

FRÉDÉRIC BOUCHARD

**TOPOCLIMAT ET MICROCLIMATS DE LA VALLÉE
DE SALLUIT (NUNAVIK)
Influence sur le régime thermique du pergélisol**

Mémoire présenté
à la Faculté des études supérieures de l'Université Laval
dans le cadre du programme de maîtrise en sciences géographiques
pour l'obtention du grade de maître en sciences géographiques (M.Sc.Géogr.)

DÉPARTEMENT DE GÉOGRAPHIE
FACULTÉ DE FORESTERIE ET DE GÉOMATIQUE
UNIVERSITÉ LAVAL
QUÉBEC

2005

Résumé

D'octobre 2002 à septembre 2004, la température de l'air ainsi que la vitesse et la direction des vents ont été mesurées dans les environs de la vallée de Salluit (Nunavik). Durant la même période, la température de la surface du sol a été mesurée dans 18 sites représentatifs des conditions topographiques rencontrées dans la vallée : relief, couvert de neige, nature du sol, proximité d'infrastructures. Les résultats montrent que la variabilité thermique dans l'air et à la surface du sol s'est avérée moins grande durant la deuxième année de mesure et que l'enceinte de la vallée possède son climat propre qui se manifeste en fonction des conditions atmosphériques régionales. Par ailleurs, les indices thermiques de gel et de dégel compilés à la surface du sol indiquent que la vallée est morcelée en une mosaïque de surfaces microclimatiques qui influencent le bilan thermique de la partie supérieure du pergélisol.

Remerciements

Ce sera long. On prie le lecteur impatient de passer directement à la table des matières.

En amorçant ce projet de maîtrise, je ne pouvais me douter à quel point certaines personnes me seraient d'une aide inestimable. Je ne pouvais non plus apprécier l'ampleur du soutien que je recevrais de mes proches au cours des mois qui viendraient. Qu'il me soit permis ici de les saluer en grandes pompes.

C'est d'abord l'histoire de deux professeurs qui ont su s'entendre pour me proposer un projet de recherche plus que stimulant, à mi-chemin entre la climatologie et la géomorphologie. À titre de directrice et de co-directeur, Nathalie Barrette et Michel Allard méritent la première volée de remerciements. Éminences grises et bailleurs de fonds, ils n'ont pas eu peur de me laisser cheminer de façon autonome tout en demeurant disponibles lorsque c'était nécessaire. Merci et longue vie aux directeurs.

Qui dit mémoire de maîtrise dit comité d'évaluation. Remercions au passage Richard Fortier et Najat Bhiry, qui ont donné de précieux conseils sur la poursuite du projet, à l'Université comme sur le terrain. Ça prenait bien un ingénieur et une sédimentologue pour évaluer rigoureusement les travaux d'un géologue...

Or le géologue devenait peu à peu géographe. Combien de temps ai-je passé au Département de géographie, à faire irruption dans les bureaux de Fernando Sheriff, Sylvie St-Jacques, Serge Duchesneau ou Denis Hébert? Combien de questions ai-je posées au trio administratif « Leclerc-L'Archevêque-Roberge »? Aucune idée, mais je les en remercie énergiquement.

Je tiens aussi à souligner la bonne humeur et le professionnalisme des étudiants-chercheurs et des employés du Centre d'études nordiques (CEN). Je salue particulièrement Olivier Gagnon et Denis Sarrazin, qui m'ont permis de travailler à temps partiel dans mon domaine d'études. Franchement, ce fut apprécié. Merci également à Roger Gauthier et Richard Dubuc pour leurs éclaircissements sur de nombreux mystères informatiques, auxquels je n'avais ni le talent ni le courage de m'attaquer seul.

Les travaux de terrain n'auraient pu être ce qu'ils ont été sans la participation et le sens de l'humour de Philippe Solomon-Côté, Thomas Ouellon, Anne-Marie Leblanc, Fabrice Calmels, Catherine Ledoux, Sébastien Demers, Catherine Savard et Jean-Sébastien L'Heureux. Je me joins à eux pour ne pas savoir comment remercier suffisamment Evelyne Sauzède-Bilodeau, la meilleure « chef » au nord du 62^{ème} parallèle. Je salue également les habitants de Salluit, pour qui je demeure à jamais « Umikallak ». Je me comprends, j'espère qu'eux aussi.

Je remercie enfin mes proches, c'est-à-dire ma « blonde-de-plus-en-plus-blonde », mes « parents-depuis-28-ans » et une poignée d'incorruptibles amis. À mon intention de retourner à l'université après deux ans d'absence, ils ont acquiescé d'un « *Ah oui? Et pourquoi pas?* ». En fin de parcours, à l'heure d'écrire ces lignes, je leur rends hommage au moyen d'un « *Je vous l'avais bien dit!* ».

Merci à tous.

Ce projet de recherche n'a pas bénéficié de l'appui financier des grands organismes subventionnaires habituels. Un solide coup de pouce est toutefois parvenu des directeurs de ce projet, du *Programme de formation scientifique dans le Nord* (PFSN) et de la *Bourse Oscar-Villeneuve* de la Société de Météorologie de Québec. C'était beaucoup mieux que rien.

*À la mémoire de mon vieux globe terrestre;
Presque tout est de sa faute...*

Table des matières

| | |
|--|-----------|
| Résumé..... | i |
| Remerciements | ii |
| Table des matières | iv |
| Liste des tableaux..... | vi |
| Abréviations utilisées dans les tableaux..... | vi |
| Liste des figures..... | vii |
| | |
| Introduction générale | 1 |
| | |
| CHAPITRE 1 : PROBLÉMATIQUE ET OBJECTIFS | 3 |
| 1.1 Contexte géographique du site..... | 4 |
| 1.1.1 Localisation | 4 |
| 1.1.2 Géologie..... | 6 |
| 1.1.3 Géomorphologie | 6 |
| 1.1.4 Climat..... | 9 |
| 1.1.5 Dynamique climatique récente | 11 |
| 1.1.6 Démographie et aménagement | 13 |
| 1.2 Objectifs de recherche | 14 |
| | |
| CHAPITRE 2 : CONCEPTS ET MÉTHODES..... | 15 |
| 2.1 Historique | 16 |
| 2.1.1 Topoclimatologie | 16 |
| 2.1.2 Pergélisol..... | 16 |
| 2.2 Concepts théoriques..... | 18 |
| 2.2.1 Orientation et inclinaison des versants | 18 |
| 2.2.2 Couverture de neige..... | 20 |
| 2.2.3 Végétation | 20 |
| 2.2.4 Types de sol..... | 21 |
| 2.2.5 Proximité d'un plan d'eau | 21 |
| 2.3 Échelles de travail | 22 |
| 2.3.1 Topoclimat | 22 |
| 2.3.2 Microclimat..... | 22 |
| 2.4 Sites d'échantillonnage | 23 |
| 2.4.1 Sites topoclimatiques | 23 |
| 2.4.2 Sites microclimatiques | 25 |
| 2.5 Instruments de mesure | 27 |
| 2.5.1 Stations climatiques | 27 |
| 2.5.2 Capteurs thermiques | 27 |
| 2.5.3 Mesures de neige | 29 |
| 2.6 Traitement et interprétation des données..... | 31 |
| 2.6.1 Températures | 31 |
| 2.6.2 Vents..... | 34 |

| | |
|--|------------|
| CHAPITRE 3 : CONDITIONS TOPOCLIMATIQUES ET MICROCLIMATIQUES DE LA VALLÉE DE SALLUIT | 35 |
| 3.1 Topoclimat de la vallée | 36 |
| 3.1.1 <i>Températures</i> | 36 |
| 3.1.2 <i>Vents.....</i> | 47 |
| 3.1.3 <i>Variabilité et phénomènes topoclimatiques.....</i> | 56 |
| 3.2 Environnements microclimatiques..... | 66 |
| 3.2.1 <i>Statistiques des températures.....</i> | 66 |
| 3.2.2 <i>Indices thermiques</i> | 76 |
| 3.2.3 <i>Variabilité microclimatique en fonction des facteurs géographiques</i> | 84 |
| CHAPITRE 4 : DISCUSSION..... | 115 |
| 4.1 Bref retour sur les résultats | 116 |
| 4.2 Dynamique climatique et géomorphologique..... | 118 |
| 4.2.1 <i>Contexte climatique régional (1970-2000).....</i> | 118 |
| 4.2.2 <i>Températures et précipitations</i> | 121 |
| 4.2.3 <i>Interactions air-sol</i> | 123 |
| 4.3 Performance thermique des infrastructures | 129 |
| 4.3.1 <i>Bâtiments surélevés.....</i> | 129 |
| 4.3.2 <i>Routes et remblais.....</i> | 133 |
| 4.4 Stabilité future du pergélisol..... | 134 |
| 4.4.1 <i>Tendances saisonnières</i> | 134 |
| 4.4.2 <i>Moyennes vs variabilité</i> | 135 |
| Conclusion générale..... | 139 |
| Bibliographie | 141 |

Liste des tableaux

| | |
|---|-----|
| Tableau I: Caractéristiques démographiques de Salluit par rapport au Québec en 2001. | 13 |
| Tableau II: Caractéristiques des sites microclimatiques. | 25 |
| Tableau III: Durée (nombre de mois) de récolte de données par les capteurs thermiques. | 29 |
| Tableau IV: Exemple de calcul : température moyenne quotidienne. | 32 |
| Tableau V: Exemple de calcul : degrés-jours de dégel. | 32 |
| Tableau VI: Exemple de calcul : amplitude mensuelle moyenne. | 33 |
| Tableau VII: Statistiques annuelles des températures, sites topoclimatiques. | 37 |
| Tableau VIII: Températures moyennes mensuelles (°C), sites topoclimatiques. | 42 |
| Tableau IX: Statistiques annuelles des vents, sites topoclimatiques. | 47 |
| Tableau X: Statistiques annuelles des inversions thermiques. | 58 |
| Tableau XI: Durée moyenne (h) des épisodes d'inversion (>6 h). | 59 |
| Tableau XII: Statistiques annuelles des températures de surface (moyenne et variabilité), sites microclimatiques. | 67 |
| Tableau XIII: Statistiques annuelles des températures de surface (minima et maxima), sites microclimatiques. | 69 |
| Tableau XIV: Impacts des facteurs géographiques sur les surfaces microclimatiques. | 114 |
| Tableau XV: Synthèse des températures et des indices thermiques dans l'air et dans le sol pour trois stations climatiques. | 124 |

Abréviations utilisées dans les tableaux

| | |
|---------------------------------------|--|
| T_max; T_min; T_moy | Température maximale; minimale; moyenne |
| Max_abs; Min_abs | Température maximale absolue; minimale absolue |
| Amp; Amp_abs | Amplitude thermique moyenne; absolue |
| DJ >0°C; DJ <0°C | Degrés-jours (indice) de dégel; degrés-jours (indice) de gel |
| #J >0°C; #J <0°C | Nombre de jours de dégel; nombre de jours de gel |
| Fact-N >0°C; Fact-N <0°C | Facteur-n de dégel; facteur-n de gel |
| Ratio G/D | Rapport (ratio) entre l'indice de gel et l'indice de dégel |
| Dir_moy | Direction moyenne (dominante) du vent |
| Fréq_dir | Fréquence annuelle de la direction dominante du vent |
| Vit_moy; Vit_med; Vit_max | Vitesse moyenne; médiane; maximale |
| Fréq_<25 | Fréquence annuelle des vents faibles (inférieurs à 25 km/h) |
| Fréq_25-75 | Fréquence annuelle des vents moyens (entre 25 et 75 km/h) |
| Fréq_>75 | Fréquence annuelle des vents forts (supérieurs à 75 km/h) |
| Vit_>100 | Épisodes de vents violents (supérieurs à 100 km/h) |
| Nb inv. | Nombre d'inversions thermiques |
| AÉRO | Station météorologique de l'aéroport |
| TIKI | Station météorologique de Tikiraatsiaq |
| Var_inter | Variation inter-annuelle (2003-2004 par rapport à 2002-2003) |

Liste des figures

| | |
|--|----|
| Figure 1: Localisation du village inuit de Salluit..... | 5 |
| Figure 2: La vallée de Salluit, une ancienne vallée glaciaire débouchant sur un fjord. | 5 |
| Figure 3: Vues de la vallée et du village..... | 5 |
| Figure 4: Dépôts de surface dans la vallée de Salluit. | 8 |
| Figure 5: Quelques unités stratigraphiques..... | 8 |
| Figure 6: Quelques formes du relief (pergélisol)..... | 8 |
| Figure 7: Climats du Québec selon la classification de Litynski..... | 10 |
| Figure 8: Glissement de terrain, secteur de Salluit-2..... | 12 |
| Figure 9: Signes de détérioration du pergélisol. | 12 |
| Figure 10: Rayonnement solaire global journalier reçu sur différentes pentes, Salluit (62°N). 19 | |
| Figure 11: Brises de pentes en milieu montagneux. | 19 |
| Figure 12: Sites et instrumentation à l'échelle du topoclimat. | 24 |
| Figure 13: Sites et instrumentation à l'échelle des microclimats. | 26 |
| Figure 14: Mesures de neige..... | 30 |
| Figure 15: Températures moyennes quotidiennes, sites topoclimatiques..... | 38 |
| Figure 16: Histogrammes de fréquences de température de l'air, sites topoclimatiques. | 40 |
| Figure 17: Températures moyennes et extrêmes mensuels de l'air, sites topoclimatiques. | 43 |
| Figure 18: Indices (degrés-jours) de gel/dégel accumulés dans l'air, sites topoclimatiques..... | 43 |
| Figure 19: Écarts-types mensuels des températures de l'air, sites topoclimatiques. | 45 |
| Figure 20: Amplitudes mensuelles absolues, sites topoclimatiques. | 45 |
| Figure 21: Directions et vitesses des vents, sites topoclimatiques. | 49 |
| Figure 22: Directions et vitesses des vents pour 4 mois, sites topoclimatiques. | 51 |
| Figure 23: Vitesses mensuelles moyennes et maximales des vents, sites topoclimatiques. | 53 |
| Figure 24: Écarts-types mensuels des vitesses des vents, sites topoclimatiques. | 53 |
| Figure 25: Effet du relief sur les vents dominants (octobre 2002 à septembre 2004). | 55 |
| Figure 26: Températures horaires et types de temps (22 juin au 1 ^{er} août 2003)..... | 57 |
| Figure 27: Total mensuel des heures et du nombre d'inversions thermiques. | 60 |
| Figure 28: Valeurs moyennes et extrêmes des inversions thermiques (>6 h). | 62 |
| Figure 29: Directions et vitesses des vents selon le type de temps ou l'occurrence d'inversions thermiques..... | 64 |
| Figure 30: Histogrammes de fréquences de température de surface, sites microclimatiques. . | 71 |
| Figure 31: Températures moyennes et extrêmes mensuels en surface, sites microclimatiques. | 73 |
| Figure 32: Amplitudes mensuelles absolues, sites microclimatiques..... | 75 |
| Figure 33: Jours de gel et de dégel au sol (octobre 2002 - septembre 2004), sites microclimatiques..... | 77 |
| Figure 34: Indices et rapports de gel et de dégel au sol, sites microclimatiques. | 79 |
| Figure 35: Facteurs-n de gel et de dégel, sites microclimatiques. | 81 |
| Figure 36: Degrés-jours cumulatifs de gel et de dégel, sites microclimatiques. | 83 |
| Figure 37: Sites de combes à neige..... | 85 |
| Figure 38: Histogrammes de fréquences de température de surface, combes à neige..... | 86 |
| Figure 39: Températures quotidiennes et indices thermiques mensuels au sol, combes à neige. | 88 |

| | |
|--|-----|
| Figure 40: Température moyenne annuelle au sol (2002-03) et couvert de neige (mars 2003), sites microclimatiques..... | 89 |
| Figure 41: Températures moyennes quotidiennes au sol pour deux groupes de sites microclimatiques..... | 91 |
| Figure 42: Sites localisés sous les bâtiments..... | 92 |
| Figure 43: Températures quotidiennes et indices thermiques mensuels au sol, sites localisés sous les bâtiments..... | 93 |
| Figure 44: Écarts de température entre la surface du sol et l'air, bâtiments et terrain naturel.. | 95 |
| Figure 45: Sites localisés près des infrastructures du village..... | 96 |
| Figure 46: Températures quotidiennes et indices thermiques mensuels au sol, sites localisés près des infrastructures du village..... | 97 |
| Figure 47: Écarts de température entre la surface du sol et l'air, sites d'infrastructures et terrain naturel..... | 99 |
| Figure 48: Glissement de terrain en milieu naturel..... | 100 |
| Figure 49: Températures quotidiennes et indices thermiques mensuels au sol, glissement de terrain en milieu naturel..... | 101 |
| Figure 50: Écarts de température entre la surface du sol et l'air, glissement de terrain et sol fissuré..... | 103 |
| Figure 51: Sites localisés en terrain humide..... | 104 |
| Figure 52: Températures quotidiennes et indices thermiques mensuels au sol, terrain humide..... | 105 |
| Figure 53: Sites localisés en terrain sec..... | 106 |
| Figure 54: Températures quotidiennes et indices thermiques mensuels au sol, terrain sec.... | 107 |
| Figure 55: Températures quotidiennes de surface durant la saison de dégel selon les types de sols..... | 109 |
| Figure 56: Sites localisés sur des versants inclinés..... | 110 |
| Figure 57: Températures quotidiennes et facteurs-n mensuels au sol, versants inclinés..... | 111 |
| Figure 58: Sites localisés près ou dans des plans d'eau..... | 112 |
| Figure 59: Températures quotidiennes et facteurs-n mensuels au sol, plans d'eau..... | 113 |
| Figure 60: Températures annuelles de l'air (1971-2000), Kuujjuaq et Iqaluit..... | 119 |
| Figure 61: Corrélation des températures de l'air (1971-2000), Kuujjuaq et Iqaluit..... | 119 |
| Figure 62: Températures moyennes mensuelles de l'air (octobre 2002 - septembre 2004) pour Salluit, Kuujjuaq et Iqaluit..... | 120 |
| Figure 63: Températures annuelles de l'air et précipitations annuelles (1971-2000), Kuujjuaq et Iqaluit..... | 122 |
| Figure 64: Sites de mesures de température du sol..... | 123 |
| Figure 65: Températures moyennes mensuelles dans l'air et dans le sol pour deux sites, vallée de Salluit..... | 126 |
| Figure 66: Températures moyennes mensuelles dans l'air et dans le sol, plateau rocheux (aéroport) et vallée de Salluit (SILA)..... | 128 |
| Figure 67: Accumulation de neige du côté nord des bâtiments..... | 131 |
| Figure 68: Ruissellement et tassement du côté sud des bâtiments..... | 131 |
| Figure 69: Remblai de route et radier près du site microclimatique #12..... | 133 |
| Figure 70: Amplitudes et températures annuelles de l'air (moyennes mobiles sur 5 ans, 1971-2000), Kuujjuaq et Iqaluit..... | 136 |
| Figure 71: Corrélation des températures moyennes quotidiennes de l'air entre l'année 2002-03 et l'année 2003-04, station SILA..... | 137 |

Introduction générale

Parmi les nombreuses questions que pose la problématique actuelle des changements climatiques, celles qui touchent les impacts de ces changements sur les communautés nordiques et leur milieu naturel demeurent préoccupantes. Non seulement la plupart des modèles climatiques annoncent, dans la région circumpolaire arctique, un réchauffement plus sévère qu'ailleurs pour les prochaines décennies (3-4 degrés d'ici 2050), mais certaines localités nordiques semblent déjà affectées par de tels bouleversements. On y récolte à tout le moins des indices inquiétants.

Le village inuit de Salluit en est un exemple. Le sol sur lequel est bâti ce village de quelque 1200 habitants a récemment montré des signes localisés de détérioration. Advenant le prolongement – voire même l'amplification – d'un épisode de réchauffement climatique déjà observé dans le Nord québécois, la stabilité du pergélisol y serait d'autant plus menacée, de sorte que les impacts sur les infrastructures existantes pourraient être dramatiques. Dans la mesure où cela vient s'ajouter à des contraintes démographiques et sociales déjà criantes, il apparaît nécessaire de mettre en lumière, pour ce cas précis, **les interactions entre le climat de surface et la dynamique du pergélisol sous-jacent**, ces interactions se déroulant d'abord et avant tout à la surface du sol. Ce faisant, les autorités compétentes seraient mieux préparées pour prévoir les impacts d'éventuels bouleversements climatiques et, conséquemment, à prendre de meilleures décisions quant à l'aménagement futur du village.

C'est dans ce contexte que le Ministère de la Sécurité publique du Québec a confié au Centre d'études nordiques (CEN) de l'Université Laval un mandat de recherche sur les conditions locales (géologie, climat et géomorphologie) du pergélisol dans la région de Salluit. Plus spécifiquement, il s'agissait de caractériser en détail le pergélisol et sa partie superficielle (mollisol) afin d'évaluer l'impact des changements climatiques sur le développement futur de cette communauté nordique en pleine croissance démographique.

Le présent projet de recherche s'intègre dans cette démarche multidisciplinaire. Par ses objectifs et sa démarche méthodologique, qui concernent à la fois la dynamique du climat et celle du pergélisol, il s'agit en quelque sorte du volet « climatologie appliquée » du projet *Salluit* du CEN.

Les deux premiers chapitres de ce mémoire présentent l'étude de climatologie appliquée de façon détaillée. La mise en contexte de la problématique (CHAPITRE 1) aborde les aspects géographiques complexes de la vallée, ainsi que les objectifs de recherche qui en découlent. Quant à la démarche méthodologique (CHAPITRE 2), elle est décrite après que sa justification théorique ait d'abord été amenée. Une attention particulière est portée aux contraintes spatiales du terrain, qui ont directement influencé le déroulement de l'étude.

Le CHAPITRE 3 présente les résultats proprement dits, à deux échelles spatiales d'analyse. Premièrement, le climat local (« topoclimat ») de la vallée de Salluit est analysé selon deux paramètres climatiques majeurs : les températures et les vents dominants (Section 3.1). À ce titre, les résultats obtenus au fond de la vallée sont comparés à ceux obtenus à l'extérieur de celle-ci, en tenant compte des types de temps prédominants. Deuxièmement, en cernant plus précisément l'enceinte de la vallée, le régime thermique des différentes surfaces microclimatiques qui la composent est analysé (Section 3.2). La variabilité y est décrite en fonction des facteurs géographiques qui influencent le climat de surface.

La discussion et la synthèse des résultats constituent le dernier chapitre de ce mémoire (CHAPITRE 4). L'accent est d'abord mis sur la dynamique climatique et géomorphologique dans la vallée, en général, et sur le rôle de la neige et des infrastructures anthropiques, en particulier. La performance thermique de ces dernières est d'ailleurs analysée plus en détail. Enfin sont proposées quelques pistes de réflexion concernant la stabilité future du pergélisol sur lequel le village est construit.

1

CHAPITRE 1 : PROBLÉMATIQUE ET OBJECTIFS

Sommaire

La problématique centrale du projet repose sur la situation locale complexe du village; c'est pourquoi le contexte géographique général est d'abord décrit. Les aspects physiques (géologie, géomorphologie, climat) puis humains (démographie et aménagement) sont abordés de façon détaillée et, autant que possible, selon un certain ordre logique (du général au particulier). Cette description progressive permet, en fin de chapitre, de mieux cerner les objectifs (généraux et spécifiques) de l'étude.

1.1 Contexte géographique du site

1.1.1 Localisation

Le village de Salluit (62°14'N; 75°38'W) est situé à l'extrémité nord de la péninsule d'Ungava, sur le littoral sud du détroit d'Hudson, en zone de pergélisol continu (Figure 1). Parmi les 14 villages inuit du Nunavik¹, il s'agit du deuxième le plus au nord. Plusieurs sites archéologiques découverts dans la région attestent de l'occupation du territoire depuis environ 3 500 ans (Gendron & Pinard, 2000). Par ailleurs, Salluit se trouve à près de 500 km au nord de la limite septentrionale des arbres, dans une région où la toundra herbacée domine. Quelques saules arctiques et bouleaux glanduleux occupent toutefois les dépressions et les bords de ruisseaux à l'abri du vent (Kasper & Allard, 2001).

Le village est localisé en bordure d'un fjord qui s'ouvre sur le détroit d'Hudson (*Fjord de Sugluk*). Il est bâti au fond d'une ancienne vallée glaciaire orientée environ N-S et recouverte en grande partie de dépôts meubles quaternaires (Figure 2). Cette vallée, d'une longueur d'environ 2,5 km et d'une largeur variant entre 600 m et 1,5 km, est relativement bien encaissée dans les plateaux rocheux environnants : près de 200 m de dénivellation pour une superficie d'environ 3 km².

Deux rivières entaillent les parties sud-ouest et sud-est de la vallée et parcourent séparément la moitié de la vallée, avant de se rejoindre tout juste en amont du village. Ce bras de rivière se jette dans le fjord environ un kilomètre plus au nord, après avoir longé toute la partie est du village. Salluit est donc limité au nord par le fjord, à l'ouest et au sud par des versants rocheux, et à l'est par la rivière (Figure 3).

Cette situation d'encaissement n'est pas sans conséquences sur l'aménagement du village. Presque tous les bâtiments sont localisés à moins d'un kilomètre du littoral ou sur une butte rocheuse occupant le centre de la vallée. Cette forte concentration est d'autant plus renforcée par l'abandon il y a quelques années d'un secteur prévu pour l'expansion future du village, appelé « *Salluit-2* ».

¹ Partie nord du Québec située au-delà du 55^{ème} parallèle.

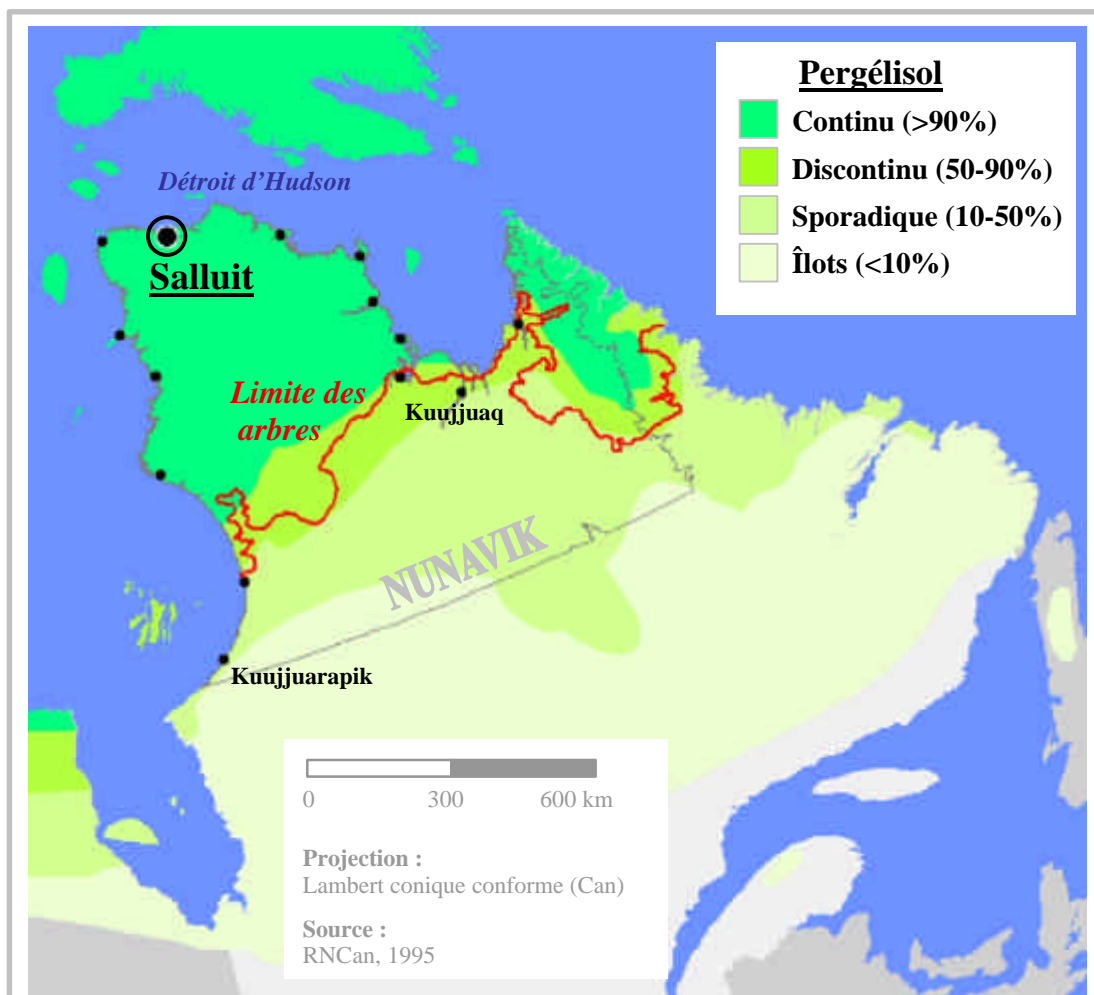


Figure 1 : Localisation du village inuit de Salluit.

