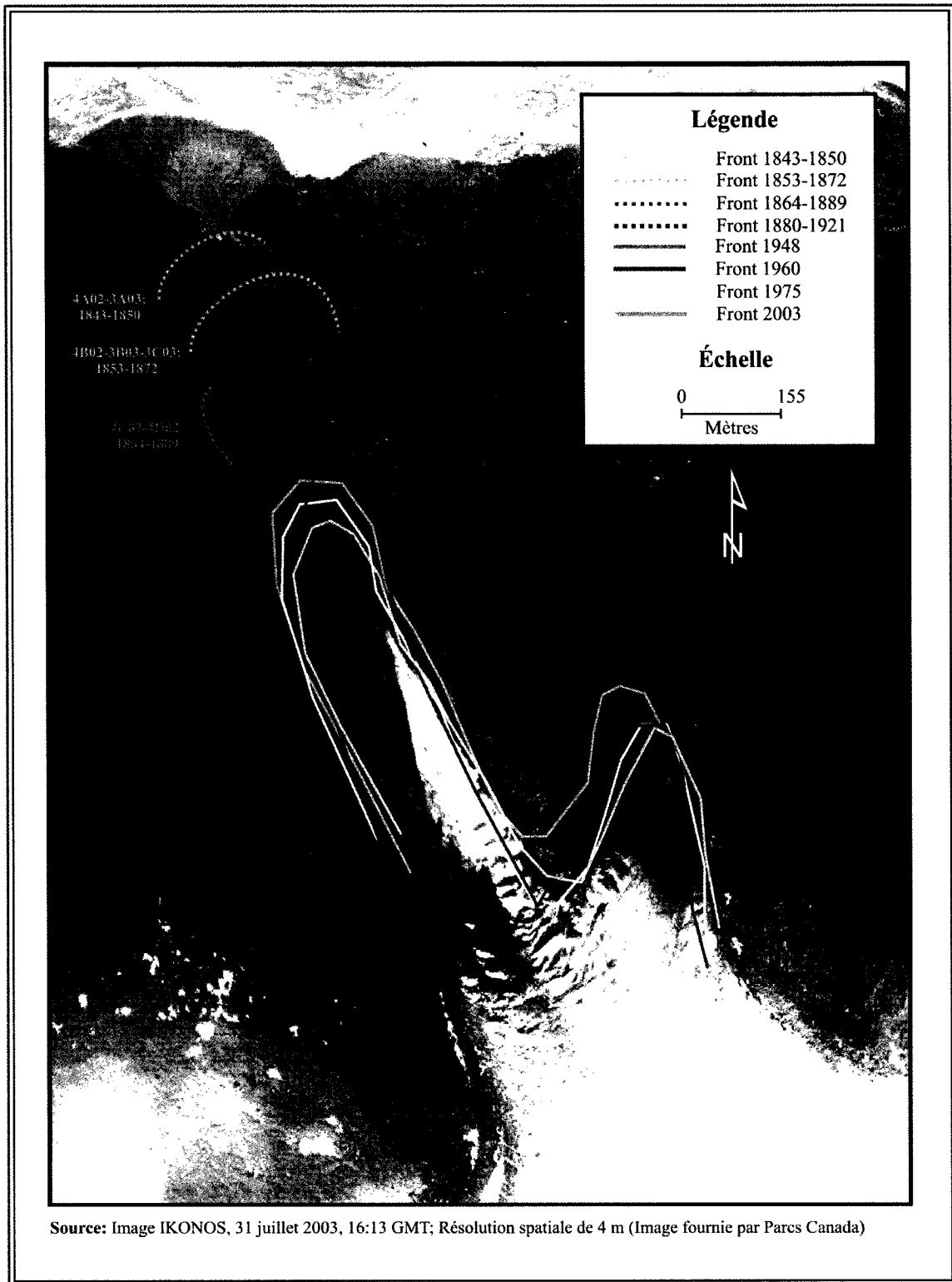


Figure 10.6 : Age des moraines étudiées du glacier Niflheim

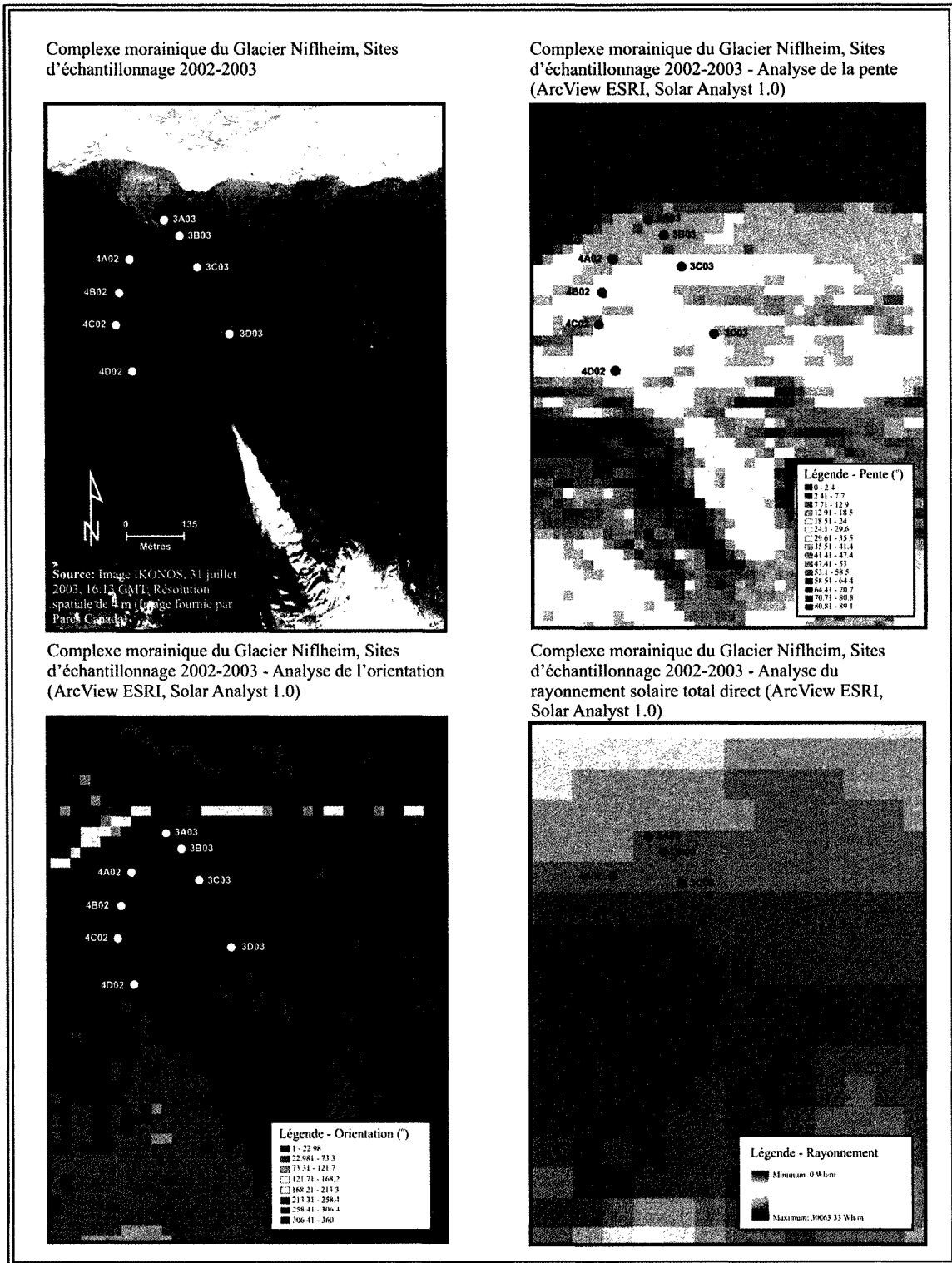


Figure 10.7: Caractéristiques des sites d'échantillonnage du complexe morainique du glacier Niflheim

11 LE GLACIER 20A

11.1 FLUCTUATIONS ACTUELLES

La morphologie du Glacier 20A est illustrée à la **Figure 11.1**. Sur la **Figure 11.6**, trois positions du front du glacier sont distinguées sur cette figure, plus précisément celles de 1960, 1975 et 2003. Tout comme le glacier Niflheim, les fluctuations du front glaciaire pour ces périodes de temps ne sont pas très grandes. Une distance de 88 m sépare les positions du front du glacier de 1960 et 2003 et une distance de 24 m sépare les positions du front du glacier de 1975 et 2003. Il est possible d'observer une diminution du taux de retrait pour les deux périodes de temps suivantes : entre 1960 et 1975, le taux de retrait moyen est de 4.3 m par an, tandis qu'entre 1975 et 2003, le taux de retrait moyen est de 0.9 m par an. Un taux de retrait annuel moyen entre 1960 et 2003 a été estimé à 2.6 m par an.

11.2 FLUCTUATIONS MODERNES

11.2.1 Mesures lichénométriques et pourcentage de couverture des lichens

Six sites d'échantillonnage lichénométriques sont localisés sur le complexe morainique du Glacier 20A. Les sites 4A03, 4C03 et 4B03 sont localisés sur la moraine latérale de l'ouest, tandis que les sites 5A02, 5B02 et 5C02 sont situés sur la moraine latérale de l'est (**Figure 11.1**). Les sites d'échantillonnage 4A03, 4C03 et 4B03 comptent 895, 1001 et 839 individus. Les sites d'échantillonnage 5A02, 5B02 et 5C02 comptent 315, 175 et 77 individus.

La moyenne du diamètre des thalles mesurés à l'intérieur des sites 4A03, 4C03 et 4B03 est de 3.29, 3.18 et 3.34 mm. Dans le même ordre, les thalles minimaux mesurés sont de 1 mm tandis que les thalles maximaux mesurés sont de 21.6, 20.7 et 16 mm. La moyenne des diamètres des thalles mesurés à l'intérieur des sites 5A02, 5B02 et 5C02 est de 3.78, 2.53 et 2.94 mm. Dans le même ordre, les thalles minimaux mesurés sont de 1 mm à l'exception du site 5C02 où le thalle minimal est de 1.3 mm. Les thalles maximaux mesurés pour ces mêmes sites sont de 17, 11.6 et 6.7 mm.

Les sites 4A03, 4C03 et 4B03, localisés sur la moraine de l'ouest du complexe morainique du Glacier 20A, sont caractérisés par les pourcentages de couverture suivants : 13, 34 et 25 %. Les sites 5A02 à 5C02, situés sur la moraine de l'est du complexe de ce même glacier possèdent des pourcentages de couverture de 31, 7 et 0 %. (**Figure 11.1**)

11.2.2 Caractéristiques des histogrammes des données brutes et des données transformées

La forme des histogrammes est plus ou moins semblable (**Figure 11.2**) et les graphiques probabilité-probabilité confirment que les distributions ne sont pas normales (**Figure 11.3**). Les sites d'échantillonnage sont caractérisés par des distributions taille-fréquence étalées vers la droite; les coefficients d'asymétrie sont de 3.03, 2.27 et de 2.8 pour les sites 4A03 à 4C03 et de 2.25, 2.49 et de 1.26 pour les sites 5A02 à 5C02. Les sites 4A03 à 4C03 possèdent une forte concentration et leur coefficient d'aplatissement sont de 12.32, 7.8 et 10.08, tandis que les sites 5A02 à 5C02 sont caractérisés par les coefficients d'aplatissement suivants : 7.83, 10.61 et 1.28. Ces histogrammes sont eux aussi fortement concentrés à l'exception du site 5C02 qui est moins concentré.

Toutes les distributions sont normales pour les données transformées des sites d'échantillonnage du complexe morainique du Glacier 20A (**Figures 11.4 & 11.5**). Les sites 4A03 à 4C03 sont caractérisés par une moyenne de 0.44, 0.45 et 0.44 mm (\log_{10}). Le coefficient d'asymétrie de ces sites est de 0.88, 0.46 et 0.79 et le coefficient d'aplatissement est de 0.86, -0.17 et 0.69. Les sites 5A02 à 5C02 sont caractérisés par une moyennes de 0.51, 0.35 et 0.44 mm (\log_{10}). Leur coefficient d'asymétrie est de 0.25, 0.43 et 0.38 et leur coefficient d'aplatissement est de 0, 0.26 et -0.32 (Voir **Annexe 1** pour le tableau des statistiques des données transformées). D'après les résultats du test Kolmogorov-Smirnov, ces sites possèdent une distribution normale. (Voir **Annexe 2**)

11.2.3 Analyse de variance et comparaisons *a posteriori*

L'analyse de variance indique qu'il y a au moins une moyenne qui est significativement différente des autres et ce, pour les sites d'échantillonnage 4A03, 4B03, 4C03, 5A02, 5B02 et 5C02. L'analyse affirme que la valeur F est de 11.45 et le F critique est de 3.02. La valeur- P , étant de 5.67^E-11 (**Annexe 3**).

Par la suite, le test *a posteriori* avance que les sites d'échantillonnage suivants ne sont pas significativement différents : 4A03 et 4B03; 4C03 et 4A03; 4A03 et 5C02; 4B03 et 4C03; 4B03 et 5C02; 4C03 et 5C02; 5A02 et 5C02; 5B02 et 5C02 (**Figure 11.1**).

11.2.4 Chronologie de l'âge des moraines

La chronologie du Glacier 20A (**Figure 11.6**) s'établie comme suit selon les résultats des analyses lichénométriques. La section frontale de la moraine latérale de l'ouest, où se situent les sites 4A03 et 4C03, s'est déposée entre 1816 et 1821. A proximité du front glaciaire de 1948, le site 4B03

indique que la moraine latérale s'est stabilisée aux alentours de 1837. Du côté de la moraine frontale de l'est, où est situé le site 5A02, la stabilisation de la moraine est estimée entre 1843 et 1848. L'âge attribué aux lichens du site 5B02 indique que la section de cette moraine latérale s'est stabilisée entre 1869 et 1896. La section de cette même moraine située à la position du site 5C02 s'est immobilisée entre 1872 et 1904.

11.2.5 Variations environnementales affectant la logique de la chronologie des moraines

La chronologie des moraines latérales est cohérente, malgré la variation environnementale du rayonnement solaire direct entre les sites situés à plus basse altitude et ceux situés à plus haute altitude. L'analyse de variance et les comparaisons multiples des sites d'échantillonnage du complexe morainique du Glacier 20A démontrent que les sites suivants sont statistiquement similaires : (1) 4A03, 4C03, 4B03 et 5C02, (2) 5A02 et 5C02, et (3) 5B02 et 5C02. Toutefois, ces regroupements de sites ne correspondent pas totalement aux groupes d'âges établis : (1) 4A03 et 4C03 (1816-1821), (2) 5A02 (1843-1848), (3) 5B02 (1869-1896), (4) 4B03 (1837) et (5) 5C02 (1872-1904). La cause de ces différences sont probablement environnementales. Les sites de ce complexe sont situés sur une pente forte, entre 12° et 26°, orientés vers le nord et le nord-ouest (5C02). On remarque que le rayonnement solaire direct diminue lorsque l'altitude des sites augmente, allant de 8525 à 5603 Wh/m² (Tableau 11.1 & Figure 11.7). Or, ces caractéristiques ne semblent pas avoir de conséquences soit sur les groupements des comparaisons multiples ou soit sur la chronologie logique de la déposition des moraines. Toutefois, il est important de considérer que les sites ayant été stabilisés plus récemment sont caractérisés par un rayonnement solaire inférieur aux autres sites, pouvant dans ce cas sous-estimer l'âge.

Tableau 11.1: Caractéristiques des sites d'échantillonnage du complexe morainique du Glacier 20A

| Site | Glacier | Coordonnées géographiques Latitude, Longitude (NAD 83) | Aire des sites (m ²) | Altitude (m) | Rayonnement solaire direct total (moyenne annuelle Wh/m ²) | Orientation de la moraine |
|------|-------------|---|----------------------------------|--------------|---|---------------------------|
| 4A03 | Glacier 20A | 66°30'57"N, 65°23'58"W | 100 | 173 | 8525 | Nord |
| 4B03 | Glacier 20A | 66°30'45"N, 65°23'58"W | 100 | 280 | 5603 | Nord-ouest |
| 4C03 | Glacier 20A | 66°30'53"N, 65°24'01"W | 100 | 197 | 6744 | Nord |
| 5A02 | Glacier 20A | 66°30'57"N, 65°23'48"W | 225 | 177 | 8147 | Nord-ouest |
| 5B02 | Glacier 20A | 66°30'52"N, 65°23'42"W | 225 | 229 | 6477 | Nord-ouest |
| 5C02 | Glacier 20A | 66°30'48"N, 65°23'32"W | 25 | 312 | 6207 | Nord-ouest |

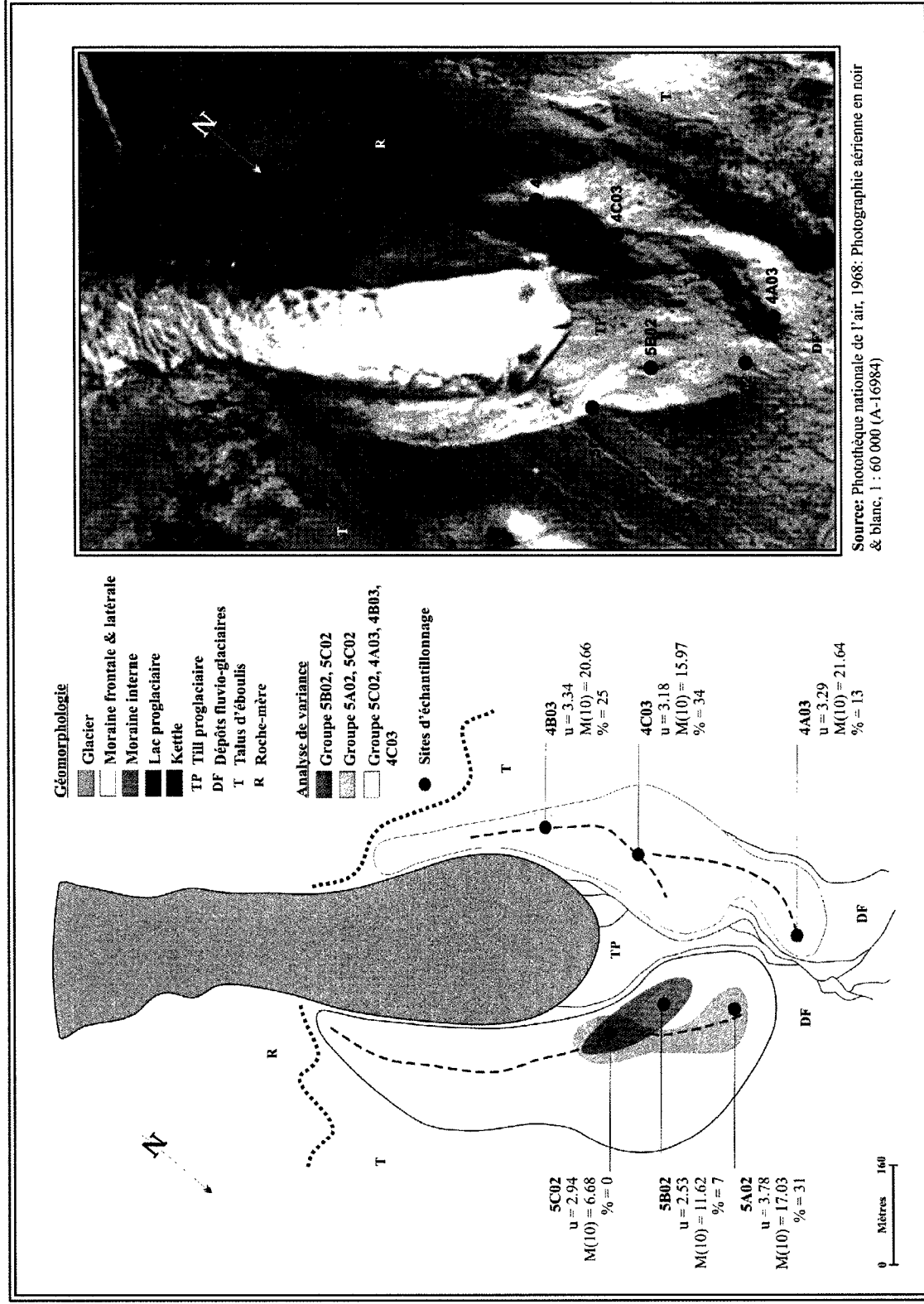


Figure 11.1: Sites d'échantillonnage et paramètres statistiques du complexe morainique du Glacier 20A