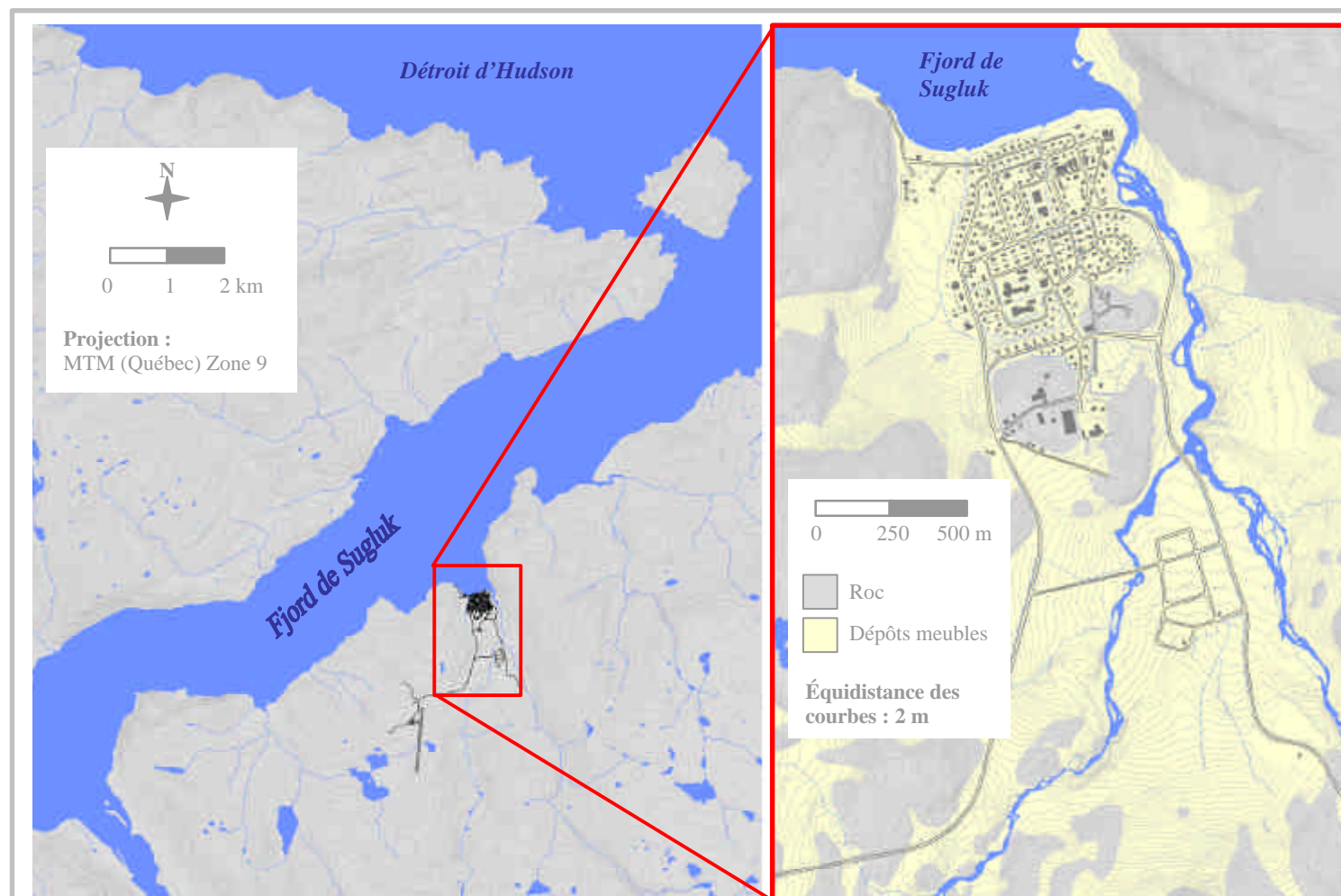


Figure 2 : La vallée de Salluit, une ancienne vallée glaciaire débouchant sur un fjord.



Figure 3 : Vues de la vallée et du village.

1.1.2 Géologie

Le socle rocheux des environs de Salluit fait partie de la *Fosse de l'Ungava*, soit le secteur nord de la province géologique de *Churchill* (Lamothe, 1994). Cette province constitue l'une des sous-régions géologiques du Bouclier canadien qui date du Précambrien. Il s'agit surtout de gneiss granitique d'âge protérozoïque (environ 1,8 milliards d'années), fortement métamorphisé. On appelle par ailleurs « *terrane de Narsajuaq* » (du nom d'une des rivières se jetant dans le fjord en amont du village) la section rocheuse qui englobe le gneiss de la vallée de Salluit. Des plis, des failles et de nombreuses veines de quartz, provoqués en régime de compression tectonique, affectent la roche à plusieurs endroits selon un axe SW-NE le long duquel s'orientent la plupart des grandes structures régionales. La présence de gisements de nickel-cuivre (mine Raglan) et d'amiante (Asbestos Hill, aujourd'hui fermée) à moins de 100 km du village résulte de ce contexte géologique particulier.

Érodé par l'action abrasive des glaciers durant les derniers épisodes glaciaires, ce gneiss affleure à plusieurs endroits dans la vallée et presque partout sur ses versants. On retrouve la même composition lithologique dans de nombreux cailloux et blocs glaciaires éparpillés à plusieurs endroits qui témoignent du passage des glaciers sur cet ancien socle rocheux. Il est aujourd'hui exploité en gravier ou blocs grossiers pour les infrastructures du village (remblais, routes, piste d'atterrissage et installations portuaires).

1.1.3 Géomorphologie

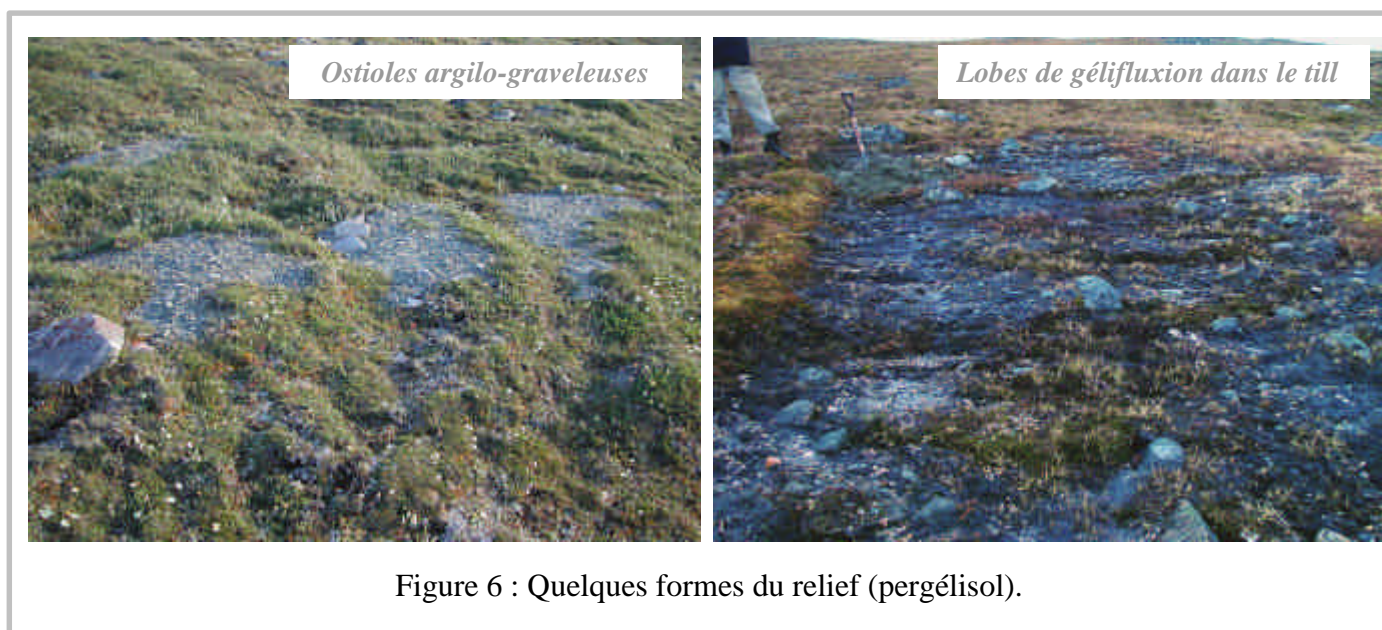
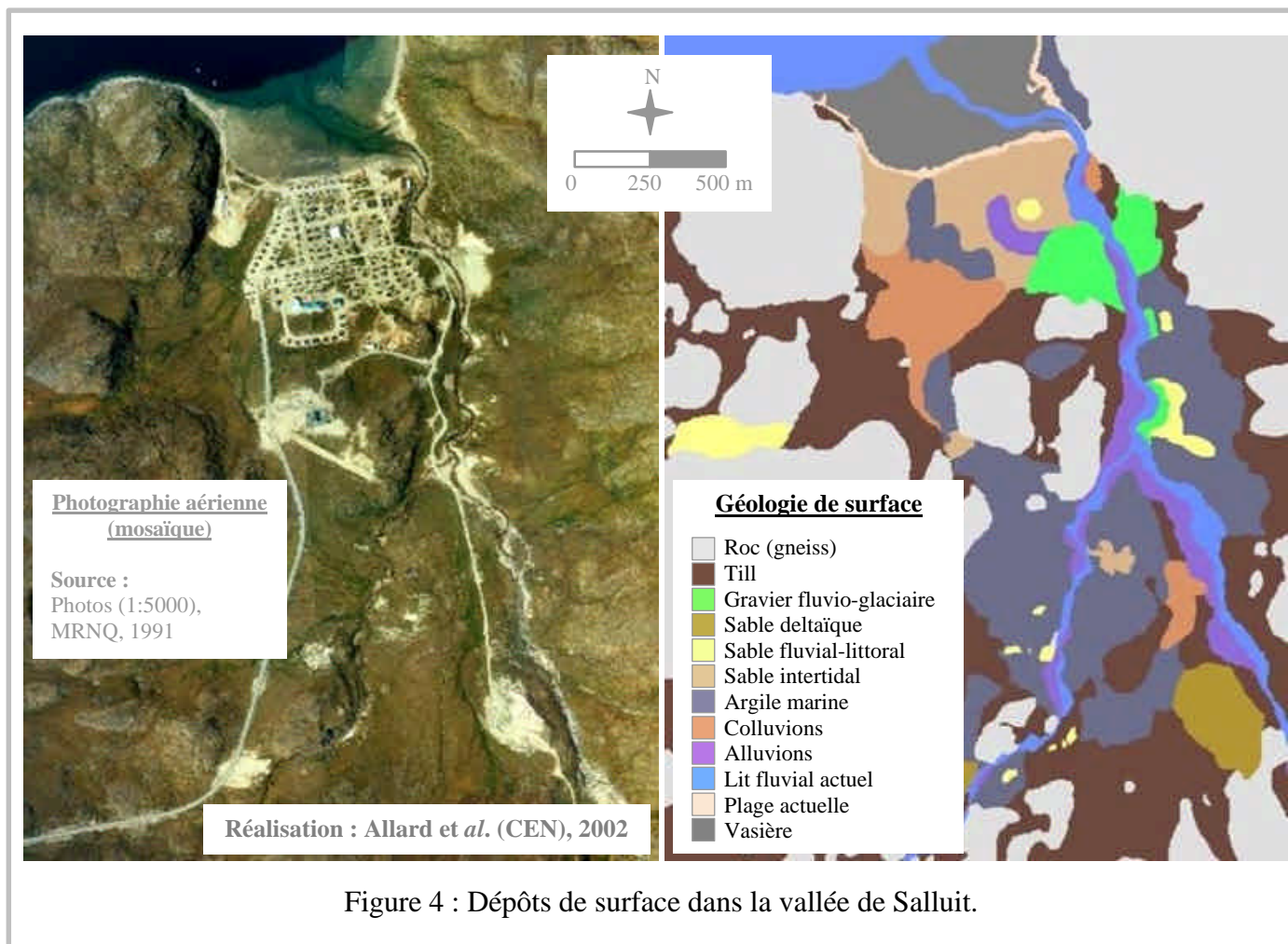
Dans les environs du fjord de Sugluk, les plateaux rocheux, dont l'altitude moyenne varie entre 350 et 450 m, alternent avec des vallées glaciaires plus ou moins perpendiculaires au fjord. En général, le socle rocheux est recouvert à plusieurs endroits d'une mince couche de dépôts glaciaires (till). Dans le fond de certaines vallées (comme celle de Salluit), à une altitude inférieure à 150 m, des dépôts meubles marins, littoraux et deltaïques affleurent.

La nature, la répartition et la stabilité des dépôts meubles de même que les formes du relief qui les affectent découlent directement de l'histoire géomorphologique de la vallée depuis la fin de la dernière glaciation. En général, cette déglaciation s'est déroulée entre 10000 et 5000 ans BP (*Before Present* : avant aujourd'hui) pour l'ensemble de la péninsule d'Ungava (Lauriol &

Gray, 1987). Pour la région de Salluit, les datations au radio-carbone indiquent que les glaciers se sont retirés vers 8600 ans BP (Kasper & Allard, 2001), période à partir de laquelle la transgression marine de la mer d'Iberville a pu s'amorcer le long des côtes du détroit d'Hudson pour se prolonger durant quelques milliers d'années. La limite marine atteint environ 150 m d'altitude dans la vallée (Gray et al., 1993). Le relèvement isostatique a rapidement permis l'émersion graduelle des terres (environ 4 cm par année entre 8000 et 5000 ans BP) et leur exposition aux conditions climatiques et hydrologiques de surface. Cette émersion se poursuit aujourd'hui, à un rythme toutefois moins rapide (2-4 mm par année).

Une carte des dépôts meubles de la vallée de Salluit a été récemment réalisée (Allard et al., 2002). Deux types de sédiments y sont présents (Figure 4) : 1) *les sédiments glaciaires* (till, sables et graviers fluvio-glaciaires) déposés à la base et en marge des glaciers pendant l'érosion du socle rocheux et couvrant, dans le cas du till, la majeure partie du fond de la vallée et de ses versants; 2) *les sédiments marins* (sables et graviers littoraux et deltaïques, silts argileux marins) accumulés lors de l'invasion marine et se superposant par endroits sur plusieurs dizaines de mètres d'épaisseur. Le régime hydrographique plus récent, par l'action des vagues, des courants de marée, du ruissellement sur les versants et de l'écoulement des cours d'eau, a contribué à redistribuer en partie ces dépôts au sein d'unités stratigraphiques plus récentes : crêtes de plage, vasière intertidale, colluvions et alluvions (Figure 5).

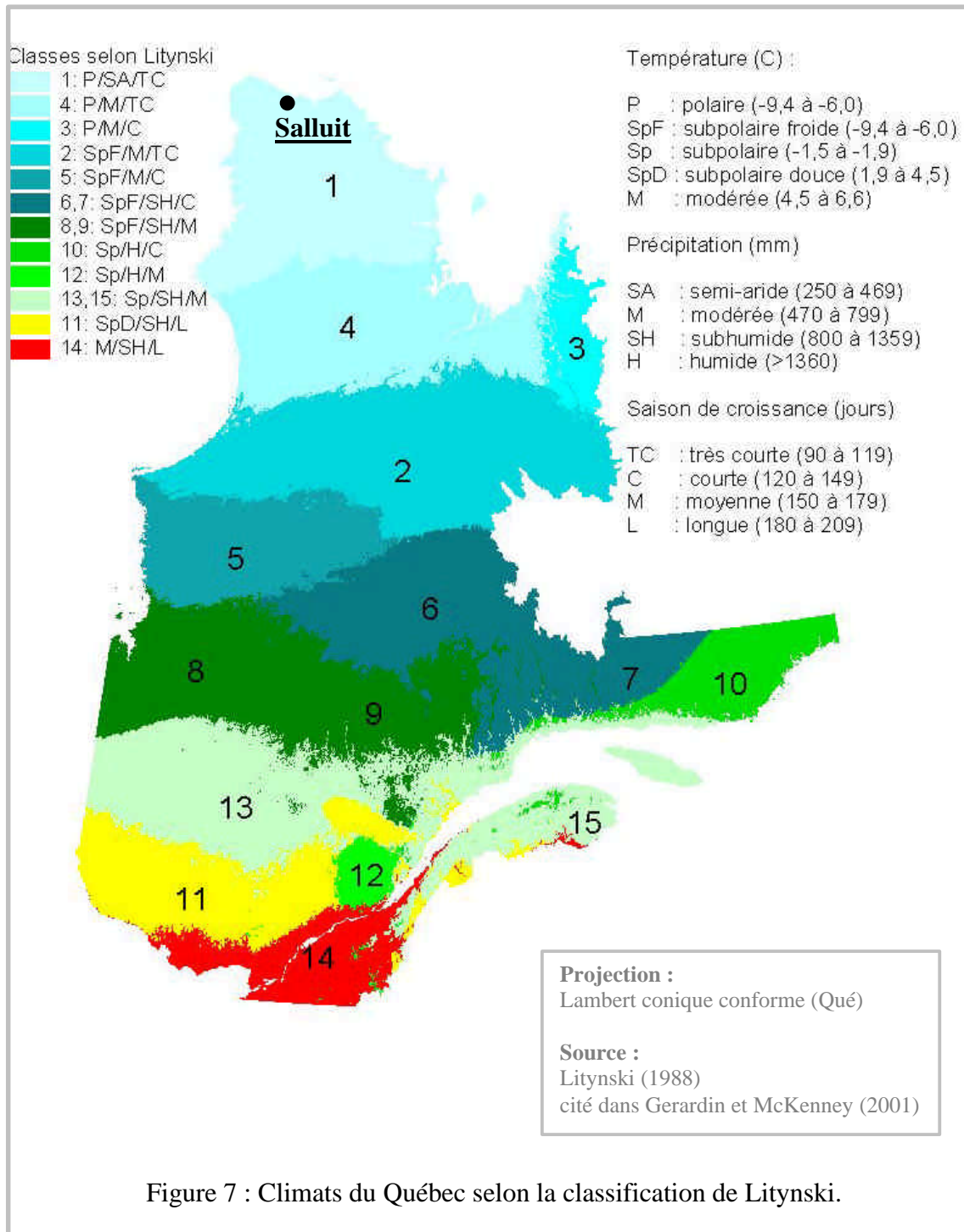
Le pergélisol est présent partout dans la vallée jusqu'à une profondeur pouvant atteindre par endroits 280 m (Allard et al., 2004). L'épaisseur maximale du *mollisol* (partie supérieure du pergélisol qui dégèle à chaque été) varie beaucoup selon le type de sol : elle passe d'à peine 25 cm dans la tourbe à plus de 3 m dans le roc. Dans plusieurs secteurs de la vallée recouverts de sédiments fins (argiles, silts, colluvions), une zone très riche en glace affecte les premiers mètres du sol. En surface, la présence de pergélisol se traduit par différentes formes affectant le relief (Figure 6) : lobes de gélifluxion, thufurs (petits monticules de sol et de végétation) ou ostioles (plaques argileuses plus ou moins circulaires formées par des mouvements convectifs dans le sol). Ces formes évoluent selon un cycle saisonnier lors du dégel estival du mollisol, mais également sur plusieurs années selon les fluctuations climatiques de surface.



1.1.4 Climat

La péninsule d'Ungava présente les conditions climatiques les plus froides de tout le territoire québécois (Figure 7). Dans la région de Salluit, la normale climatique des températures moyennes annuelles dans l'air est généralement évaluée à $-8\text{ }^{\circ}\text{C}$, bien qu'il n'existe actuellement pas de station climatique environnante présentant une série de données suffisamment longue (30 ans selon les standards de l'Organisation Météorologique Mondiale) pour la déterminer avec précision. Toutefois, une récente étude climatique (Barrette et *al.*, 2004) basée sur l'analyse spatio-temporelle des données climatiques du Québec septentrional (1971-2000) tend à conforter cette estimation. Selon cette étude, la température moyenne annuelle à Salluit est légèrement inférieure à $-7,5\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Les précipitations sont de l'ordre de 300 mm par année, dont environ la moitié sous forme de neige (Kasper et Allard, 2001). Il s'agit d'un climat continental, parfois même classé « semi-aride » dans certains atlas (Gerardin et McKenney, 2001). En effet, les grandes masses d'eau environnantes (baie d'Hudson, détroit d'Hudson et baie d'Ungava) gèlent durant une partie de l'année et adoptent donc un comportement climatique de type continental. De plus, la région est affectée majoritairement par le passage de masses d'air sec en provenance de l'archipel arctique canadien. La répartition de la neige est fortement contrôlée par les vents dominants, qui sont soutenus tout au long de l'année et parfois violents ou supérieurs à 100 km/h.

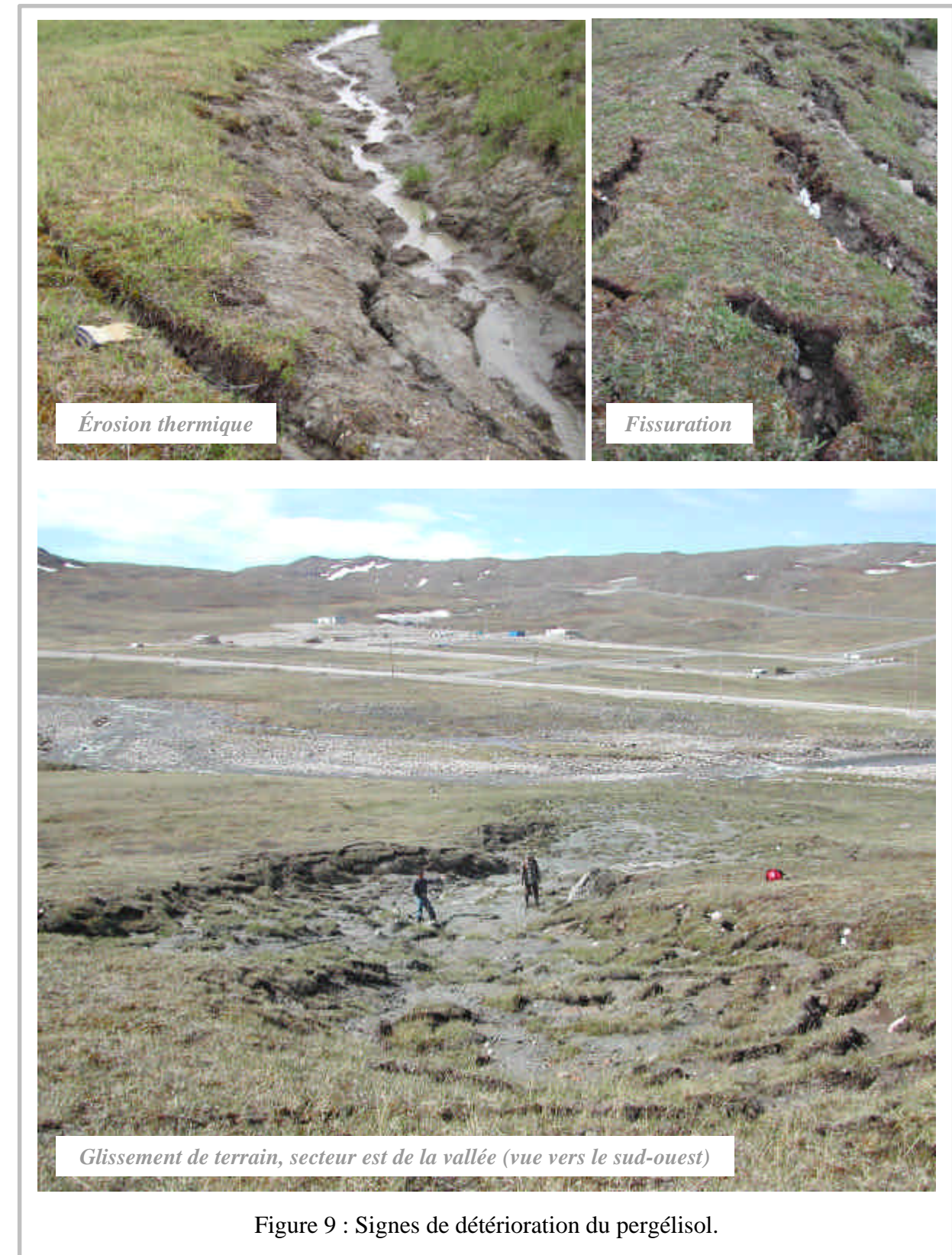


1.1.5 Dynamique climatique récente

L'évolution climatique des dernières décennies, déduite de données thermiques récoltées dans le pergélisol, montre un refroidissement – généralisé dans tout le Québec nordique – jusqu'en 1992-93, suivi d'un réchauffement notable jusqu'à aujourd'hui (Allard et *al.*, 2004). Ce réchauffement, de l'ordre de 2 °C en un peu plus d'une décennie, demeure préoccupant quant à son amplitude et à sa rapidité. En effet, certains types de sols présents dans la vallée comme les argiles marines sont localement riches en glace, la teneur volumétrique en glace dépassant parfois largement la porosité originelle du sédiment. La fonte de tels sols provoque donc non seulement un affaissement du terrain, mais aussi une libération d'eau de fonte, elle-même source d'érosion thermique en favorisant la formation de mares thermokarstiques.

De plus, la salinité du sol sur lequel est bâtie la majeure partie du village est par endroits assez élevée pour abaisser de quelques dixièmes de degrés le point de fusion de la glace qu'il contient. Un tel sédiment, même légèrement sous 0 °C, peut donc demeurer non-gelé et moins résistant mécaniquement. Dans ce contexte, un réchauffement important des températures dans les premiers centimètres du sol aurait des impacts drastiques sur la stabilité du sol et des constructions qu'il supporte.

Or en septembre 1998, au terme d'une année particulièrement chaude, un glissement de terrain en surface (rupture du mollisol) a affecté un secteur du village (« Salluit-2 ») spécialement aménagé dans les années '90 pour une éventuelle expansion (Figure 8). Des causes anthropiques (concentration du drainage et empilement de la neige) et naturelles (été chaud, sol argileux riche en glace) auraient provoqué le glissement. Cet épisode a mené au déménagement d'une vingtaine de maisons sur de nouveaux remblais construits dans le centre du village, ce qui a restreint davantage l'espace pouvant être aménagé. D'autres signes localisés de détérioration du pergélisol (Figure 9) montrent enfin que sa stabilité à court terme est étroitement liée aux activités humaines et aux variations climatiques.



1.1.6 Démographie et aménagement

La tendance démographique des dernières années à Salluit est représentative de celle observée ailleurs au Nunavik. La croissance y est nettement plus marquée que dans le reste du Québec, ce qui se traduit entre autres par une proportion de jeunes deux fois plus élevée et des familles presque deux fois plus nombreuses (Tableau I). Dans ce contexte, les besoins en logements pour les nombreuses nouvelles familles seront de plus en plus criants.

Tableau I: Caractéristiques démographiques de Salluit par rapport au Québec en 2001.

| Caractéristique démographique | Salluit | Québec |
|---|---------|-----------|
| Population en 2001 | 1 075 | 7 237 480 |
| Population en 1996 | 929 | 7 138 795 |
| Croissance entre 1996 et 2001 (%) | 15,7 | 1,4 |
| Proportion des personnes âgées de moins de 25 ans (%) | 59,1 | 31,0 |
| Proportion des personnes âgées de 55 ans et plus (%) | 5,6 | 23,8 |
| Âge médian de la population | 19,7 | 38,8 |
| Nombre total de familles | 235 | 2 019 555 |
| Nombre moyen de personnes par famille | 5,8 | 3,1 |
| Nombre total de logements | 225 | 2 978 110 |

Source : Institut de la statistique du Québec

Or, les contraintes topographiques et géologiques dans la vallée restreignent déjà la superficie disponible pour une expansion pourtant nécessaire. Les secteurs rocheux ou recouverts de sédiments plus stables (sables et graviers bien drainés) sont déjà presque entièrement aménagés. Dans la partie ouest, la nature des sols (argiles et colluvions mal drainés) ainsi que la proximité des falaises rocheuses (au pied desquelles un secteur a été récemment identifié comme zone à risque pour les avalanches) rendent les aménagements problématiques. Plus loin dans la vallée, à l'est comme au sud, c'est justement l'éloignement par rapport aux services du village et au littoral du fjord qui demeure une contrainte significative.