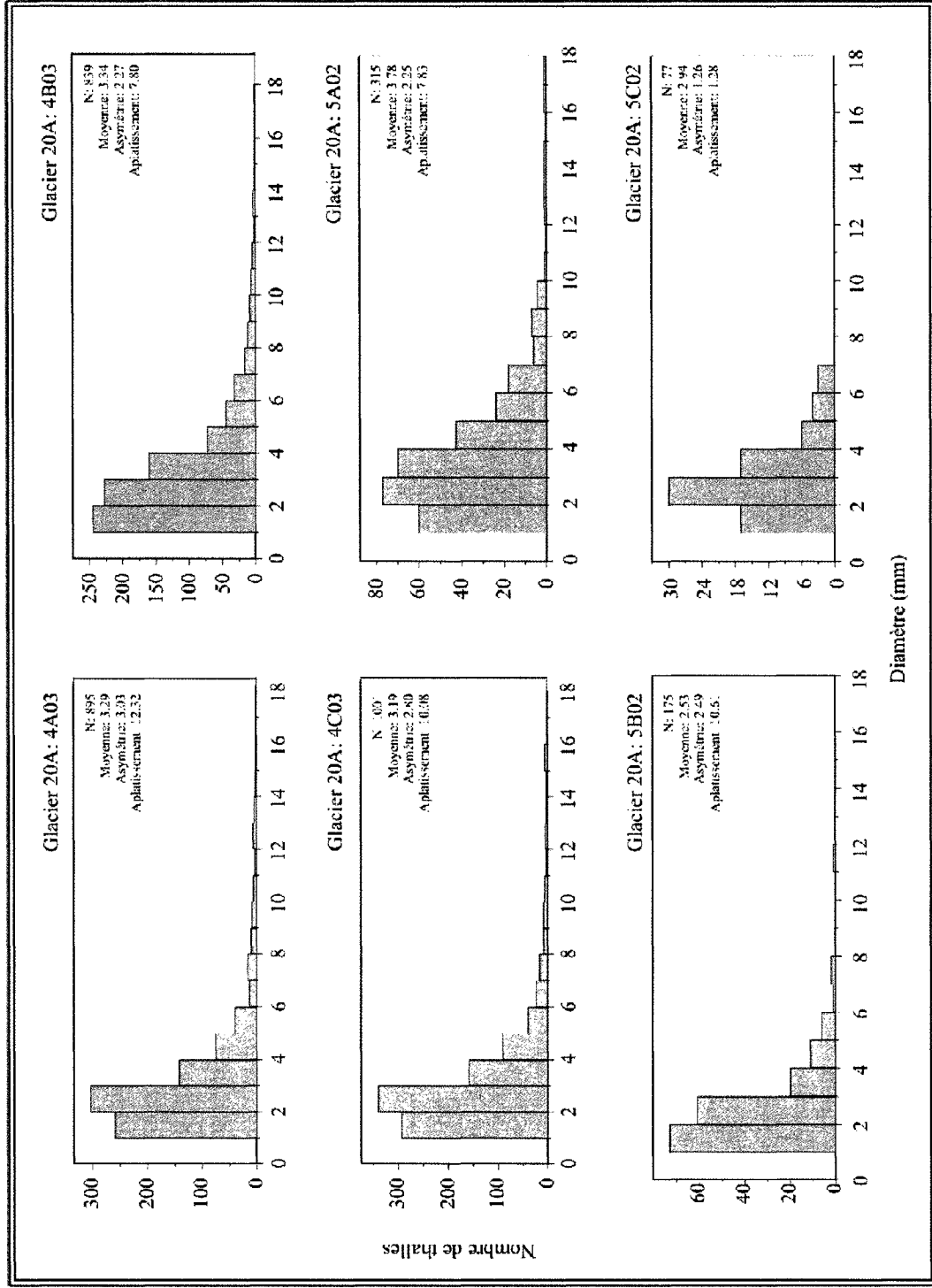


Figure 11.2: Histogrammes de la distribution taille-fréquence des données brutes du Glacier 20A

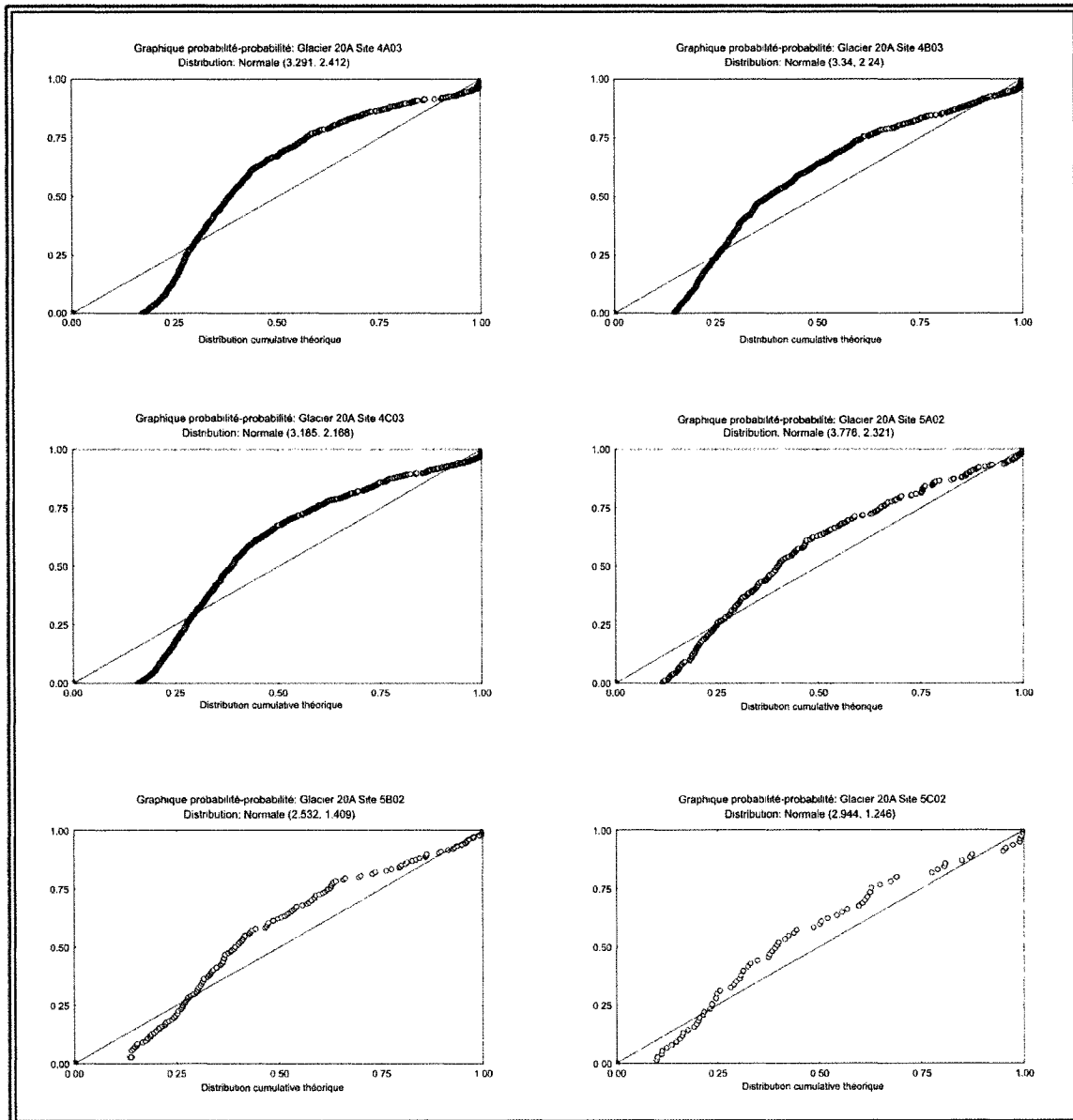


Figure 11.3: Graphique probabilité-probabilité des données brutes du Glacier 20A

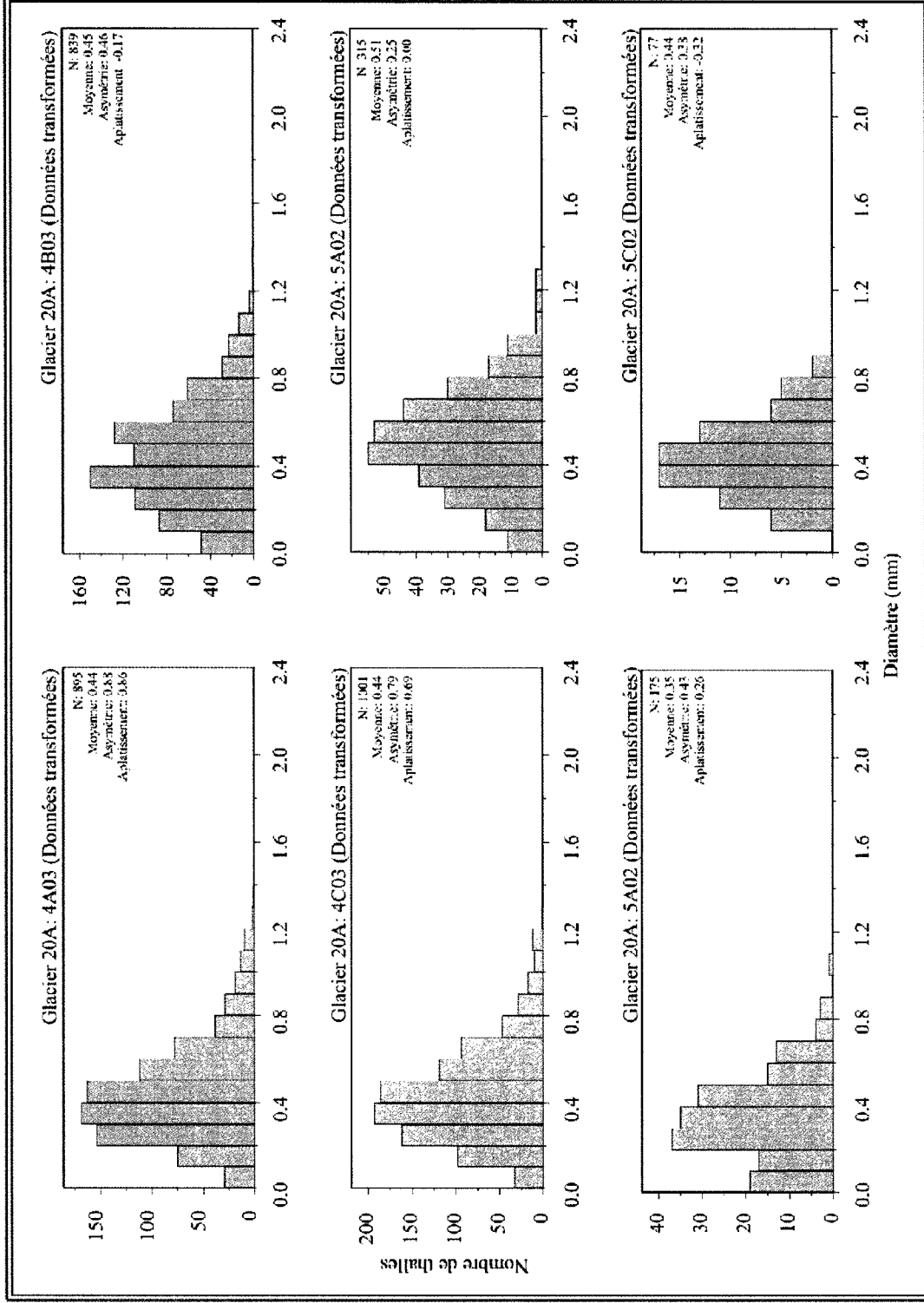


Figure 11.4: Histogrammes de la distribution taille-fréquence des données transformées du Glacier 20A

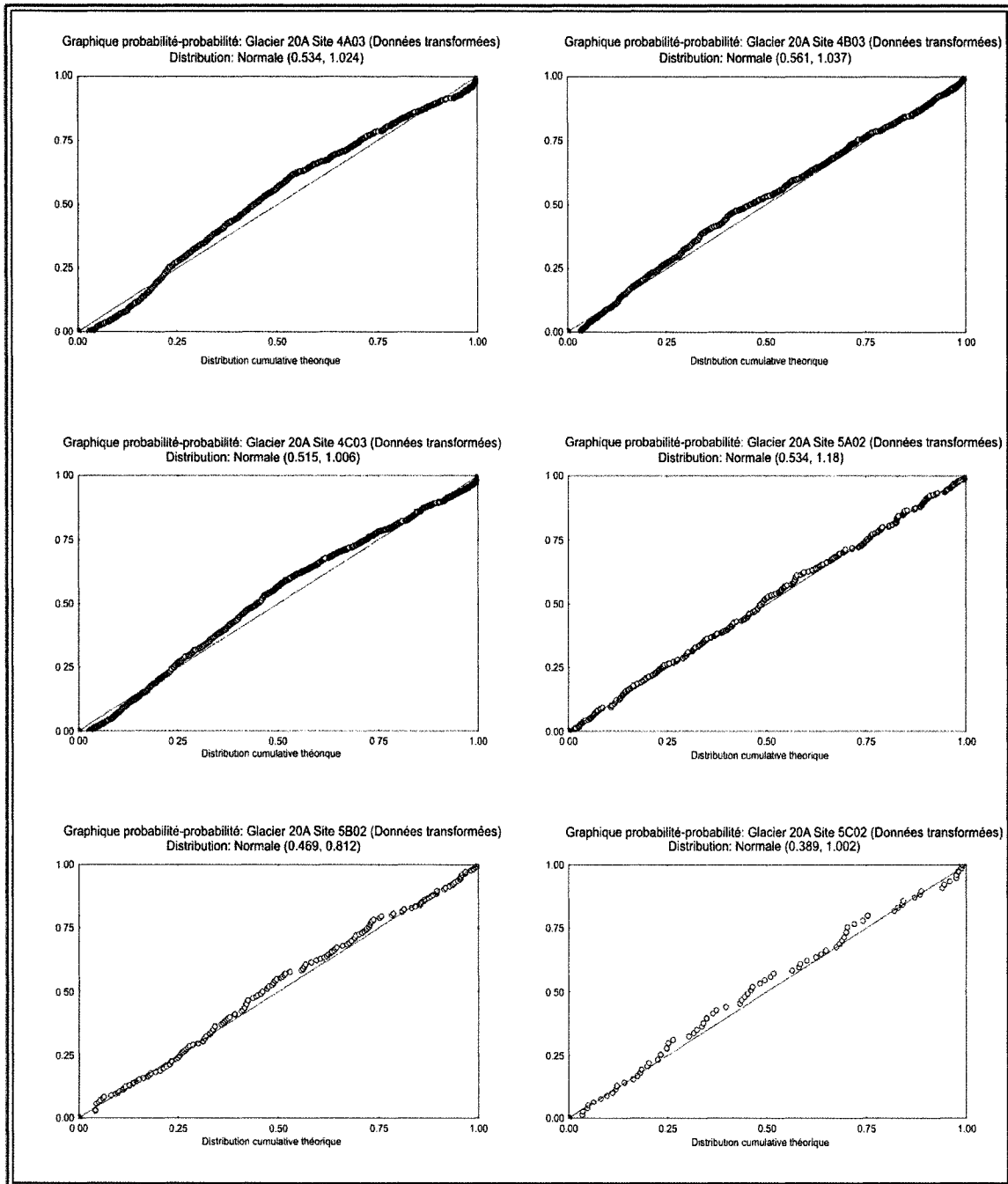


Figure 11.5: Graphique probabilité-probabilité des données transformées du Glacier 20A

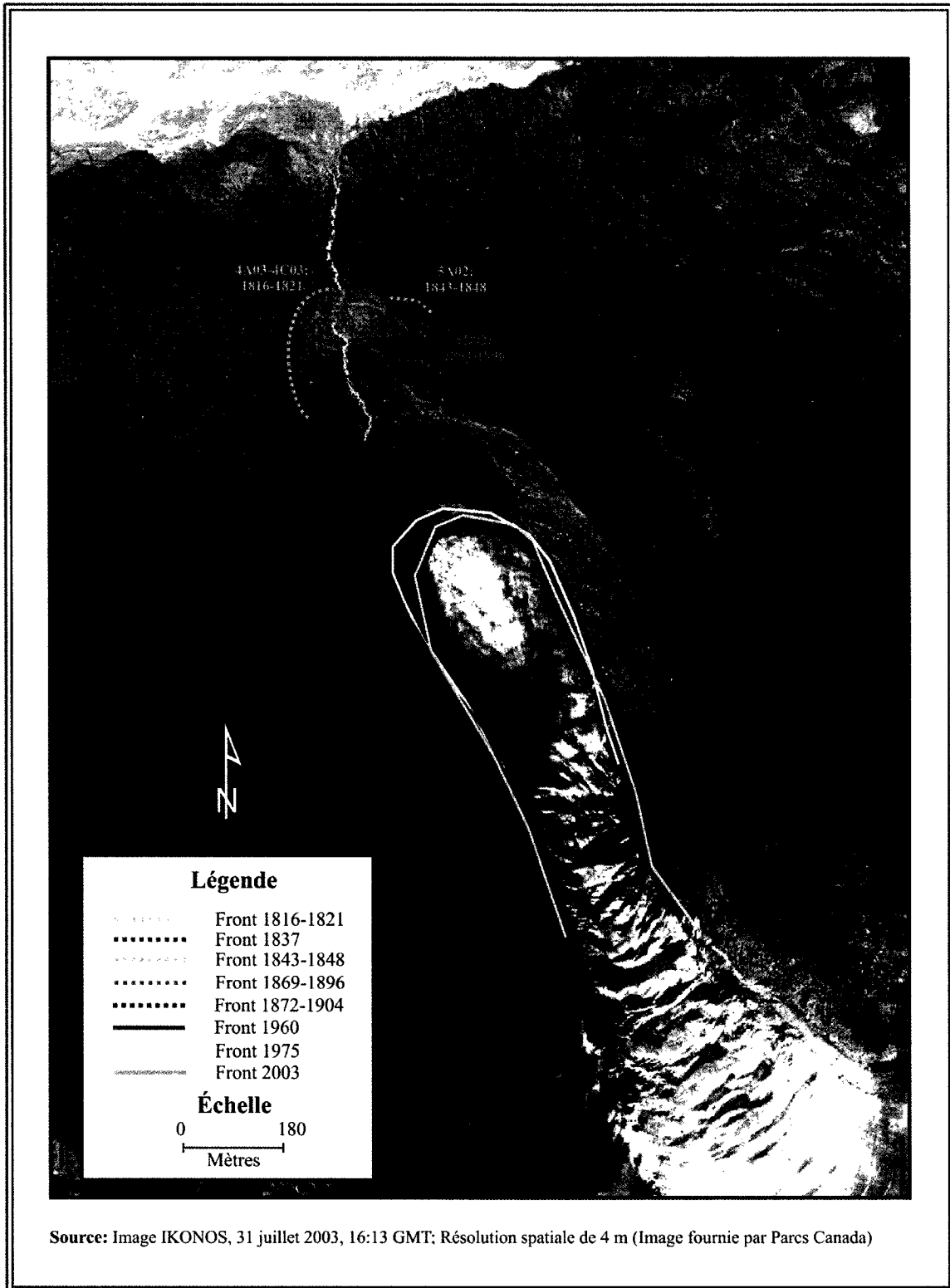


Figure 11.6 : Age des moraines étudiées du Glacier 20A

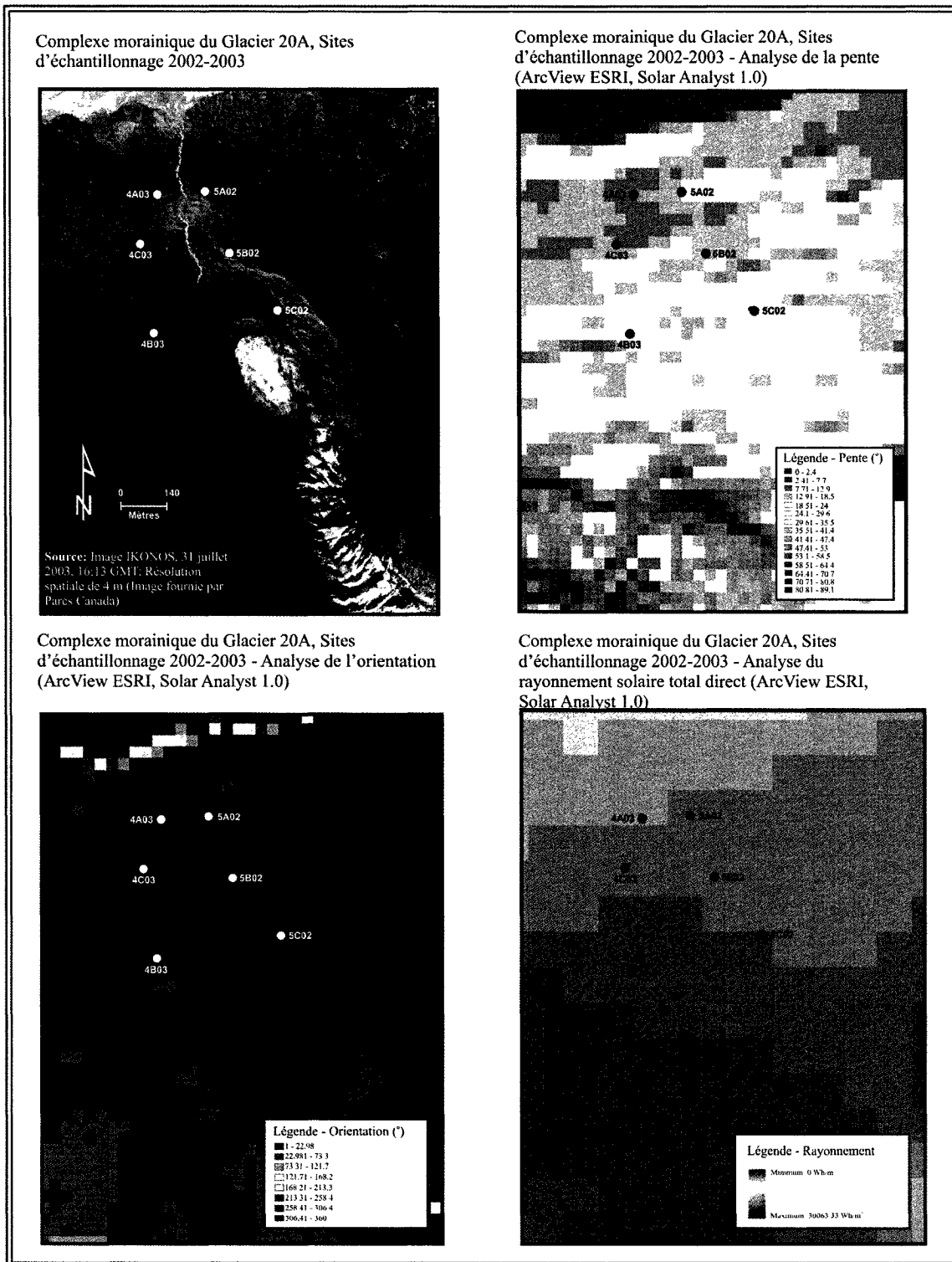


Figure 11.7: Caractéristiques des sites d'échantillonnage du complexe morainique du Glacier 20A

12 LE GLACIER SIVINGAVUK

12.1 FLUCTUATIONS MODERNES

12.1.1 Mesures lichénométriques et pourcentage de couverture des lichens

Six sites d'échantillonnage lichénométriques sont localisés sur une moraine interne du glacier Sivingavuk. Les sites 5A03, 5C03 et 5B03 sont situés sur le côté ouest de la moraine, tandis que les sites 6A02 à 6C02 sont localisés sur le côté est de la moraine (**Figure 12.1**). La taille des échantillons analysés est de 1003, 506 et 398 thalles pour les sites 5A03, 5C03 et 5B03 et de 300, 300 et 310 thalles pour les sites 6A02 à 6C02.