En somme, les facteurs géographiques – naturels et humains – contribuent à rendre la problématique particulièrement complexe et délicate.

1.2 Objectifs de recherche

Les deux principaux objectifs de ce projet de recherche concernent directement les deux grands thèmes d'étude du projet :

1) **Décrire le climat local de la vallée de Salluit (topoclimat) et le situer dans son contexte climatique régional, soit par rapport au climat affectant les plateaux environnants.** Pour ce faire, les principaux paramètres climatiques locaux (températures, vitesse et direction des vents) ont été analysés.

2) **Observer les variations de température enregistrées à la surface du sol dans plusieurs environnements microclimatiques situés à l'intérieur de la vallée; et évaluer l'influence de ces variations sur la dynamique du pergélisol.** Cet objectif a été abordé en comparant le comportement thermique de la surface du sol dans plusieurs sites microclimatiques choisis.

Cette démarche passait par la réalisation d'objectifs spécifiques :

- Déceler (s'il y a lieu) les phénomènes thermiques locaux (brises de pentes, inversions) par lesquels se démarque le fond de la vallée par rapport aux sommets des versants, en tenant compte des types de temps prédominants (dégagés ou couverts).

- Analyser la distribution spatiale des températures (à la surface du sol) dans la vallée, en fonction des paramètres géographiques locaux : orientation et inclinaison des versants, types de sols, humidité de surface, couvert de neige, végétation, exposition aux vents.

- Démontrer (s'il y a lieu) et évaluer l'influence anthropique (constructions, remblais) sur les températures de surface, par modification du bilan radiatif et de l'écoulement de l'air.

L'hypothèse selon laquelle *le relief d'un lieu influence directement le climat de surface et ce, à différentes échelles spatiales*, a été retenue tout au long du travail comme base de questionnement et d'analyse. C'est d'ailleurs ce raisonnement qui amorce la démarche méthodologique présentée au prochain chapitre.

2

CHAPITRE 2 : CONCEPTS ET MÉTHODES

Sommaire

La démarche méthodologique de cette étude s'articule autour de nombreux sites et instruments de mesure. Elle s'appuie également sur une longue expérience résultant des travaux antérieurs et sur les concepts théoriques qui en découlent. Une brève mise en contexte est donc proposée en premier lieu. Par la suite, une distinction est faite entre les deux échelles de travail utilisées dans le cadre de l'étude. Cette distinction est au cœur des sections suivantes concernant les sites d'échantillonnage et les instruments de mesures. Enfin, la démarche de traitement et d'interprétation des données est présentée.

2.1 Historique

2.1.1 Topoclimatologie

La relation entre les conditions topographiques d'un lieu et les phénomènes climatiques qui s'y déroulent est connue depuis longtemps. Les Grecs anciens désignaient déjà par le terme « *klima* » l'inclinaison entre la surface de la Terre à un endroit précis et les rayons solaires qui y parviennent. Ce lieu était d'ailleurs appelé « *topos* ». Toutefois, ces connaissances n'étaient que pressenties de façon empirique et souvent incluses aux croyances religieuses de l'époque.

Ce n'est qu'au milieu du XX^{ème} siècle que l'influence du relief sur le climat local est scientifiquement étudiée et documentée. Le terme « topoclimatologie » est alors proposé (Thorntwaite, 1954) pour décrire l'étude du climat d'un lieu. Les échanges de chaleur et d'humidité entre la surface du sol et l'air sont systématiquement étudiés pour différents types de surfaces (Geiger, 1966). Il est désormais possible, en tenant compte de paramètres de surface du terrain (végétation, propriétés physiques du sol), de procéder aux premières cartographies topoclimatiques (Paszynski, 1964). Au cours des années suivantes, ces notions sont utilisées dans divers champs d'application : foresterie, agriculture, aménagement du territoire, pollution urbaine (MacHattie & McCormack, 1968; Yoshino, 1975; Smith, 1975). À la fin du siècle, au terme d'un raffinement méthodologique et instrumental, la topoclimatologie est une branche mature de la recherche en climatologie appliquée (Lamothe, 1983; Choissnel, 1987; Douguedroit, 1987; Fallot, 1992; Guyot, 1999).

2.1.2 Pergélisol

À partir du milieu du XIX^{ème} siècle et pendant près d'une centaine d'années, la recherche concernant le pergélisol est effectuée presque exclusivement par les Russes. Ce n'est qu'à partir de la Deuxième Guerre mondiale, avec les chantiers de l'Alaska et du Nord canadien, que les Nord-américains s'y intéressent et y travaillent intensivement. Au Québec nordique, quelques études sont alors menées dans les environs de Schefferville, lors de travaux d'exploitation minière.

Durant les années '70 et '80 sont précisés différents aspects du pergélisol : géocryologie (Mackay, 1972; Washburn, 1979), répartition (Brown, 1978; Allard & Séguin, 1987) et régime thermique (Taylor & Judge, 1979; Gray et *al.*, 1988). Plus tard, les préoccupations face aux changements climatiques appréhendés viennent s'ajouter aux travaux de recherche (Jean, 1991; Nelson et *al.*, 1993).

Enfin, l'influence climatique de certains facteurs géographiques du terrain (topographie, végétation, neige) est considérée à l'échelle locale (Goodrich, 1982; Roche, 1994; Mueller et *al.*, 1998; Smith et *al.*, 1998;). Parfois même, l'ensemble des facteurs est considéré (Young et *al.*, 1997; Ménard et *al.*, 1998; Henry & Smith, 2001).

C'est justement ce genre d'approche méthodologique qui a été développée dans le cadre de cette étude, en y ajoutant l'impact des bâtiments et des infrastructures du village.

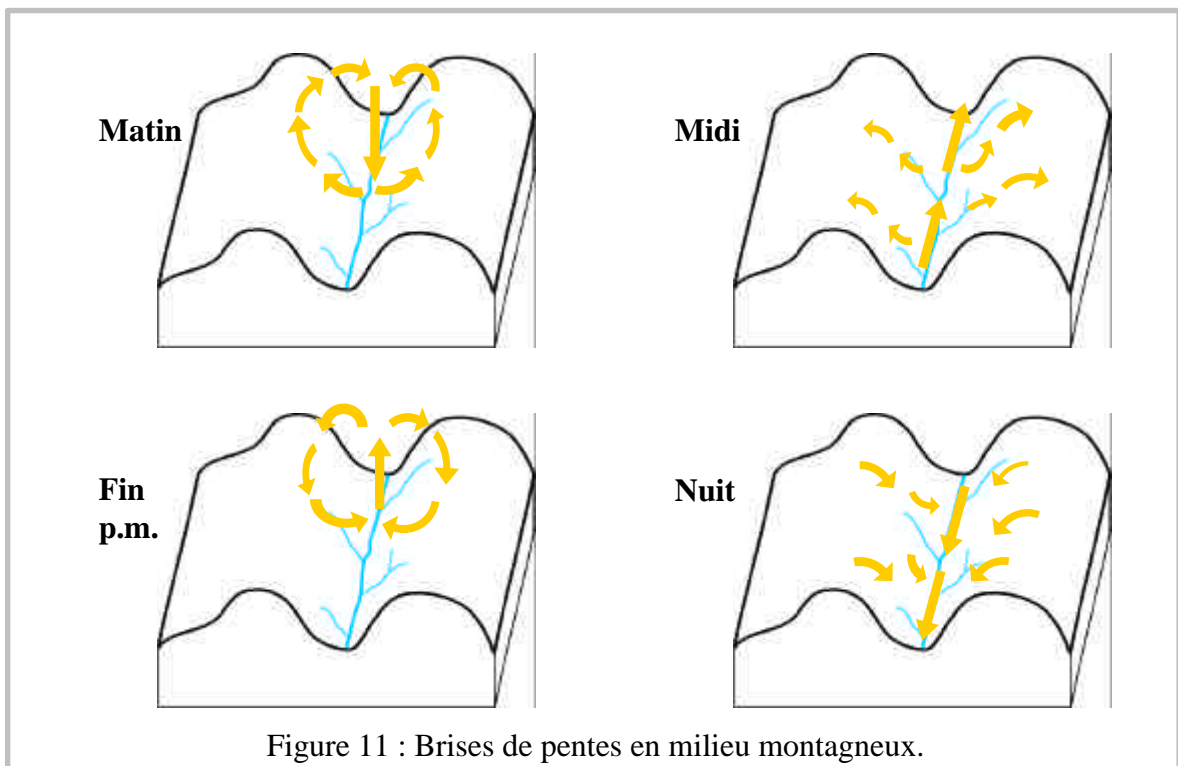
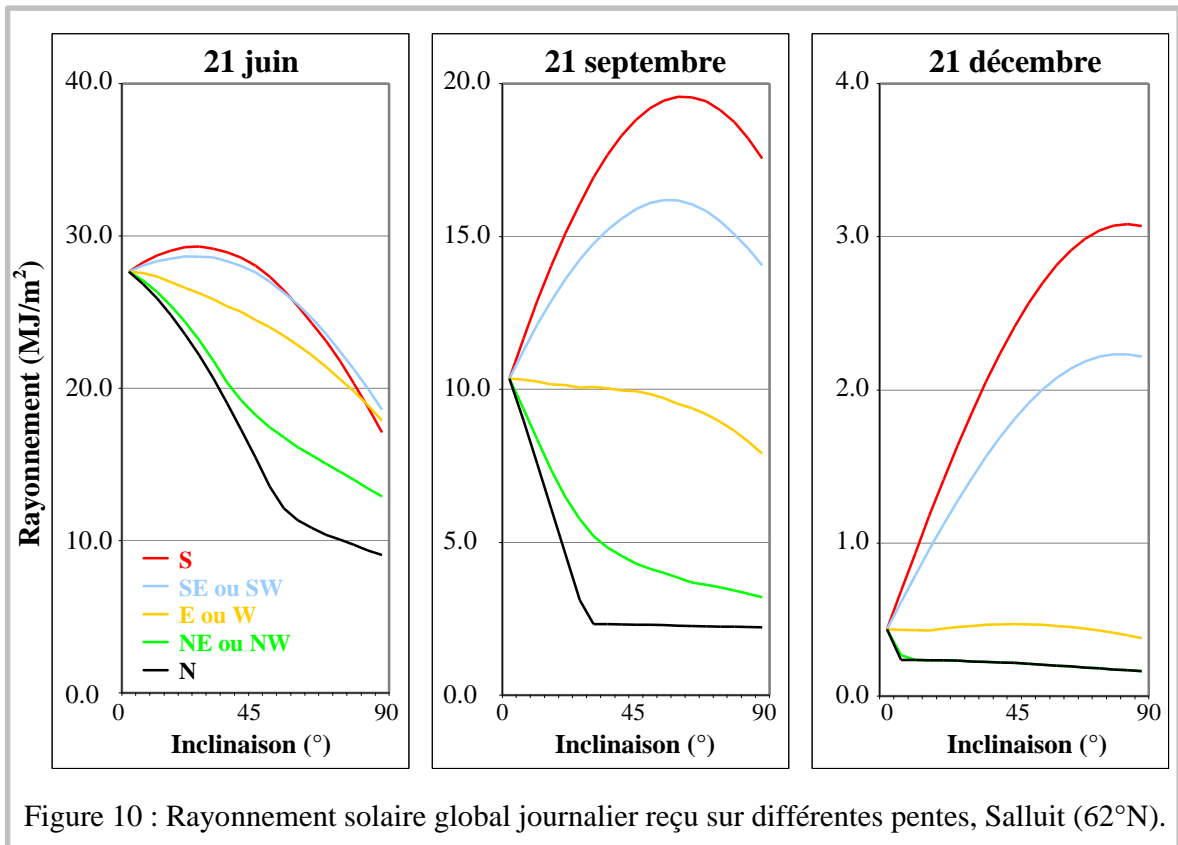
2.2 Concepts théoriques

Les facteurs topographiques influencent donc le climat d'un lieu et plus le relief est accidenté, plus cette influence est marquée. Elle se fait sentir à deux niveaux (Choisnel, 1987) : l'effet *thermique* du relief (modification du bilan radiatif) et l'effet *dynamique* du relief (modification de l'écoulement de l'air). Les types de temps viennent également doser ces effets : par temps clair, alors que la composante *directe* du rayonnement solaire est dominante, les contrastes thermiques des différents secteurs sont plus marqués que par temps couvert, alors que c'est plutôt la composante *diffuse* du rayonnement solaire qui domine.

Plusieurs facteurs topographiques ont été pris en compte lors de l'installation des instruments de mesure. Ils sont présentés dans les lignes qui suivent.

2.2.1 Orientation et inclinaison des versants

L'intensité du rayonnement solaire direct reçu sur une surface dépend de l'angle d'incidence du rayonnement solaire par rapport à cette surface. Ce rayonnement est maximal s'il arrive perpendiculairement à la surface et minimal lorsqu'il lui est parallèle. Cet effet témoigne donc de l'importance du rôle joué par les pentes et versants de différentes inclinaisons en milieu montagneux à différentes heures de la journée, mais aussi à différentes saisons de l'année (Figure 10). De plus, l'orientation des pentes est aussi fondamentale : une surface exposée au sud (dans l'hémisphère Nord) est plus avantageuse qu'une surface exposée au nord et cet effet varie selon la latitude du lieu et le moment de l'année et de la journée. L'effet des ombres portés par les sommets des alentours est d'ailleurs à considérer. Bref, la quantité d'énergie solaire captée par chaque secteur est grandement influencée par la position topographique du secteur dans la vallée, ce qui a un effet sur les températures de surface.



Le relief joue également un rôle dans l'écoulement de l'air et la circulation locale des vents est modifiée en partie par la forme et l'orientation de la vallée (Figure 11). Durant les premières heures du jour, le réchauffement plus marqué des versants par rapport au fond de la vallée peut provoquer des mouvements ascendants (brises de pentes ascendantes ou vents *anabatiques*). Ce mouvement s'inverse durant les premières heures de la nuit, alors que les versants se refroidissent plus rapidement (brises de pentes descendantes ou vents *catabatiques*). Si la configuration topographique le permet et si les vents régionaux sont assez faibles, ces mouvements d'air peuvent se généraliser à toute la vallée (brises de vallée durant le jour; brises de montagne durant la nuit). De plus, l'orientation générale de la vallée par rapport aux vents dominants peut aussi donner lieu à des phénomènes météorologiques particuliers, en canalisant les vents régionaux le long de son axe ou en les atténuant. À une échelle spatiale plus réduite, les creux topographiques abrités du vent peuvent faciliter l'accumulation de neige tandis que les buttes ou collines, bien ventilées, produisent l'effet contraire.

2.2.2 Couverture de neige

La neige, par ses propriétés isolantes, joue un rôle de premier plan dans le comportement des températures de la surface du sol, et cet effet est d'autant plus marqué lorsque sa densité est faible (neige fraîche ou non compactée par le vent ou la fonte partielle) et son accumulation précoce dans la saison de gel. En région de pergélisol, elle maintient les températures du sol plus élevées en l'isolant de la pénétration du front de gel hivernal. De plus, l'eau provenant de sa fonte au printemps (et durant une bonne partie de l'été) contrôle partiellement les variations thermiques à la surface du sol à cause de sa chaleur latente. Enfin, cette eau de fonte influence localement l'humidité, l'épaisseur du mollisol et l'ampleur des processus morphologiques de surface (érosion, glissements de terrain, tassement).

2.2.3 Végétation

L'effet de la végétation, pourtant évident et très marqué en régions forestières et dans la toundra forestière, pourrait paraître négligeable en région de toundra arctique, où dominant les herbacées. Or, certains types de végétation des hautes latitudes (arbustes, herbacées, mousses, lichens) participent activement aux bilans hydrique et thermique de surface, ce qui se répercute dans le taux d'humidité de l'air et des sols environnants (Smith et *al.*, 1998). Les

fluctuations climatiques (journalières) dans l'air se propagent plutôt mal à travers une couche de végétation abondante, où elles sont fortement réduites, alors qu'elles peuvent se transmettre plus facilement dans des sols dépourvus de végétation. En fait, la nature et la répartition de la végétation sont étroitement liées aux conditions microclimatiques de surface.

2.2.4 Types de sol

La composition minéralogique d'un sol, sa granulométrie, sa teneur en eau et, dans le cas présent, sa teneur en glace, déterminent ses propriétés physiques : conductivité et diffusivité thermiques, entre autres. Lorsque des variations de température se produisent à la surface, elles peuvent se propager dans le sol à une vitesse et à une intensité qui dépendent de ces propriétés physiques. Le bilan thermique juste sous la surface du sol est influencé par les propriétés physiques et écologiques de la surface du sol (Mueller et *al.*, 1998). Par exemple, puisque la tourbe est un bon isolant, elle peut atténuer fortement les fluctuations thermiques ressenties dans l'air, alors qu'une surface rocheuse, bonne conductrice thermique, a tendance à les enregistrer beaucoup plus fidèlement. Les plus grandes profondeurs de pergélisol sont d'ailleurs atteintes dans les secteurs rocheux.

2.2.5 Proximité d'un plan d'eau

L'inertie thermique des grands plans d'eau fait en sorte que les écarts de température, dans leur voisinage, sont en général moins marqués qu'à l'intérieur des terres. L'influence d'un grand plan d'eau est également perceptible sur la dynamique des vents : durant le jour, les terres se réchauffant plus rapidement que la surface de l'eau, des mouvements ascendants d'air chaud provoquent un rappel d'air vers l'intérieur des terres (brises de mer). Durant la nuit, le sol se refroidit plus vite que l'eau et l'effet inverse se produit (brise de terre). Rappelons toutefois que, comme dans le cas des brises de pente, de vallée ou de montagne, cet effet s'observe par temps clair lorsque les vents dominants sont de faible intensité.

En résumé, tous ces facteurs semblent jouer un rôle sur la dynamique climatique d'un lieu. Or, l'importance et l'interconnexion de ces effets ne sont pas les mêmes selon l'échelle spatiale à laquelle ils se produisent. Afin de les déceler et de les analyser correctement, il convient donc d'utiliser plus d'une échelle d'investigation.

2.3 Échelles de travail

En climatologie comme dans bien d'autres disciplines de terrain, le choix de l'échelle spatiale d'investigation se fait en fonction des besoins de l'étude. À ce titre, les points de mesure (ou sites d'échantillonnage) sont au centre des préoccupations : leur nombre, leur localisation et leur représentativité des différentes facettes du milieu environnant orientent le choix d'une échelle (ou de plusieurs échelles) de travail adéquate. Dans le cas de la présente étude, deux échelles spatiales, s'intégrant l'une dans l'autre, ont été retenues.

2.3.1 Topoclimat

Premièrement, à l'échelle de la vallée de Salluit, le climat local a été étudié en comparant les données provenant du fond de la vallée à celles provenant du sommet des versants, sur les plateaux environnants. L'échelle du *topoclimat* dont la distance caractéristique est de 10 km en zone de plaine et 1 km en zone de montagne (Guyot, 1999) a donc été utilisée pour couvrir un territoire qui s'étend sur environ 3 km² en zone semi-montagneuse.

2.3.2 Microclimat

Deuxièmement, la température de la surface du sol a été analysée plus précisément dans différents environnements topographiques et écologiques se superposant au sein de la vallée. L'échelle du *microclimat*, variant de la centaine de mètres en zone de plaine à la dizaine de mètres en zone de montagnes (Guyot, 1999), a permis de préciser la dynamique des températures près du sol, en fonction de facteurs environnementaux très localisés, à une échelle cartographique *plus fine* (en termes géographiques : à une échelle *plus grande*).

Par conséquent, la prise en considération de ces deux échelles spatiales complémentaires, s'imbriquant l'une dans l'autre, a permis d'étudier les relations entre le climat de surface et le régime thermique du sommet du pergélisol à deux niveaux d'analyse. Le *topoclimat* (ou climat local) de la vallée de Salluit, lui-même contrôlé par les conditions climatiques régionales (de façon plus ou moins marquée selon le type de temps), est ainsi formé d'une mosaïque de *microclimats*.

2.4 Sites d'échantillonnage

Un réseau d'échantillonnage assurant le suivi climatique de la vallée à plusieurs niveaux (dans l'air, à la surface du sol et dans le sol) a été mis en place durant la campagne de terrain de l'été 2002. Ce réseau s'articule au moyen de nombreux instruments dont les sites d'emplacement ont été choisis en fonction de leur représentativité par rapport au milieu environnant, selon les deux échelles de travail déjà mentionnées (*topo-* et *micro-*).

2.4.1 Sites topoclimatiques

Afin d'étudier le topoclimat de la vallée de Salluit et de le situer dans son contexte régional, deux sites principaux d'échantillonnage, en plus d'un site secondaire, ont été retenus (Figure 12). Ces sites ont été choisis en fonction de leur environnement géographique naturel en respectant toutefois certaines contraintes logistiques (accessibilité du site et proximité d'un réseau téléphonique pour la transmission automatique des données). Un premier site a été implanté au fond de la vallée (station *SILA*) à environ 1,5 km du rivage du fjord, sur un secteur recouvert de till. L'altitude moyenne (45 m), le relief relativement plat et dégagé de même que la représentativité du site par rapport à l'ensemble des conditions géographiques de la vallée ont justifié un tel choix. Un deuxième site est localisé au sommet des versants (station *AÉROPORT*), à 225 m d'altitude sur les plateaux rocheux environnants. Ce site particulier, par son exposition aux vents régionaux dominants en plus de la nature et de la topographie du sol sur lequel il repose (plateau rocheux recouvert par endroits de till et de blocs glaciaires), témoigne des conditions climatiques régionales prévalant sur les plateaux entourant la vallée. C'est donc la comparaison des données provenant de ces deux sites de mesures qui a permis d'étudier le climat local de la vallée dans son contexte régional.

Or, l'effet thermique non négligeable d'un grand plan d'eau, à proximité du secteur d'études, restait à évaluer. C'est pourquoi un troisième site de mesure (station *TIKIRAATSIAQ*), localisé à environ 2 km du village sur une pointe rocheuse s'avancant dans le fjord et à un peu moins de 40 m d'altitude, a été choisi. L'influence du fjord (température et vents) sur la dynamique climatique de la vallée, qu'il borde à son extrémité nord, a donc pu être analysée.

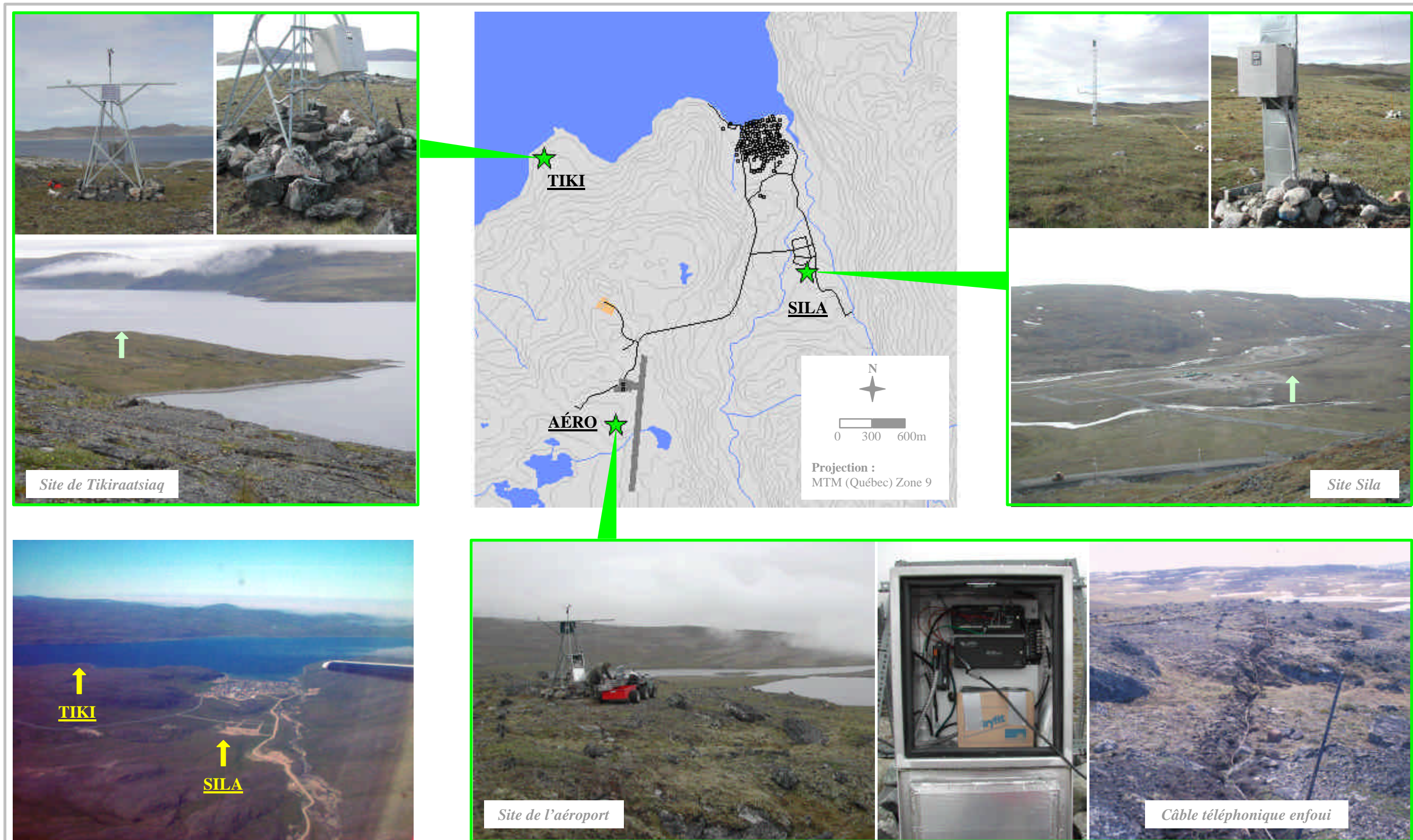


Figure 12 : Sites et instrumentation à l'échelle du topoclimat.

2.4.2 Sites microclimatiques

À l'échelle des microclimats, une vingtaine de sites ont également été choisis suite à l'interprétation de photos aériennes et aux visites de terrain pour étudier le régime thermique à la surface du sol (Figure 13). Les conditions climatiques de surface étant directement influencées, à une telle échelle, par la nature du terrain, ces sites sont localisés dans divers environnements topographiques et écologiques (Tableau II): versants de différentes orientations et inclinaisons, divers types de sols et de végétation, présence ou non d'un couvert de neige (en fonction de l'exposition aux vents dominants), d'un plan d'eau ou d'une infrastructure anthropique. Ces environnements, qui s'imbriquent les uns aux autres, témoignent de l'ensemble des conditions de terrain rencontrées dans la vallée.

Tableau II: Caractéristiques des sites microclimatiques.

| Site | Topographie | Végétation | Type de sol | Particularité |
|-------|-------------------|---------------------|--------------------|--|
| 1 | Légère pente W | Mousse, lichen | Sable, gravier | Sol fissuré |
| 2 | Plat | Mousse (touffes) | Argile | Terrain sec; venteux |
| 3 | Creux, pente NE | Herbacées, arbustes | Argile | Combe à neige |
| 4-5-6 | Légère pente SW | Herbacées (touffes) | Argile | Glissement de terrain récent #4 : bordure (25 cm prof.) #5 : bordure (5 cm prof.) #6 : dans le glissement |
| 7 | Plat | Herbacées | Argile | Terrain humide; venteux |
| 9 | Plat | Herbacées (touffes) | Sable, gravier | Haut de plage; venteux |
| 10 | Plat | Herbacées (touffes) | Gravier, blocs | Dans le village |
| 11 | Plat | - | Gravier (remblais) | Sous une école |
| 12 | Plat | Mousse, lichen | Colluvions | Secteur de déneigement |
| 13 | Plat | Herbacées | Tourbe, argile | Terrain marécageux |
| 14 | Versant, pente NE | Mousse, herbacées | Till | Mi-versant (alt. 40 m) |
| 15 | Versant, pente N | - | Roc (gneiss) | Sommet d'une colline rocheuse |
| 17 | Creux, pente N | Mousse, herbacées | Till | Combe à neige |
| 18 | Plat | Prêles (pousses) | Sable, gravier | Près d'une route; sol perturbé |
| 20 | Plat | - | Alluvions | Fond d'un lit de rivière |
| 21 | Plat | - | Gravier (remblais) | Sous une maison |



2.5 Instruments de mesure

De la même façon que pour l'emplacement des sites d'échantillonnage, le choix et l'installation des instruments de mesure ont été décidés en fonction des échelles de travail. Deux types d'appareils, installés à l'été 2002 et revisités durant les autres campagnes de terrain, ont donc servi à deux objectifs distincts : 1) le suivi topoclimatique de la vallée (températures et vents) dans son contexte régional; 2) le bilan thermique des différentes surfaces microclimatiques. Sauf exceptions, ces appareils fonctionnent toujours à l'heure actuelle et le suivi climatique pourra se poursuivre durant les prochaines années.