La moyenne du diamètre des thalles mesurés à l'intérieur des sites 5A03, 5C03 et 5B03 est de 3.42, 2.45 et 3.77 mm. Les thalles minimaux mesurés sont tous de 1 mm tandis que les thalles maximaux mesurés sont de 19 et 15 mm. La moyenne des diamètres des thalles mesurés à l'intérieur des sites 6A02 à 6C02 est de 22.31, 16.94 et 4.97 mm. Dans le même ordre, les thalles minimaux mesurés à l'intérieur de ces sites sont de 1.9, 2.3 et 1 mm. Les thalles maximaux mesurés pour ces mêmes sites sont de 146.2, 76.6 et 19.2 mm.

Des pourcentages de couverture des lichens de 31, 26 et 30 caractérisent les sites 5A03, 5C03 et 5B03, localisés sur la moraine ouest du complexe morainique du glacier Sivingavuk. Sur la moraine de l'est du complexe de ce même glacier, les sites 6A02 à 6C02 sont caractérisés par des pourcentages de couverture de 92, 68 et 34%. (**Figure 12.1**)

12.1.2 Caractéristiques des histogrammes des données brutes et des données transformées

La forme des histogrammes et la distribution des graphiques probabilité-probabilité sont semblables pour l'ensemble des sites et il s'avère que la distribution des données brutes n'est pas normale (**Figures 12.2 & 12.3**). Les sites d'échantillonnage sont caractérisés par une distribution taille-fréquence étalée vers la droite; les coefficients d'asymétrie sont de 2.4, 3.44 et de 1.79 pour les sites 5A03, 5C03 et 5B03 et de 2.48, 1.96 et de 1.76 pour les sites 6A02 à 6C02. Les sites 5A03, 5C03 et 5B03 possèdent une forte concentration et leur coefficient d'aplatissement sont de 8.54, 19.38 et 4.58, tandis que les sites 6A02 à 6C02 sont caractérisés par les coefficients d'aplatissement suivants : 8.89, 5.96 et 4.58. Ces histogrammes sont eux aussi fortement concentrés.

La même situation est observée pour les sites 5A03 à 5C03 et les sites 6A02 à 6C02 du complexe morainique du glacier Sivingavuk. La distribution des échantillons est normale. Les sites 5A03 à

5C03 sont caractérisés par une moyenne de 0.46, 0.47 et 0.34 mm (\log_{10}). Leur coefficient d'asymétrie est de 0.51, 0.46 et 0.75 et leur coefficient d'aplatissement est de 0.14, -0.7 et 0.89. Les sites 6A02 à 6C02 sont caractérisés par une moyenne de 0.65, 1.15 et 0.64 mm (\log_{10}). Leur coefficient d'asymétrie est de 0.03, -0.11 et 0.23 et leur coefficient d'aplatissement est de -0.28, 0.18 et -0.05 (Voir **Annexe 1** pour le tableau des statistiques des données transformées). D'après les résultats du test Kolmogorov-Smirnov, les sites d'échantillonnage du complexe morainique du glacier Sivingavuk possèdent une distribution normale, à l'exception du site 5B03. (Voir **Annexe 2**)

12.1.3 Analyse de variance et comparaisons *a posteriori*

Les sites d'échantillonnage 5A03, 5B03, 5C03, 6A02, 6B02 et 6C02 possèdent au moins une moyenne qui est significativement différente des autres, ceci étant démontré par l'analyse de variance. De plus, ceci est appuyé par la valeur F étant de 846.44, le F critique étant de 3.02 et la valeur- P , étant de 0 (**Annexe 3**).

La **Figure 12.1** montre les deux paires de sites d'échantillonnage n'ayant pas de moyennes significativement différentes : 5A03 et 5B03; 6A02 et 6B02. Les autres sites sont caractérisés par des moyennes significativement différentes.

12.1.4 Chronologie de l'âge des moraines

La chronologie du glacier Sivingavuk (**Figure 12.6**), basée sur les âges lichénométriques, est la suivante. La moraine frontale possède un âge entre 3159 et 5728 ans BP, correspondant au site lichénométrique 6A02. Par la suite, la moraine au site 6B02 s'est stabilisée entre 150 et 1143 et la moraine au site 6C02 s'est stabilisée entre 1493 et 1835. La chronologie des deux moraines latérales ne correspond pas parfaitement. L'âge des sites 5A03 et 5B03 est similaire au site 6C02; la moraine à ces deux sites se serait stabilisée entre 1828 et 1839. Par contre, le moment de la stabilisation de la moraine au site 5C03 ne suit pas un ordre logique, en comparaison avec les autres sites lichénométriques. Les lichens ont colonisé ce dernier entre 1854 et 1870. Cette moraine devrait être plus jeune qu'estimée.

12.1.5 Variations environnementales affectant la logique de la chronologie des moraines

L'analyse de variance et les comparaisons multiples des sites d'échantillonnage du complexe morainique du glacier Sivingavuk démontrent que les sites suivants sont statistiquement semblables :

(1) 6A02 et 6B02, et (2) 5A03 et 5B03. La chronologie des moraines latérales est logique à l'exception du site 5C03 situé entre 5A03 et 5B03, ayant un âge beaucoup plus récent. De plus, l'âge de la moraine au site 6A02 est considéré très vieille, étant peut-être surestimé comparativement aux autres sites.

Les caractéristiques environnementales des sites lichénométriques sont les suivants (**Tableau 12.1 & Figure 12.7**). La pente se situe entre 10° et 29° et elle est orientée vers le nord. De plus, tout comme les sites des glaciers Niflheim et 20A, le rayonnement solaire diminue avec l'augmentation de l'altitude des sites, passant de 8959 à 5798 Wh/m². Ces caractéristiques environnementales ne semblent pas pouvoir expliquer la situation de la chronologie du site 5C03. En ce qui concerne le site 6A02, il possède le rayonnement solaire direct le plus élevé annuellement et la croissance des lichens pourrait en bénéficier. De plus, comme ce site est moins exposé, étant protégé par la moraine frontale, la croissance des lichens est aussi favorisée.

Afin de bien cerner la dynamique des populations de lichens étudiés sur ce complexe morainique, l'exposition au vent, la disponibilité de l'humidité, la couverture de neige et les variations thermiques sont des facteurs qui devraient être pris en considération pour l'analyse lichénométrique.

Tableau 12.1: Caractéristiques des sites d'échantillonnage du complexe morainique du glacier Sivingavuk

| Site | Glacier | Coordonnées géographiques Latitude, Longitude (NAD 83) | Aire des sites (m ²) | Altitude (m) | Rayonnement solaire direct total (moyenne annuelle Wh/m ²) | Orientation de la moraine |
|------|------------|---|----------------------------------|--------------|--|---------------------------|
| 5A03 | Sivingavuk | 66°31'10"N, 65°21'48"W | 100 | 294 | 8866 | Nord |
| 5B03 | Sivingavuk | 66°31'06"N, 65°21'34"W | 25 | 367 | 5798 | Nord-ouest |
| 5C03 | Sivingavuk | 66°31'07"N, 65°21'39"W | 25 | 336 | 7715 | Nord-ouest |
| 6A02 | Sivingavuk | 66°31'14"N, 65°22'06"W | 100 | 289 | 8959 | Sud-ouest |
| 6B02 | Sivingavuk | 66°31'14"N, 65°21'58"W | 100 | 314 | 8515 | Ouest |
| 6C02 | Sivingavuk | 66°31'14"N, 65°21'46"W | 100 | 394 | 6038 | Nord-ouest |

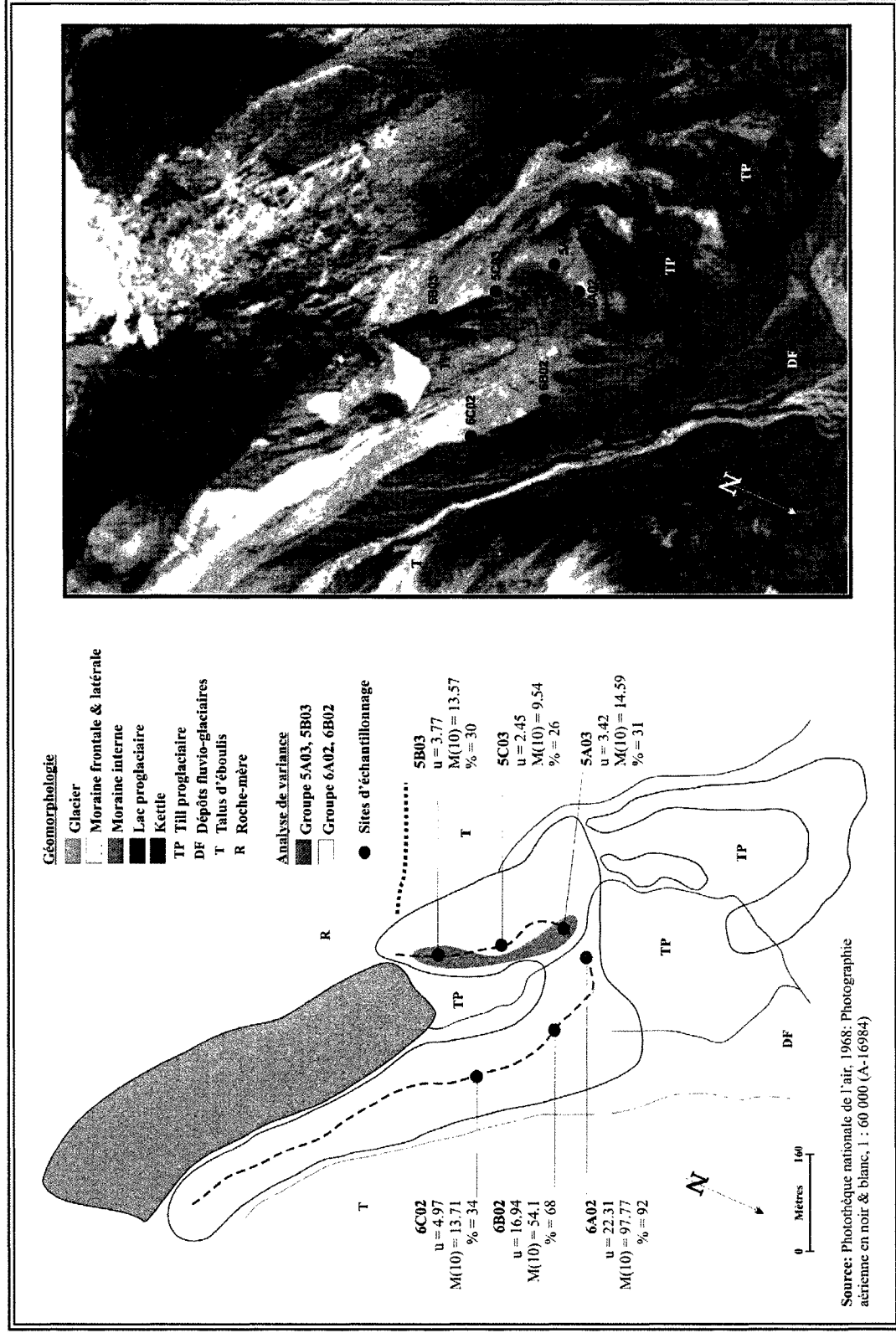


Figure 12.1: Sites d'échantillonnage et paramètres statistiques du complexe morainique du glacier Sivingavuk

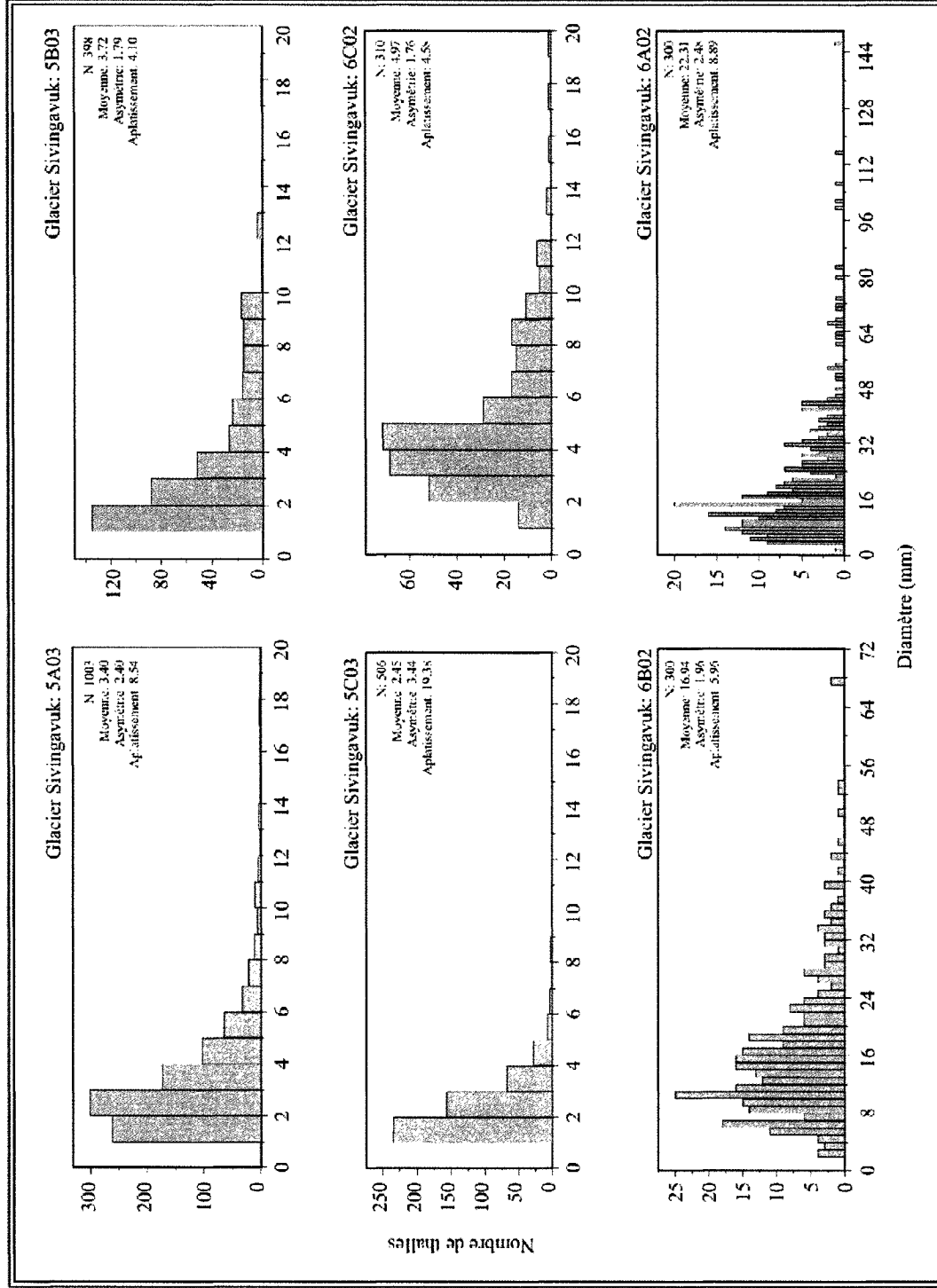


Figure 12.2: Histogrammes de la distribution taille-fréquence des données brutes du glacier Sivingavuk

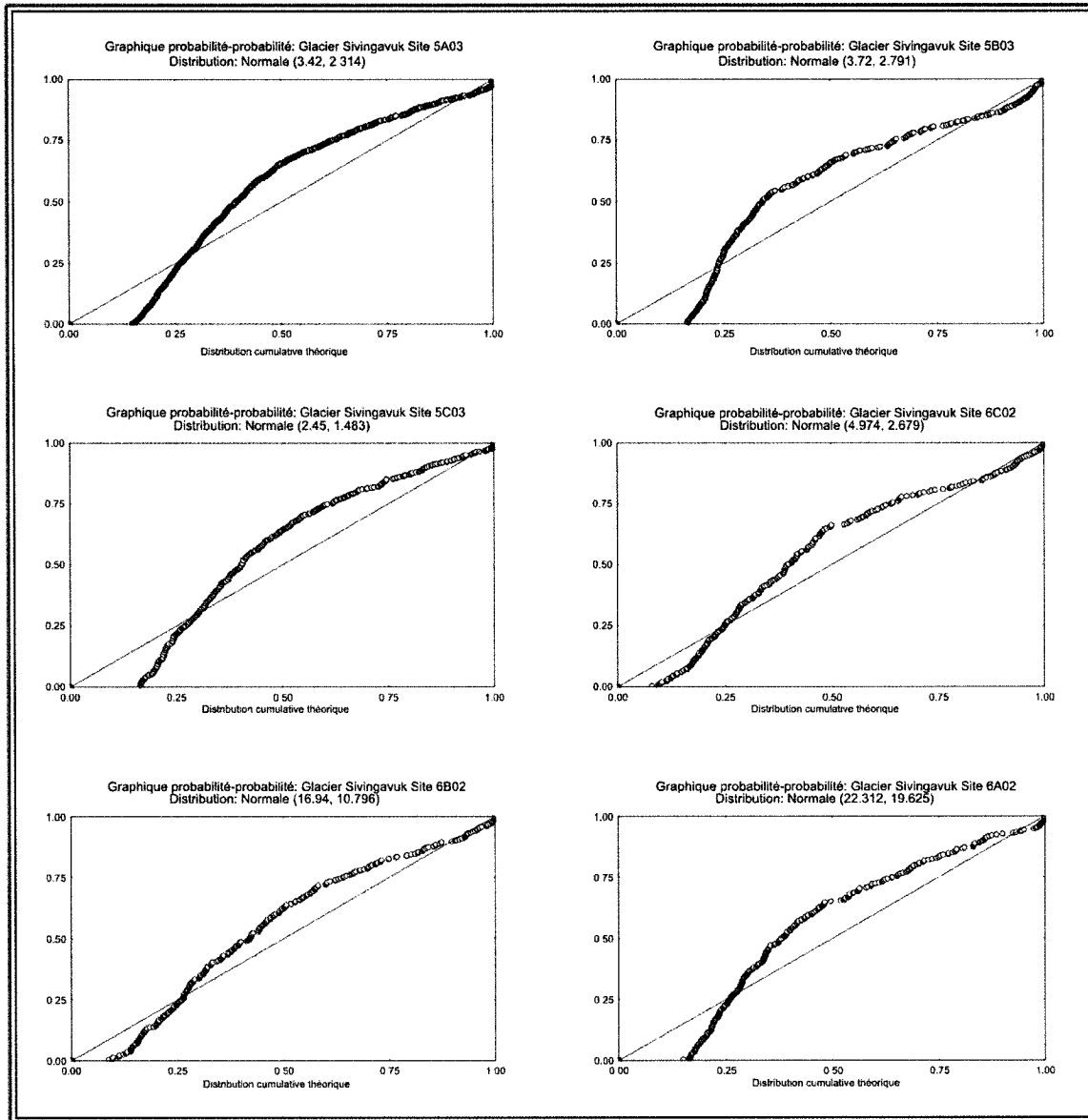


Figure 12.3: Graphique probabilité-probabilité des données brutes du glacier Sivingavuk

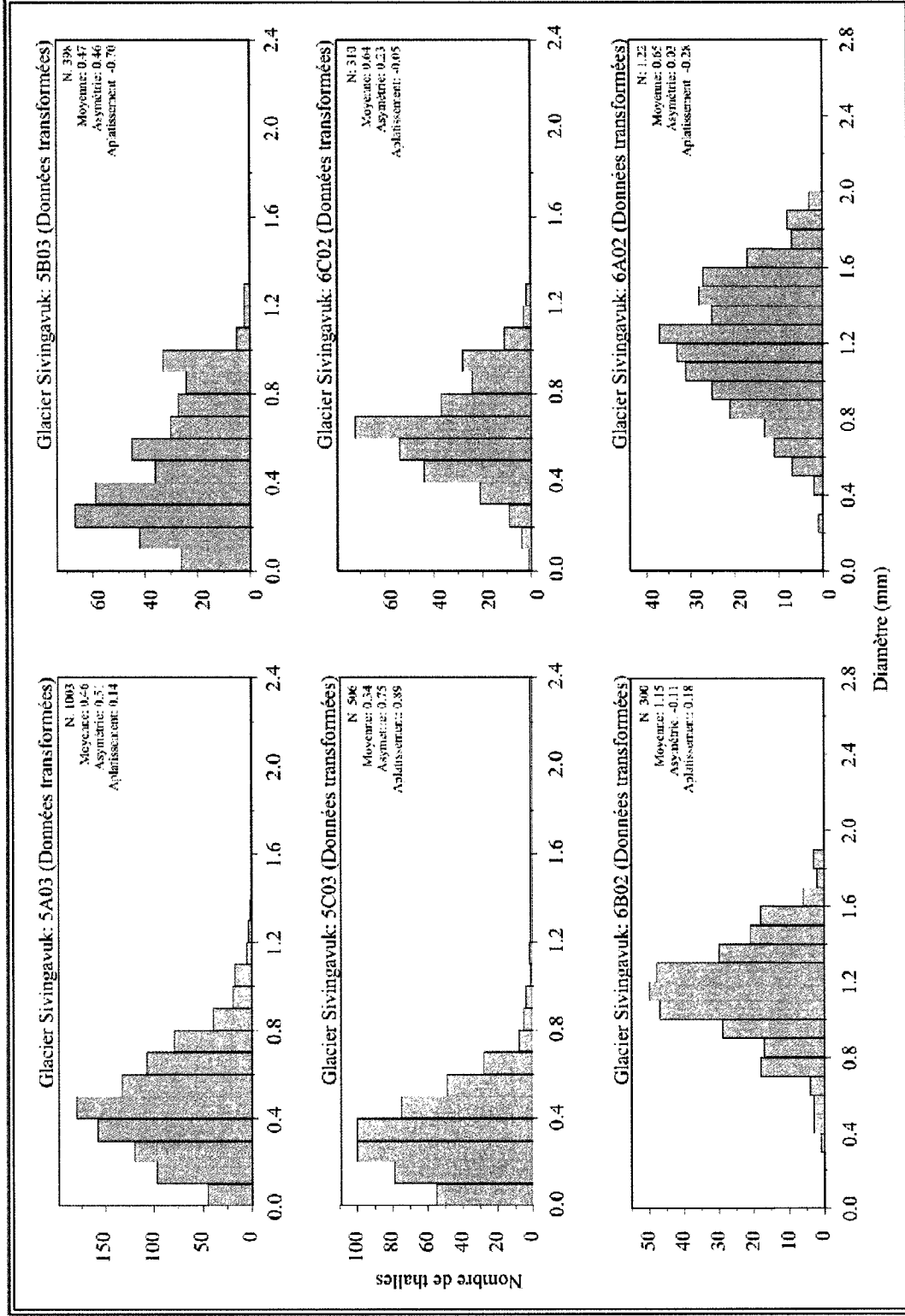


Figure 12.4: Histogrammes de la distribution taille-fréquence des données transformées du glacier Sivingavuk

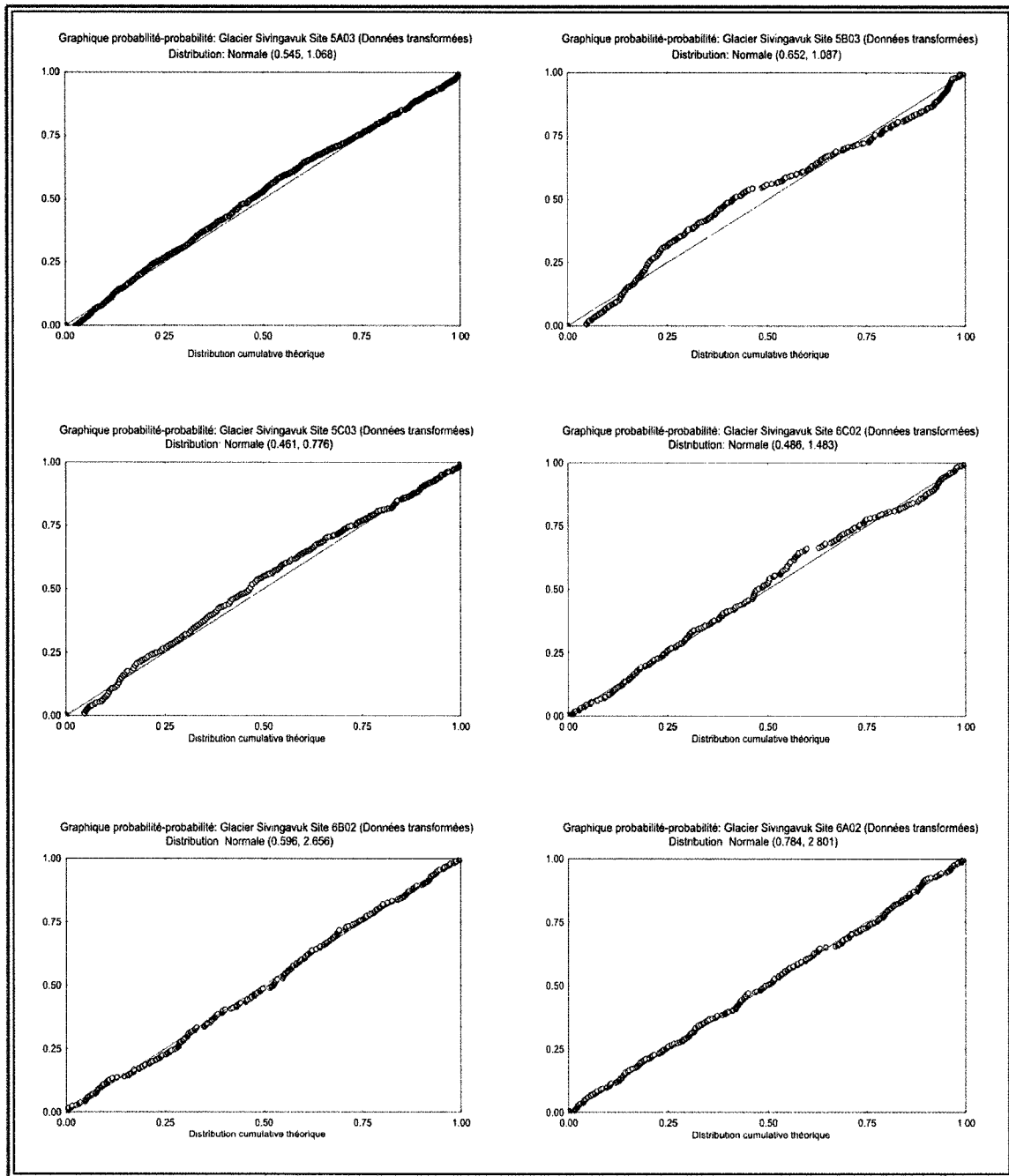


Figure 12.5: Graphique probabilité-probabilité des données transformées du glacier Sivingavuk

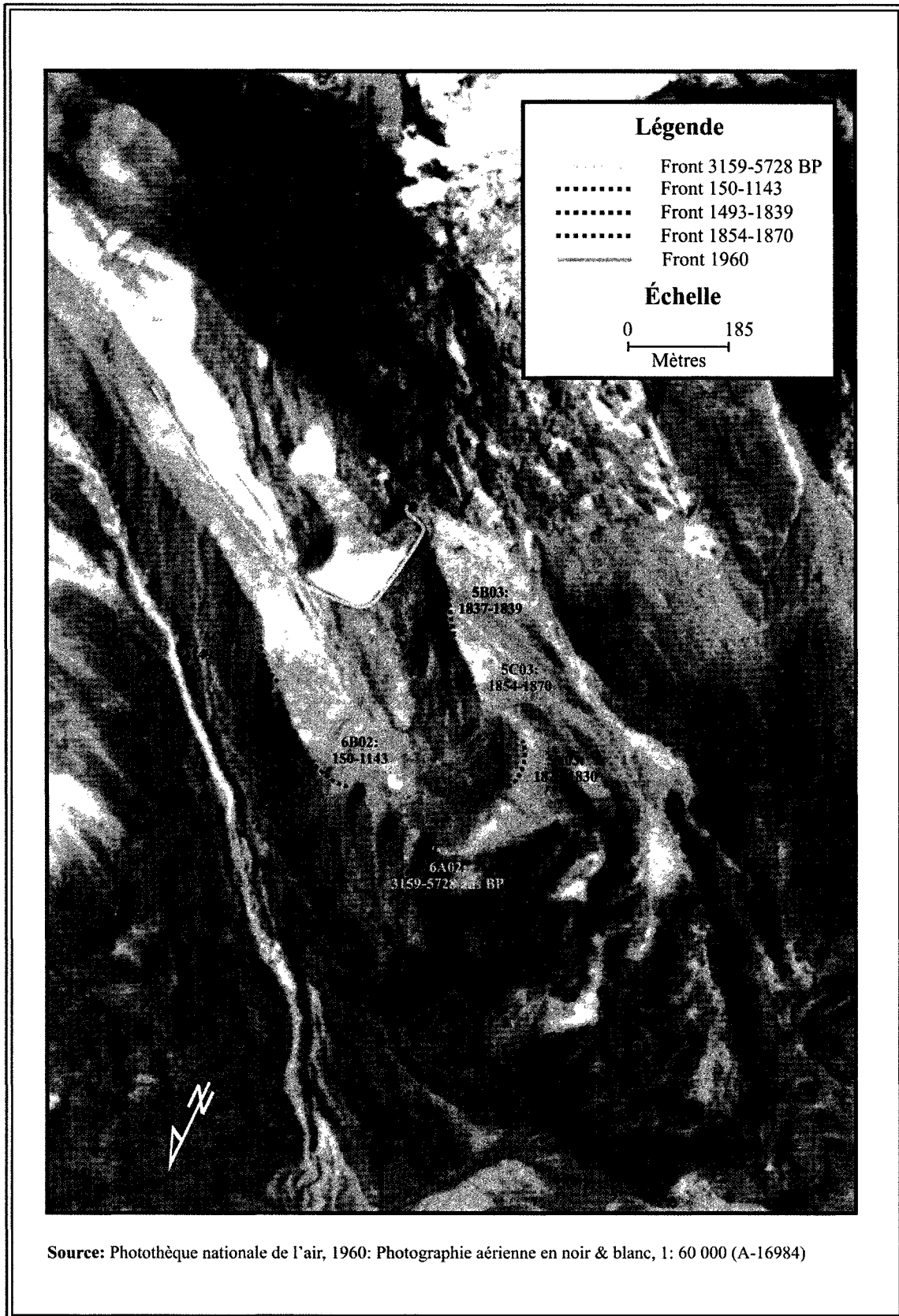


Figure 12.6 : Age des moraines étudiées du glacier Sivingavuk

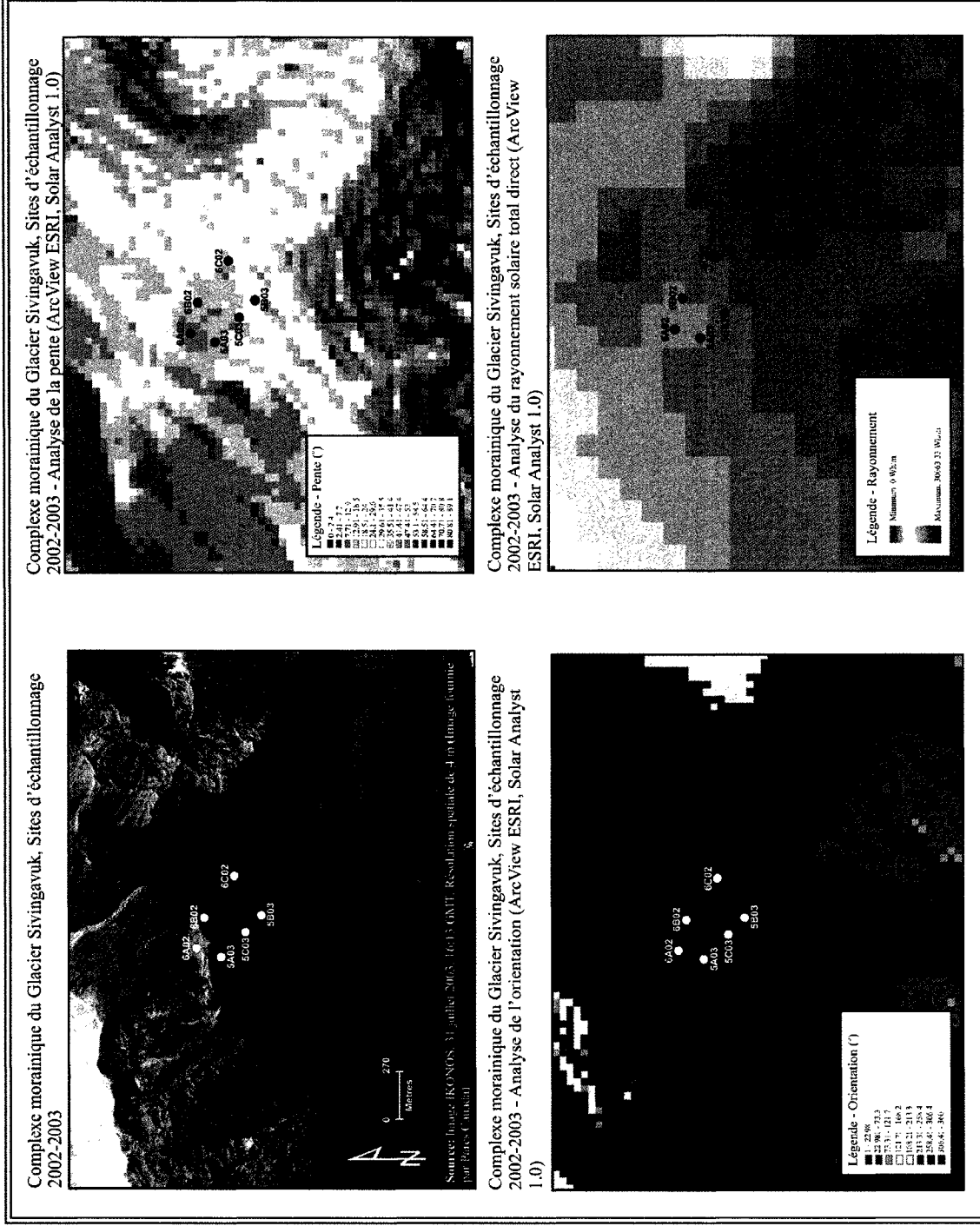


Figure 12.7: Caractéristiques des sites d'échantillonnage du complexe morainique du glacier Sivingavuk

13 SYNTHÈSE ET CONCLUSION GÉNÉRALE

13.1 FLUCTUATIONS ACTUELLES

Le premier but de cette recherche a été d'étudier les fluctuations des fronts glaciaires actuels localisés dans la Passe d'Akshayuk. La méthode utilisée a été celle de la photo-interprétation d'images aériennes associée à l'analyse de deux scènes satellitaires d'IKONOS et du capteur ETM + de LANDSAT 7. À partir de ces images, les reculs des fronts des glaciers dans cette Passe ont été cartographiés pour la période 1948-2003. Les deux glaciers orientés vers le nord, Niflheim et 20A, connurent durant cette période de temps les taux de retrait annuels les moins élevés, soit 1.6 et 2.6 m. Pour cette même période de temps, le glacier Windy Lake, orienté vers le sud, a eu un taux de retrait annuel de 10.8 m. Les glaciers Tête de Cirques et Glacier 12 ont connu les taux de retrait annuels les plus élevés, soit de 12.4 et 17.3 m. Le taux de retrait moyen annuel des cinq fronts glaciaires a été de 8.9 m par an entre 1948 et 2003.

En analysant les taux de retrait annuel entre 1948 et 2003 des glaciers Niflheim et 20A, (orientation nord et nord-ouest), on note que les taux varient très peu (**Tableau 13.1**). On note toutefois une période de recul plus accentuée entre 1960 et 1975, où le taux de retrait annuel augmente. En observant les taux de retrait annuel moyen pour le glacier Windy Lake (orientation sud), on considère que ce taux diminue graduellement entre les périodes de 1948-1960, 1960-1975 et 1975-2003. La période de 1948-1960 est caractérisée par le taux de retrait le plus élevé. En ce qui concerne le Glacier 12 (orientation sud-ouest), le taux de retrait annuel n'est que de 2.3 m entre 1948-1960; il augmente largement pour les périodes de 1960-1977 et de 1977-2003. Le taux de retrait annuel du glacier Tête de Cirques (orientation sud-ouest) pour la période de 1948-1960 est de 28.3 m. Entre 1960 et 1977, le front glaciaire recule peu et de 1977 à 2003, le taux de retrait annuel est de 8.6 m.

Il semble que les facteurs déterminant les taux de retrait soit le montant de rayonnement solaire direct total annuel perçu à la surface des glaciers et l'orientation de la pente moyenne des glaciers. Les glaciers orientés vers le nord ont été caractérisés par des taux de retrait minimes et négligeables, comparativement aux glaciers orientés vers l'ouest et le sud, ayant connu des taux de retrait annuel moyen plus élevés et considérables. Néanmoins, cinq glaciers ont été observés durant cette courte période de temps et comme seulement les facteurs environnementaux suivants ont été analysés, soit le rayonnement solaire, l'orientation, la pente et l'aire de la surface des glaciers, il est impossible d'expliquer les facteurs influençant véritablement les variations des fluctuations glaciaires actuelles. Dans le but de perfectionner cette analyse des fluctuations, les informations suivantes seraient nécessaires :

- Des mesures climatiques à proximité de la localisation des glaciers à l'étude, correspondant entièrement à la période de temps d'analyse des fluctuations;
- Des études de bilan de masse glaciaire, incorporant une évaluation de l'albédo de la surface des glaciers à l'étude, de la radiation de grandes ondes, du transfert de chaleur sensible et latente;
- Une analyse de la topographie des bassins glaciaires.

Tableau 13.1: Taux de retrait annuel (m) pour les différentes périodes d'analyse de la position des fronts glaciaires étudiés

| Glacier | Période d'analyse de la position des fronts glaciaires | Distance entre les fronts glaciaires (m) | Taux de retrait annuel par période (m) |
|-----------------|--|--|--|
| Turnweather | 925-1650 ² | 143 | 5.1 |
| | 1650-1850 ² | 163 | 1.2 |
| | 1850-2000 ² | 1457 | 9.7 |
| Tête de Cirques | 1850-1860 ² | 219 | 21.9 |
| | 1860-1948 ² | 350 | 4.0 |
| | 1948-1960 ¹ | 340 | 28.3 |
| | 1960-1977 ¹ | 5 | 0.3 |
| | 1977-2003 ¹ | 224 | 8.6 |
| Glacier 12 | 1794-1833 ² | 135 | 3.5 |
| | 1833-1844 ² | 365 | 33.2 |
| | 1844-1948 ² | 781 | 7.5 |
| | 1948-1960 ¹ | 27 | 2.3 |
| | 1960-1977 ¹ | 454 | 26.7 |
| Windy Lake | 1977-2003 ¹ | 597 | 23.0 |
| | 925-1650 ² | 150 | 0.2 |
| | 1650-1850 ² | 187 | 0.9 |
| | 1850-1948 ² | 560 | 5.7 |
| | 1948-1960 ¹ | 240 | 20.0 |
| | 1960-1975 ¹ | 149 | 9.9 |
| | 1975-2003 ¹ | 64 | 2.3 |
| Niflheim | 1847-1863 ² | 56 | 3.5 |
| | 1863-1877 ² | 190 | 13.6 |
| | 1877-1900 ² | 57 | 2.5 |
| | 1900-1948 ² | 57 | 1.2 |
| | 1948-1960 ¹ | 6 | 0.5 |
| 20A | 1960-1975 ¹ | 46 | 3.1 |
| | 1975-2003 ¹ | 34 | 1.2 |
| | 1819-1846 ² | 82 | 3.0 |
| | 1846-1883 ² | 47 | 1.3 |
| | 1883-1888 ² | 98 | 19.6 |
| Sivingavuk | 1888-1960 ² | 87 | 1.2 |
| | 1960-1975 ¹ | 64 | 4.3 |
| | 1975-2003 ¹ | 24 | 0.9 |
| | 1828-2003 ¹ | 352 | 2.7 |

¹ Fluctuations actuelles analysées à partir de la photo-interprétation

² Fluctuations modernes analysées à partir de la lichénométrie

13.2 FLUCTUATIONS MODERNES

Le deuxième but de la recherche a été de dater les fronts morainiques par une étude lichénométrique dans le sud de la Passe d'Akshayuk, afin d'établir une chronologie des fluctuations glaciaires modernes. Les résultats indiquent que les glaciers Tête de Cirques, Glacier 12, Niflheim, et Glacier 20A ont connu une avancée maximale entre l'an 1789 et 1850 de notre ère, incluant le temps de colonisation des lichens sur les surfaces étudiées. Quant à l'avancée maximale du glacier Sivingavuk, elle reste incertaine selon la technique de la lichénométrie. L'avancée maximale des glaciers Windy Lake et Turnweather, où le thalle maximum de *R. geographicum* a été mesuré (Davis, 1980), est estimée entre l'an 800 et 1050 de notre ère. Les valeurs lichénométriques de cette présente étude complètent celles de Davis (1980).