2.5.1 Stations climatiques

À l'échelle du topoclimat, trois stations climatiques automatisées et alimentées chacune par une pile et un panneau solaire (Figure 12) ont été installées dans les trois sites de mesures topoclimatiques (*SILA*, *AÉROPORT* et *TIKIRAATSIAQ*). Ces stations mesurent, sur une base horaire, la vitesse et la direction dominante des vents ainsi que la température de l'air à environ 3 m du sol.

À chacun des deux sites topoclimatiques principaux (*SILA* et *AÉROPORT*), les stations sont reliées à un réseau de télémétrie par un câble téléphonique enfoui sous la surface du sol. De plus, des câbles à thermistances, également reliés au réseau télémétrique et mesurant la température du sol à plusieurs profondeurs (sur des bases horaire et journalière) sont installés dans les environs immédiats (quelques mètres) de ces stations. Il est donc possible, à tout moment, d'acquérir les données à partir du laboratoire de télémétrie du CEN.

Pour des raisons logistiques, la troisième station climatique (*TIKIRAATSIAQ*), bien qu'elle mesure de façon automatisée les mêmes paramètres, n'est pas reliée au réseau téléphonique. L'acquisition des données provenant de cette station a été effectuée manuellement durant les visites de terrain. Cependant, aucun câble à thermistances n'y a été installé.

2.5.2 Capteurs thermiques

À l'échelle microclimatique, 21 capteurs thermiques ou *micro-dataloggers* (*Optic StowAway Temp* de marque Onset) ont été installés à l'été 2002 (Figure 13). Ces appareils miniatures

(environ 10 cm de longueur par 2 cm de diamètre; poids de 35g) peuvent mesurer des températures comprises entre -40 et +75 °C. Ils ont été programmés à l'aide d'un connecteur relié à un ordinateur pour prendre des mesures horaires. Leur précision, qui varie légèrement en fonction de la température ambiante, est comprise entre 0,2 et 0,5 °C. Sauf exception, tous les capteurs ont été enfouis immédiatement sous la surface du sol, à 5 cm de profondeur. Leur positionnement a été systématiquement relevé à l'aide d'un GPS et pour les repérer facilement l'année suivante, un ruban (*flagging tape*) a été accroché à l'une de leurs extrémités. De ce nombre, 20 ont été installés directement dans la vallée, le capteur restant ayant été enfoui aux pieds de la station *TIKIRAATSIAQ*.

Sur les 20 capteurs installés dans la vallée, 18 ont pu être récupérés durant la campagne de terrain de l'été 2003 (Tableau III). Celui du site #8 avait disparu, probablement ramassé à l'automne 2002 par un cueilleur de fruits; celui du site #16 s'est avéré défectueux et n'a fourni aucune donnée. Les 18 appareils ont été remis dans le sol après les lectures et 15 d'entre eux ont été à nouveau récupérés à l'automne 2004 lors de la visite annuelle d'entretien du réseau de télémétrie du CEN. Parmi les appareils manquants, deux d'entre eux ont cessé de fonctionner (aux sites #15 et #20) et un seul n'a pas été retrouvé (au site #4). Ainsi, 15 capteurs ont fourni des données s'étendant sur deux cycles complets de gel-dégel, soit de juillet 2002 à octobre 2004. Pour les 3 autres sites (#4, #15 et #20), la période de mesure s'étend sur un an seulement, soit de juillet 2002 à juillet 2003.

Tableau III: Durée (nombre de mois) de récolte de données par les capteurs thermiques.

| Site | 2002 | | | | | 2003 | | | | | 2004 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|------|------|---|---|---|---|------|---|---|---|---|------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | J | A | S | O | N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O |
| 1 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 2 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 3 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 4 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 5 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 6 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 7 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 8 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 9 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 10 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 11 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 12 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 13 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 14 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 15 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 16 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 17 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 18 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 19 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 20 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 21 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

2.5.3 Mesures de neige

En mars 2003, au moment de l'année où l'accumulation de neige était maximale, l'épaisseur et la densité du couvert nival ont été systématiquement relevées à tous les sites de mesures microclimatiques en plus de quelques autres sites dans le village, à l'aide d'une sonde à neige de 2,15 m de longueur (Figure 14). Cette sonde, précise au centimètre près, a permis de prélever des carottes de neige et de les peser afin de déterminer leur densité. À chaque site, 2 ou 3 mesures de neige (parfois plus, lorsque la variabilité était grande) ont été effectuées afin d'obtenir des résultats représentatifs. Il faut toutefois mentionner que ces mesures sont ponctuelles dans l'espace et dans le temps, et que la répartition de la couverture de neige, à l'échelle de la vallée, varie grandement selon la topographie de surface. Par conséquent, il n'a pas été possible d'obtenir une carte précise et continue de la répartition de la neige.



Extraction de carottes de neige

Sila



Salluit-2



Vue vers le sud-ouest

Figure 14 : Mesures de neige.

2.6 Traitement et interprétation des données

Pour les deux types d'instruments relevant des deux échelles d'analyse, les données ont été récupérées (soit automatiquement par câble téléphonique, soit manuellement à l'aide d'un ordinateur portable) sous forme de fichiers convertibles en chiffriers informatiques (*.xls). Ces données ayant été enregistrées sur une base horaire, chaque cycle annuel complet représente près de 9000 données pour chacun des paramètres mesurés (température de l'air, température du sol, vitesse des vents, direction des vents). Toutes les séries de données ont d'abord été traitées à l'aide du logiciel *Excel* afin de les mettre en ordre chronologique, sur des bases horaire, quotidienne, mensuelle et annuelle. L'analyse finale (calculs statistiques, graphiques et histogrammes) a également été effectuée dans *Excel*², sauf les roses des vents qui ont été produites à l'aide du logiciel *GEOrient*.

Les calculs statistiques concernant les températures (dans l'air et à la surface du sol) et les directions dominantes des vents ont été effectués selon les règles admises en climatologie par l'*Organisation Météorologique Mondiale* (OMM) et le *Service météorologique du Canada* (SMC).

2.6.1 Températures

Chaque valeur quotidienne (moyenne, minimum et maximum) a été calculée à partir des 24 données horaires représentant la journée (Tableau IV). Parmi ces valeurs, les températures moyennes quotidiennes ont servi à déterminer les *degrés-jours* (ou *indices*) de gel (<0 °C) ou de dégel (>0 °C). En effet, les degrés-jours représentent la différence entre la température moyenne d'un jour déterminé et une température de référence, en l'occurrence 0 °C (Tableau V).

Par extension, les nombres de jours de gel ou de dégel (jours pour lesquels la température moyenne était, respectivement, en-dessous ou au-dessus de 0 °C) ont été extraits pour chaque site, dans l'air comme dans le sol.

² C'est ce qui explique l'utilisation du *point* (Anglais) plutôt que la *virgule* (Français) pour séparer les décimales des unités. Tous les tableaux et les graphiques contenant des décimales séparées des unités par des *points* ont été effectués dans le logiciel Excel.

Tableau IV: Exemple de calcul : température moyenne quotidienne.

| F2 | | | | | | =MOYENNE(B2:B25) |
|----|------------------|------------------|-------|-------|-------|------------------|
| | A | B | C | D | E | F |
| 1 | Date Heure | Température (°C) | T_max | T_min | T_moy | |
| 2 | 2002-07-14 00:43 | 6.6 | | 7.7 | 4.7 | 6.0 |
| 3 | 2002-07-14 01:43 | 6.2 | | | | |
| 4 | 2002-07-14 02:43 | 5.8 | | | | |
| 5 | 2002-07-14 03:43 | 5.8 | | | | |
| 6 | 2002-07-14 04:43 | 5.4 | | | | |
| 7 | 2002-07-14 05:43 | 5.1 | | | | |
| 8 | 2002-07-14 06:43 | 5.1 | | | | |
| 9 | 2002-07-14 07:43 | 4.7 | | | | |
| 10 | 2002-07-14 08:43 | 4.7 | | | | |
| 11 | 2002-07-14 09:43 | 4.7 | | | | |
| 12 | 2002-07-14 10:43 | 4.7 | | | | |
| 13 | 2002-07-14 11:43 | 4.7 | | | | |
| 14 | 2002-07-14 12:43 | 4.7 | | | | |
| 15 | 2002-07-14 13:43 | 5.1 | | | | |
| 16 | 2002-07-14 14:43 | 5.8 | | | | |
| 17 | 2002-07-14 15:43 | 6.2 | | | | |
| 18 | 2002-07-14 16:43 | 6.9 | | | | |
| 19 | 2002-07-14 17:43 | 7.3 | | | | |
| 20 | 2002-07-14 18:43 | 7.7 | | | | |
| 21 | 2002-07-14 19:43 | 7.7 | | | | |
| 22 | 2002-07-14 20:43 | 7.7 | | | | |
| 23 | 2002-07-14 21:43 | 7.7 | | | | |
| 24 | 2002-07-14 22:43 | 7.3 | | | | |
| 25 | 2002-07-14 23:43 | 6.9 | | | | |
| 26 | 2002-07-15 00:43 | 6.6 | | 9.5 | 3.9 | 6.5 |
| 27 | 2002-07-15 01:43 | 6.2 | | | | |

Tableau V: Exemple de calcul : degrés-jours de dégel.

| C2 | | | | | | =SI(B2>0;B2;0) |
|----|------------|-------|---------------|----------|---------------|----------------|
| | A | B | C | D | E | F |
| 1 | Date | T_moy | degré-jour >0 | cumul >0 | degré-jour <0 | cumul <0 |
| 2 | 2002-07-14 | 6.0 | 6.0 | 6.0 | 0.0 | 0.0 |
| 3 | 2002-07-15 | 6.5 | 6.5 | 12.5 | 0.0 | 0.0 |
| 4 | 2002-07-16 | 6.5 | 6.5 | 19.0 | 0.0 | 0.0 |
| 5 | 2002-07-17 | 6.0 | 6.0 | 24.9 | 0.0 | 0.0 |
| 6 | 2002-07-18 | 5.8 | 5.8 | 30.7 | 0.0 | 0.0 |
| 7 | 2002-07-19 | 5.0 | 5.0 | 35.7 | 0.0 | 0.0 |
| 8 | 2002-07-20 | 5.1 | 5.1 | 40.8 | 0.0 | 0.0 |
| 9 | 2002-07-21 | 5.1 | 5.1 | 45.9 | 0.0 | 0.0 |
| 10 | 2002-07-22 | 4.4 | 4.4 | 50.2 | 0.0 | 0.0 |
| 11 | 2002-07-23 | 5.2 | 5.2 | 55.5 | 0.0 | 0.0 |
| 12 | 2002-07-24 | 6.3 | 6.3 | 61.7 | 0.0 | 0.0 |

Enfin, en calculant le rapport entre la somme des degrés-jours accumulés à la surface du sol et ceux accumulés dans l'air (mensuellement ou annuellement), on obtient les *facteurs-n* :

$$\text{Facteur-n}_{(\text{gel;dégel})} = \text{DJ}_{(\text{gel;dégel})} \text{ sol} / \text{DJ}_{(\text{gel;dégel})} \text{ air}$$

Les facteurs-n donnent une appréciation de la facilité avec laquelle la chaleur ou le froid pénètrent dans les premiers centimètres du sol. Ainsi, un facteur-n près de 1 indique un transfert thermique non atténué ou amplifié, et inversement pour une valeur tendant vers 0.

Les valeurs mensuelles de température (moyenne, minimum et maximum) ont ensuite été calculées à partir des données quotidiennes correspondantes. Les moyennes mensuelles représentent la moyenne arithmétique des moyennes quotidiennes. Par extension, les minima et maxima mensuels représentent, respectivement, la moyenne des minima et des maxima quotidiens. Il importe de les différencier des extrêmes mensuels (minima ou maxima *absolus*), qui sont plutôt les plus faibles ou plus fortes valeurs atteintes au cours du mois. Conséquemment, les amplitudes mensuelles *moyennes* (différence entre les maxima et minima *moyens*) diffèrent des amplitudes mensuelles *absolues* (différence entre les extrêmes). La comparaison entre ces deux types de valeurs permet de caractériser la variabilité de chaque mois (Tableau VI).

Tableau VI: Exemple de calcul : amplitude mensuelle moyenne.

| | A | B | C | D | E | F | G | H |
|----|-------|------|------------|------------|------------------|---------|---------|---------|
| 1 | Année | Mois | T_max | T_min | Amplitude | Max_abs | Min_abs | Amp_abs |
| 2 | 2002 | 8 | 9.4 | 6.5 | 2.8 | 12.0 | 3.9 | 2.8 |
| 3 | 2002 | 9 | 4.4 | 2.9 | 1.5 | 8.4 | 0.8 | 1.5 |
| 4 | 2002 | 10 | 0.6 | 0.2 | 0.5 | 2.7 | 0.0 | 0.5 |
| 5 | 2002 | 11 | -3.1 | -4.3 | 1.2 | 0.0 | -11.5 | 1.2 |
| 6 | 2002 | 12 | -11.3 | -13.5 | 2.1 | -6.1 | -19.2 | 2.1 |
| 7 | 2003 | 1 | -13.3 | -14.8 | 1.5 | -8.0 | -20.6 | 1.5 |
| 8 | 2003 | 2 | -25.2 | -27.3 | 2.1 | -19.9 | -34.0 | 2.1 |
| 9 | 2003 | 3 | -21.6 | -23.3 | 1.7 | -17.2 | -32.8 | 1.7 |
| 10 | 2003 | 4 | -12.5 | -13.7 | 1.1 | -6.1 | -19.2 | 1.1 |
| 11 | 2003 | 5 | -1.2 | -2.7 | 1.5 | 2.7 | -9.5 | 1.5 |
| 12 | 2003 | 6 | 5.1 | 2.3 | 2.8 | 9.5 | 0.0 | 2.8 |
| 13 | 2003 | 7 | 10.3 | 6.4 | 3.9 | 14.5 | 3.5 | 3.9 |
| 14 | 2003 | 8 | 9.2 | 6.1 | 3.2 | 14.8 | 2.4 | 3.2 |

Le même raisonnement est valide sur une base annuelle. Les valeurs moyennes, minimales et maximales de même que les extrêmes annuels et les amplitudes correspondantes ont été calculées. Dans la majorité des cas, la période de calcul de ces valeurs annuelles s'étend du début octobre d'une année jusqu'à la fin septembre de l'autre année, de façon à couvrir un cycle complet et continu de gel-dégel. Seulement trois des sites microclimatiques (#4, #15 et #20) ont fourni des données sur une période annuelle incomplète (355 jours, de juillet 2002 à juillet 2003).

2.6.2 Vents

En ce qui concerne la vitesse et la direction des vents dominants, une analyse supplémentaire a été effectuée avec le logiciel *Georient* de façon à produire les roses des vents (annuels et mensuels) pour chacune des trois stations topoclimatiques. Parallèlement, des graphiques et des histogrammes de vitesse ont été produits dans *Excel*. Dans tous les cas, les données horaires ont été traitées directement « en blocs », sans passer par des calculs intermédiaires (ex : moyennes quotidiennes ou mensuelles).

Le choix des 5 classes de vitesses (0-25, 25-50, 50-75, 75-100, >100 km/h) a été inspiré par les classes généralement retenues dans le domaine de l'énergie éolienne, bien qu'il ne semble pas y exister de standard incontournable. Pour ce qui est des directions dominantes, l'OMM recommande généralement 16 points de compas (N, NNE, NE, ENE, etc.), ce qui a été retenu dans le présent travail.

Toutes les données, brutes et transformées, sont disponibles pour consultation au laboratoire de climatologie de l'Université Laval.

3

CHAPITRE 3 : CONDITIONS TOPOCLIMATIQUES ET MICROCLIMATIQUES DE LA VALLÉE DE SALLUIT

Sommaire

Ce chapitre présente les résultats de l'étude selon deux échelles spatiales interconnectées. D'abord, les résultats topoclimatiques décrivent le climat local de la vallée de Salluit dans son contexte régional. Les températures et les vents dominants (vitesse et direction) sont analysés en détail et certains phénomènes topoclimatiques sont décrits en fonction des types de temps. Deuxièmement, le comportement thermique de nombreuses surfaces microclimatiques est étudié, de même que les facteurs géographiques qui en contrôlent la variabilité.

3.1 Topoclimat de la vallée

Cette section aborde les phénomènes topoclimatiques observables dans la vallée et dans son environnement immédiat. Tout au long de la section, une double comparaison est constamment faite : d'une part, entre les trois sites topoclimatiques (SILA, au fond de la vallée; AÉROPORT, au sommet des versants; TIKIRAATSIAQ, sur le bord du fjord); et d'autre part, entre les deux « années climatiques » de mesure (octobre 2002-septembre 2003; octobre 2003-septembre 2004). Il est à noter que la deuxième année compte 1 jour de plus que la précédente (29 jours en février 2004).

3.1.1 Températures

Les statistiques annuelles des températures figurent au Tableau VII. Premièrement, les températures moyennes annuelles de 2003-04, par rapport à celles de 2002-03, n'ont subi qu'un léger réchauffement aux sites SILA et AÉROPORT (moins d'un vingtième de degré) alors que ce réchauffement a été plus élevé au site TIKIRAATSIAQ (plus d'un dixième de degré). Cependant, ces moyennes sont somme toute demeurées aux alentours de $-6,7\text{ °C}$ au fond de la vallée, $-8,0\text{ °C}$ au sommet des versants et $-7,0\text{ °C}$ sur le bord du fjord. Par extension, les moyennes minimales et maximales, de même que les amplitudes annuelles moyennes, aux trois stations, n'ont que légèrement augmenté en 2003-04. Par contre, les amplitudes absolues ont nettement diminué (près d'une douzaine de degrés), ce qui s'est traduit à la fois par une diminution des maxima absolus (environ 6 °C) et une augmentation à peu près équivalente des minima absolus (de 5 à 7 °C).

Les indices de gel et de dégel ont également diminué de façon notable en 2003-04. C'est aux sites SILA et TIKIRAATSIAQ que cette tendance s'est davantage affirmée. Pour ces sites, la saison de dégel y a été plus courte d'une vingtaine de jours, alors que les degrés-jours de dégel ont nettement diminué. Par contre, durant la saison de gel, qui a été prolongée d'une vingtaine de jours, l'indice de gel y a quand même été beaucoup plus bas. Une tendance similaire, quoique moins marquée, a été observée à la station AÉROPORT. Enfin, le rapport entre l'indice de gel et l'indice de dégel (« ratio G/D ») a été, pour les 3 stations, plus élevé en 2003-04 qu'en 2002-03. Cette augmentation a surtout affecté les sites AÉROPORT et TIKIRAATSIAQ (+20%).

Tableau VII: Statistiques annuelles des températures, sites topoclimatiques.

| | SILA | | | AÉRO | | | TIKI | | |
|-----------|--------|--------|---------------|--------|--------|---------------|--------|--------|---------------|
| | 02-'03 | 03-'04 | Var_inter | 02-'03 | 03-'04 | Var_inter | 02-'03 | 03-'04 | Var_inter |
| T_moy | -6.8 | -6.7 | +0.1 | -8.0 | -7.9 | +0.1 | -7.1 | -6.9 | +0.2 |
| T_max | -4.0 | -3.8 | +0.2 | -5.5 | -5.4 | +0.1 | -4.4 | -4.2 | +0.2 |
| Max_abs | 28.1 | 21.8 | -6.3 | 26.5 | 20.4 | -6.1 | 26.0 | 20.2 | -5.8 |
| T_min | -9.7 | -9.7 | 0 | -10.6 | -10.5 | +0.1 | -9.8 | -9.6 | +0.2 |
| Min_abs | -39.2 | -34.0 | +5.2 | -40.9 | -33.8 | +7.2 | -39.9 | -34.4 | +5.5 |
| Amp | 5.7 | 5.9 | +0.2 | 5.1 | 5.2 | +0.1 | 5.3 | 5.4 | +0.1 |
| Amp_abs | 67.4 | 55.7 | -11.7 | 67.4 | 54.2 | -13.2 | 65.9 | 54.5 | -11.4 |
| DJ >0°C | 911.3 | 736.2 | -175.1 | 743.0 | 592.8 | -150.2 | 838.5 | 673.4 | -165.1 |
| #J >0°C | 152 | 133 | -19 | 125 | 114 | -11 | 151 | 131 | -20 |
| DJ <0°C | 3331.9 | 3180.8 | -151.1 | 3607.1 | 3487.0 | -120.1 | 3366.9 | 3199.4 | -167.5 |
| #J <0°C | 213 | 233 | +20 | 240 | 252 | +12 | 214 | 235 | +21 |
| Ratio G/D | 3.7 | 4.3 | +0.6 | 4.9 | 5.9 | +1.0 | 4.0 | 4.8 | +0.8 |

Afin d'éclairer et de préciser ces résultats annuels, il convient d'observer attentivement le comportement des températures moyennes quotidiennes pour la même période de mesure (Figure 15). Les courbes des trois stations montrent que dans l'ensemble, les contrastes thermiques ont été moins marqués en 2003-04 qu'en 2002-03. En effet, à l'été 2003, les moyennes quotidiennes ont fréquemment dépassé les 10 °C, quelques fois les 15 °C et même, en de rares occasions, les 20 °C (sauf au site TIKIRAATSIAQ). Durant l'été suivant, par contre, elles n'ont dépassé 10 °C que quelques fois, n'atteignant jamais 15 °C (sauf au site AÉROPORT, durant une journée seulement). Les températures hivernales ont montré une atténuation semblable : à l'hiver 2003-04, les températures n'ont que rarement descendu sous la barre des -30 °C, alors que ce fut fréquemment le cas à l'hiver 2002-03, quelques épisodes plus froids frôlant même les -40 °C. En somme, durant la deuxième année de mesure, l'hiver a été plus doux mais plus long tandis que l'été a été plus frais mais plus court. Cette tendance concorde avec l'importante diminution des amplitudes thermiques absolues ainsi qu'avec les résultats des indices et saisons de gel et de dégel précédemment cités.

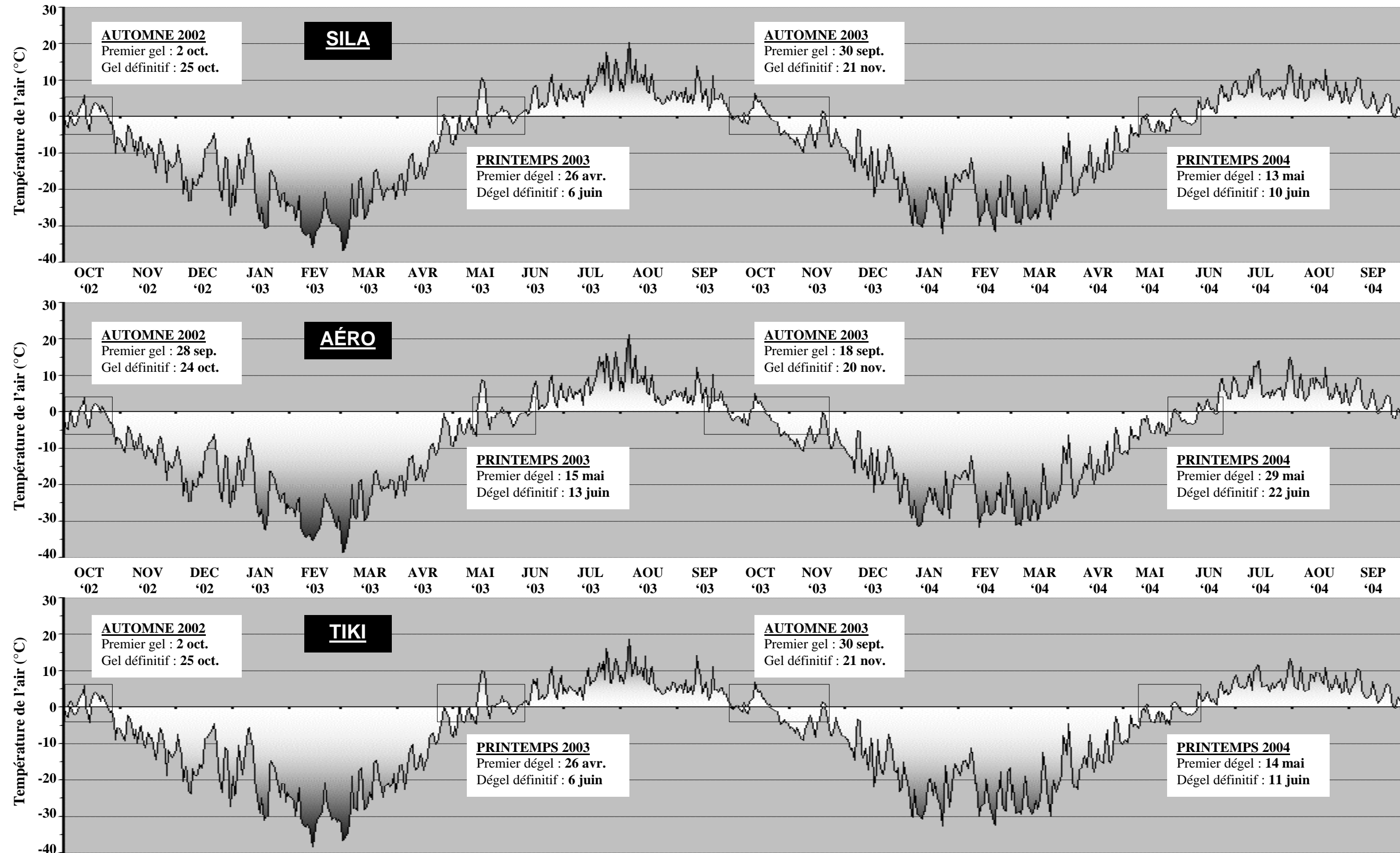


Figure 15 : Températures moyennes quotidiennes, sites topo-climatiques.

Les variations thermiques quotidiennes ont été plus fréquentes durant l'été (juillet à septembre) que durant l'hiver. Cela pourrait témoigner de conditions synoptiques (régionales) plus changeantes durant l'été. Ces épisodes de variabilité élevée ont été précédés, en mai et juin, de deux périodes chaudes ($>0\text{ }^{\circ}\text{C}$) suivies de périodes de gel ($<0\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Les intervalles d'oscillation des températures autour du point de congélation (Figure 15, encadrés) fournissent des renseignements supplémentaires. Premièrement, les dates des premiers dégels printaniers ont été décalées (plus tard) de plus de deux semaines au printemps 2004 par rapport au printemps 2003. À ce propos, le site AÉROPORT a lui-même montré un retard de plus de deux semaines par rapport aux deux autres sites et ce, pour chacune des deux années de mesure. De plus, pour les sites SILA et TIKIRAATSIAQ, l'intervalle entre la date du premier dégel et celle du dégel définitif a été nettement plus court en 2004 qu'en 2003 : 28 jours contre 41 jours, respectivement. Le site AÉROPORT n'a pas connu de tel raccourcissement (24 jours en 2004 contre 29 jours en 2003).

La date du premier gel automnal n'a changé significativement qu'au site AÉROPORT, où il s'est produit 10 jours plus tôt à la deuxième année (18 septembre en 2003, contre 28 septembre en 2002). Par contre, tous les sites ont enregistré le « redoux » de la fin de la troisième semaine de novembre 2003, ce qui a considérablement augmenté l'intervalle entre la date du premier gel et celle du gel définitif : de 23 à 52 jours pour SILA et TIKIRAATSIAQ, elle est passée de 26 à 63 jours à l'AÉROPORT.

L'analyse statistique selon la fréquence relative de plusieurs classes de température jette un éclairage nouveau sur le comportement annuel (et inter-annuel) des données (Figure 16). Ces histogrammes montrent d'abord, pour les deux années de mesure, une distribution « bimodale », soit un regroupement des données autour de deux classes dominantes : entre -15 et $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ et entre 0 et $5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Il existe donc deux populations distinctes et inégales qui mettent en évidence l'existence des deux saisons principales, soit la saison de gel et la saison de dégel. Ces histogrammes de fréquence montrent également la similitude de répartition (forme des « cloches ») entre les sites SILA et TIKIRAATSIAQ. L'écart entre les deux classes dominantes y est plus marqué (surtout en 2002-03) qu'au site AÉROPORT. Les températures situées entre 0 et 5°C ont même représenté plus de 20% (2002-03) à ces deux sites.

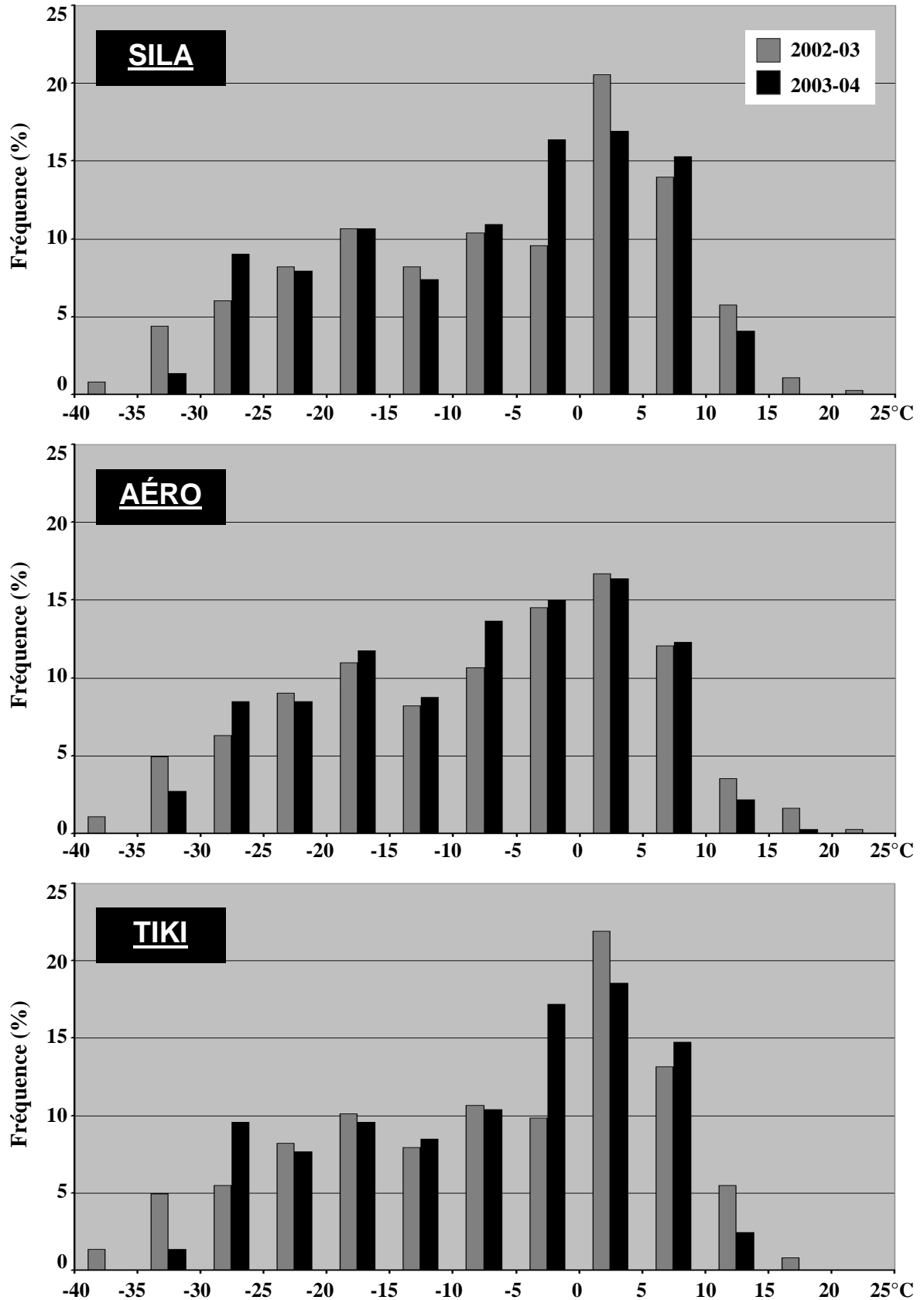


Figure 16 : Histogrammes de fréquences de température de l'air, sites topo-climatiques.

Par ailleurs, la diminution des amplitudes thermiques de l'année 2003-04 par rapport à l'année 2002-03 (Tableau VII) est observable dans la répartition des fréquences pour les trois sites. En effet, les classes extrêmes (inférieures à -30 °C et supérieures à 10 °C) ont été nettement plus rares durant la deuxième année, lorsqu'elles n'ont pas carrément disparu. En somme, l'année 2002-03 a couvert 13 classes de températures (12 pour TIKIRAATSIAQ), soit plus d'une soixantaine de degrés, alors que l'année 2003-04 s'est plutôt étendue sur 10 classes (11 pour l'AÉROPORT), soit une cinquantaine de degrés.

Enfin, les variations inter-annuelles ont été généralement plus marquées aux sites SILA et TIKIRAATSIAQ, surtout pour les classes situées de part et d'autre de 0 °C . En 2003-04, la classe comprise entre -5 et 0 °C a même augmenté de plus de 50% alors que celle de 0 à 5 °C a sensiblement diminué. Au site AÉROPORT, ces variations ont été nettement moins marquées : la forme de la « double cloche » y est définie plus précisément.

L'analyse des données mensuelles précise davantage les tendances annuelles. Les températures moyennes mensuelles (Tableau VIII) montrent des comportements variables. À tous les sites, l'adoucissement de l'hiver 2003-04 par rapport à l'hiver 2002-03 se reflète dans les moyennes plus élevées de novembre, de décembre, mais surtout de février (augmentation de plus de 7 °C). Il est d'ailleurs pertinent de noter qu'en 2002-03, février a été le mois le plus froid alors qu'il n'a figuré qu'en troisième place en 2003-04, derrière janvier et mars. Le mois de janvier a été quant à lui notablement plus froid durant la deuxième année (environ 4 °C de moins). Quant aux températures des mois de printemps et d'été, elles ont toutes été plus fraîches en 2004 qu'en 2003, surtout aux mois d'avril et mai (environ 2 à 3 °C , respectivement). Les autres mois présentent des variations moins marquées, de l'ordre d'un degré et moins.

Toutefois, ces variations inter-annuelles ne se sont pas fait sentir avec la même ampleur aux trois sites : la station TIKIRAATSIAQ a été la plus « sensible » pour 7 des 12 mois de l'année, surtout pour les mois d'hiver (décembre à mars), alors que la station AÉROPORT a enregistré des refroidissements estivaux (juillet et août) plus marqués qu'aux deux autres stations.

Tableau VIII: Températures moyennes mensuelles (°C), sites topoclimatiques.

| T_moy | SILA | | | AÉRO | | | TIKI | | |
|-------|--------|--------|-------------|--------|--------|-------------|--------|--------|-------------|
| | 02-'03 | 03-'04 | Var_inter | 02-'03 | 03-'04 | Var_inter | 02-'03 | 03-'04 | Var_inter |
| OCT | -0.3 | -0.2 | +0.1 | -1.7 | -1.7 | 0 | -0.1 | 0.1 | +0.2 |
| NOV | -9.3 | -5.5 | +3.8 | -10.4 | -7.0 | +3.4 | -8.9 | -5.2 | +3.7 |
| DEC | -15.1 | -12.9 | +2.2 | -16.5 | -14.2 | +2.3 | -15.0 | -12.8 | +2.2 |
| JAN | -19.5 | -23.6 | -4.1 | -20.5 | -24.2 | -3.7 | -19.5 | -23.9 | -4.4 |
| FEV | -28.9 | -21.7 | +7.2 | -29.6 | -22.4 | +7.2 | -29.7 | -22.0 | +7.7 |
| MAR | -23.6 | -22.7 | +0.9 | -24.7 | -23.9 | +0.8 | -24.3 | -23.0 | +1.3 |
| AVR | -11.2 | -13.1 | -1.9 | -12.7 | -14.7 | -2.0 | -11.4 | -13.2 | -1.8 |
| MAI | 0.1 | -3.1 | -3.2 | -1.7 | -4.9 | -3.2 | -0.1 | -3.3 | -3.2 |
| JUN | 3.5 | 2.5 | -1.0 | 2.1 | 1.4 | -0.7 | 3.2 | 1.8 | -1.4 |
| JUL | 8.9 | 8.1 | -0.8 | 8.2 | 7.2 | -1.0 | 7.7 | 7.2 | -0.5 |
| AOU | 8.6 | 7.6 | -1.0 | 7.7 | 6.4 | -1.3 | 8.1 | 7.0 | -1.1 |
| SEP | 5.5 | 3.9 | -1.6 | 4.0 | 2.5 | -1.5 | 5.2 | 3.9 | -1.3 |

Des précisions supplémentaires peuvent être tirées du comportement des extrêmes mensuels par rapport aux moyennes (Figure 17). On y remarque que les réchauffements mensuels importants de l'hiver 2003-04 (novembre, décembre mais surtout février) se sont traduits par une augmentation à la fois des maxima et des minima absolus. À ce titre, les minima absolus, au deuxième hiver, n'ont pas descendu plus bas que -35 °C, alors qu'ils avaient atteint -40 °C l'année précédente. Par contre, les refroidissements estivaux (avril mais surtout mai et août) de la deuxième année de mesure n'ont semblé être associés qu'à la diminution des maxima absolus. Il est d'ailleurs à noter que les maxima du mois d'août ont à peine dépassé 20 °C à l'été 2003 alors qu'ils avaient largement dépassé la barre des 25 °C à l'été 2002.

Cette tendance est valable pour les indices mensuels de gel et de dégel (Figure 18). Le réchauffement des extrêmes de l'hiver 2003-04 (sauf pour le mois de janvier) s'est traduit par une diminution des degrés-jours de gel, surtout en février. En ce qui concerne les mois d'été, la diminution des maxima absolus s'est répercutée dans la diminution des indices de dégel et, pour les mois de mai et juin, l'augmentation correspondante des indices de gel.

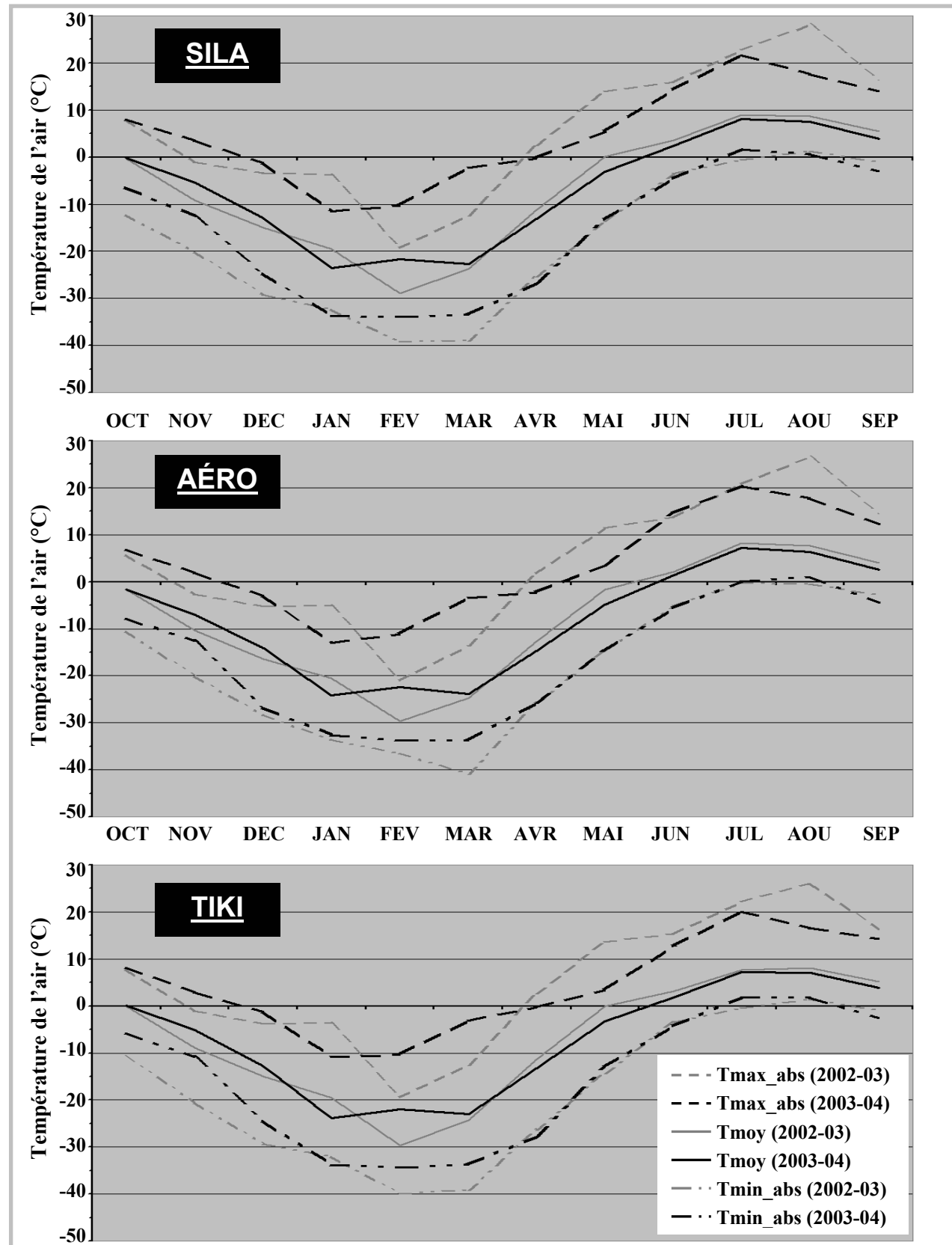


Figure 17 : Températures moyennes et extrêmes mensuels de l'air, sites topoclimatiques.

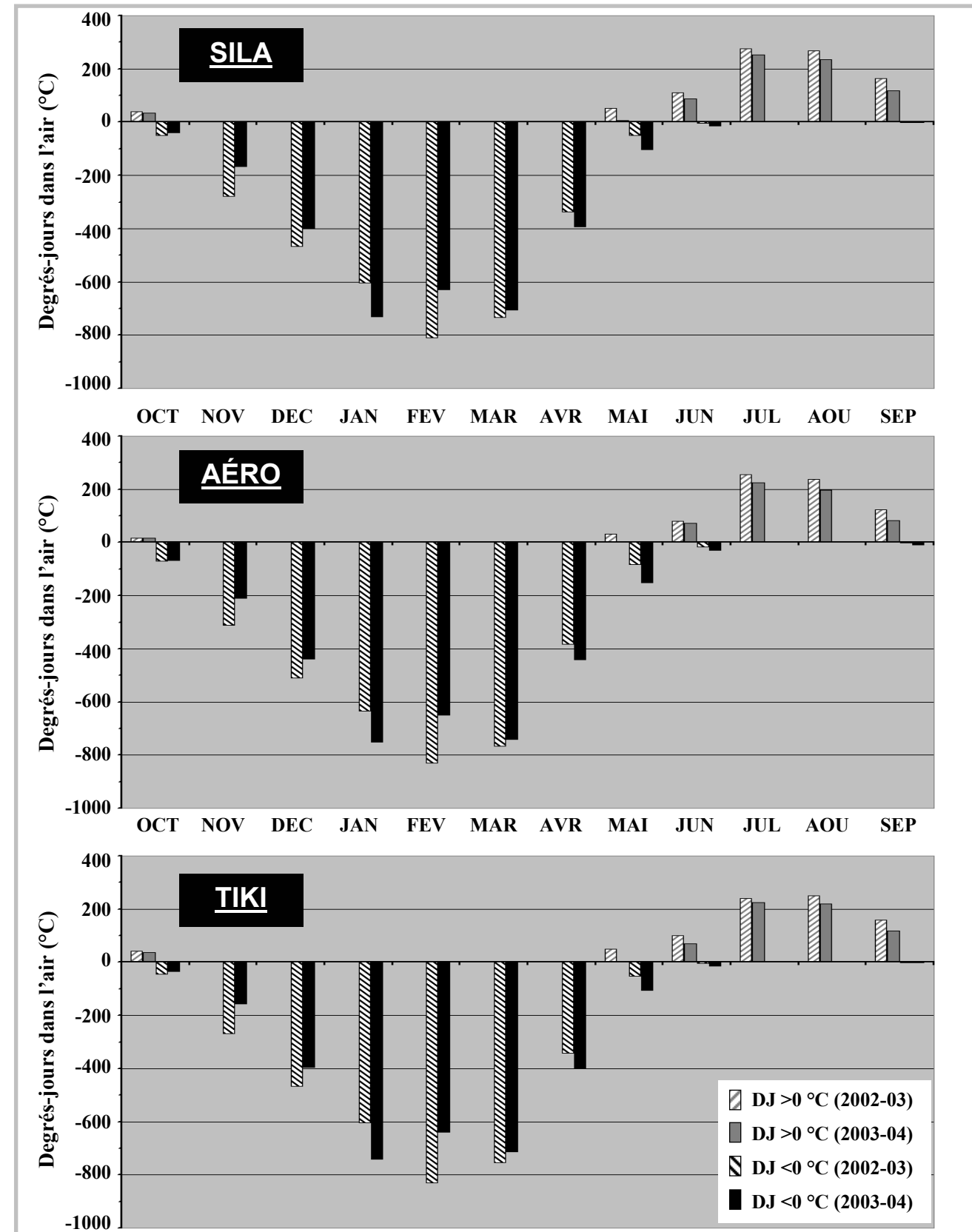


Figure 18 : Indices (degrés-jours) de gel/dégel accumulés dans l'air, sites topoclimatiques.

La variabilité thermique semble donc avoir diminué dans l'ensemble durant la deuxième année de mesure. Cependant, cette tendance montre de fortes variations mensuelles en ce qui concerne les écarts-types et les amplitudes absolues.

En 2003-04, les écarts-types mensuels (Figure 19) aux trois sites ont montré une forte diminution (de un à deux degrés) aux mois de décembre, janvier, mai et août, ainsi qu'une forte augmentation (plus de deux degrés) au mois de février. Le site AÉROPORT s'est d'ailleurs distingué puisque ses écarts-types de juin et septembre ont augmenté, contrairement aux deux autres sites. De plus, le nombre de fois où les valeurs ont approché ou dépassé 6 °C a été nettement réduit, alors que ces mêmes valeurs ont quelques fois avoisiné ou tombé sous la barre des 3 °C, ce qui ne s'était pas produit l'année précédente. Ainsi, pour les sites SILA et TIKIRAATSIAQ, jusqu'à la moitié des mois de l'année ont montré des écarts-types près de 3 °C ou en-dessous.

Quant aux amplitudes mensuelles absolues (Figure 20), elles ont fortement diminué durant la deuxième année (de 5 à 10 °C) pour les mois de janvier, mai et août. Celles des mois d'octobre, novembre (AÉROPORT et TIKIRAATSIAQ) et août (TIKIRAATSIAQ) ont même chuté en-dessous de 15 °C, ce qui ne s'était pas produit l'année précédente. Par contre, l'amplitude a sensiblement augmenté aux trois stations aux mois de février et mars. Elle a même franchi les 30 °C en mars 2004, valeur jamais atteinte à l'hiver précédent. Ainsi, le mois de mars présente à la fois une diminution de l'écart-type et une augmentation de l'amplitude absolue et ce, pour les trois sites.

Le site AÉROPORT montre encore un comportement légèrement différent de celui des autres sites : en plus d'avoir enregistré plus sensiblement les variations d'amplitudes absolues de janvier (-) et février (+), ses amplitudes de décembre et juin ont augmenté contrairement aux sites SILA et TIKIRAATSIAQ. Ainsi, concernant les variations inter-annuelles à la fois des écarts-types et des amplitudes absolues, les mois de décembre, juin et septembre présentent à l'AÉROPORT des tendances différentes ou contraires à celles observées aux deux autres sites.

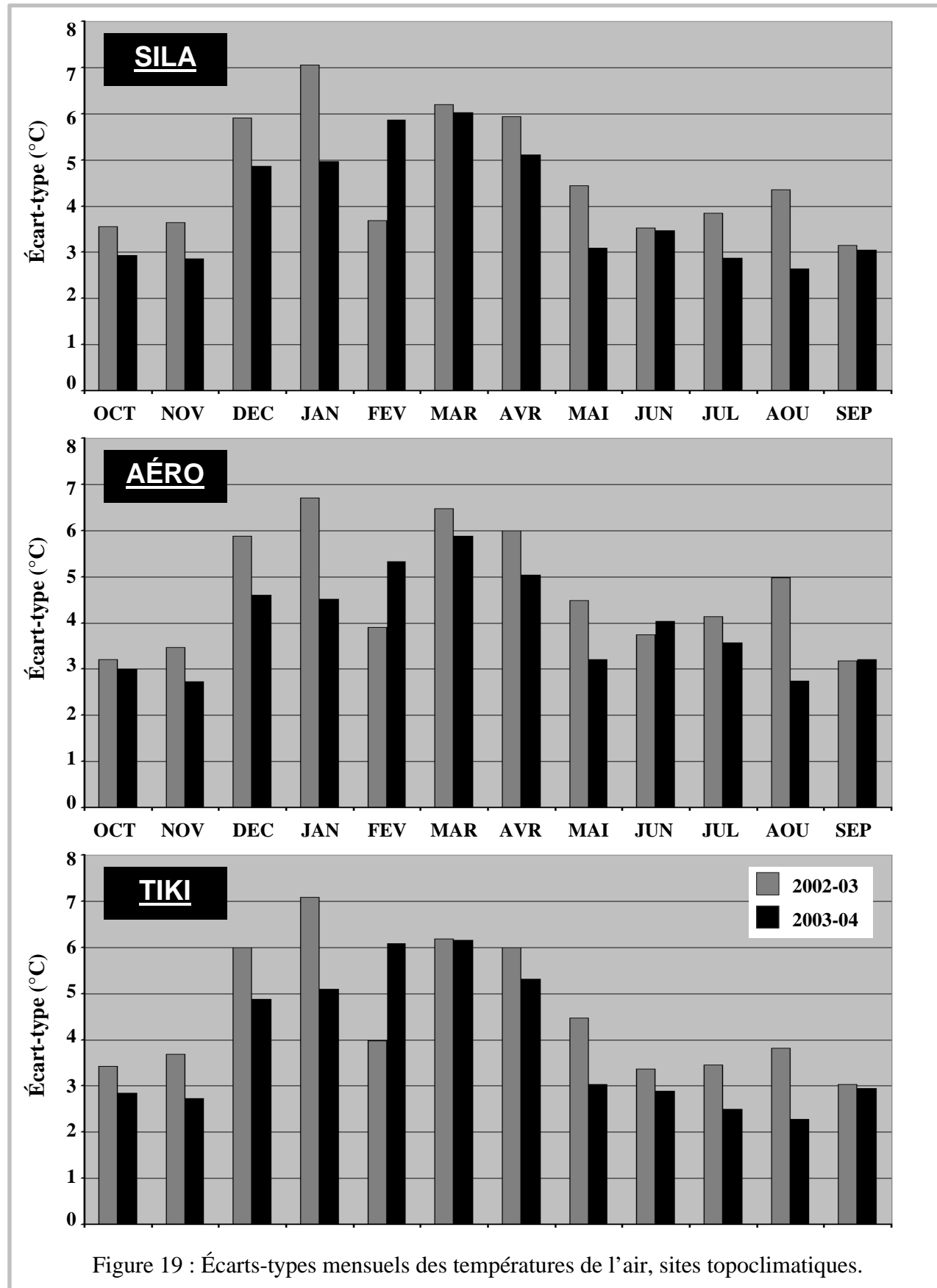


Figure 19 : Écart-types mensuels des températures de l'air, sites topoclimatiques.

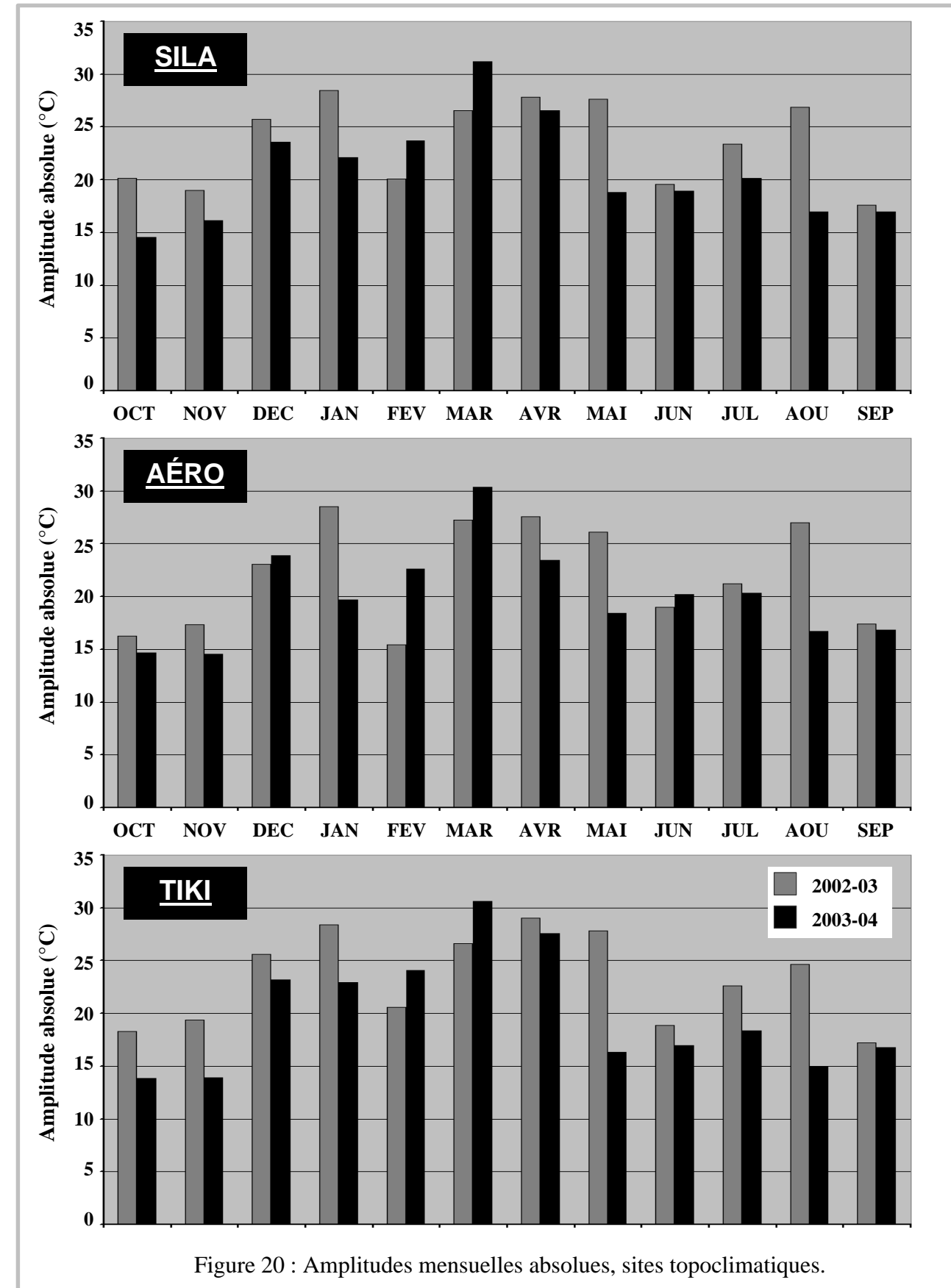


Figure 20 : Amplitudes mensuelles absolues, sites topoclimatiques.