Les taux de retrait des sept glaciers étudiés à l'aide de la lichénométrie ont été déterminés à partir de la distance séparant deux positionnements frontaux glaciaires avec des âges lichénométriques calculés (distance mesurée à partir de l'image du capteur IKONOS; à l'exception du glacier Turnweather où l'image du capteur ETM+ de LANDSAT 7 de l'an 2000 a été employée). Le glacier Turnweather (orientation sud-ouest), a été caractérisé par un taux de retrait de 5.1 m par an entre 925 et 1650; ensuite, ce taux de retrait diminue à 1.2 m par an entre 1650 et 1850 pour augmenter à 9.7 m par an entre 1850 et 2000 (**Tableau 13.1**). La période froide du Petit Age Glaciaire est bien caractérisée par le taux de retrait de la période de 1650-1850. Le glacier Tête de Cirques (orientation sud-ouest) a connu un taux de retrait annuel de 22 m par an entre 1850 et 1860; par la suite, ce taux diminue considérablement entre 1860 et 1948 (4 m par an). Le front du Glacier 12 (orientation sud-ouest) a été caractérisé par un taux de retrait de 3.5 m par an entre 1794 et 1833; ensuite, entre 1833 et 1844, ce taux augmente considérablement à 33 m par an pour diminuer ensuite à 7.5 m par an pour la période 1844-1948. Les taux de retrait annuel des fronts des trois glaciers mentionnés précédemment indiquent une période de réchauffement généralement après le Petit Age Glaciaire, soit aux alentours de 1850. En ce qui concerne le front du glacier Windy Lake, le taux de retrait annuel a été minime durant les périodes de 925-1650 et 1650-1850, ceci indiquant la présence d'une période froide. Entre 1850 et 1948, le front a connu toutefois un taux de retrait plus rapide, soit de 5.7 m par an. Pour les fronts des glaciers Niflheim (orientation nord), 20A (orientation nord-ouest) et Sivingavuk (orientation ouest), le taux de retrait annuel a peu varié pour les périodes de fluctuations modernes, se situant entre 1.2 et 3.5 m par an. Toutefois, les glaciers Niflheim et 20A ont été caractérisés par un taux de retrait plus élevé entre 1863 et 1888, étant de 13.6 et 19.6 m par an; cette observation indique aussi un réchauffement suite au Petit Age Glaciaire.

Certaines variations environnementales sur les complexes morainiques des glaciers mentionnés précédemment ont été considérées pour l'application de la lichénométrie et l'interprétation de la chronologie des fluctuations glaciaires. On a observé que ces facteurs environnementaux (orientation, rayonnement solaire direct et température), ont des impacts sur la dynamique des populations de *R. geographicum* sur le complexe morainique du Glacier Tête de Cirques. Cependant, pour l'explication de l'incohérence de la chronologie du recul Glacier 12 et du glacier Sivingavuk, l'observation des caractéristiques environnementales notées pour ces sites d'échantillonnage ne semblent pas valables.

13.3 RECOMMANDATIONS

La précision des âges des moraines étudiées à partir de la lichénométrie et de l'espèce *R. geographicum* reste assez incertaine. Ces âges sont des estimations grossières qui indiquent un âge minimum de stabilisation des moraines. Afin d'augmenter la qualité des chronologies des fluctuations glaciaires modernes lors des prochaines études lichénométriques, les commentaires et les questions suivantes devraient être considérées :

- (1) Puisque les conditions climatiques ont varié depuis le Petit Âge Glaciaire, ces variations ont eu des impacts sur la dynamique des populations de lichens puisque la croissance des lichens est dépendante de micro et macro facteurs tels la disponibilité de l'humidité, la température, l'intensité de la lumière, la topographie, la stabilité du substrat, l'exposition au vent, la couverture de neige, et le rôle de la végétation. Comme il est impossible de mesurer ces facteurs dans le passé, ils laissent donc une incertitude face à la dynamique des populations de lichens et l'interprétation des âges lichénométriques obtenus. Des études plus approfondies devraient être réalisées dans le but de comprendre davantage les facteurs environnementaux qui affectent la croissance des lichens dans la vallée et sur les complexes morainiques des glaciers dans le sud de la Passe d'Akshayuk.
- (2) Le temps de colonisation des lichens est aussi inconnu pour l'espèce *R. geographicum*. Un temps minimum de 50 ans a été estimé dans la région d'étude à l'aide des photographies aériennes et le positionnement des fronts glaciaires. Toutefois, la colonisation des lichens pourrait avoir lieu à un niveau microscopique bien avant qu'un thalle soit visible à un niveau macroscopique, soit lorsqu'il y a une connexion symbiotique d'un champignon et d'un organisme chlorophyllien unicellulaire pour former un thalle. Les âges estimés pour les moraines représentent donc des âges minimums de stabilisation.

- (3) La dynamique des lichens est un autre point important qui reste encore plus ou moins bien compris dans le domaine de la lichénologie et de la lichénométrie. Le taux de mortalité, la compétition entre thalles et la succession sont des facteurs qui devraient être pris en considération lors d'études lichénométriques. Le taux de mortalité et la compétition entre thalles ont été observé selon la distribution taille-fréquence des échantillons de *R. geographicum*. Toutefois, ces observations devraient être approfondies davantage afin de caractériser et de comprendre l'influence des facteurs environnementaux.
- (4) La littérature indique que les lichens possèdent différentes phases de croissance. Toutefois, ces phases ne sont estimées que pour *R. geographicum*. Comme les taux de croissance d'un thalle varie considérablement selon les phases de croissance, ceci affecte les résultats pour l'interprétation des âges estimés par la lichénométrie d'une surface uniforme. De plus, les taux de croissance sont différents d'une espèce à l'autre. Il serait pertinent lors d'études futures d'effectuer des analyses des distributions taille-fréquence de l'espèce *Alectoria minuscula* (ayant un taux de croissance plus rapide que *R. geographicum*) sur des surfaces de jeunes âges.
- (5) Les recherches lichénométriques futures dans cette région devraient mesurer les variations micro-climatiques entre les sites d'échantillonnage. De plus, les facteurs environnementaux pourraient être notés, tel l'orientation des roches sur lesquelles croient des lichens, la température et l'humidité de la surface des substrats, et l'exposition au vent des sites d'échantillonnage. Comme il a été démontré que la chronologie établie à certains sites est plus ou moins cohérente avec la chronologie des autres sites lichénométriques l'entourant, ces facteurs pourraient sans doute fournir une explication de cette incohérence. Il serait sans doute plus raisonnable d'affirmer que certains complexes morainiques sont moins propices que d'autres à la colonisation et à la croissance des lichens.
- (6) Les âges lichénométriques des moraines ne sont basés que sur quelques points de contrôle, formant une courbe de croissance facilement critiquable. De plus, cette courbe de croissance a été établie pour la région nord de la péninsule de Cumberland. L'utilisation de cette courbe de croissance dans la région de la Passe d'Akshayuk ne prend donc pas en considération les différents facteurs environnementaux discutés précédemment, négligeant ainsi la précision des âges obtenus. Une courbe de croissance devrait être construite pour la région de la Passe d'Akshayuk. Mais comme la disponibilité de la matière organique est mince, ceci est difficile à accomplir. Afin de remédier à ce problème, des stations de mesures directes de la croissance de

thalles de lichens devraient être établies afin de mesurer les différents taux de croissance selon les différentes phases de croissance et ce, à partir de substrats caractérisés par des âges variés.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Anderson, J.L. & J.L. Sollid, 1971 : Glacial chronology and glacial geomorphology in the marginal zones of the glaciers Midtaldsbreen and Nigardsbreen, south Norway. *Norsk Geografiska Tidsskrift*, 25, 1-38.
- Andrews, J.T. & D.M. Barnett, 1979 : Holocene (neoglacial) moraine and proglacial lake chronology, Barnes Ice Cap, Canada. *Boreas*, 8, 339-356.
- Andrews, J.T. & P.J. Webber, 1964 : A lichenometrical study of the northwestern margin of the Barnes Ice Cap: a geomorphological technique. *Geographical Bulletin*, 22, 80-104.
- Andrews, J.T. & P.J. Webber, 1969 : Lichenometry to evaluate changes in glacial mass budgets : as illustrated from north-central Baffin Island, N.W.T. *Arctic and Alpine Research*, 1, 181-194.
- Andrews, J.T., Barry, R.G., Bradley, R.S., Miller, G.H. & L.D. Williams, 1972 : Past and present glaciological responses to climate in Eastern Baffin Island. *Quaternary Research*, 2, 303-314.
- Andrews, J.T., Davis, P.T. & C. Wright, 1976 : Little ice age permanent snowcover in the eastern Canadian Arctic : extent mapped from LANDSAT-1 satellite imager. *Geografiska Annaler*, 58A (1-2), 71-81.
- Armstrong, R.A., 1974 : Growth phases in the life of a lichen thallus. *New Phytologist*, 73, 913-918.
- Armstrong, R.A., 1976 : Studies on the growth rates of lichens. In *Lichenology: Progress and Problems* (Brown, D.H., Hawksworth, D.L., & Bailey, R.H., eds.), London, New York, San Francisco, Academic Press, 309-322.
- Bailey, R.H., 1976 : Ecological aspects of dispersal and establishment in lichens, In *Lichenology: Progress and Problems* (Brown, D.H., Hawksworth, D.L., & Bailey, R.H., eds.), London, New York, San Francisco, Academic Press, 215-247.
- Benedict, J.B., 1967 : Recent glacial history of an alpine area in the Colorado Front Range, U.S.A. I. Establishing a lichen-growth curve. *Journal of Glaciology*, 6 (48), 817-832.
- Benedict, J.B., 1968 : Recent glacial history of an alpine area in the Colorado Front Range, U.S.A. II. Dating the glacial deposits. *Journal of Glaciology*, 7 (49), 77-87.
- Benedict, J.B., 1988 : Techniques in lichenometry : Identifying the yellow Rhizocarpons. *Arctic and Alpine Research*, 20 (3), 285-291.
- Benedict, J.B., 1990 : Experiments on lichen growth. 1. Seasonal patterns and environmental controls. *Arctic and Alpine Research*, 22, 244-254.
- Benn, D.I. & D.J.A. Evans, 1998 : *Glaciers and Glaciation*. Arnold, London, 734 p.
- Beschel, R.E., 1957 : A project to use lichens as indicators of climate and time. *Arctic*, 10 (1), 60.
- Beschel, R.E., 1961 : *Botany and some remarks on the history of vegetation and glacierization. Jacobsen-McGill Arctic Research Expedition to Axel-Heiberg Island, Preliminary Report 1959-60* (ed. by B.S. Muller). McGill University, Montréal.

- Bickerton, R.W. & J.A. Matthews, 1992 : On the accuracy of lichenometric dates : an assessment based on the Little Ice Age moraine sequences of Nidardsbreen, southern Norway. *The Holocene*, 2, 227-237.
- Bickerton, R.W. & J.A. Matthews, 1993 : Little Ice Age variations of outlet glaciers from the Jostedalbreen ice-cap, southern Norway: a regional lichenometric-dating study of ice-marginal moraine sequences and their climatic significance. *Journal of Quaternary Science*, 8, 45-66.
- Bierman, P.R., Marsella, K.A., Patterson, C., Davis, P.T. & M. Caffee, 1999 : Mid-Pleistocene cosmogenic minimum-age limits for pre-Wisconsinan glacial surfaces in southwestern Minnesota and southern Baffin Island : a multiple nuclide approach. *Geomorphology*, 27, 25-39.
- Birkeland, P.W., 1973 : Use of relative age-dating methods in a stratigraphic study of rock glacier deposits, Mt. Sopris, Colorado. *Arctic and Alpine Research*, 5 (4), 401-416.
- Blouin, J-L., Desloges, C. & A. Guimond, 1975 : *Auyuittuq National Park Biophysical Classification of Pangnirtung Pass*. Unpublished report to Parks Canada, Prairie Region, Department of Indian and Northern Affairs. 2 volumes, 371 p.
- Brink, N.W.T., 1973 : Lichen growth rates in west Greenland. *Arctic and Alpine Research*, 5 (4), 323-331.
- Brodo, M., Sharnoff, S.D. & S. Sharnoff, 2001 : *Lichens of North America*. New Haven, London, Yale University Press, 795 p.
- Bull, W.B., & M.T. Brandon, 1998 : Lichen dating of earthquake-generated regional rockfall events, Southern Alps, New Zealand. *Geological Society of America*, 110, 1, 60-84.
- Bull, W.B., King, J., Kong, F., Mouttoux, T. & W.M. Phillips, 1994 : Lichen dating of coseismic landslide hazards in alpine mountains. *Geomorphology*, 10, 253-264.
- Calkin, P.E. & J.M. Ellis, 1980 : A lichenometric dating curve and its application to Holocene glaciers studies in the central Brooks Range, Alaska. *Arctic and Alpine Research*, 12 (3), 245-264
- Calkin, P.E. & J.M. Ellis, 1984 : Development and application of a lichenometric dating curve, Brooks Range, Alaska. In: *Quaternary Dating Methods*, (Mahaney W.C., ed.), Elsevier, 227-245.
- Carrara, P. & J.T. Andrews, 1972 : The Quaternary history of northern Cumberland Peninsula, Baffin Island, N.W.T.; Part I : the late and Neoglacial deposits of the Akudlermuit and Boas Glaciers. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 9, 403-414.
- Carrara, P.E. & J.T. Andrews, 1973 : Problems and application of lichenometry to geomorphic studies, San Juan Mountains, Colorado. *Arctic and Alpine Research*, 5 (4), 373-384.
- Carroll, T., 1974 : Relative age dating techniques and a late Quaternary chronology, Arikaree Cirque, Colorado. *Geology*, 2, 321-325.
- Davis, P.T., 1980 : Late holocene glacial, vegetational and climatic history of Pangnirtung and Kingnait Fiord area, Baffin Island, N.W.T., Canada. Unpublished PhD Thesis, University of Colorado, Boulder, Colorado.

Denton, G.H. & W. Karlen, 1977 : Holocene glacial and tree-line variations in the White River valley and Skolai Pass, Alaska and Yukon Territory. *Quaternary Research*, 7, 63-111.

Denton, G.H. & W. Karlen, 1973 : Lichenometry : Its application to Holocene moraine studies in Southern Alaska and Swedish Lapland. *Arctic and Alpine Research*, 5 (4), 347-372.

Derruau, M., 1974 : *Précis de géomorphologie*. 6^{ième} Édition, Maison et C^{ie}, Paris, France, 453 p.

Doucet, A., 2004 : *Fréquences et risques naturels des coulées de débris du sud de la vallée d'Akshayuk, du parc national du Canada Auyuittuq, Nunavut*. Mémoire de baccalauréat non publié, Université d'Ottawa, Ottawa.

Dyke, A.S., 1979 : Glacial and sea-level history of southwestern Cumberland Peninsula, Baffin Island, N.W.T., Canada. *Arctic and Alpine Research*, 11 (2), 179-202.

Dyke, A.S., 1990 : A lichenometric study of Holocene rock glaciers and neoglacial moraines, Frances lake map area, southeastern Yukon Territory and Northwest Territories. *Geological Survey of Canada Bulletin*, 394, 33 p.

Environnement Canada, 2004 : Service météorologique du Canada. Adresse URL : <http://weatheroffice.ec.gc.ca/> (Page visitée le 1 mai 2004).

Fairbridge, R.W., 1968 : *The Encyclopedia of Geomorphology, Encyclopedia of Earth Sciences*. Vol. III. Reinhold Book Corporation, New York, 1295 p.

Farrar, J.F., 1974 : A method for investigating lichen growth rates and succession. *Lichenologist*, 6, 151-155.

Fischer, D.A, Koerner, R.M., Bourgeois, J.C., Zielinski, G., Wake, C., Hammer, C.U., Clausen, H.B., Gundestrup, N., Johnsen, S., Goto-Azuma, K., Hondoh, T., Blake, E. & M. Gerasimoff, 1998 : Penny Ice Cap Cores, Baffin Island, Canada, and the Wisconsinan Foxe Dome Connection: Two states of Hudson Bay Ice Cover. *Science*, 279, 692-695.

Frederici, P.R. & M.C. Stefanini, 2001 : Evidence and Chronology of the Little Ice Age in the Argentera Massif (Italian Maritime Alps). Band 37, *Heft*, 1, S. 35-48.

Frontier, S., Davoult, D., Gentilhomme, V. & Y. Lagadeuc, 2001 : *Statistique pour les sciences de la vie et de l'environnement: Cours et exercices corrigés*. Paris, Dunod, 377 p.

Fu, P. & P.M. Rich, *Design and Implementation of the Solar Analyst: an ArcView Extensions for Modelling Solar Radiation at Landscape Scale*. Adresse URL : <http://gis.esri.com/library/userconf/proc99/proceed/papers/pap867/p867.htm#introduction> (page visitée le 4 avril 2004)

GÉOBASE, Gouvernement du Canada. Adresse URL : www.geobase.ca (page visitée le 6 avril 2004)

Gordon, J.E., & M. Sharp, 1983 : Lichenometry in dating recent glacial landforms and deposits, southeast Iceland. *Boreas*, 12, 191-200.

Graham, D., 1997 : The Neoglacial history of Akshayuk Pass, Baffin Island, Canada, using lichenometry and rock weathering techniques. Unpublished B.Sc. thesis, University of Nottingham.

- Haines-Young, R.H., 1988 : Size-frequency and size-density relationships in populations from the Rhizocarpon sub-genus Cern. on moraine slopes in southern Norway. *Journal of Biogeography*, 15, 863-878.
- Hill, D.J., 1981 : The growth of lichens with special reference to the modelling of circular thalli. *Lichenologist*, 13 (1), 265-287.
- Innes, J.L., 1981 : A manual for lichenometry – Comment. *Area*, 13, 237-241.
- Innes, J.L., 1982 : Lichenometric use of an aggregated Rhizocarpon species. *Boreas*, 11, 53-57.
- Innes, J.L., 1983a : Lichenometric dating of debris-flow deposits in the Scottish Highlands. *Earth Surface Processes and Landforms*, 8, 579-588.
- Innes, J.L., 1983b : Size frequency distribution as a lichenometric technique: an assessment. *Arctic and Alpine Research*, 15, 285-294.
- Innes, J.L., 1984 : The optimal sample size in lichenometric studies, *Arctic and Alpine Research*, 16, 233-244.
- Innes, J.L., 1985a : Lichenometry. *Progress in Physical Geography*, 9, 187-254.
- Innes, J.L., 1985b : A standard Rhizocarpon nomenclature for lichenometry. *Boreas*, 14, 83-85.
- Innes, J.L., 1986a : Dating exposed surfaces in the Arctic by lichenometry : the problem of thallus circularity and its effect on measurement errors. *Arctic*, 39, 253-259.
- Innes, J.L., 1986b : Influence of sampling design in lichen size-frequency distributions and its effect on derived lichenometric indices. *Arctic and Alpine Research*, 18, 201-208.
- Innes, J.L., 1986c : The size-frequency distributions of the lichens *Sporastatia testudinea* and *Rhizocarpon alpicola* through time at Storbreen south-west Norway. *Journal of Biogeography*, 13, 283-291.
- Innes, J.L., 1988 : The use of lichens in dating. In *Handbook of lichenology* (Galun, M., ed.), Boca Raton, Fl.:CRC Press, 75-92.
- INQUA, 1987 : *International Union for Quaternary Research: Excursion Guide Book C-2, Cumberland Sound and Frobisher Bay, Southeastern Baffin Island, Northwest Territories*. The National Research Council of Canada & The Canadian Quaternary Association, 91 p.
- IPCC, 2001 : *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Houghton, J.T., Y. Ding, D.J. Griggs, M. Noguer, P.J. van der Linden, X. Dai, K. Maskell & C.A. Johnson (eds.), Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 881pp.
- Jennings, A.E., 1993 : The Quaternary history of Cumberland Sound, southeastern Baffin Island: The marine evidence. *Géographie physique et quaternaire*, 47 (1), 21 pp.
- Jochimsen, M., 1973 : Does the lichen thalli size really constitute a valid measure for dating relict glacio-morphological features? *Arctic and Alpine Research*, 5, 417-424.