En résumé, l'analyse de la présente sous-section permet de dégager les points suivants :

- Les températures du fond de la vallée (SILA) se distinguent d'abord et avant tout de celles du sommet des versants (AÉROPORT) alors qu'elles ont, en général, un comportement semblable à celui des températures du littoral du fjord (TIKIRAATSIAQ). Ce point est à retenir en vue de la prochaine sous-section concernant les vents.
- Les moyennes annuelles sont les plus douces dans la vallée (-6,7 °C), légèrement plus fraîches sur le bord du fjord (-7,0 °C) et plus froides sur les plateaux (-8,0 °C). En 2003-04, ces moyennes n'ont que très légèrement augmenté par rapport à 2002-03.
- Pour les trois sites topoclimatiques, l'année 2003-04 s'est avérée nettement moins contrastée que l'année 2002-03, comme le démontre la forte diminution des amplitudes thermiques absolues. Cette tendance s'est traduite, durant la deuxième année de mesure, par une saison de gel plus douce et plus longue, de même qu'une saison de dégel plus fraîche et plus courte. Par conséquent, l'indice de gel et l'indice de dégel ont tous les deux diminué, surtout aux sites SILA et TIKIRAATSIAQ.
- L'année 2003-04 s'est également démarquée de 2002-03 par des dates de gel et de dégel définitifs retardées de plusieurs semaines. À ce titre, le site AÉROPORT s'est avéré plus précoce que les autres sites pour les premiers gels, mais nettement plus tardif pour les premiers dégels.
- La plupart des mois d'hiver (surtout février) ont été significativement plus chauds à la deuxième année, sauf le mois de janvier, nettement plus froid. Cette tendance a été observée dans le réchauffement des extrêmes mensuels (minima et maxima). Les mois d' « été » (surtout mai et août) ont par contre été sensiblement plus frais, ce qui s'est répercuté dans la diminution des maxima absolus (les minima n'ayant que peu varié).
- En général, la variabilité mensuelle (écart-type et amplitude absolue) a diminué de façon notable en 2003-04, sauf dans le cas de février, où elle a augmenté. Les mois de janvier, mai et août ont montré les plus fortes variations. Le site AÉROPORT a toutefois montré des résultats beaucoup plus nuancés qu'aux deux autres sites.

3.1.2 Vents

À l'instar des températures, les vents dominants présentent des comportements variables selon le site de mesure ou l'année d'échantillonnage (Tableau IX). Premièrement, les directions dominantes montrent l'effet de canalisation du relief : alors que les vents viennent surtout du sud-ouest sur les plateaux (AÉROPORT) et le long du fjord (TIKIRAATSIAQ), d'ailleurs orienté SW-NE, ils sont légèrement déviés par les versants de la vallée (SILA) d'orientation nord-sud. La fréquence annuelle de ces directions varie toutefois d'un site à l'autre : alors qu'elle est demeurée à près de 25% pour le site TIKIRAATSIAQ, elle a chuté de 3% aux sites SILA (22 à 19%) et AÉROPORT (19 à 16%). Autrement dit, les directions ont été plus « concentrés » à TIKIRAATSIAQ et plus « dispersées » à l'AÉROPORT, surtout en 2003-04.

Quant aux vitesses, elles ont montré un comportement différent dans le fond de la vallée par rapport aux autres sites. En effet, les vents ont été systématiquement plus faibles au site SILA, autant pour les valeurs moyennes ou médianes (5-6 km/h de moins) que pour les valeurs maximales (de 15 à 25 km/h de moins). Quant au site de l'AÉROPORT, les vitesses maximales y sont demeurées plus élevées qu'à TIKIRAATSIAQ, malgré des valeurs moyennes et médianes légèrement plus faibles.

Tableau IX: Statistiques annuelles des vents, sites topoclimatiques.

| | SILA | | | AÉRO | | | TIKI | | |
|--------------------|--------|--------|-------------|--------|--------|-------------|--------|--------|-------------|
| | 02-'03 | 03-'04 | Var_inter | 02-'03 | 03-'04 | Var_inter | 02-'03 | 03-'04 | Var_inter |
| Dir_moy | S | S | - | SW | SW | - | SW | SW | - |
| Fréq_dir | 22.2 | 18.9 | -3.3 | 18.9 | 16.0 | -2.9 | 24.3 | 24.6 | +0.3 |
| Vit_moy | 17 | 16 | -1 | 22 | 21 | -1 | 24 | 22 | -2 |
| Vit_med | 15 | 14 | -1 | 19 | 18 | -1 | 21 | 19 | -2 |
| Vit_max | 75 | 89 | +14 | 99 | 113 | +14 | 91 | 110 | +19 |
| Fréq_<25 | 78.9 | 82.3 | +3.4 | 63.3 | 67.3 | +4.0 | 63.2 | 67.3 | +4.1 |
| Fréq_25-75 | 21.0 | 17.5 | -3.5 | 35.8 | 31.9 | -3.9 | 36.4 | 32.2 | -4.2 |
| Fréq_>75 | 0.0 | 0.2 | +0.2 | 0.9 | 0.8 | -0.1 | 0.5 | 0.5 | 0 |
| Vit >100 | 0 | 0 | 0 | 0 | 13 | +13 | 0 | 7 | +7 |

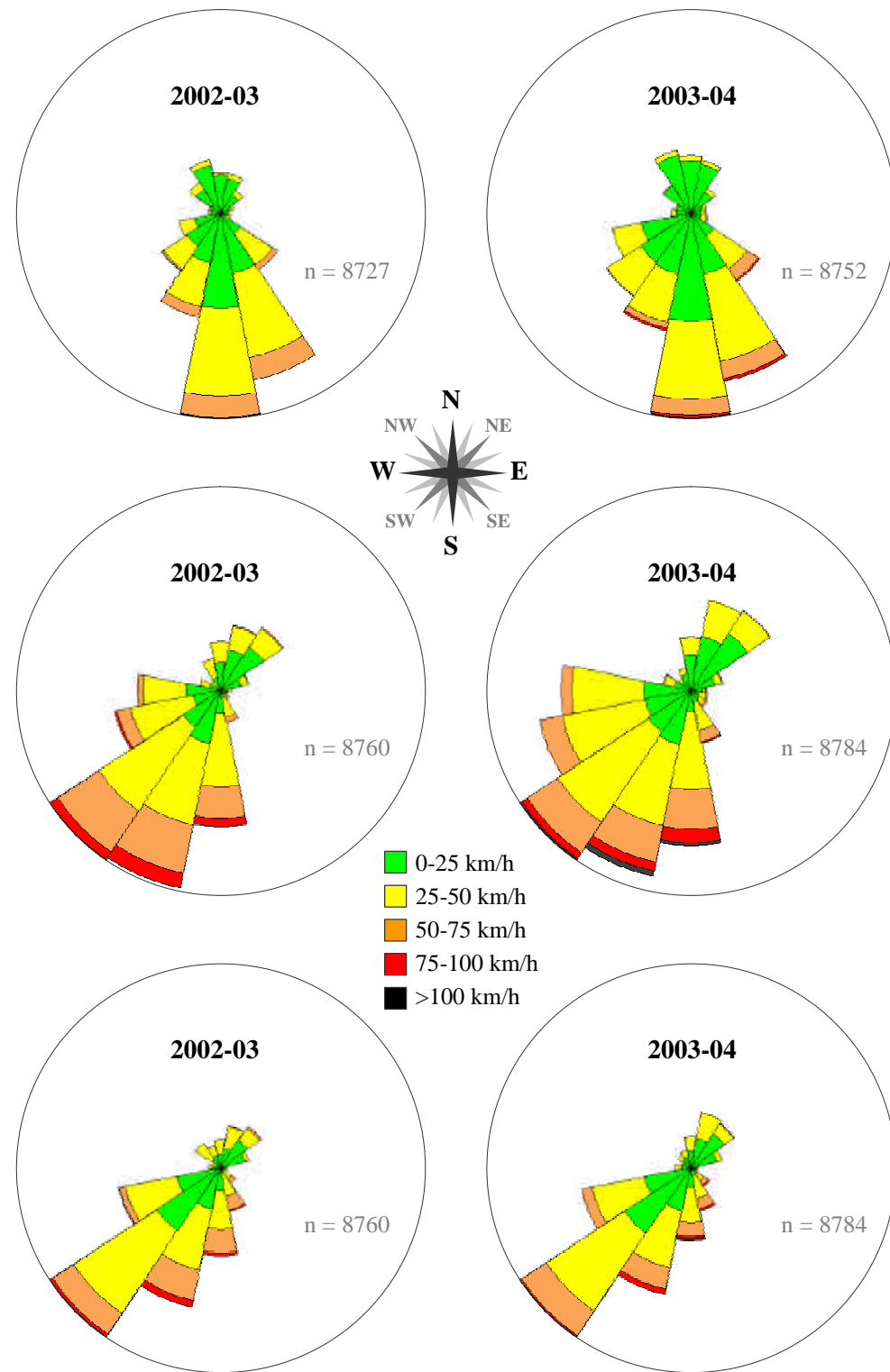
La séparation des vitesses en plusieurs classes a permis de préciser les résultats annuels. Ainsi, l'affaiblissement des vitesses moyennes et médianes s'est traduit par la *diminution* de la fréquence des vents « moyens » (entre 25 et 75 km/h) et par l'*augmentation* presque correspondante de celle des vents « faibles » (moins de 25 km/h). Des épisodes extrêmes (plus de 100 km/h), jamais observés en 2002-03, ont été répertoriés en 2003-04 aux sites AÉROPORT et TIKIRAATSIAQ.

La représentation graphique de ces résultats permet une meilleure compréhension (Figure 21). Les roses des vents montrent d'abord la concentration plus marquée, au site TIKIRAATSIAQ, des directions horaires autour de la direction dominante (SW). À l'inverse, ces directions ont été beaucoup plus dispersées au site AÉROPORT, où les directions dominantes se répartissent presque également entre SW et SSW. Par ailleurs, à ces deux sites, les vitesses au-dessus de 100 km/h ne sont apparues qu'en 2003-04, comme mentionné plus haut. Ces épisodes n'ont affecté que les directions S et SSW.

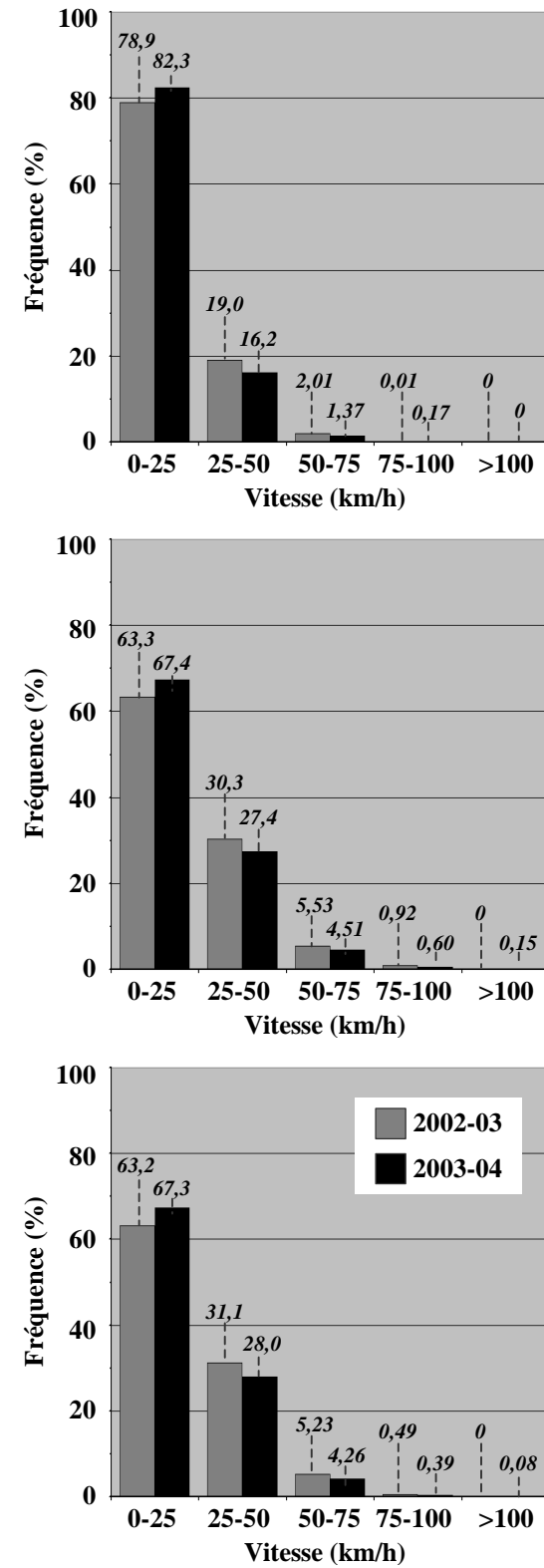
Les histogrammes de fréquences relatives de certaines classes de vitesse démontrent une similitude entre les sites AÉROPORT et TIKIRAATSIAQ. En effet, les vents de moins de 25 km/h y représentent 60-65% alors que cette proportion grimpe à 80% pour le site SILA. De plus, les vents supérieurs à 50 km/h (total des trois dernières classes) ont été nettement plus fréquents à ces deux sites (5-6%) que dans le fond de la vallée (à peine 2%).

Enfin, le comportement des vitesses maximales quotidiennes confirme le renforcement des épisodes de vents violents en 2003-04, notamment aux mois de décembre 2003, avril 2004 et septembre 2004. Il est à noter que ces événements n'ont pas été enregistrés avec la même sensibilité selon les sites : par exemple, l'épisode du 25 décembre 2003 s'est traduit par des vitesses dépassant 110 km/h à l'AÉROPORT mais atteignant à peine 100 km/h à TIKIRAATSIAQ et 80 km/h à SILA. Parallèlement, les mêmes graphiques montrent une légère diminution de la tendance générale : durant la deuxième année de mesure, les vitesses maximales sont demeurées plus souvent sous la barre des 20 km/h que durant l'année précédente. Par ailleurs, le site TIKIRAATSIAQ a enregistré des vitesses plus soutenues et plus régulières (très rarement en-dessous de 20 km/h) qu'aux autres sites, ce qui explique les valeurs moyennes et médianes plus élevées (Tableau IX).

Directions des vents dominants annuels



Fréquence relative des vitesses



Vitesses quotidiennes maximales (oct. '02 - sep. '04)

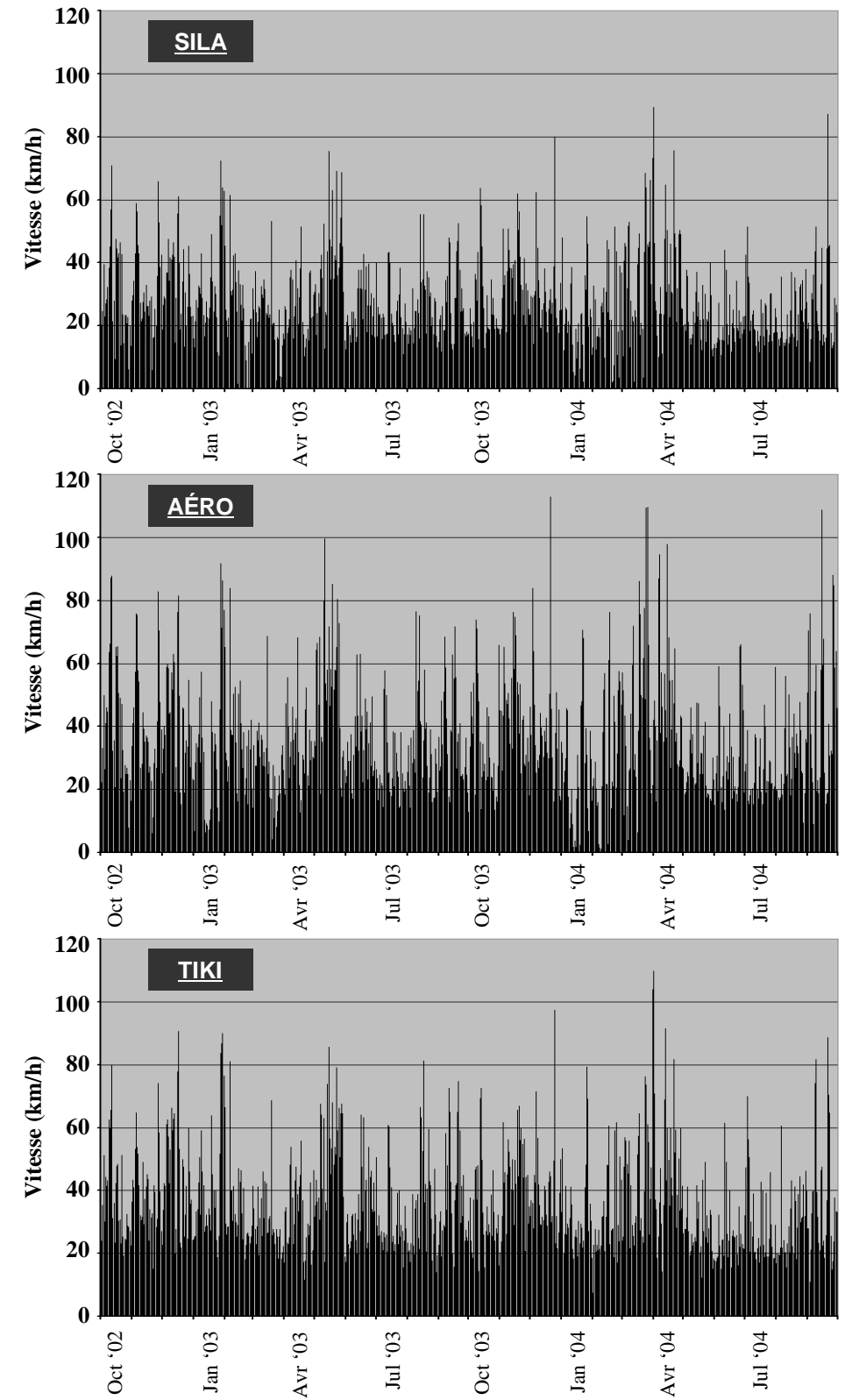


Figure 21 : Directions et vitesses des vents, sites topoclimatiques.

Une comparaison de diverses roses des vents mensuelles permet quelques précisions « saisonnières » (Figure 22). En effet, il est possible d'y comparer chaque début de saison, pour chacune des années de mesure à chacun des sites topoclimatiques. De façon générale, les directions dominantes, bien qu'elles aient varié d'un mois à l'autre, confirment la différence récurrente (une vingtaine de degrés, la plupart du temps) entre le site SILA, d'une part, et les sites AÉROPORT et TIKIRAATSIAQ, d'autre part. Ces observations confirment la tendance annuelle déjà mentionnée (Tableau IX et Figure 21).

Ces directions n'ont montré que peu de changement d'une année à l'autre, sauf au mois d'avril 2004 où elles ont été davantage dispersées. À ce titre, le site AÉROPORT a montré la plus grande dispersion des directions, qui se sont étalées dans presque tout le cadran « sud-ouest » (W, WSW, SW, SSW et S). Les vitesses ont également augmenté sensiblement en avril 2004 à tous les sites, comme l'avait démontré le comportement des vitesses maximales quotidiennes durant les épisodes de vents violents, fréquents pour ce mois.

Les roses des vents du mois de juillet montrent toutefois une allure différente des autres mois et ce, pour tous les sites et pour les deux années de mesure. D'abord, les directions dominantes observées se sont franchement démarquées des autres mois. En plus des directions qui ont dominé durant le reste de l'année, soit sud pour SILA et sud-ouest pour les deux autres sites, la composante nord-est associée aux brises de mer en provenance de l'embouchure du fjord s'est affirmée. Au site SILA, des phénomènes de brises de pentes affectant le fond de la vallée ont par ailleurs contribué à la grande dispersion des directions.

Par ailleurs, les vitesses ont été plus faibles en juillet que durant les autres mois, bien qu'elles aient légèrement augmenté en 2003-04. Encore une fois, des brises de mer (site TIKIRAATSIAQ) et des brises de pentes (site SILA) de faible vitesse et souvent observables durant l'été pourraient expliquer de tels résultats.

Ces phénomènes topoclimatiques seront analysés plus en détail à la sous-section suivante qui concerne la variabilité des températures et des vents en fonction des types de temps.

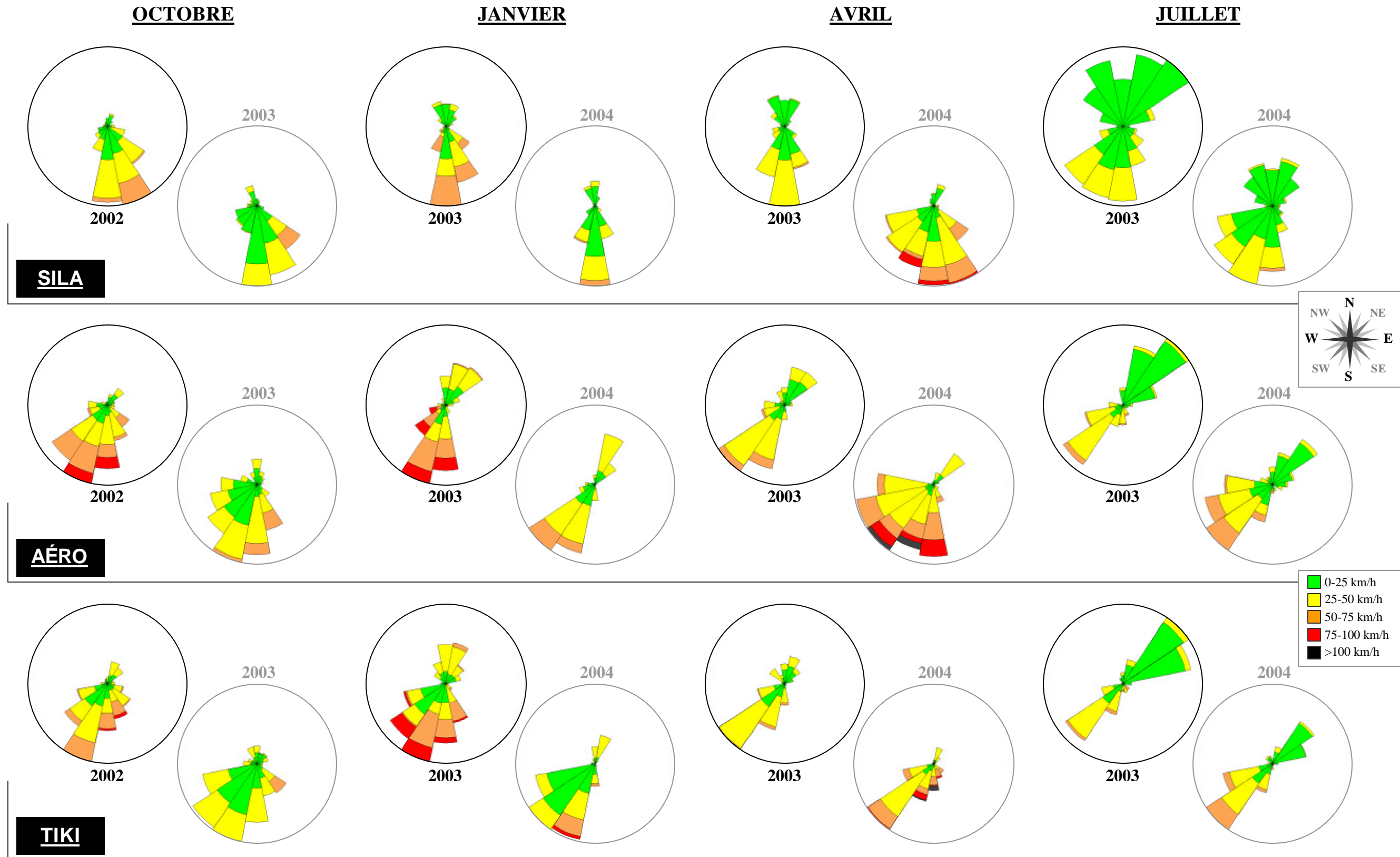


Figure 22 : Directions et vitesses des vents pour 4 mois, sites topoclimatiques.

Il convient d'approfondir le comportement des vitesses des vents sur une base mensuelle. Premièrement, les courbes des valeurs moyennes et maximales (Figure 23) confirment la tendance annuelle, à quelques exceptions près. À tous les sites, les valeurs moyennes ont été généralement plus basses en 2003-04, sauf pour les mois de mars et avril 2004, où elles ont été significativement plus élevées. À ce propos, le site TIKIRAATSIAQ a enregistré des vitesses moyennes supérieures à celles du site AÉROPORT (surtout en 2002-03) et nettement supérieures à celles du site SILA.

Cependant, les vitesses mensuelles maximales ont subi des variations beaucoup plus marquées et variées. En général, elles ont été plus élevées durant la deuxième année de mesure, surtout aux mois de décembre, mars, avril et septembre. Par contre, les mois de mai et août ont connu une chute notable des vitesses maximales, descendant même jusqu'à des valeurs jamais atteintes l'année précédente : 40 km/h pour SILA et 50 km/h pour les deux autres sites. En somme, la variabilité des vitesses mensuelles maximales (différence entre les valeurs extrêmes) a été nettement plus élevée en 2003-04 qu'en 2002-03.

Cette analyse peut être complétée par le comportement des écarts-types mensuels des vitesses (Figure 24). Sauf exception, les augmentations importantes des écarts-types, durant la deuxième année de mesure, correspondent aux augmentations des vitesses maximales pour les mois correspondants : mars, avril et septembre (et dans une certaine mesure mais de façon moins marquée, juillet) sont des exemples. Le mois de décembre fait exception aux trois sites : malgré une vitesse maximale plus élevée en 2003-04, l'écart-type y est demeuré plus faible (surtout à TIKIRAATSIAQ, où la différence inter-annuelle des vitesses était pourtant moins marquée qu'aux autres sites).

Les différents sites n'ont pas enregistré ces variations avec la même sensibilité. À SILA, les écarts-types ont fluctué entre un minimum de 7 km/h (juin 2004) et un maximum de 15 km/h (janvier 2003). Ces valeurs ont plutôt varié entre 9 et 20 km/h (durant les mêmes mois) pour le site AÉROPORT et entre 9 et 17 km/h (respectivement, mai 2004 et janvier 2003) pour TIKIRAATSIAQ. Le site de TIKIRAATSIAQ s'est enfin démarqué pour les mois de novembre et février, où les écarts-types n'ont pratiquement pas varié entre les deux années de mesure, contrairement aux deux autres sites.

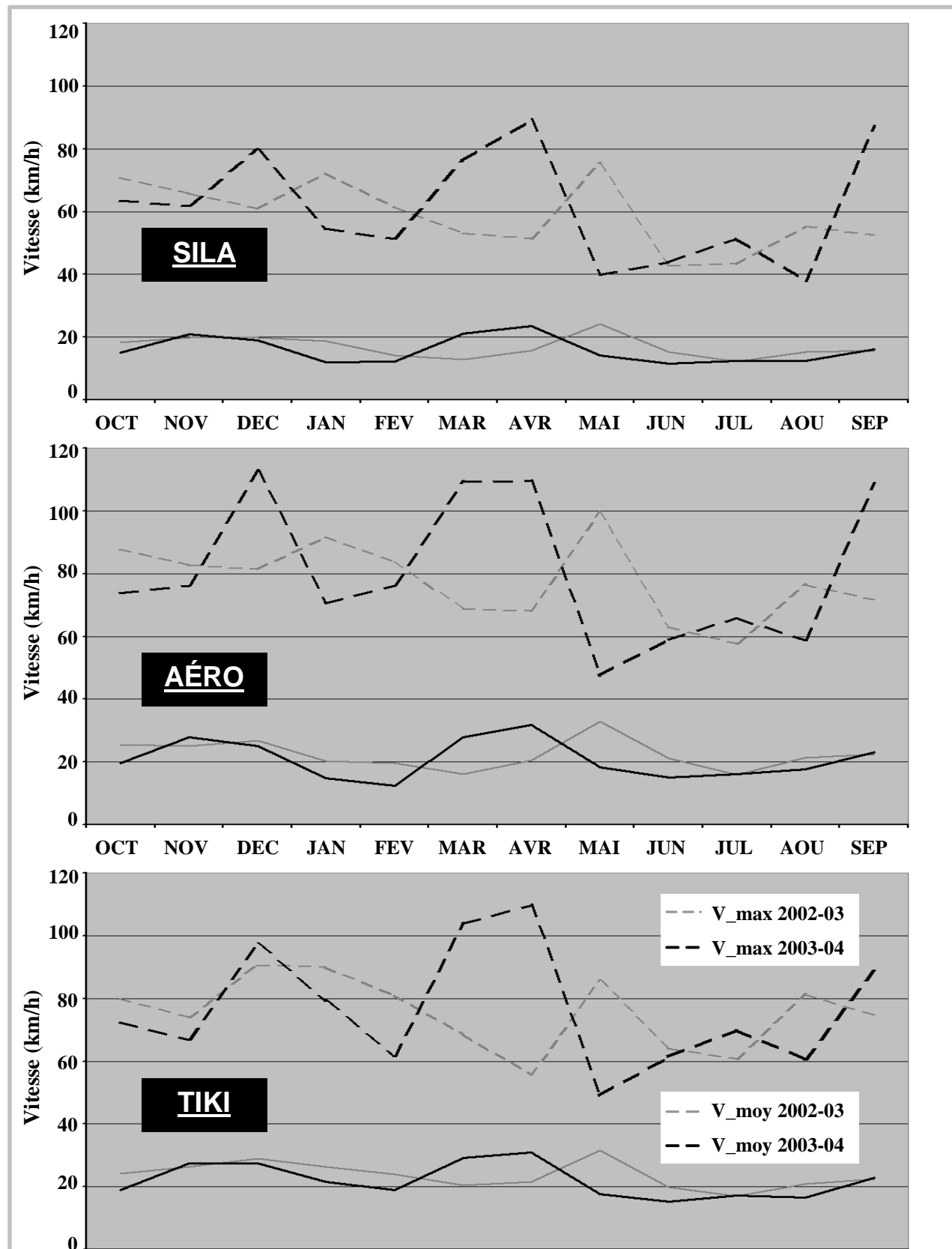


Figure 23 : Vitesses mensuelles moyennes et maximales des vents, sites topoclimatiques.