- Karlén, W., 1973 : Holocene glacier and climatic variations in the Kebnekaise Mountains, Swedish Lapland. *Geografisk Annaler*, 55A, 29-63.
- Karlén, W., 1979 : Glacier fluctuations in the Svartisen area, northern Norway. *Geografiska Annaler*, 61A, 11-28.
- Kirk, R.E., 1995 : *Experimental Design; Procedures for the Behavioral Sciences*. Pacific Grove, 3rd Edition, Brooks/Cole Publishing Company, 921 p.
- Kirk, R.E., 1999 : *Statistics: An Introduction*. Orlando, 4th Edition, Harcourt Brace College Publishers, 755 p.
- Lévesques, E. & J. Svoboda, 1999 : Vegetation re-establishment in *polar lichen-kill* landscapes : a case study of the Little Ice Age impact. *Polar Research*, 18, 221-228.
- Lindsay, D.C., 1973 : Estimates of lichen growth rates in the maritime Antarctic. *Arctic and Alpine Research*, 5, 341-349.
- Locke, C.W. & W.W. III Locke, 1977 : Little ice age snow-cover extent and paleoglaciation thresholds : north-central Baffin Island, N.W.T., Canada. *Arctic and Alpine Research*, 9 (3), 291-300.
- Locke, W.W. III, 1983 : Discussion of "Size frequency distribution as a lichenometric technique: an assessment" by J.L. Innes. Correspondence. *Arctic Alpine Research*, 15, 419.
- Locke, W.W. III, Andrews, J.T. & P.J. Webber, 1979 : *A manual for lichenometry*. British Geomorphological Research Group, Technical bulletin, 26, 45 p.
- Luckman, B.H., 1977 : Lichenometric dating of Holocene moraines at Mount Edith Cavell Jasper, Alberta. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 14, 1809-1822.
- Marsella, K.A, Bierman, P.R., Davis, P.T & M.W. Caffee, 2000 : Cosmogenic ¹⁰Be and ²⁶Al ages for the Last Glacial Maximum, eastern Baffin Island, Arctic Canada. *Geological Society of America Bulletin*, 112 (7), 1296-1312.
- Matthews, J.A. & R.A. Shakesby, 1984 : The status of the Little Ice Age in southern Norway: relative age dating of Neoglacial moraines with Schmidt hammer and lichenometry. *Boreas*, 13, 333-346.
- Matthews, J.A., 1973 : Lichen growth on an active medial moraine, Jotunheimen, Norway, *Journal of Glaciology*, 12 (65), 305-313.
- Matthews, J.A., 1974 : Families of lichenometric dating curves from the Storbreen gletschervorfeld, Jotunheimen, Norway. *Norsk Geografisk Tidsskrift*, 28, 215-235.
- Matthews, J.A., 1975 : Experiments on the reproducibility and reliability of lichenometric dates, Storbreen gletschervorfeld, Jotunheimen, Norway. *Norsk Geografisk Tidsskrift*, 29, 97-109.
- Matthews, J.A., 1994 : Lichenometric dating: a review with particular reference to Little Ice Age moraines in southern Norway, In *Dating in exposed and surface contexts* (Beck, C., ed.), 185-212, Albuquerque: University of New Mexico Press.

- McCarroll, D., 1994 : A new approach to lichenometry: dating single-age and diachronous surfaces. *The Holocene*, 4, 383-396.
- McCarthy, D.P. & D.J. Smith, 1995 : Growth curves for calcium tolerant lichens in the Canadian Rocky Mountains. *Arctic Alpine Research*, 27, 290-297.
- McCarthy, D.P. & Z. Zaniewski, 2001 : Digital analysis of lichen cover: a technique for use in lichenometry and lichenology. *Arctic, Antarctica and Alpine Research*, 33 (1), 107-113.
- McCarthy, D.P., 1999 : A biological basis for lichenometry? *Journal of Biogeography*, 26, 379-386.
- McCarthy, D.P., 2002a : Lichenometry, In *Monitoring with lichens – Monitoring Lichens* (P.L. Nimis, C. Scheidegger & P.A. Wolseley, eds.), Kluwer Academic Publishers, Netherlands, 379-383.
- McCarthy, D.P., 2002b : Estimating lichenometric ages by direct and indirect measurement of radial growth: a case study of *Rhizocarpon* agg. at the Illecillewaet Glacier, British Columbia. In *preparation*. Brook University, St.Catherines, Ontario, May 2002.
- Miller, G.H. & J.T. Andrews, 1972 : Quaternary history of northern Cumberland Peninsula, East Baffin Island, N.W.T., Canada. Part VI: Preliminary lichen growth curve. *Bulletin of the Geological Society of America*, 83, 1133-1138.
- Miller, G.H., 1973a : Late Quaternary glacial and climatic history of northern Cumberland Peninsula, Baffin Island, N.W.T., Canada. *Quaternary Research*, 3, 561-583.
- Miller, G.H., 1973b : Variations in lichen growth from direct measurements: Preliminary curves for *Alectoria miniscula* from Eastern Baffin Island, N.W.T., Canada. *Arctic and Alpine Research*, 5 (4), 333-339.
- Miller, G.H., Wolfe, A.P., Steig, E.J., Sauer, P.E., Kaplan, M.R. & J.P. Briner, 2002 : The Goldilocks dilemma: big ice, little ice, or « just-right » ice in the Eastern Canadian Arctic. *Quaternary Science Reviews*, 21, 33-48.
- Mottershead, D.N. & White, I.D., 1972 : The lichenometric dating of glacier recession, Tunsbergdal, southern Norway. *Geografiska Annaler*, 54A, 47-52.
- Mottershead, D.N., 1980 : Lichenometry – some recent applications, In *Timescale in geomorphology* (Cullingford, R.A., Davidson, D.A. & Lewin, J., eds.), Chichester: Wiley, 96-108.
- Nesje, A. & S.O. Dahl, 2000 : *Glaciers and environmental change*. Collection Key issues in environmental change, Arnold, London, 203 p.
- Orombelli, G. & S. Porter, 1983 : Lichen growth curves for the southern flank of the Mont Blanc Massif, Western Italian Alps. *Arctic and Alpine Research*, 15, 193-200.
- Parcs Canada, 2002 : Ecological Data Management Directive – Parks Canada Ecosystem Conservation Plan 1998, Hull, Canada.
- Parcs Canada, 2004 : *Plan des niveaux des parcs nationaux: Introduction au plan de réseau des parcs nationaux*. Gouvernement du Canada, Patrimoine Canada.

Plasse, Daniel, 2002 : *Approche à l'utilisation des géoindicateurs abiotiques dans les parcs nationaux du Canada pour fin de suivi des écosystèmes*. Université de Sherbrooke, Sherbrooke, 93 p.

Proctor, M.C.F., 1983 : Sizes and growth rates of the lichen *Rhizocarpon geographicum* on the moraines of the Glacier de Valsoray, Valais, Switzerland. *Lichenologist*, 15, 249-262.

Rapp, A. & R. Nyberg, 1981 : Alpine debris flows in northern Scandinavia. *Geografiska Annaler*, 63A, 183-196.

Reger, R.D. & T.L. Péwé, 1969 : Lichenometric dating in the central Alaska Range, In *The Periglacial Environment: Past and Present* (Péwé, T.L., ed.), McGill-Queen's University Press and Arctic Institute of North America, Montreal, 223-247.

Scherrer, B., 1984 : *Biostatistique*. Chicoutimi, Québec, Gaëtan Morin Éditeur, 850 p.

Shaw, G. & D. Wheeler, 1985 : *Statistical Techniques in Geographical Analysis*. Chichester, New York, Brisbane, Toronto, Singapore, John Wiley & Sons, 364 p.

Smith, D.J., McCarthy, D.P., & M.E. Colenutt, 1995 : Little Ice Age glacial activity in Peter Lougheed and Elk Lakes Provincial Parks, Canadian Rocky Mountains. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 32, 579-589.

Sprinthall, R.C., 1987 : *Basic Statistical Analysis*. Englewood Cliffs, 2nd Edition, Prentice-Hall Inc., 433 p.

Stork, A., 1963 : Plant immigration in front of retreating glaciers with examples from the Kebnekajse area, Northern Sweden. *Geografiska Annaler*, 45 (1), 1-22.

Thompson, H.R., 1954 : Pagnirtung Pass, Baffin Island: an exploratory regional geomorphology. Unpublished PhD thesis, Montreal, McGill University.

Topham, P.B., 1977 : Colonization, growth, succession and competition, In *Lichens Ecology* (M.R.D. Seaward, ed.), London, New York, San Francisco, Academic Press, 31-68.

United States Geological Survey Professional Paper 1386-J, 2002 : *Satellite Image Atlas of Glaciers of the World, North America*. United States Geological Survey, Denver, 405 p.

Vivian, R., 1975 : *Les glaciers des alpes occidentales, Études géographiques*. Imprimerie Allier, Grenoble, France, 513 p.

Webber, P.J. & J.T. Andrews, 1973 : Lichenometry: a commentary. *Arctic Alpine Research*, 5, 295-302.

Williams, L.D., 1978 : The Little Ice Age glaciation level on Baffin Island, Arctic Canada. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 25, 199-207.

Wilson, R., 1976 : *The land that never melts, Auyuittuq National Park*. Indian and Northern Affairs, Parks Canada, Publishing Centre, Supply and Services Canada, 212 p.

Wright, C., 1975 : Lichen-free areas as indicators of recent extensive glacierization in north-central Baffin Island, N.W.T., Canada. Unpublished MA thesis, University of Colorado, Boulder.

ANNEXE 1

Paramètres statistiques des données transformées des sites d'échantillonnage 2002-2003

Paramètres statistiques des données transformées des sites d'échantillonnage 2002-2003

| Sites | N | Moyenne (mm log ₁₀) | Limite de confiance - 0.95% | Limite de confiance 0.95% | Médiane (mm log ₁₀) | Minimum (mm log ₁₀) | Maximum (mm log ₁₀) | 25 ^{ème} Quartile | 75 ^{ème} Quartile | Variance | Écart- type | Erreur- type | Asymétrie | Aplatissement |
|-------|------|------------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|----------|----------------|-----------------|-----------|---------------|
| 1A02 | 336 | 0.66 | 0.64 | 0.68 | 0.66 | 0.09 | 1.21 | 0.53 | 0.79 | 0.04 | 0.20 | 0.01 | -0.26 | -0.12 |
| 1B02 | 254 | 0.63 | 0.60 | 0.66 | 0.63 | 0.00 | 1.22 | 0.47 | 0.83 | 0.06 | 0.25 | 0.02 | -0.35 | -0.19 |
| 1A03 | 932 | 0.56 | 0.54 | 0.57 | 0.56 | 0.00 | 1.17 | 0.39 | 0.72 | 0.05 | 0.23 | 0.01 | 0.05 | -0.41 |
| 1B03 | 649 | 0.47 | 0.45 | 0.48 | 0.46 | 0.00 | 1.16 | 0.30 | 0.64 | 0.05 | 0.23 | 0.01 | 0.16 | -0.52 |
| 1C03 | 508 | 0.44 | 0.42 | 0.45 | 0.40 | 0.00 | 1.16 | 0.29 | 0.57 | 0.05 | 0.22 | 0.01 | 0.59 | 0.39 |
| 1D03 | 174 | 0.42 | 0.38 | 0.46 | 0.39 | 0.00 | 1.20 | 0.20 | 0.60 | 0.07 | 0.27 | 0.02 | 0.48 | -0.51 |
| 2A03 | 767 | 1.12 | 1.10 | 1.14 | 1.17 | 0.01 | 1.71 | 0.99 | 1.32 | 0.09 | 0.29 | 0.01 | -1.12 | 1.57 |
| 2B03 | 753 | 0.65 | 0.63 | 0.67 | 0.68 | 0.00 | 1.45 | 0.40 | 0.87 | 0.10 | 0.32 | 0.01 | 0.00 | -0.66 |
| 3A02 | 148 | 0.53 | 0.50 | 0.57 | 0.52 | 0.01 | 1.05 | 0.36 | 0.69 | 0.05 | 0.23 | 0.02 | 0.16 | -0.60 |
| 3B02 | 172 | 0.50 | 0.47 | 0.53 | 0.49 | 0.00 | 0.99 | 0.36 | 0.67 | 0.05 | 0.22 | 0.02 | -0.07 | -0.56 |
| 3A03 | 741 | 0.48 | 0.47 | 0.50 | 0.47 | 0.00 | 1.17 | 0.32 | 0.63 | 0.05 | 0.22 | 0.01 | 0.36 | -0.09 |
| 3B03 | 824 | 0.42 | 0.40 | 0.43 | 0.39 | 0.00 | 2.49 | 0.26 | 0.55 | 0.05 | 0.22 | 0.01 | 2.15 | 16.85 |
| 3C03 | 668 | 0.42 | 0.41 | 0.44 | 0.41 | 0.00 | 1.17 | 0.27 | 0.56 | 0.04 | 0.21 | 0.01 | 0.28 | -0.15 |
| 3D03 | 88 | 0.25 | 0.22 | 0.29 | 0.26 | 0.00 | 0.64 | 0.13 | 0.35 | 0.02 | 0.16 | 0.02 | 0.26 | -0.51 |
| 4A02 | 286 | 0.57 | 0.54 | 0.60 | 0.57 | 0.00 | 1.20 | 0.39 | 0.75 | 0.06 | 0.25 | 0.01 | -0.01 | -0.48 |
| 4B02 | 311 | 0.52 | 0.49 | 0.54 | 0.51 | 0.00 | 1.11 | 0.38 | 0.65 | 0.04 | 0.20 | 0.01 | 0.08 | 0.11 |
| 4C02 | 273 | 0.46 | 0.43 | 0.48 | 0.47 | 0.00 | 1.04 | 0.33 | 0.58 | 0.04 | 0.19 | 0.01 | -0.04 | 0.01 |
| 4D02 | 212 | 0.45 | 0.42 | 0.48 | 0.47 | 0.00 | 1.03 | 0.28 | 0.60 | 0.05 | 0.22 | 0.02 | -0.17 | -0.63 |
| 4A03 | 895 | 0.44 | 0.43 | 0.46 | 0.41 | 0.00 | 1.34 | 0.27 | 0.57 | 0.05 | 0.23 | 0.01 | 0.88 | 0.86 |
| 4B03 | 839 | 0.45 | 0.43 | 0.47 | 0.42 | 0.00 | 1.32 | 0.27 | 0.60 | 0.06 | 0.24 | 0.01 | 0.46 | -0.16 |
| 4C03 | 1001 | 0.44 | 0.42 | 0.45 | 0.41 | 0.00 | 1.20 | 0.28 | 0.57 | 0.05 | 0.22 | 0.01 | 0.79 | 0.69 |
| 5A02 | 315 | 0.51 | 0.49 | 0.54 | 0.50 | 0.00 | 1.23 | 0.35 | 0.67 | 0.05 | 0.23 | 0.01 | 0.25 | 0.00 |
| 5B02 | 175 | 0.35 | 0.32 | 0.38 | 0.33 | 0.00 | 1.07 | 0.22 | 0.47 | 0.04 | 0.20 | 0.02 | 0.43 | 0.26 |
| 5C02 | 77 | 0.44 | 0.40 | 0.47 | 0.42 | 0.13 | 0.82 | 0.31 | 0.53 | 0.03 | 0.17 | 0.02 | 0.38 | -0.32 |
| 5A03 | 1003 | 0.46 | 0.45 | 0.48 | 0.45 | 0.00 | 1.38 | 0.29 | 0.61 | 0.06 | 0.24 | 0.01 | 0.50 | 0.14 |
| 5B03 | 398 | 0.47 | 0.44 | 0.50 | 0.41 | 0.00 | 1.28 | 0.24 | 0.68 | 0.08 | 0.28 | 0.01 | 0.46 | -0.70 |
| 5C03 | 506 | 0.34 | 0.32 | 0.35 | 0.32 | 0.00 | 1.18 | 0.19 | 0.46 | 0.04 | 0.20 | 0.01 | 0.75 | 0.89 |
| 6A02 | 300 | 1.22 | 1.18 | 1.26 | 1.21 | 0.29 | 2.16 | 0.98 | 1.47 | 0.12 | 0.34 | 0.02 | 0.03 | -0.28 |
| 6B02 | 300 | 1.15 | 1.12 | 1.18 | 1.17 | 0.36 | 1.88 | 1.00 | 1.32 | 0.07 | 0.26 | 0.01 | -0.11 | 0.18 |
| 6C02 | 310 | 0.64 | 0.62 | 0.67 | 0.63 | 0.08 | 1.28 | 0.50 | 0.77 | 0.04 | 0.21 | 0.01 | 0.23 | -0.05 |
| 6A03 | 1016 | 0.39 | 0.38 | 0.40 | 0.36 | 0.00 | 1.12 | 0.24 | 0.51 | 0.04 | 0.21 | 0.01 | 0.79 | 0.61 |
| 6B03 | 995 | 0.40 | 0.39 | 0.42 | 0.37 | 0.00 | 3.15 | 0.22 | 0.55 | 0.06 | 0.25 | 0.01 | 1.77 | 13.13 |
| 6C03 | 912 | 0.51 | 0.49 | 0.53 | 0.48 | 0.00 | 1.34 | 0.28 | 0.73 | 0.08 | 0.29 | 0.01 | 0.36 | -0.66 |
| 6D03 | 831 | 0.40 | 0.39 | 0.42 | 0.37 | 0.00 | 1.26 | 0.25 | 0.53 | 0.05 | 0.22 | 0.01 | 0.78 | 0.73 |
| 7A02 | 299 | 0.67 | 0.65 | 0.70 | 0.63 | 0.09 | 1.34 | 0.49 | 0.84 | 0.06 | 0.25 | 0.01 | 0.44 | -0.12 |
| 7B02 | 300 | 0.56 | 0.53 | 0.59 | 0.53 | 0.00 | 1.25 | 0.36 | 0.75 | 0.07 | 0.27 | 0.02 | 0.39 | -0.54 |
| 7C02 | 295 | 0.56 | 0.54 | 0.59 | 0.55 | 0.00 | 1.27 | 0.36 | 0.76 | 0.06 | 0.24 | 0.01 | 0.26 | -0.63 |
| 7D02 | 300 | 0.57 | 0.54 | 0.60 | 0.55 | 0.03 | 1.23 | 0.41 | 0.72 | 0.06 | 0.24 | 0.01 | 0.32 | -0.21 |

ANNEXE 2

Pourcentage de couverture des lichens des sites d'échantillonnage 2002-2003

Résultats du test Kolmogorov-Smirnov

| Sites | N | Données brutes | | Données transformées | |
|-------|------|----------------|----------|----------------------|----------|
| | | d | p < 0.01 | d | p < 0.01 |
| 1A02 | 336 | 0.08 | 0.09 | 0.05 | 0.09 |
| 1B02 | 254 | 0.10 | 0.10 | 0.05 | 0.10 |
| 1A03 | 932 | 0.10 | 0.05 | 0.03 | 0.05 |
| 1B03 | 649 | 0.13 | 0.06 | 0.03 | 0.06 |
| 1C03 | 508 | 0.15 | 0.07 | 0.07 | 0.07 |
| 1D03 | 174 | 0.17 | 0.12 | 0.08 | 0.12 |
| 2A03 | 767 | 0.06 | 0.06 | 0.09 | 0.06 |
| 2B03 | 753 | 0.14 | 0.06 | 0.05 | 0.06 |
| 3A02 | 148 | 0.13 | 0.13 | 0.05 | 0.13 |
| 3B02 | 172 | 0.12 | 0.12 | 0.04 | 0.12 |
| 3A03 | 741 | 0.12 | 0.06 | 0.04 | 0.06 |
| 3B03 | 824 | 0.13 | 0.06 | 0.06 | 0.06 |
| 3C03 | 668 | 0.11 | 0.06 | 0.03 | 0.06 |
| 3D03 | 88 | 0.11 | 0.17 | 0.05 | 0.17 |
| 4A02 | 286 | 0.11 | 0.10 | 0.04 | 0.10 |
| 4B02 | 311 | 0.12 | 0.09 | 0.03 | 0.09 |
| 4C02 | 273 | 0.09 | 0.10 | 0.03 | 0.10 |
| 4D02 | 212 | 0.09 | 0.11 | 0.06 | 0.11 |
| 4A03 | 895 | 0.18 | 0.05 | 0.08 | 0.05 |
| 4B03 | 839 | 0.15 | 0.06 | 0.06 | 0.06 |
| 4C03 | 1001 | 0.18 | 0.05 | 0.07 | 0.05 |
| 5A02 | 315 | 0.14 | 0.09 | 0.04 | 0.09 |
| 5B02 | 175 | 0.14 | 0.12 | 0.05 | 0.12 |
| 5C02 | 77 | 0.13 | 0.19 | 0.06 | 0.19 |
| 5A03 | 1003 | 0.16 | 0.05 | 0.04 | 0.05 |
| 5B03 | 398 | 0.18 | 0.08 | 0.09 | 0.08 |
| 5C03 | 506 | 0.16 | 0.07 | 0.05 | 0.07 |
| 6A02 | 300 | 0.17 | 0.09 | 0.03 | 0.09 |
| 6B02 | 300 | 0.14 | 0.09 | 0.03 | 0.09 |
| 6C02 | 310 | 0.16 | 0.09 | 0.07 | 0.09 |
| 6A03 | 1016 | 0.17 | 0.05 | 0.07 | 0.05 |
| 6B03 | 995 | 0.16 | 0.05 | 0.07 | 0.05 |
| 6C03 | 912 | 0.16 | 0.05 | 0.06 | 0.05 |
| 6D03 | 831 | 0.18 | 0.06 | 0.08 | 0.06 |
| 7A02 | 299 | 0.17 | 0.09 | 0.07 | 0.09 |
| 7B02 | 300 | 0.18 | 0.09 | 0.06 | 0.09 |
| 7C02 | 295 | 0.14 | 0.09 | 0.07 | 0.09 |
| 7D02 | 300 | 0.16 | 0.09 | 0.05 | 0.09 |