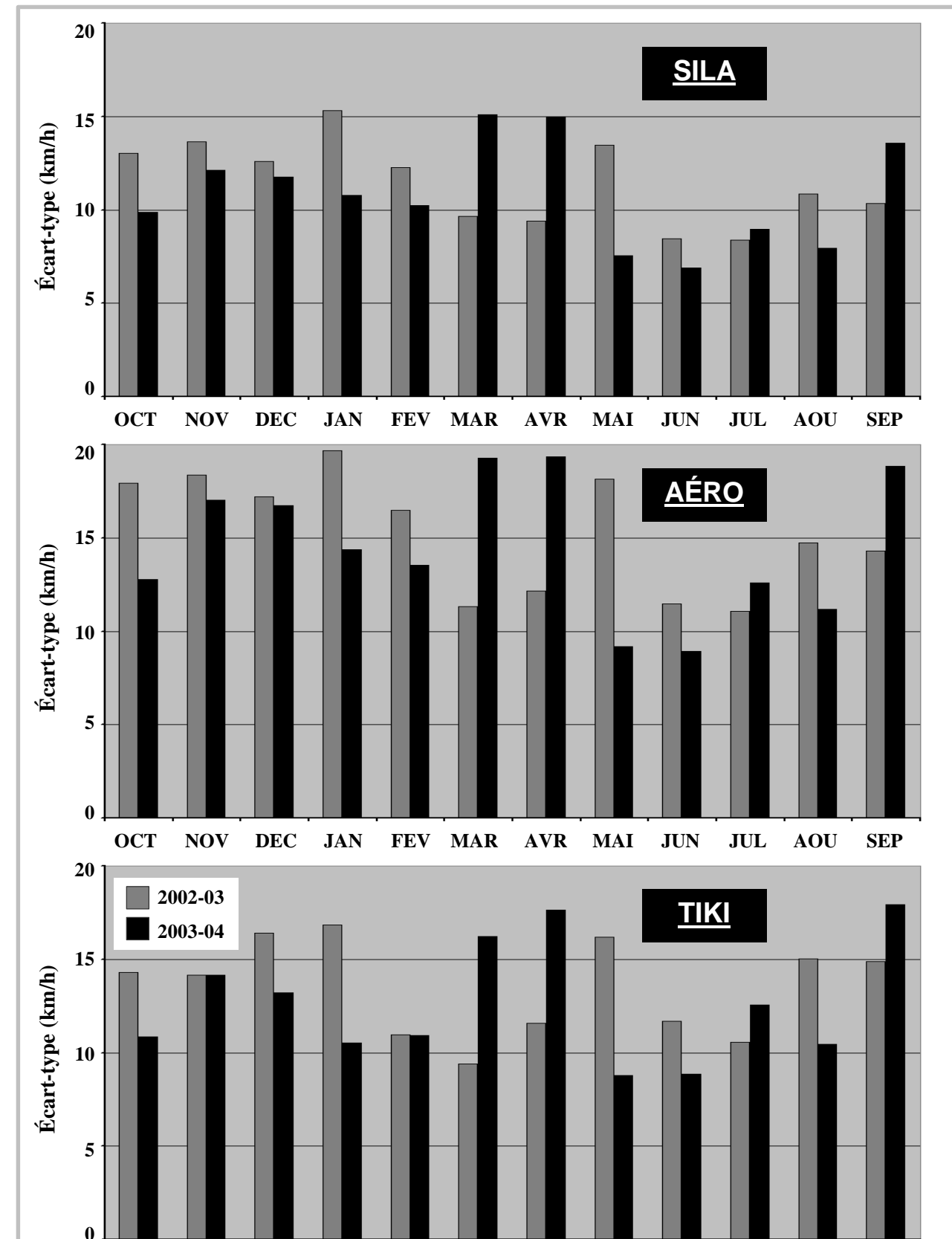


Figure 24 : Écart-types mensuels des vitesses des vents, sites topoclimatiques.

Il apparaît pertinent de résumer les résultats des vents en quelques grands points :

- L'effet du relief a influencé le comportement des vents dominants, comme le montrent les roses des vents annuelles et mensuelles. En effet, le fond de la vallée (orientée N-S) s'est démarqué du sommet des versants et du bord du fjord (orienté SW-NE) autant pour les directions (sud contre sud-ouest) que pour les vitesses (plus faibles). Une vue d'ensemble cartographique permet d'apprécier cet effet (Figure 25).
- Les directions et les vitesses ont montré des similitudes entre les sites AÉROPORT et TIKIRAATSIAQ, malgré certaines différences en ce qui concerne la concentration des directions autour d'une valeur dominante, plus marquée au site TIKIRAATSIAQ. Cette concentration résulte du rôle du fjord dans la canalisation des vents.
- L'année 2003-04 a montré des vitesses moyennes et médianes globalement plus faibles qu'en 2002-03 (de 1 à 2 km/h), malgré des valeurs maximales plus élevées (entre une douzaine et une vingtaine de km/h, selon le site). Cette tendance s'est traduite à la fois par une *augmentation* des vents faibles (<25 km/h) et des vents violents (>100 km/h) et par une *diminution* correspondante des vents moyens (25-75 km/h).
- Les résultats mensuels des vitesses ont montré une variabilité plus élevée en 2003-04 qu'en 2002-03. Les valeurs maximales des mois de mars, avril et septembre ont atteint des sommets en 2004, alors que celles des mois de mai et août ont été sensiblement plus faibles que durant l'année précédente. Ces résultats s'expriment dans les variations inter-annuelles des écarts-types (sauf le mois de décembre, qui présente un cas particulier).
- Les roses des vents mensuelles ont enregistré les épisodes de vents violents d'avril 2004, durant lesquels les directions dominantes ont été fortement dispersées. Enfin, ces roses des vents ont montré, pour les deux années de mesure, une différence estivale (juillet) par rapport aux autres saisons. En effet, des vents faibles en provenance de l'embouchure du fjord (sites AÉROPORT et TIKIRAATSIAQ) ou des différents versants de vallée (SILA) seraient en partie le résultat de phénomènes topoclimatiques qui se produisent par temps dégagé.

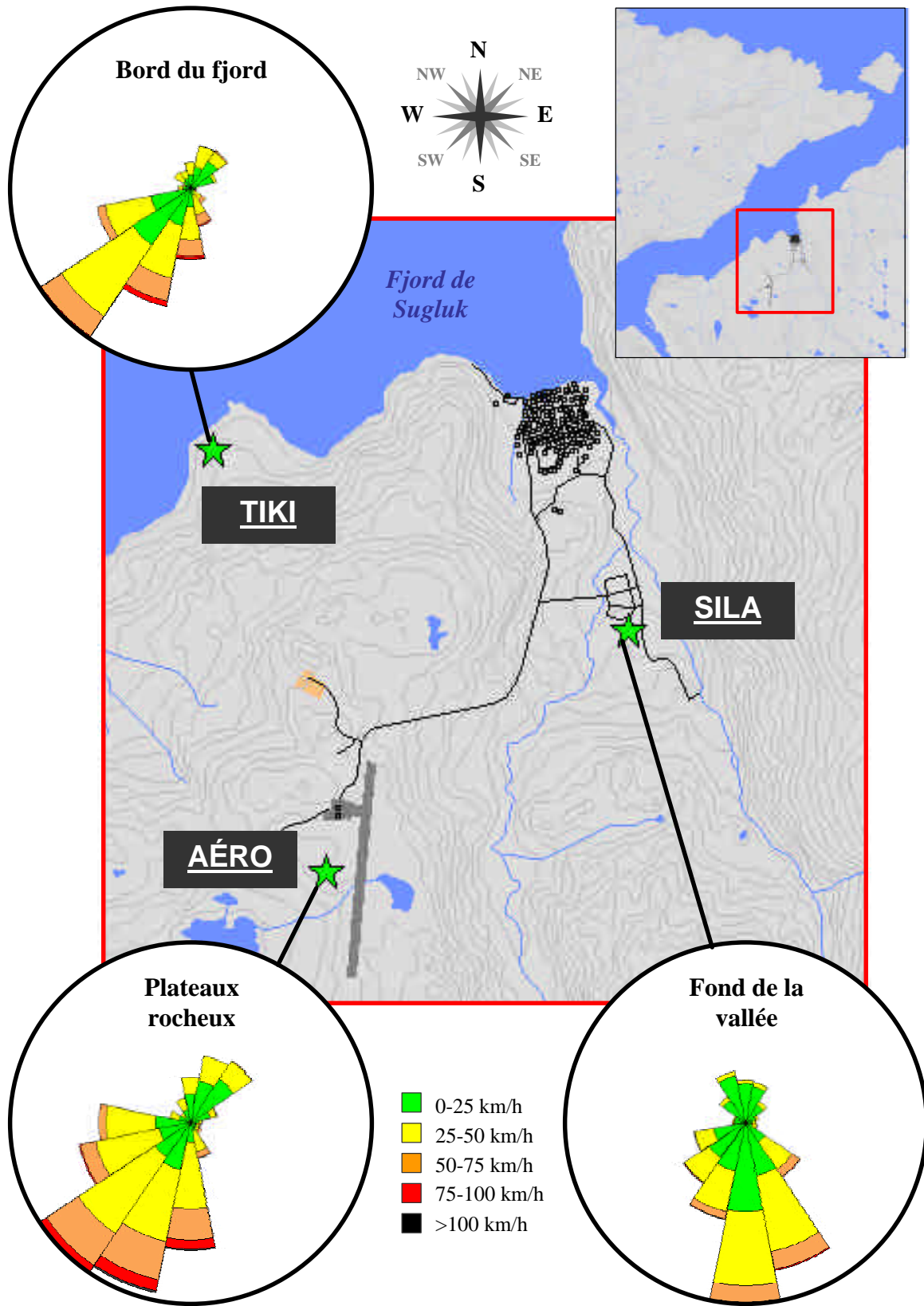


Figure 25 : Effet du relief sur les vents dominants (octobre 2002 à septembre 2004).

3.1.3 Variabilité et phénomènes topoclimatiques

Les phénomènes topoclimatiques (brises de pentes, inversions) se manifestent lorsque les conditions atmosphériques le permettent : temps dégagé (nébulosité faible à nulle) et vents régionaux très faibles, voire nuls. C'est de cette façon que certaines surfaces peuvent se réchauffer beaucoup plus que d'autres durant le jour et se refroidir beaucoup plus durant la nuit, ce qui entraîne des mouvements locaux ascendants (air chaud) ou descendants (air froid).

Durant la campagne de terrain de l'été 2003, un relevé visuel systématique des conditions de nébulosité a été effectué 2 à 3 fois par jour (matin, après-midi et fin de soirée). Trois types de temps ont ainsi été retenus : ciel dégagé (nébulosité <20%), ciel couvert (nébulosité >80%) et conditions intermédiaires (nébulosité entre 20 et 80%). Sauf exception, ces conditions se sont étendues sur une période de 2 à 4 jours. La mise en graphique de ce relevé, parallèlement à celle des températures horaires enregistrées aux trois stations météorologiques, a permis d'analyser l'influence des types de temps sur certaines manifestations topoclimatiques (Figure 26). Seuls les types de temps « extrêmes » (ciel dégagé ou ciel couvert) ont été retenus.

Premièrement, les périodes de temps couvert (durant lesquelles les vents sont parfois forts et soutenus) se démarquent par une nette tendance à la baisse des températures. Les cycles journaliers y sont généralement moins marqués, surtout en fin de période. Par ailleurs, les températures au site AÉROPORT y sont plus froides (1 à 2 °C) qu'aux deux autres sites. Ce type de temps a prédominé durant une douzaine de jours sur la période étudiée, soit environ 30% du temps.

Les périodes de temps dégagé, généralement à vent faible, présentent un comportement sensiblement différent. Si les périodes plus courtes de 2 jours et moins semblent se confondre avec les temps plus variables ou intermédiaires, les périodes prolongées telles que la deuxième moitié de juillet se démarquent d'abord par une hausse notable des températures. Les amplitudes journalières y sont également plus marquées. Enfin et surtout, les températures aux sites SILA et TIKIRAATSIAQ deviennent inférieures à celles du site AÉROPORT. Cette différence de 3 ou 4 °C témoigne directement de périodes d'inversions de température entre le sommet des versants et le fond des vallées (7 épisodes en 15 jours). Ce type de temps dégagé a prédominé durant un total de 16 jours, soit près de 40% de la période d'étude.

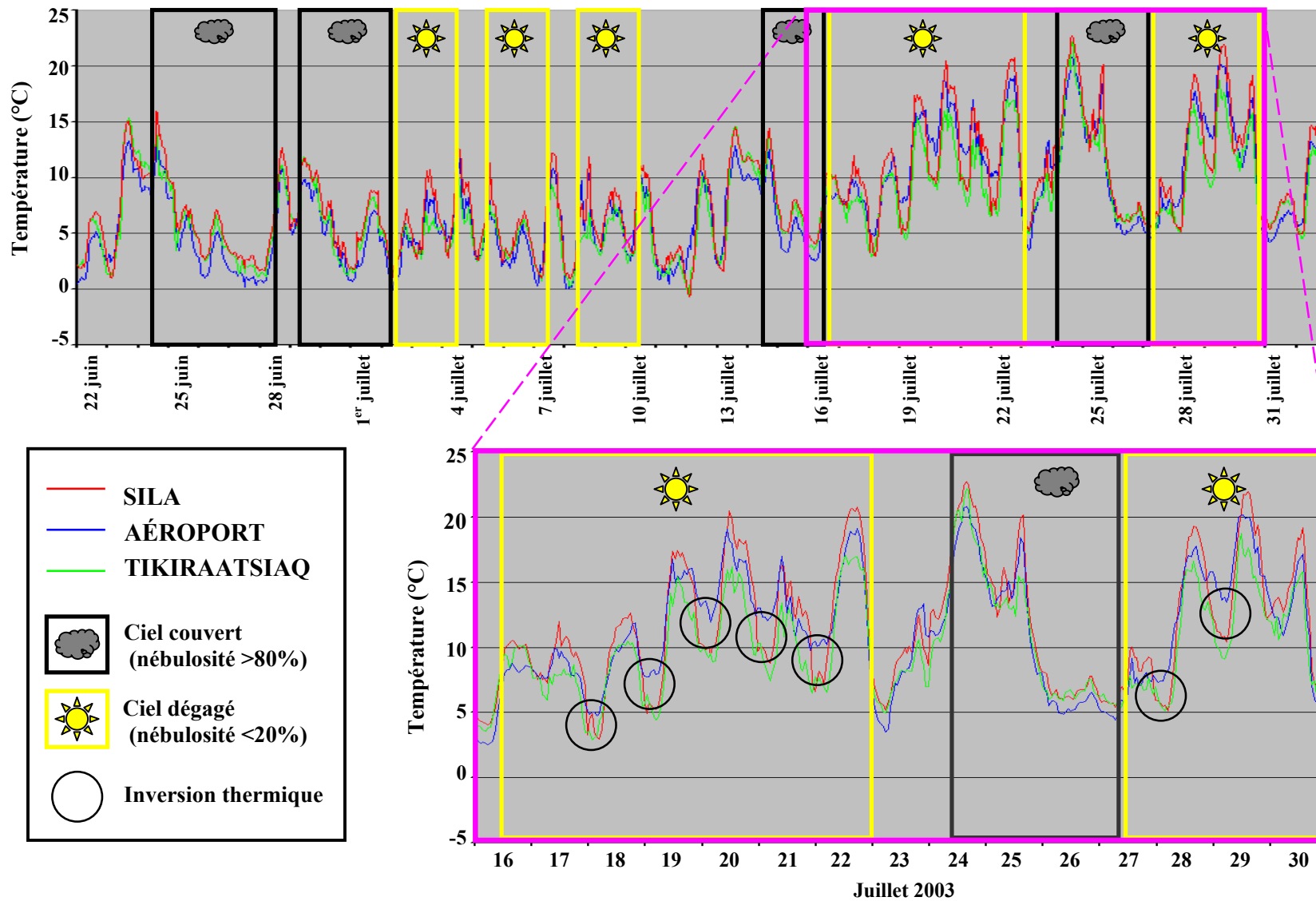


Figure 26 : Températures horaires et types de temps (22 juin au 1^{er} août 2003).

Les périodes d'inversions thermiques observables par temps dégagé ont donc affecté le comportement horaire des températures. Bien que les données d'ensoleillement ne soient pas disponibles durant toute la période de mesure (octobre 2002 à septembre 2004), il est apparu pertinent d'analyser plus en détail ces périodes d'inversions aux sites SILA et TIKIRAATSIAQ (Tableau X).

Le nombre total d'heures d'inversion, de même que le nombre d'heures pour des périodes d'inversion significative (dépassant six heures consécutives), a été sensiblement plus élevé au site TIKIRAATSIAQ. Cet écart, plus marqué durant la première année (60 à 85%), a légèrement diminué durant la deuxième année (autour de 50%). Le nombre d'épisodes d'inversion de plus de 6 heures a également été plus élevé au site TIKIRAATSIAQ bien que l'écart entre les deux sites ait diminué en 2003-04.

Le nombre d'épisodes plus prolongés a toutefois montré des comportements variables : alors que le nombre de « très longs » épisodes (>24 h) n'a que peu varié d'une année à l'autre, celui des épisodes d'une demi-journée et plus a fortement diminué à TIKIRAATSIAQ (plus de 20% de diminution) et a augmenté à SILA (près de 30%). Ainsi, le nombre d'inversions de plus de 12 heures a été, durant la deuxième année, plus élevé à SILA qu'à TIKIRAATSIAQ.

Tableau X: Statistiques annuelles des inversions thermiques.

| | SILA | | | TIKIRAATSIAQ | | |
|-------------------------|--------|--------|-------------|--------------|--------|-------------|
| | 02-'03 | 03-'04 | Var_inter | 02-'03 | 03-'04 | Var_inter |
| Total_heures | 994 | 888 | -106 | 1651 | 1366 | -285 |
| Total_h (>6h) | 728 | 684 | -44 | 1360 | 1056 | -304 |
| Nb inv. > 6h | 50 | 45 | -5 | 73 | 57 | -16 |
| Nb inv. > 12h | 28 | 36 | +8 | 48 | 28 | -20 |
| Nb inv. > 24h | 4 | 6 | +2 | 14 | 15 | +1 |
| Min (°C) | 0.0 | 0.0 | 0 | 0.0 | 0.0 | 0 |
| Moy (°C) | 2.0 | 2.0 | 0 | 1.9 | 2.2 | +0.3 |
| Max (°C) | 8.4 | 7.2 | -1.2 | 10.1 | 8.7 | -1.4 |
| Durée_moy | 14.8 | 14.2 | -0.6 | 16.7 | 16.9 | +0.2 |

Par ailleurs, les valeurs numériques (en °C) de ces inversions ont montré des variations différentes d'un site à l'autre et d'une année à l'autre. Durant la deuxième année de mesure, les valeurs minimales et moyennes ont diminué à SILA, alors qu'elles ont augmenté à TIKIRAATSIAQ. Ainsi, la moyenne annuelle des inversions thermiques a nettement dépassé les 2 °C au site TIKIRAATSIAQ en 2003-04. Par contre, les maxima d'inversion ont diminué aux deux sites en 2003-04. Ils sont quand même demeurés plus élevés (20%) durant les deux années au site TIKIRAATSIAQ. Enfin, la durée moyenne des inversions (>6 h), bien qu'elle n'ait que peu varié d'une année à l'autre, est demeurée supérieure d'environ 2 heures à TIKIRAATSIAQ.

Ces résultats méritent d'être approfondis sur une base mensuelle. Le total mensuel des heures et du nombre d'inversions (Figure 27) montre d'abord une concentration de ces épisodes vers le milieu des saisons hivernale et estivale. Parallèlement, le rapport entre le nombre d'heures (épisodes >6 h) et le nombre d'inversions (>6 h) donne une idée de la durée moyenne des inversions pour chaque mois (Tableau XI).

Tableau XI: Durée moyenne (h) des épisodes d'inversion (>6 h).

| Durée_moy | SILA | | | TIKIRAATSIAQ | | |
|------------|--------|--------|--------------|--------------|--------|---------------|
| | 02-'03 | 03-'04 | Var_inter | 02-'03 | 03-'04 | Var_inter |
| OCT | 10.33 | 6.00 | -4.33 | 13.50 | - | - |
| NOV | 21.33 | 14.00 | -7.33 | 16.75 | 18.00 | +1.25 |
| DEC | 15.25 | 16.67 | +1.42 | 13.20 | 14.75 | +1.55 |
| JAN | 20.75 | 29.17 | +8.42 | 22.25 | 26.29 | +4.04 |
| FEV | 27.17 | 27.75 | +0.58 | 33.71 | 19.00 | -14.71 |
| MAR | 13.57 | 15.20 | +1.63 | 18.33 | 22.80 | +4.47 |
| AVR | 12.00 | 8.67 | -3.33 | 9.80 | 11.25 | +1.45 |
| MAI | - | - | - | 9.00 | 9.00 | 0 |
| JUN | 6.50 | 9.00 | +2.5 | 12.75 | 19.83 | +7.08 |
| JUL | 9.50 | 12.13 | +2.63 | 19.67 | 22.30 | +2.63 |
| AOU | 11.50 | 8.50 | -3.00 | 19.88 | 11.71 | -8.16 |
| SEP | - | 9.00 | - | 11.00 | 10.67 | -0.33 |

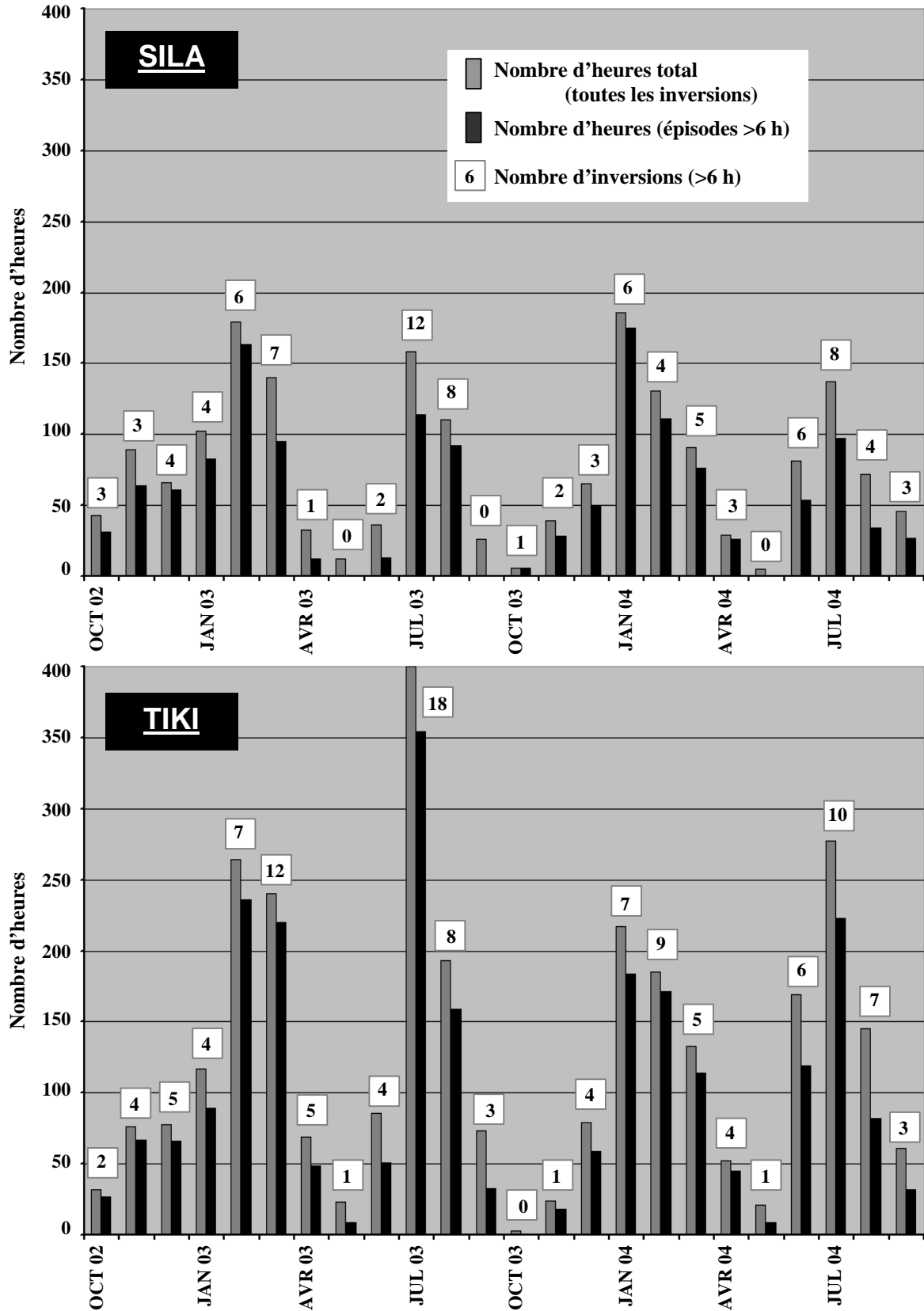


Figure 27 : Total mensuel des heures et du nombre d'inversions thermiques.

De façon générale, le nombre d'heures et le nombre d'inversions ont été systématiquement plus élevés au site TIKIRAATSIAQ (Figure 27). Durant plusieurs mois (février, mars et juillet 2003 de même que juillet 2004), le nombre d'heures cumulées (épisodes >6 h) y a dépassé les 200 heures, avec un maximum de plus de 350 heures en février 2003 (soit plus de la moitié du temps). Dans le cas de SILA, le nombre d'heures n'a que rarement dépassé les 150 heures (février 2003 et janvier 2004). Enfin, pour les deux sites, les mois les plus propices aux inversions thermiques (nombre et heures cumulées) ont été sensiblement les mêmes : février et mars pour l'hiver 2002-03; juillet et août pour l'été 2003; janvier et février pour l'hiver 2003-04; et juillet pour l'été 2004.

Par contre, la durée moyenne de ces épisodes, à chaque mois, s'est avérée fort variable d'un mois à l'autre, d'un site à l'autre et d'une année à l'autre (Tableau XI). En général, les inversions ont été de plus courte durée à l'automne et au printemps, surtout au site SILA. À l'opposé, elles ont été de plus longue durée au milieu de l'hiver (janvier à mars) et de l'été (juillet-août), surtout au site TIKIRAATSIAQ. Les variations inter-annuelles pour plusieurs mois ont été très contrastées d'un site à l'autre.

Quelques précisions peuvent être tirées des valeurs moyennes et extrêmes (en °C) des inversions, pour les épisodes de plus de 6 heures (Figure 28). D'abord, les inversions ont été généralement plus importantes à TIKIRAATSIAQ qu'au site SILA, surtout en 2003-04 : comme mentionné plus haut, la valeur moyenne des inversions durant cette année y a franchement dépassé la barre des 2 °C (Tableau X). De plus, le nombre de mois pour lesquels la valeur maximale a égalé ou dépassé les 6 °C a été systématiquement plus élevé à TIKIRAATSIAQ qu'à SILA (Figure 28) : 6 contre 2 en 2002-03 et 8 contre 5 en 2003-04. Un maximum de plus de 10 °C a même été atteint en août 2003, ce qui n'a jamais été le cas au site SILA.

Il importe enfin de mentionner que les mois ayant atteint des sommets, pour ces valeurs moyennes et extrêmes, ne correspondent pas exactement aux mois ayant atteint des sommets pour le nombre d'heures ou le nombre d'épisodes d'inversions (Figure 27), de même que pour la durée moyenne de ces épisodes (Tableau XI). Par conséquent, il convient de bien différencier l'importance des inversions, leur durée moyenne et leur fréquence durant l'année.