ANNEXE 3

Résultats de l'analyse de variance et des comparaisons *a posteriori*
Sites d'échantillonnage lichénométriques 2002 – 2003 de *Rhizocarpon geographicum*

Sites d'échantillonnage du complexe morainique du glacier Turnweather

Analyse de variance

Alpha = 0.01

Résumé

| Groupes | N | Somme | Moyenne | Variance |
|----------|-----|------------|----------|----------|
| 2A03_LOG | 767 | 859.368696 | 1.120429 | 0.086307 |
| 2B03_LOG | 753 | 487.816068 | 0.647830 | 0.099506 |

ANOVA

| Source de variation | SS | Degré de liberté | MS | F | P-value | F critique |
|---------------------|------------|------------------|-----------|------------|-----------|------------|
| Inter groupe | 84.865530 | 1 | 84.865530 | 914.047933 | 1.43E-157 | 6.651590 |
| Intra groupe | 140.939955 | 1518 | 0.092846 | | | |
| Total | 225.805485 | 1519 | | | | |

Effet principal

| | Somme des carrés | Degré de liberté | Moyenne au carré | F | p-level |
|--------|------------------|------------------|------------------|------------|---------|
| Effet | 84.865532 | 1 | 84.865532 | 914.047913 | 0 |
| Erreur | 140.939957 | 1518 | 0.092846 | | |

F(1,1518)=914.05; p<0.000

| Variable | |
|----------|----------|
| 2A03_LOG | 1.120429 |
| 2B03_LOG | 0.647830 |

Test HSD

Probabilités

Effet principal

| | {1} | {2} |
|--------------|-------------|-------------|
| | 1.120429 | .6478301 |
| 2A03_LOG {1} | | 8.76188E-06 |
| 2B03_LOG {2} | 8.76188E-06 | |

Sites d'échantillonnage du complexe morainique du glacier Tête de Cirques

Analyse de variance

Alpha = 0.01

Résumé

| Groupes | N | Somme | Moyenne | Variance |
|----------|-----|------------|----------|----------|
| 1A02_LOG | 336 | 221.049860 | 0.657886 | 0.041131 |
| 1B02_LOG | 254 | 159.864792 | 0.629389 | 0.061374 |
| 1A03_LOG | 932 | 519.139821 | 0.557017 | 0.052217 |
| 1B03_LOG | 649 | 302.918773 | 0.466747 | 0.051798 |
| 1C03_LOG | 508 | 221.548908 | 0.436120 | 0.046714 |
| 1D03_LOG | 174 | 73.514242 | 0.422496 | 0.070545 |

ANOVA

| Source de variation | SS | Degré de liberté | MS | F | P-value | F critique |
|---------------------|------------|------------------|----------|-----------|-------------|------------|
| Inter groupe | 17.700184 | 5 | 3.540037 | 68.387246 | 1.08877E-67 | 3.023672 |
| Intra groupe | 147.373746 | 2847 | 0.051765 | | | |
| Total | 165.073930 | 2852 | | | | |

Effet principal

| | Somme des carrés | Degré de liberté | Moyenne au carré | F | p-level |
|--------|------------------|------------------|------------------|-----------|---------|
| Effet | 17.700184 | 5 | 3.540037 | 68.387245 | 0 |
| Erreur | 147.373749 | 2847 | 0.051765 | | |

F(5,2847)=68.39; p<0.000

| Variable | |
|----------|----------|
| 1A02_LOG | 0.657887 |
| 1B02_LOG | |
| 1A03_LOG | 0.557017 |
| 1B03_LOG | 0.466747 |
| 1C03_LOG | 0.436120 |
| 1D03_LOG | 0.422496 |

Test HSD

Probabilités

Effet principal

| | {1} | {2} | {3} | {4} | {5} | {6} |
|--------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| | .6578865 | .6293889 | .5570170 | .4667470 | .4361199 | .4224956 |
| 1A02_LOG {1} | | 0.720080 | 0.000020 | 0.000020 | 0.000020 | 0.000020 |
| 1B02_LOG {2} | 0.720080 | | 0.004572 | 0.000020 | 0.000020 | 0.000020 |
| 1A03_LOG {3} | 0.000020 | 0.004572 | | 0.000020 | 0.000020 | 0.000021 |
| 1B03_LOG {4} | 0.000020 | 0.000020 | 0.000020 | | 0.263947 | 0.456500 |
| 1C03_LOG {5} | 0.000020 | 0.000020 | 0.000020 | 0.263947 | | 0.993588 |
| 1D03_LOG {6} | 0.000020 | 0.000020 | 0.000021 | 0.456500 | 0.993588 | |

Sites d'échantillonnage du complexe morainique du Glacier 12

Analyse de variance

Alpha = 0.01

Résumé

| Groupes | N | Somme | Moyenne | Variance |
|----------|------|------------|----------|----------|
| 6A03_LOG | 1016 | 395.351493 | 0.389125 | 0.042509 |
| 6B03_LOG | 995 | 400.529634 | 0.402542 | 0.064079 |
| 6C03_LOG | 912 | 463.138940 | 0.507828 | 0.081667 |
| 6D03_LOG | 831 | 333.521244 | 0.401349 | 0.050250 |
| 7A02_LOG | 299 | 201.687425 | 0.674540 | 0.063840 |
| 7B02_LOG | 300 | 168.338462 | 0.561128 | 0.071722 |
| 7C02_LOG | 295 | 166.377269 | 0.563991 | 0.059027 |
| 7D02_LOG | 300 | 171.373119 | 0.571244 | 0.057679 |

ANOVA

| Source de variation | SS | Degré de liberté | MS | F | P-value | F critique |
|---------------------|------------|------------------|----------|-----------|------------|------------|
| Inter groupe | 36.947435 | 7 | 5.278205 | 87.493006 | 1.582E-120 | 2.642935 |
| Intra groupe | 298.016196 | 4940 | 0.060327 | | | |
| Total | 334.963631 | 4947 | | | | |

Effet principal

| | Somme des carrés | Degré de liberté | Moyenne au carré | F | p-level |
|--------|------------------|------------------|------------------|-----------|----------|
| Effet | 36.947433 | 7.000000 | 5.278205 | 87.493004 | 0.000000 |
| Erreur | 298.016205 | 4940.000000 | 0.060327 | | |

F(7,4940)=87.49; p<0.000

| | |
|----------|----------|
| 6A03_LOG | 0.389125 |
| 6B03_LOG | 0.402542 |
| 6C03_LOG | 0.507828 |
| 6D03_LOG | 0.401349 |
| 7A02_LOG | 0.674540 |
| 7B02_LOG | 0.561128 |
| 7C02_LOG | 0.563991 |
| 7D02_LOG | 0.571244 |

Test HSD

Probabilités

Effet principal

| | {1} | {2} | {3} | {4} | {5} | {6} | {7} | {8} |
|--------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| | .3891255 | .4025424 | .5078278 | .4013493 | .6745399 | .5611282 | .5639908 | .5712437 |
| 6A03_LOG {1} | | 0.926762 | 0.000032 | 0.972443 | 0.000032 | 0.000032 | 0.000032 | 0.000032 |
| 6B03_LOG {2} | 0.926762 | | 0.000032 | 1.000000 | 0.000032 | 0.000032 | 0.000032 | 0.000032 |
| 6C03_LOG {3} | 0.000032 | 0.000032 | | 0.000032 | 0.000032 | 0.135755 | 0.100729 | 0.033649 |
| 6D03_LOG {4} | 0.972443 | 1.000000 | 0.000032 | | 0.000032 | 0.000032 | 0.000032 | 0.000032 |
| 7A02_LOG {5} | 0.000032 | 0.000032 | 0.000032 | 0.000032 | | 0.000032 | 0.000033 | 0.000039 |
| 7B02_LOG {6} | 0.000032 | 0.000032 | 0.135755 | 0.000032 | 0.000032 | | 1.000000 | 0.999644 |
| 7C02_LOG {7} | 0.000032 | 0.000032 | 0.100729 | 0.000032 | 0.000033 | 1.000000 | | 0.999964 |
| 7D02_LOG {8} | 0.000032 | 0.000032 | 0.033649 | 0.000032 | 0.000039 | 0.999644 | 0.999964 | |

Sites d'échantillonnage du complexe morainique du glacier Windy Lake

Analyse de variance

Alpha = 0.01

Résumé

| Groupes | N | Somme | Moyenne | Variance |
|----------|-----|-----------|----------|----------|
| 3A02_LOG | 148 | 78.919925 | 0.533243 | 0.054901 |
| 3B02_LOG | 172 | 86.112098 | 0.500652 | 0.048333 |

ANOVA

| Source de variation | SS | Degré de liberté | MS | F | P-value | F critique |
|---------------------|-----------|------------------|----------|----------|----------|------------|
| Inter groupe | 0.084496 | 1 | 0.084496 | 1.644885 | 0.200591 | 6.715254 |
| Intra groupe | 16.335307 | 318 | 0.051369 | | | |
| Total | 16.419803 | 319 | | | | |

Effet principal

| | Somme des carrés | Degré de liberté | Moyenne au carré | F | p-level |
|--------|------------------|------------------|------------------|----------|----------|
| Effet | 0.084496 | 1 | 0.084496 | 1.644885 | 0.200591 |
| Erreur | 16.335306 | 318 | 0.051369 | | |

F(1,318)=1.64; p<.2006

| | Variable |
|----------|----------|
| 3A02_LOG | 0.533243 |
| 3B02_LOG | 0.500652 |

Test HSD

Probabilités

Effet principal

| | {1} | {2} |
|--------------|----------|----------|
| 3A02_LOG {1} | .5332428 | .5006517 |
| 3B02_LOG {2} | 0.216098 | |

Sites d'échantillonnage du complexe morainique du glacier Niflheim

Analyse de variance

Alpha = 0.01

Résumé

| Groupes | N | Somme | Moyenne | Variance |
|----------|-----|------------|----------|----------|
| 3A03_LOG | 741 | 356.497815 | 0.481104 | 0.048168 |
| 3B03_LOG | 824 | 344.144269 | 0.417651 | 0.049691 |
| 3C03_LOG | 668 | 283.680873 | 0.424672 | 0.044123 |
| 3D03_LOG | 88 | 22.232734 | 0.252645 | 0.024430 |
| 4A02_LOG | 286 | 162.441640 | 0.567978 | 0.060567 |
| 4B02_LOG | 311 | 160.377472 | 0.515683 | 0.039733 |
| 4C02_LOG | 273 | 124.865844 | 0.457384 | 0.036516 |
| 4D02_LOG | 212 | 95.055546 | 0.448375 | 0.048922 |
| 4E02_LOG | 65 | 93.527845 | 1.438890 | 0.019534 |

ANOVA

| Source de variation | SS | Degré de liberté | MS | F | P-value | F critique |
|---------------------|------------|------------------|----------|------------|-------------|------------|
| Inter groupe | 72.387396 | 8 | 9.048425 | 196.624748 | 7.5615E-275 | 2.516401 |
| Intra groupe | 159.178846 | 3459 | 0.046019 | | | |
| Total | 231.566243 | 3467 | | | | |

Effet principal

| | Somme des carrés | Degré de liberté | Moyenne au carré | F | p-level |
|--------|------------------|------------------|------------------|------------|---------|
| Effet | 72.387398 | 8 | 9.048425 | 196.624741 | 0 |
| Erreur | 159.178848 | 3459 | 0.046019 | | |

F(8,3459)=196.62; p<0.000

| | Variable |
|----------|----------|
| 3A03_LOG | 0.481104 |
| 3B03_LOG | 0.417651 |
| 3C03_LOG | 0.424672 |
| 3D03_LOG | 0.252645 |
| 4A02_LOG | 0.567978 |
| 4B02_LOG | 0.515683 |
| 4C02_LOG | 0.457384 |
| 4D02_LOG | 0.448375 |
| 4E02_LOG | 1.438890 |

Test HSD

Probabilités

Effet principal

| | {1} | {2} | {3} | {4} | {5} | {6} | {7} | {8} | {9} |
|--------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| | .4811037 | .4176508 | .4246720 | .2526447 | .5679778 | .5156832 | .4573840 | .4483752 | 1.438890 |
| 3A03_LOG {1} | | 0.000010 | 0.000062 | 0.000010 | 0.000053 | 0.536181 | 0.934041 | 0.820912 | 0.000010 |
| 3B03_LOG {2} | 0.000010 | | 0.999622 | 0.000021 | 0.000010 | 0.000010 | 0.429504 | 0.867581 | 0.000010 |
| 3C03_LOG {3} | 0.000062 | 0.999622 | | 0.000013 | 0.000010 | 0.000014 | 0.694573 | 0.968552 | 0.000010 |
| 3D03_LOG {4} | 0.000010 | 0.000021 | 0.000013 | | 0.000010 | 0.000010 | 0.000010 | 0.000010 | 0.000010 |
| 4A02_LOG {5} | 0.000053 | 0.000010 | 0.000010 | 0.000010 | | 0.085061 | 0.000010 | 0.000010 | 0.000010 |
| 4B02_LOG {6} | 0.536181 | 0.000010 | 0.000014 | 0.000010 | 0.085061 | | 0.040048 | 0.033727 | 0.000010 |
| 4C02_LOG {7} | 0.934041 | 0.429504 | 0.694573 | 0.000010 | 0.000010 | 0.040048 | | 0.999968 | 0.000010 |
| 4D02_LOG {8} | 0.820912 | 0.867581 | 0.968552 | 0.000010 | 0.000010 | 0.033727 | 0.999968 | | 0.000010 |
| 4E02_LOG {9} | 0.000010 | 0.000010 | 0.000010 | 0.000010 | 0.000010 | 0.000010 | 0.000010 | 0.000010 | |

Sites d'échantillonnage du complexe morainique du Glacier 20A

Analyse de variance

Alpha = 0.01

Résumé

| Groupes | N | Somme | Moyenne | Variance |
|----------|------|------------|----------|----------|
| 4A03_LOG | 895 | 398.032596 | 0.444729 | 0.053808 |
| 4B03_LOG | 839 | 377.738762 | 0.450225 | 0.059336 |
| 4C03_LOG | 1001 | 437.541136 | 0.437104 | 0.050076 |
| 5A02_LOG | 315 | 161.458254 | 0.512566 | 0.053797 |
| 5B02_LOG | 175 | 61.709295 | 0.352625 | 0.041475 |
| 5C02_LOG | 77 | 33.503142 | 0.435106 | 0.028536 |

ANOVA

| Source de variation | SS | Degré de liberté | MS | F | P-value | F critique |
|---------------------|------------|------------------|----------|-----------|-------------|------------|
| Inter groupe | 3.024147 | 5 | 0.604829 | 11.445059 | 5.66704E-11 | 3.022791 |
| Intra groupe | 174.181525 | 3296 | 0.052846 | | | |
| Total | 177.205672 | 3301 | | | | |

Effet principal

| | Somme des carrés | Degré de liberté | Moyenne au carré | F | p-level |
|--------|------------------|------------------|------------------|-----------|-------------|
| Effet | 3.024147 | 5 | 0.604829 | 11.445059 | 5.66704E-11 |
| Erreur | 174.181519 | 3296 | 0.052846 | | |

F(5,3296)=11.45; p<.0000

| Variable | |
|----------|----------|
| 4A03_LOG | 0.444729 |
| 4B03_LOG | |
| 4C03_LOG | 0.437104 |
| 5A02_LOG | 0.512566 |
| 5B02_LOG | 0.352625 |
| 5C02_LOG | 0.435106 |

Test HSD

Probabilités

Effet principal

| | {1} | {2} | {3} | {4} | {5} | {6} |
|--------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| | .4447291 | .4502250 | .4371040 | .5125659 | .3526245 | .4351057 |
| 4A03_LOG {1} | | 0.996547 | 0.981799 | 0.002923 | 0.002465 | 0.999841 |
| 4B03_LOG {2} | 0.996547 | | 0.851684 | 0.008732 | 0.001017 | 0.998555 |
| 4C03_LOG {3} | 0.981799 | 0.851684 | | 0.000553 | 0.007750 | 1.000000 |
| 5A02_LOG {4} | 0.002923 | 0.008732 | 0.000553 | | 0.000020 | 0.292013 |
| 5B02_LOG {5} | 0.002465 | 0.001017 | 0.007750 | 0.000020 | | 0.225549 |
| 5C02_LOG {6} | 0.999841 | 0.998555 | 1.000000 | 0.292013 | 0.225549 | |

Sites d'échantillonnage du complexe morainique du glacier Sivingavuk

Analyse de variance

Alpha = 0.01

Résumé

| Groupes | N | Somme | Moyenne | Variance |
|----------|------|------------|----------|----------|
| 5A03_LOG | 1003 | 465.014352 | 0.463623 | 0.055978 |
| 5B03_LOG | 398 | 187.939101 | 0.472209 | 0.080255 |
| 5C03_LOG | 506 | 170.544168 | 0.337044 | 0.040056 |
| 6A02_LOG | 300 | 364.929199 | 1.216431 | 0.115865 |
| 6B02_LOG | 300 | 345.990932 | 1.153303 | 0.066996 |
| 6C02_LOG | 310 | 199.601860 | 0.643877 | 0.044501 |

ANOVA

| Source de variation | SS | Degré de liberté | MS | F | P-value | F critique |
|---------------------|------------|------------------|-----------|------------|---------|------------|
| Inter groupe | 265.896283 | 5 | 53.179257 | 846.443188 | 0 | 3.023757 |
| Intra groupe | 176.605934 | 2811 | 0.062827 | | | |
| Total | 442.502217 | 2816 | | | | |

Effet principal

| | Somme des carrés | Degré de liberté | Moyenne au carré | F | p-level |
|--------|------------------|------------------|------------------|------------|----------|
| Effet | 265.896271 | 5 | 53.179256 | 846.443176 | 0.000000 |
| Erreur | 176.605942 | 2811 | 0.062827 | | |

F(5,2811)=846.44; p<0.000

| Variable | |
|----------|----------|
| 5A03_LOG | 0.463623 |
| 5B03_LOG | |
| 5C03_LOG | 0.337044 |
| 6A02_LOG | 1.216431 |
| 6B02_LOG | 1.153303 |
| 6C02_LOG | 0.643877 |

Test HSD

Probabilités

Effet principal

| | {1} | {2} | {3} | {4} | {5} | {6} |
|--------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| | .4636235 | .4722088 | .3370438 | 1.216431 | 1.153303 | .6438770 |
| 5A03_LOG {1} | | 0.996758 | 0.000020 | 0.000020 | 0.000020 | 0.000020 |
| 5B03_LOG {2} | 0.996758 | | 0.000020 | 0.000020 | 0.000020 | 0.000020 |
| 5C03_LOG {3} | 0.000020 | 0.000020 | | 0.000020 | 0.000020 | 0.000020 |
| 6A02_LOG {4} | 0.000020 | 0.000020 | 0.000020 | | 0.024933 | 0.000020 |
| 6B02_LOG {5} | 0.000020 | 0.000020 | 0.000020 | 0.024933 | | 0.000020 |
| 6C02_LOG {6} | 0.000020 | 0.000020 | 0.000020 | 0.000020 | 0.000020 | |

ANNEXE 4**Résultats du test-*t* pour la comparaison de l'orientation des sites d'échantillonnage lichénométriques 2002 – 2003 de *Rhizocarpon geographicum***

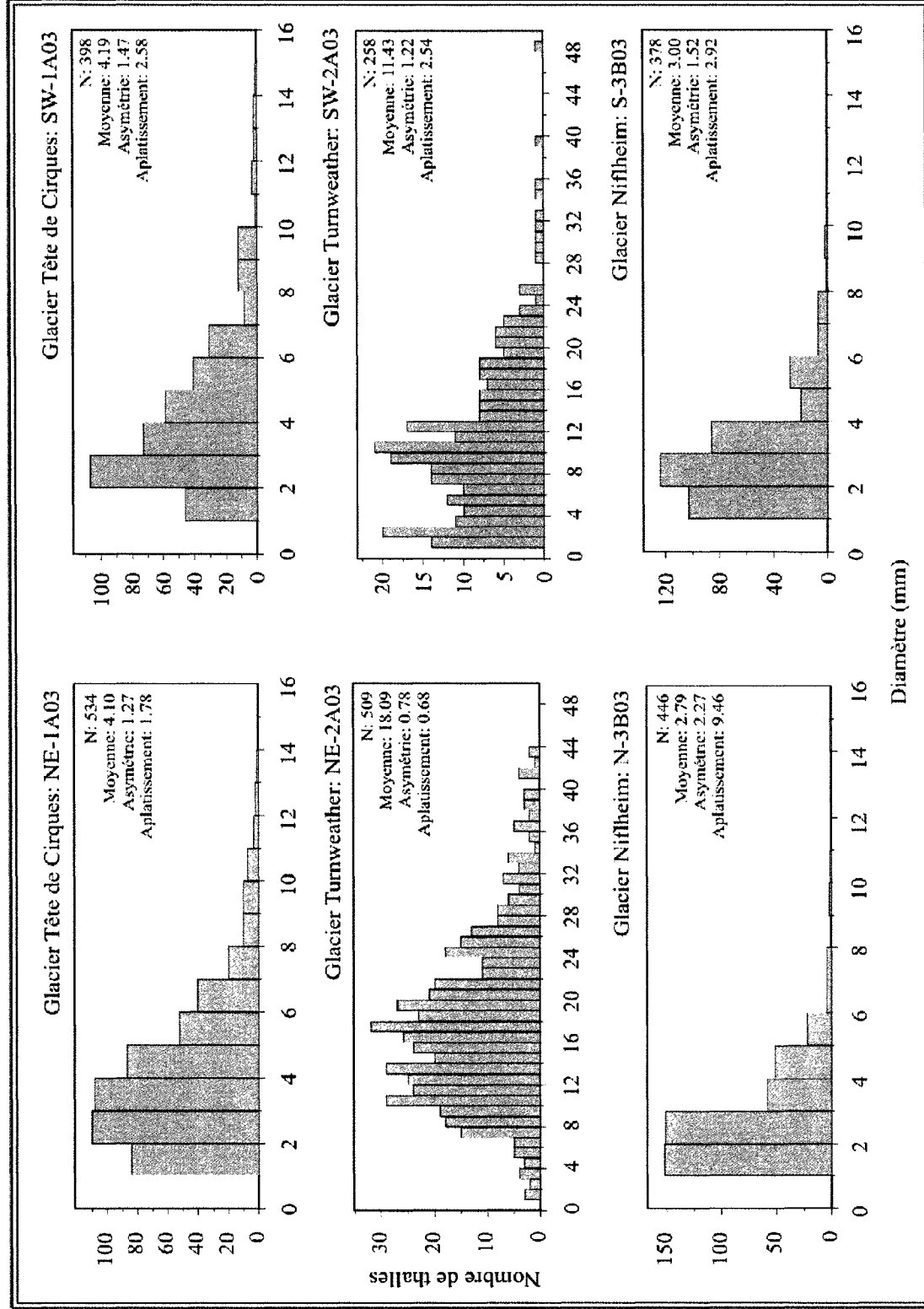
- (A) Tableau des paramètres statistiques des données brutes
- (B) Tableau des paramètres statistiques des données transformées
- (C) Histogrammes de la distribution taille-fréquence des données brutes
- (D) Graphique probabilité-probabilité des données brutes
- (E) Histogrammes de la distribution taille-fréquence des données transformées
- (F) Graphique probabilité-probabilité des données transformées
- (G) Tableau des résultats du test-*t*
- (H) Illustration des résultats du test-*t*

(A) Données brutes

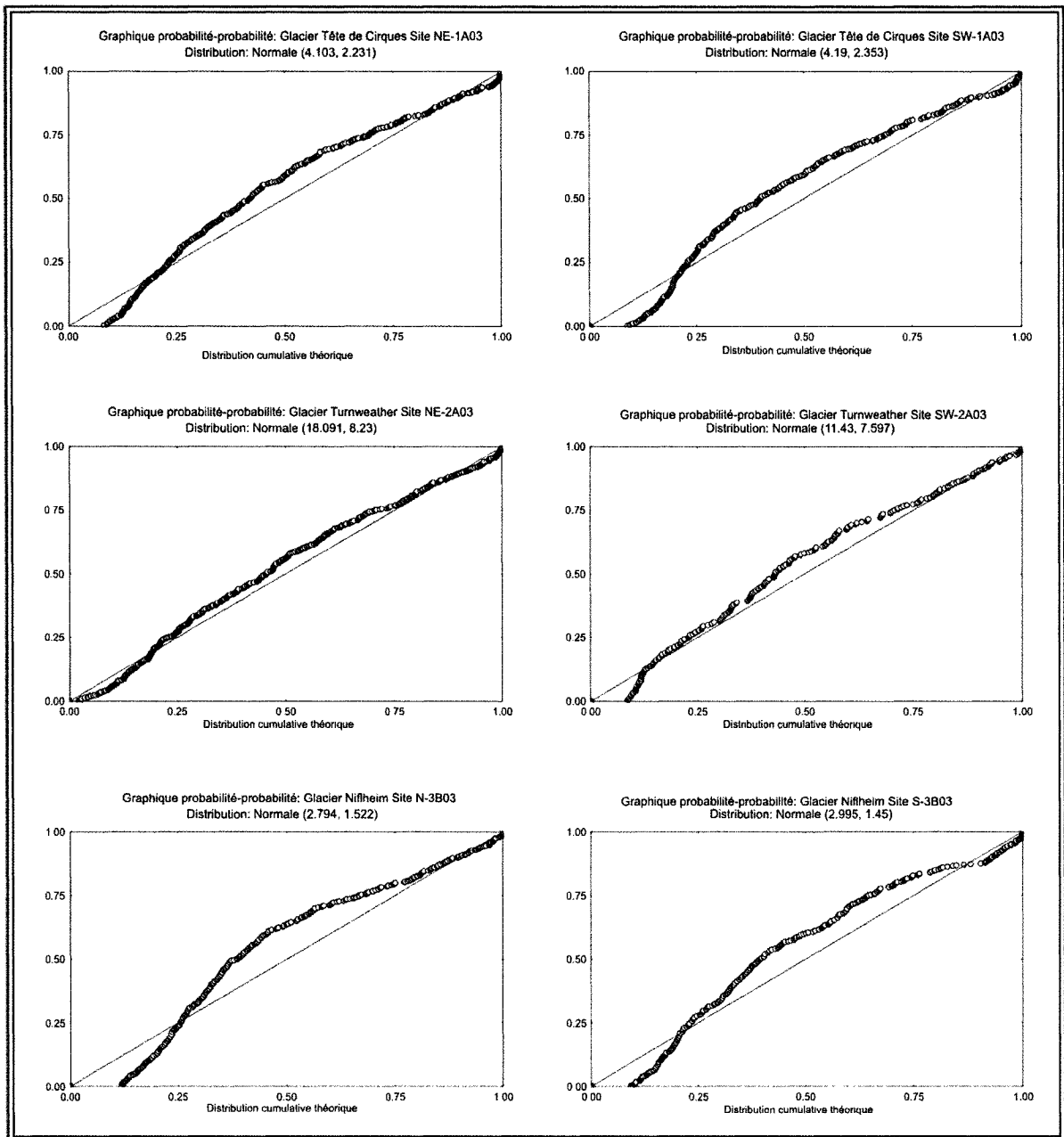
| Sites | N | Moyenne | Limite de confiance -0.95% | Limite de confiance 0.95% | Médiane | Minimum | Maximum | 25ième Quartile | 75ième Quartile | Variance | Écart-type | Erreur-type | Asymétrie | Aplatissement |
|---------|-----|---------|----------------------------|---------------------------|---------|---------|---------|-----------------|-----------------|----------|------------|-------------|-----------|---------------|
| NE-1A03 | 534 | 4.10 | 3.91 | 4.29 | 3.65 | 1.00 | 13.65 | 2.47 | 5.23 | 4.98 | 2.23 | 0.10 | 1.27 | 1.78 |
| SW-1A03 | 398 | 4.19 | 3.96 | 4.42 | 3.59 | 1.00 | 14.76 | 2.44 | 5.34 | 5.53 | 2.35 | 0.12 | 1.47 | 2.57 |
| NE-2A03 | 509 | 18.09 | 17.37 | 18.81 | 17.17 | 1.29 | 51.47 | 12.04 | 22.53 | 67.73 | 8.23 | 0.36 | 0.78 | 0.68 |
| SW-2A03 | 258 | 11.43 | 10.50 | 12.36 | 10.13 | 1.03 | 48.51 | 5.81 | 15.59 | 57.71 | 7.60 | 0.47 | 1.22 | 2.54 |
| N-3B03 | 446 | 2.79 | 2.65 | 2.94 | 2.35 | 1.00 | 14.26 | 1.79 | 3.45 | 2.32 | 1.52 | 0.07 | 2.27 | 9.46 |
| S-3B03 | 378 | 3.00 | 2.85 | 3.14 | 2.61 | 1.07 | 9.98 | 1.95 | 3.54 | 2.10 | 1.45 | 0.07 | 1.52 | 2.92 |

(B) Données transformées

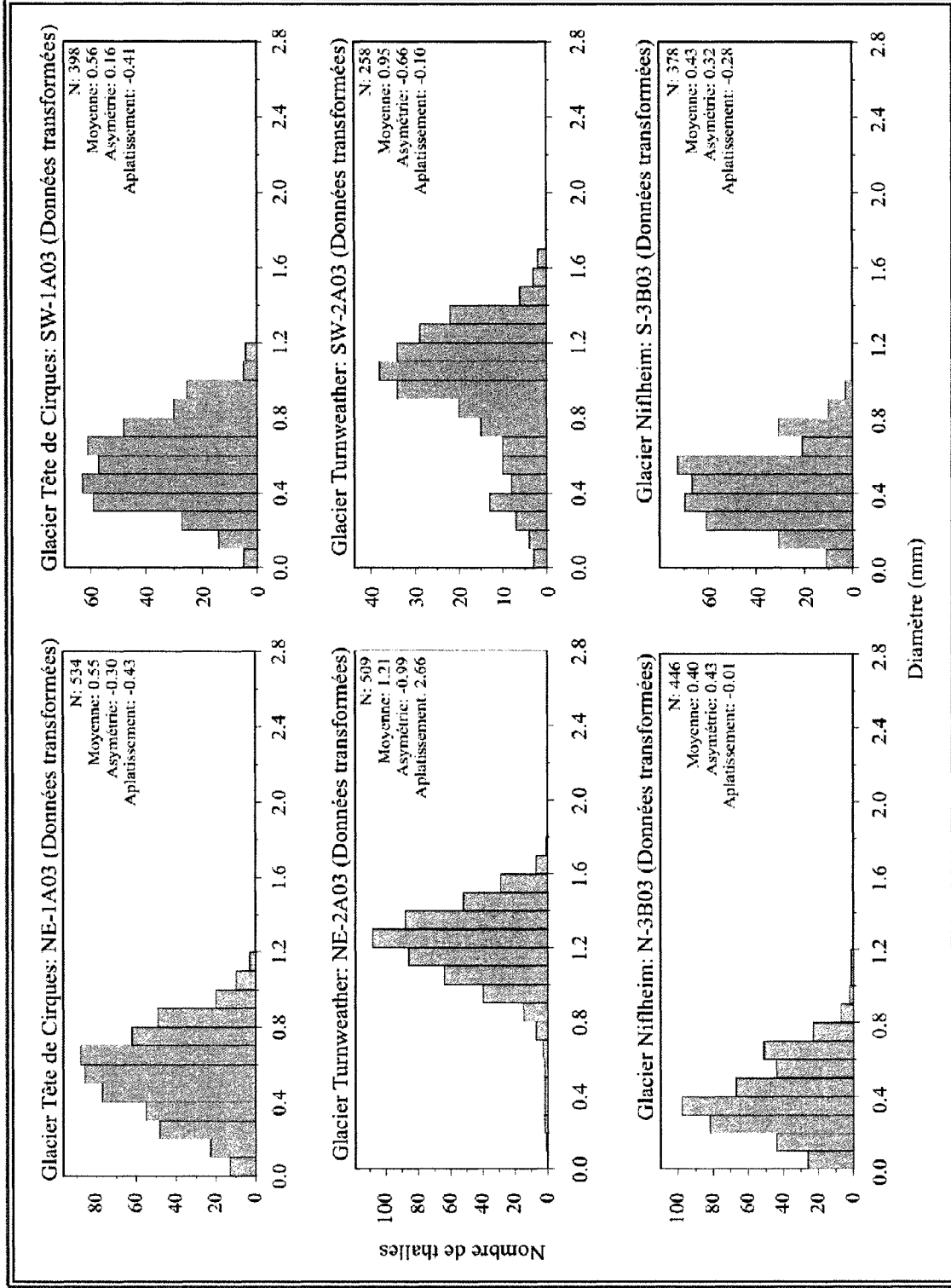
| Sites | N | Moyenne | Limite de confiance -0.95% | Limite de confiance 0.95% | Médiane | Minimum | Maximum | 25ième Quartile | 75ième Quartile | Variance | Écart-type | Erreur-type | Asymétrie | Aplatissement |
|---------|-----|---------|----------------------------|---------------------------|---------|---------|---------|-----------------|-----------------|----------|------------|-------------|-----------|---------------|
| NE-1A03 | 534 | 0.55 | 0.53 | 0.57 | 0.56 | 0.00 | 1.14 | 0.39 | 0.72 | 0.05 | 0.23 | 0.01 | -0.03 | -0.42 |
| SW-1A03 | 398 | 0.56 | 0.54 | 0.58 | 0.55 | 0.00 | 1.17 | 0.39 | 0.73 | 0.05 | 0.23 | 0.01 | 0.16 | -0.41 |
| NE-2A03 | 509 | 1.21 | 1.19 | 1.23 | 1.23 | 0.11 | 1.71 | 1.08 | 1.35 | 0.05 | 0.22 | 0.01 | -0.99 | 2.66 |
| SW-2A03 | 258 | 0.95 | 0.91 | 0.99 | 1.01 | 0.01 | 1.69 | 0.76 | 1.19 | 0.11 | 0.34 | 0.02 | -0.66 | -0.09 |
| N-3B03 | 446 | 0.40 | 0.38 | 0.41 | 0.37 | 0.00 | 1.15 | 0.25 | 0.54 | 0.04 | 0.20 | 0.01 | 0.43 | -0.01 |
| S-3B03 | 378 | 0.43 | 0.41 | 0.45 | 0.42 | 0.03 | 1.00 | 0.29 | 0.55 | 0.04 | 0.19 | 0.01 | 0.32 | -0.28 |



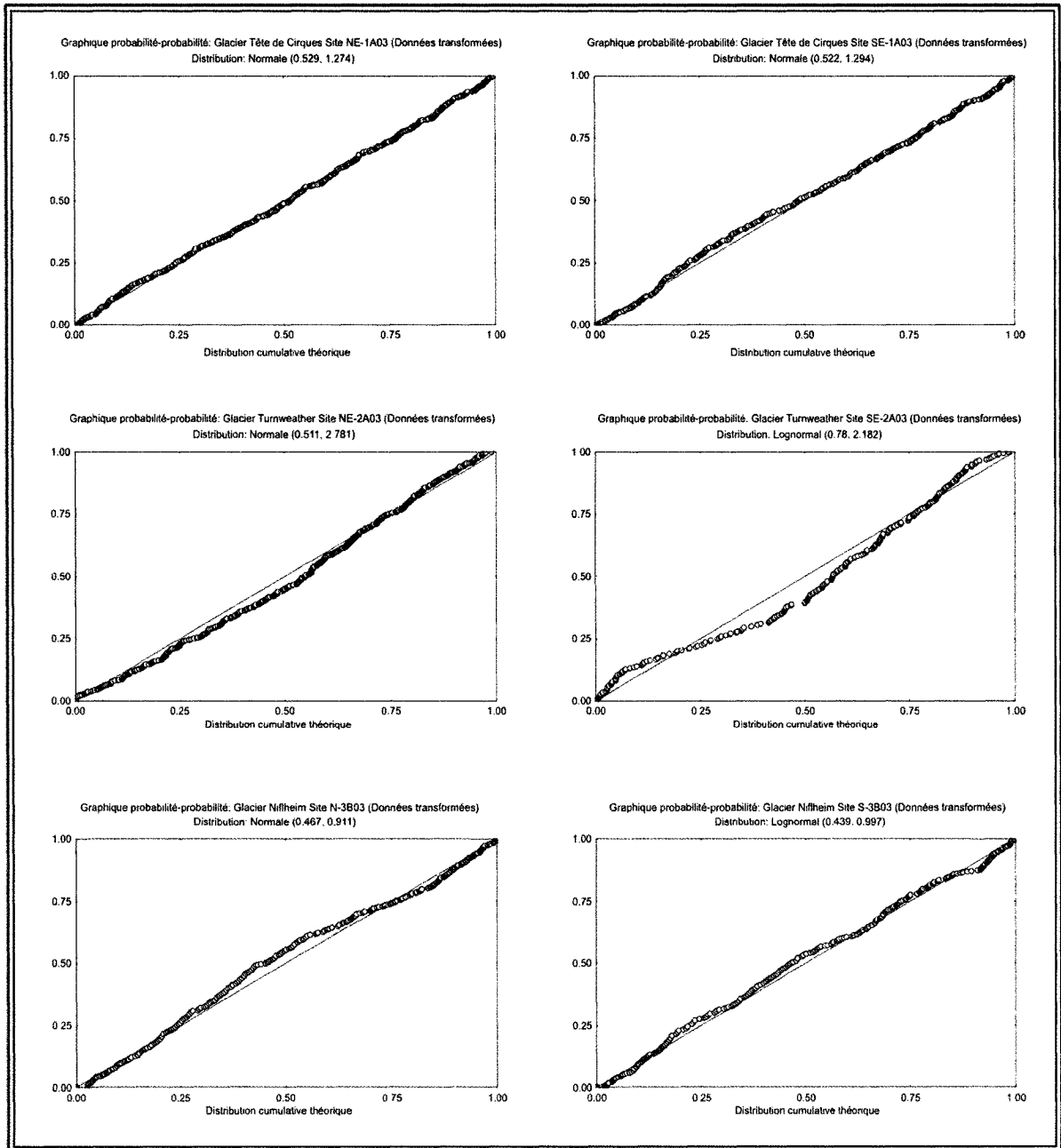
(C)



(D)



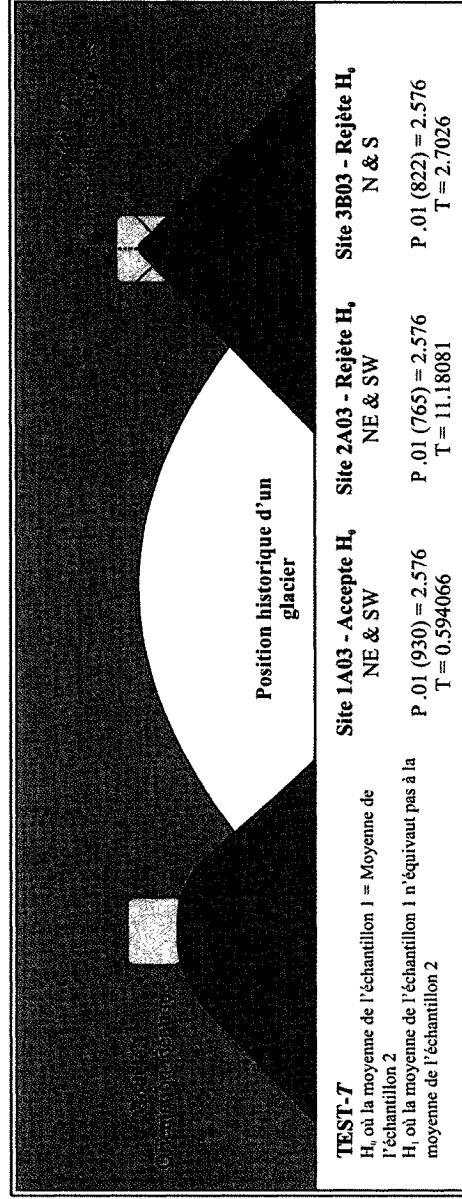
(E)



(F)

(G) Résultats du test-t pour les sites ayant deux orientations distinctes

| Sites | N | Variance | Variance théorique (Y) | Mean | Rapport T |
|---------|-----|----------|------------------------|------|-----------|
| NE-1A03 | 534 | 0.05 | 0.0002 | 0.55 | 0.59 |
| SW-1A03 | 398 | 0.05 | | 0.56 | |
| NE-2A03 | 509 | 0.05 | 0.0005 | 1.21 | 11.18 |
| SW-2A03 | 258 | 0.11 | | 0.95 | |
| N-3B03 | 446 | 0.04 | 0.0002 | 0.40 | 2.70 |
| S-3B03 | 378 | 0.04 | | 0.43 | |



(H) Illustration des résultats du test-t pour l'analyse des variations environnementales de trois sites d'échantillonnage