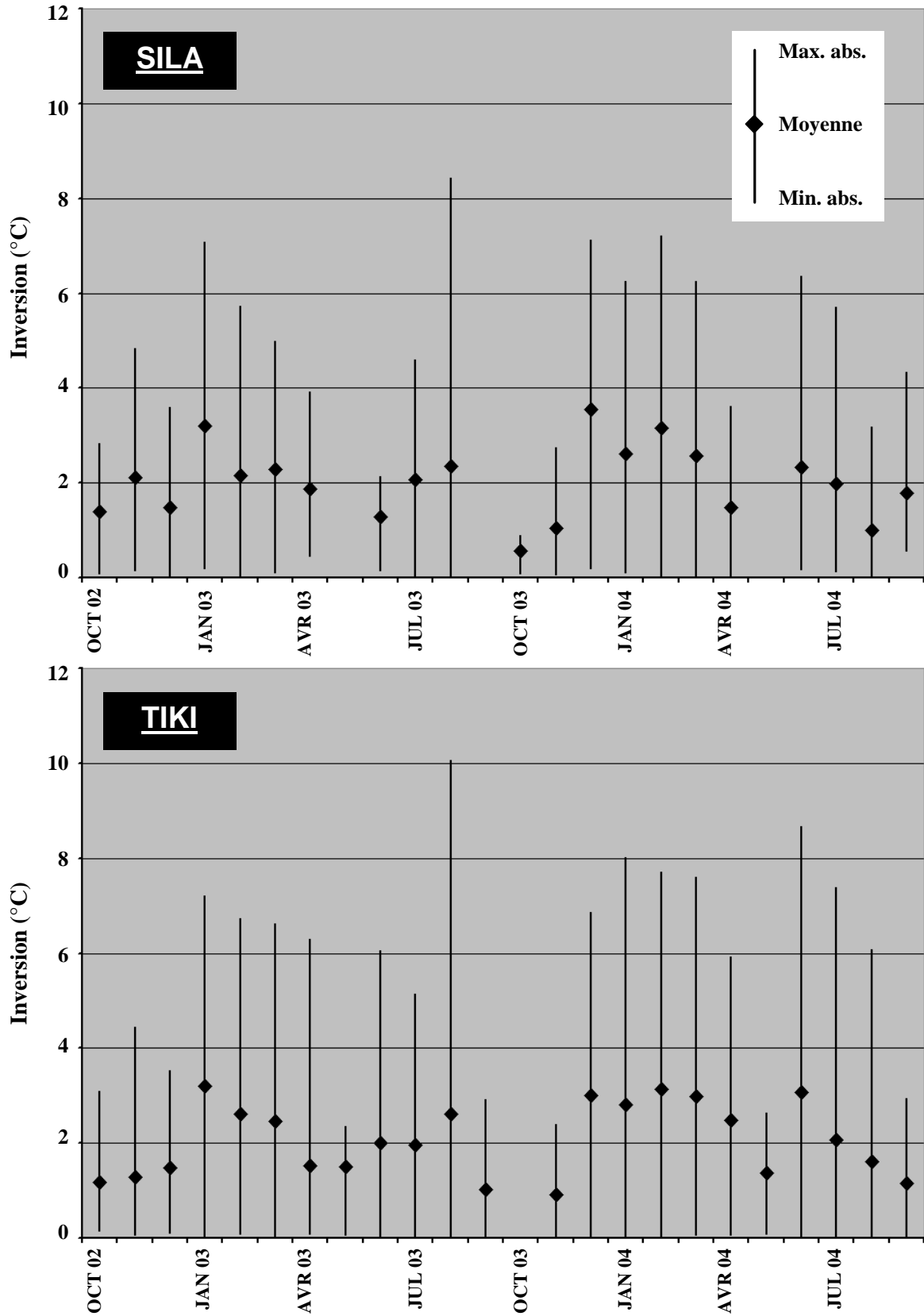


Figure 28 : Valeurs moyennes et extrêmes des inversions thermiques (>6 h).

L'effet des types de temps sur les vents ou les brises locales a également été étudié d'après les relevés de l'été 2003. Les données horaires de direction et de vitesse ont été séparées en deux groupes selon le type de temps prédominant : ciel dégagé et ciel couvert. Des roses des vents ont ainsi pu être produites pour chaque site et chaque type de temps (Figure 29, côté gauche).

Les directions dominantes ont été les mêmes pour les trois sites : sud-ouest par ciel couvert et nord-est par ciel dégagé. De plus, les vitesses ont été plus élevées par temps couvert (vents régionaux prédominants) que par temps clair. Cependant, le site SILA s'est démarqué par des directions nettement plus dispersées qu'aux autres sites : par temps couvert (effet partiel de l'orientation de la vallée) mais surtout par temps dégagé (composantes NW et NNW témoignant de brises de pentes, absentes aux autres sites). De plus, les vitesses y ont été plus faibles qu'ailleurs, comme l'avaient déjà démontré les résultats concernant les vents.

Ces résultats s'étendent toutefois sur une période de temps très limitée. Une analyse plus détaillée a été effectuée sur l'ensemble des données (2002-04) en tenant compte de l'occurrence d'épisodes d'inversions thermiques (>6 h). En effet, les inversions se produisant surtout lors de périodes sans nuages, il apparaît logique d'y relier des phénomènes de brises de pentes, comme le montrent les roses des vents correspondantes (Figure 29, côté droit). Bien que les inversions d'été (nocturnes) diffèrent des inversions hivernales (qui durent parfois plusieurs jours), les deux types d'inversions sont inclus dans les roses des vents (côté droit).

Ces résultats font d'abord ressortir l'importante dispersion des directions, lors d'épisodes d'inversions, pour le site SILA. Par exemple, certaines directions bien représentées en temps d'inversions (NW et SSW, surtout) ont été observées beaucoup moins fréquemment en temps normal. Par ailleurs, les directions des « quadrants » NW et SE ont même été carrément absentes aux autres sites. Cela témoigne du passage de brises de pentes en provenance des versants, comme le montrent les faibles vitesses enregistrées au site SILA lors d'inversions.

Les roses des vents pour les deux autres sites, en temps d'inversions, montrent également des vents beaucoup plus faibles qu'en temps normal, mais quand même plus soutenus qu'au site SILA. Quant aux directions, si elles sont restées relativement constantes au site AÉROPORT (avec une prédominance NE), elles se sont fortement concentrées à TIKIRAATSIAQ autour des deux directions dominantes (SW et WSW). Cette tendance démontre l'influence du fjord.

ÉTÉ 2003

2 ANS (2002-04)

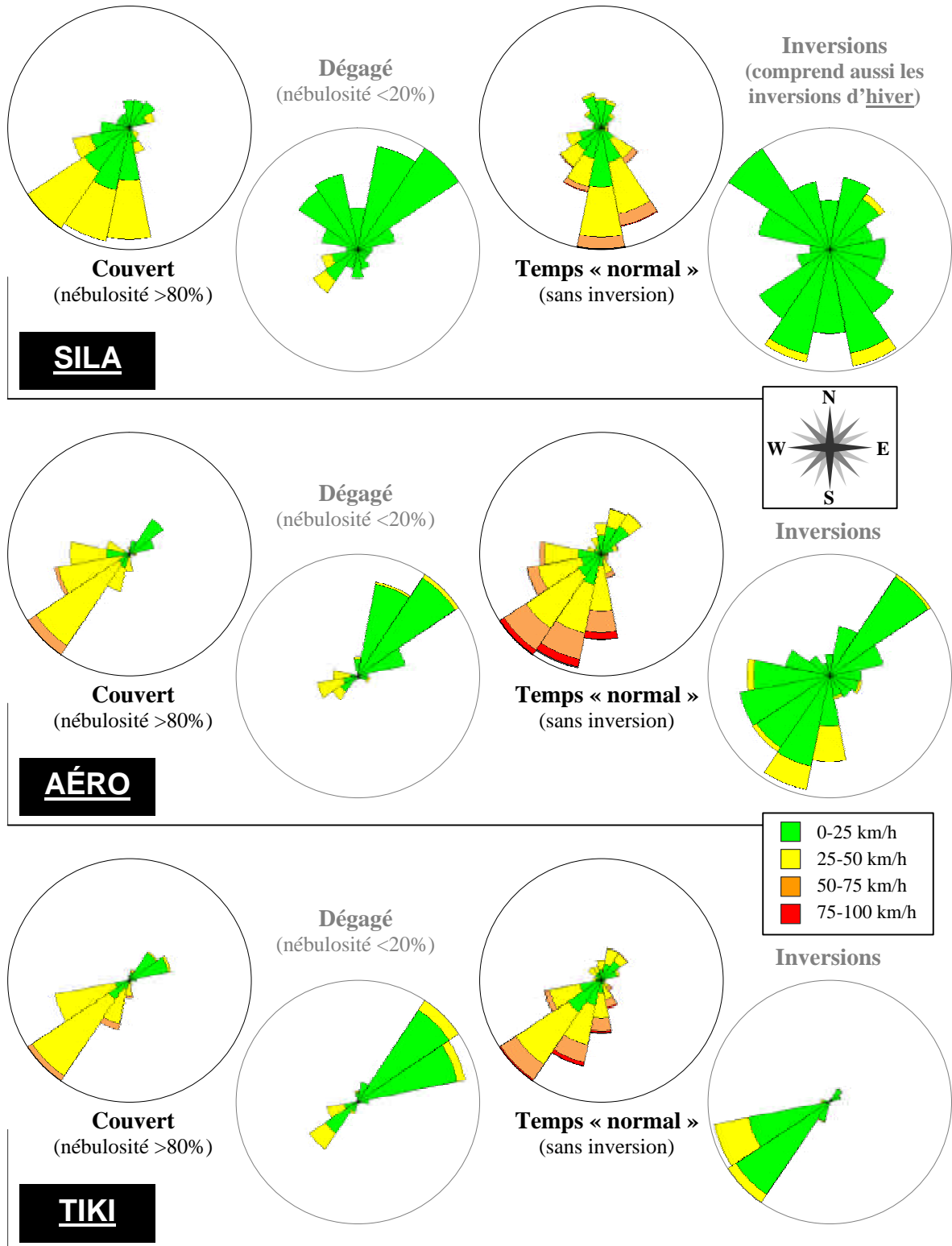


Figure 29 : Directions et vitesses des vents selon le type de temps ou l'occurrence d'inversions thermiques.

Les résultats de l'analyse des manifestations topoclimatiques peuvent être résumés ainsi :

- Le relevé journalier des conditions d'ensoleillement à l'été 2003 a permis de faire ressortir deux types de temps très contrastés : 1) *les temps couverts*, généralement à vents forts, au cours desquels les températures diminuent et demeurent plus froides à l'AÉROPORT; 2) *les temps dégagés*, à vents dispersés mais très faibles (brises de pentes et effet du plan d'eau), au cours desquels les températures augmentent et sont affectées d'inversions entre l'AÉROPORT et les autres sites situés plus en aval (SILA et TIKIRAATSIAQ).
- L'analyse plus approfondie des températures horaires a permis de détecter tous les épisodes d'inversions thermiques d'octobre 2002 à septembre 2004, en particulier ceux qui dépassaient 6 heures consécutives. Sur une base annuelle, le nombre de ces épisodes, leur durée et leur importance ont été plus élevés au site TIKIRAATSIAQ qu'au site SILA. Cet écart s'est toutefois réduit durant la deuxième année de mesure (2003-04).
- Sur une base mensuelle, le nombre d'inversions et la quantité d'heures cumulées se sont surtout concentrés au milieu de l'été (juillet) et de l'hiver (février). Les inversions d'été ont été plus fréquentes mais moins prolongées que celles d'hiver. De plus, elles se sont produites uniquement durant la nuit, lorsque le refroidissement des versants par rayonnement était suffisant. Quant aux inversions d'hiver, elles ont parfois duré plusieurs jours consécutifs à cause des faibles apports de chaleur au sol (rayonnement solaire très faible) durant de longues périodes de temps.
- En distinguant ces épisodes d'inversion (>6 h) du reste des données horaires, il est enfin apparu que les vents, par temps d'inversion, ont été sensiblement plus faibles qu'en temps normal et ce, à tous les sites. Les directions fortement dispersées du site SILA (brises de pentes) et concentrées du site TIKIRAATSIAQ (effet du fjord) ont démontré l'influence directe du relief sur le climat de surface par temps dégagé ou lorsque les vents régionaux sont faibles.

3.2 Environnements microclimatiques

Cette section aborde le comportement thermique de différentes surfaces microclimatiques au sein de la vallée. Une comparaison est faite tout au long de la section entre les sites eux-mêmes et par rapport à la température de l'air mesurée à la station topoclimatique de référence située dans la vallée (SILA).

3.2.1 Statistiques des températures

Il importe d'abord de jeter un coup d'œil d'ensemble à certaines statistiques annuelles concernant les températures de la surface du sol (Tableau XII), en tout premier lieu la température moyenne annuelle. Dans plus de la moitié des cas, cette température a été de 1 à 2 °C plus élevée qu'à la station de référence, soit entre -5 et -6 °C. Dans une proportion semblable, les températures moyennes annuelles ont augmenté d'au moins un demi-degré durant la deuxième année de mesure.

Plusieurs sites ont toutefois montré des comportements différents. Les combes à neige (sites #3 et #17), le bord de route (site #18) et le lit de rivière (site #20) ont enregistré une moyenne annuelle près de 0 °C. L'inertie thermique de l'eau et l'effet isolant de la neige semblent avoir joué, dans ces cas-ci, un rôle important dans le comportement des températures annuelles. Les sites #6 (glissement) et #14 (versant NE), recouverts eux-aussi de plusieurs dizaines de centimètres de neige, ont enregistré des moyennes annuelles plus douces qu'aux autres sites. Comme il en sera fait mention plus loin, l'effet des autres facteurs géographiques locaux (sol, végétation, etc.), quoi que plus subtil et modeste, peut être impliqué.

Certains sites (#7-plateau et #9-plage) ont enregistré un réchauffement nettement plus important qu'ailleurs, soit près de deux degrés en 2003-04. Par ailleurs, c'est plutôt un refroidissement notable qui a affecté les espaces sous les bâtiments (#11-école et #21-maison, dépourvus de neige), le versant orienté NE (#14) et une des combes à neige (#3, où la moyenne annuelle est d'ailleurs descendue sous 0 °C à la deuxième année de mesure). En somme, parmi la quinzaine de sites avec des séries complètes de données, un seul d'entre eux (#12-colluvions) n'a montré qu'une variation inter-annuelle négligeable (température moyenne annuelle d'environ -6 °C pour les deux années).

Tableau XII: Statistiques annuelles des températures de surface (moyenne et variabilité), sites microclimatiques.

| Site | Particularité | Neige (cm) | T_moy_an | | | Écart-type | | | Amp_moy | | | Amp_abs | | |
|------|-------------------------|------------|----------|--------|-------------|------------|--------|-------------|---------|--------|-------------|---------|--------|--------------|
| | | | 02-'03 | 03-'04 | Var_inter | 02-'03 | 03-'04 | Var_inter | 02-'03 | 03-'04 | Var_inter | 02-'03 | 03-'04 | Var_inter |
| 1 | Sol fissuré | 33 | -5.8 | -5.6 | +0.2 | 2.7 | 2.4 | -0.3 | 2.0 | 2.0 | +0.0 | 48.8 | 42.7 | -6.1 |
| 2 | Plateau | 14 | -5.5 | -4.8 | +0.7 | 2.9 | 2.7 | -0.2 | 2.9 | 4.5 | +1.7 | 53.9 | 50.0 | -3.8 |
| 3 | Combe à neige | 61 | 0.4 | -0.2 | -0.6 | 0.8 | 0.5 | -0.3 | 0.6 | 0.4 | -0.2 | 16.2 | 11.8 | -4.4 |
| 4 | Glissement | - | -5.9 | - | - | 2.0 | - | - | 0.9 | - | - | 37.3 | - | - |
| 5 | Glissement | 50 | -5.8 | -5.0 | +0.9 | 2.6 | 2.3 | -0.3 | 1.9 | 2.0 | +0.1 | 47.1 | 40.3 | -6.8 |
| 6 | Glissement | 86 | -2.9 | -1.8 | +1.2 | 2.1 | 1.7 | -0.5 | 1.7 | 1.8 | +0.1 | 39.6 | 32.2 | -7.4 |
| 7 | Plateau | 19 | -5.5 | -3.6 | +1.8 | 2.7 | 2.1 | -0.7 | 2.3 | 1.8 | -0.4 | 53.1 | 41.8 | -11.2 |
| 9 | Plage | 65 | -4.2 | -2.5 | +1.7 | 2.6 | 1.7 | -0.9 | 2.8 | 2.0 | -0.8 | 44.9 | 36.8 | -8.0 |
| 10 | Village | 52 | -3.8 | -3.2 | +0.6 | 2.3 | 1.9 | -0.4 | 2.5 | 2.3 | -0.2 | 46.9 | 39.2 | -7.7 |
| 11 | École | 0 | -5.9 | -6.2 | -0.3 | 2.5 | 1.8 | -0.7 | 1.5 | 1.2 | -0.3 | 42.2 | 31.8 | -10.4 |
| 12 | Colluvions | 30 | -6.0 | -6.1 | -0.1 | 2.6 | 1.8 | -0.8 | 2.1 | 1.6 | -0.6 | 49.0 | 38.9 | -10.1 |
| 13 | Colluvions | 28 | -4.9 | -4.1 | +0.8 | 2.4 | 1.8 | -0.5 | 2.2 | 1.5 | -0.7 | 43.6 | 36.4 | -7.2 |
| 14 | Versant (NE) | 48 | -2.1 | -2.6 | -0.5 | 1.6 | 1.4 | -0.2 | 1.7 | 1.2 | -0.5 | 30.4 | 32.6 | +2.2 |
| 15 | Versant (N) | 24 | -5.9 | - | - | 2.8 | - | - | 1.9 | - | - | 46.4 | - | - |
| 17 | Combe à neige | 104 | 0.8 | 0.9 | +0.1 | 0.6 | 0.8 | +0.2 | 0.8 | 2.2 | +1.5 | 14.8 | 32.0 | +17.2 |
| 18 | Remblai route | 62 | -0.4 | 0.0 | +0.5 | 1.8 | 1.7 | -0.1 | 2.8 | 3.1 | +0.3 | 36.9 | 33.8 | -3.2 |
| 20 | Lit rivière | - | -1.0 | - | - | 1.3 | - | - | 1.4 | - | - | 26.3 | - | - |
| 21 | Maison | 0 | -7.0 | -7.3 | -0.3 | 2.9 | 2.3 | -0.6 | 2.1 | 2.0 | -0.0 | 47.9 | 36.4 | -11.5 |
| SILA | T _{SOL} (2 cm) | 0 | -6.2 | -5.9 | +0.3 | 3.2 | 2.8 | -0.4 | 3.0 | 3.1 | +0.1 | 52.6 | 45.0 | -7.6 |
| SILA | T _{AIR} | 0 | -6.8 | -6.7 | +0.1 | 4.6 | 4.0 | -0.6 | 5.7 | 5.9 | +0.1 | 67.4 | 55.7 | -11.6 |

Afin de caractériser la variabilité des données (Tableau XII, trois dernières colonnes), une analyse des écarts-types annuels est d'abord nécessaire. La majorité des sites ont obtenu des écarts-types entre 2 et 3 °C, alors qu'ils étaient de plus de 4°C dans l'air à la station SILA. Ces résultats ont toutefois été nettement inférieurs (moins d'un degré) aux sites des combes à neige (#3 et #17). Enfin, il est à noter que les écarts-types annuels ont diminué partout durant la deuxième année de mesure, sauf au site #17 (combe à neige).

Les amplitudes annuelles fournissent également des résultats concernant la variabilité thermique des surfaces. D'abord, les amplitudes *moyennes* (différences entre les moyennes maximales et minimales) sont demeurées autour de 2 °C pour une majorité de sites alors que cette valeur a été de près de 6 °C dans l'air (site SILA). En 2003-04, des amplitudes moyennes légèrement plus élevées ont été atteintes aux sites #18 (bord de route) et #2 (plateau argileux), ce dernier site ayant profité d'une augmentation de près de 60%. Par ailleurs, les combes à neige ont montré des comportements particuliers : alors que l'amplitude moyenne est demeurée très faible (moins d'un demi-degré) au site #3, elle a presque triplé au site #17 (0,79 à 2,24 °C) durant la deuxième année de mesure. Enfin, environ la moitié des sites ont enregistré une diminution de l'amplitude moyenne annuelle durant la deuxième année.

La tendance des amplitudes *absolues* (différences entre les extrêmes) présente une allure légèrement différente. Premièrement, les valeurs ont diminué presque partout en 2003-04, surtout aux sites #7 (plateau), #11 (école), #12 (colluvions) et #21 (maison), où la diminution a dépassé les 10 °C (comme dans l'air à la station SILA). Cette diminution a été plus modeste aux sites #2 et #18, là où les amplitudes *moyennes* avaient d'ailleurs été les plus élevées en 2003-04. Le nombre de sites ayant enregistré une amplitude absolue supérieure à 40 °C est passé de 11 en 2002-03 à 4 en 2003-04. Cependant le site #17 se démarque nettement : l'amplitude absolue y est passé de moins de 15 °C en 2002-03 à plus de 30 °C en 2003-04, soit plus de 100% d'augmentation. Parmi tous les sites, il s'agit de la plus forte variation inter-annuelle (17 °C).

Les résultats concernant les amplitudes thermiques annuelles illustrent directement la tendance des températures maximales et minimales, de même que celle des extrêmes (Tableau XIII).

Tableau XIII: Statistiques annuelles des températures de surface (minima et maxima), sites microclimatiques.

| Site | Particularité | Neige (cm) | T_max | | | T_min | | | Max_abs | | | Min_abs | | |
|------|-------------------------|------------|--------|--------|-------------|--------|--------|-------------|---------|--------|--------------|---------|--------|-------------|
| | | | 02-'03 | 03-'04 | Var_inter | 02-'03 | 03-'04 | Var_inter | 02-'03 | 03-'04 | Var_inter | 02-'03 | 03-'04 | Var_inter |
| 1 | Sol fissuré | 33 | -4.8 | -4.6 | +0.2 | -6.7 | -6.6 | +0.2 | 14.8 | 14.1 | -0.7 | -34.0 | -28.6 | +5.4 |
| 2 | Plateau | 14 | -4.0 | -2.3 | +1.6 | -6.8 | -6.9 | -0.0 | 18.7 | 21.5 | +2.8 | -35.2 | -28.6 | +6.6 |
| 3 | Combe à neige | 61 | 0.7 | 0.0 | -0.7 | 0.1 | -0.4 | -0.5 | 12.4 | 8.4 | -4.0 | -3.8 | -3.4 | +0.4 |
| 4 | Glissement | - | -5.5 | - | - | -6.3 | - | - | 7.7 | - | - | -29.6 | - | - |
| 5 | Glissement | 50 | -4.8 | -3.9 | +0.9 | -6.7 | -5.9 | +0.8 | 13.1 | 11.6 | -1.4 | -34.0 | -28.6 | +5.4 |
| 6 | Glissement | 86 | -2.0 | -0.8 | +1.2 | -3.7 | -2.6 | +1.1 | 17.6 | 16.2 | -1.4 | -21.9 | -16.0 | +6.0 |
| 7 | Plateau | 19 | -4.2 | -2.7 | +1.5 | -6.5 | -4.5 | +2.0 | 18.0 | 15.2 | -2.8 | -35.1 | -26.6 | +8.4 |
| 9 | Plage | 65 | -2.8 | -1.5 | +1.3 | -5.6 | -3.5 | +2.1 | 21.5 | 18.3 | -3.2 | -23.4 | -18.5 | +4.9 |
| 10 | Village | 52 | -2.5 | -2.0 | +0.5 | -4.9 | -4.2 | +0.7 | 21.1 | 18.7 | -2.4 | -25.8 | -20.6 | +5.3 |
| 11 | École | 0 | -5.1 | -5.6 | -0.5 | -6.7 | -6.8 | -0.2 | 15.5 | 9.8 | -5.7 | -26.7 | -22.0 | +4.7 |
| 12 | Colluvions | 30 | -4.9 | -5.2 | -0.4 | -7.0 | -6.8 | +0.2 | 16.3 | 13.1 | -3.2 | -32.8 | -25.8 | +7.0 |
| 13 | Colluvions | 28 | -3.7 | -3.3 | +0.4 | -5.9 | -4.8 | +1.1 | 16.9 | 15.2 | -1.8 | -26.7 | -21.2 | +5.4 |
| 14 | Versant (NE) | 48 | -1.2 | -2.0 | -0.8 | -2.9 | -3.2 | -0.3 | 13.8 | 16.6 | +2.8 | -16.6 | -16.0 | +0.6 |
| 15 | Versant (N) | 24 | -4.8 | - | - | -6.7 | - | - | 14.9 | - | - | -31.5 | - | - |
| 17 | Combe à neige | 104 | 1.2 | 2.2 | +1.1 | 0.4 | 0.0 | -0.4 | 12.7 | 28.2 | +15.5 | -2.1 | -3.8 | -1.7 |
| 18 | Remblai route | 62 | 1.1 | 1.8 | +0.7 | -1.6 | -1.2 | +0.4 | 23.2 | 24.3 | +1.1 | -13.7 | -9.5 | +4.3 |
| 20 | Lit rivière | - | -0.2 | - | - | -1.6 | - | - | 15.9 | - | - | -10.5 | - | - |
| 21 | Maison | 0 | -5.9 | -6.2 | -0.3 | -8.0 | -8.2 | -0.3 | 17.3 | 10.6 | -6.7 | -30.5 | -25.7 | +4.8 |
| SILA | T _{SOL} (2 cm) | 0 | -4.7 | -4.3 | +0.4 | -7.7 | -7.4 | +0.2 | 16.5 | 14.9 | -1.5 | -36.2 | -30.1 | +6.1 |
| SILA | T _{AIR} | 0 | -4.0 | -3.8 | +0.2 | -9.7 | -9.7 | +0.1 | 28.1 | 21.8 | -6.4 | -39.2 | -34.0 | +5.3 |

Plusieurs sites ont enregistré des températures moyennes maximales en-dessous de celle enregistrée dans l'air (SILA) : #1 (sol fissuré), #4 (25 cm de profondeur), #5 (près d'un glissement), #11 (sous l'école), #12 (colluvions), #15 (versant orienté N), et #21 (sous une maison). Par ailleurs, ces maxima ont été sensiblement plus élevées dans les combes à neige (#3 et #17), près de la route (#18) et dans le lit de la rivière (#20).

Quant aux moyennes minimales, elles ont été franchement plus élevées qu'à la station de référence. Seul le site #21 (sous une maison) s'en est approché, à plus d'un degré de différence. Sauf exceptions (trois sites), les endroits ayant enregistré une augmentation des moyennes maximales en 2003-04 ont aussi enregistré une augmentation des moyennes minimales. De la même façon, la diminution des maxima a été accompagnée d'une diminution simultanée des minima. Parmi les exceptions, le site #17 s'est démarqué par une augmentation de la moyenne maximale et une diminution de la moyenne minimale, ce qui s'est traduit par une augmentation notable de l'amplitude moyenne et de l'écart-type.

Enfin, le comportement des maxima et minima absolus corrobore la tendance observée pour les amplitudes thermiques absolues (Tableau XII). La plupart des sites ont subi, durant la deuxième année de mesure, une diminution des maxima absolus et une augmentation correspondante des minima absolus, ce qui s'est traduit par une nette diminution de l'amplitude thermique. Le nombre de sites ayant enregistré un minimum absolu sous les -30°C est passé de 7 en 2002-03 à aucun en 2003-04. Le site #17 (combe à neige) a toutefois montré un comportement nettement différent : une forte augmentation de son maximum et une diminution de son minimum ont contribué à l'augmentation marquée de l'amplitude absolue.

L'analyse statistique selon les classes de température a également été effectuée (Figure 30). Afin de comparer les résultats entre les sites et avec la station de référence (SILA : T_{AIR}), les mêmes classes de 5°C ont été retenues d'un site à l'autre. De plus, sauf exceptions (les 2 sites de combes à neige), les fréquences relatives ont été graduées selon les mêmes intervalles.

Première constatation : à l'instar de ce qui avait été observé dans l'air, la grande majorité des sites ont vu leur nombre de classes diminuer en 2003-04 (perte d'un ou deux intervalles aux « extrémités »), ce qui concorde avec la nette diminution des amplitudes thermiques annuelles absolues. Une fois de plus, le site #17 a fait exception (une classe de plus en 2003-04).

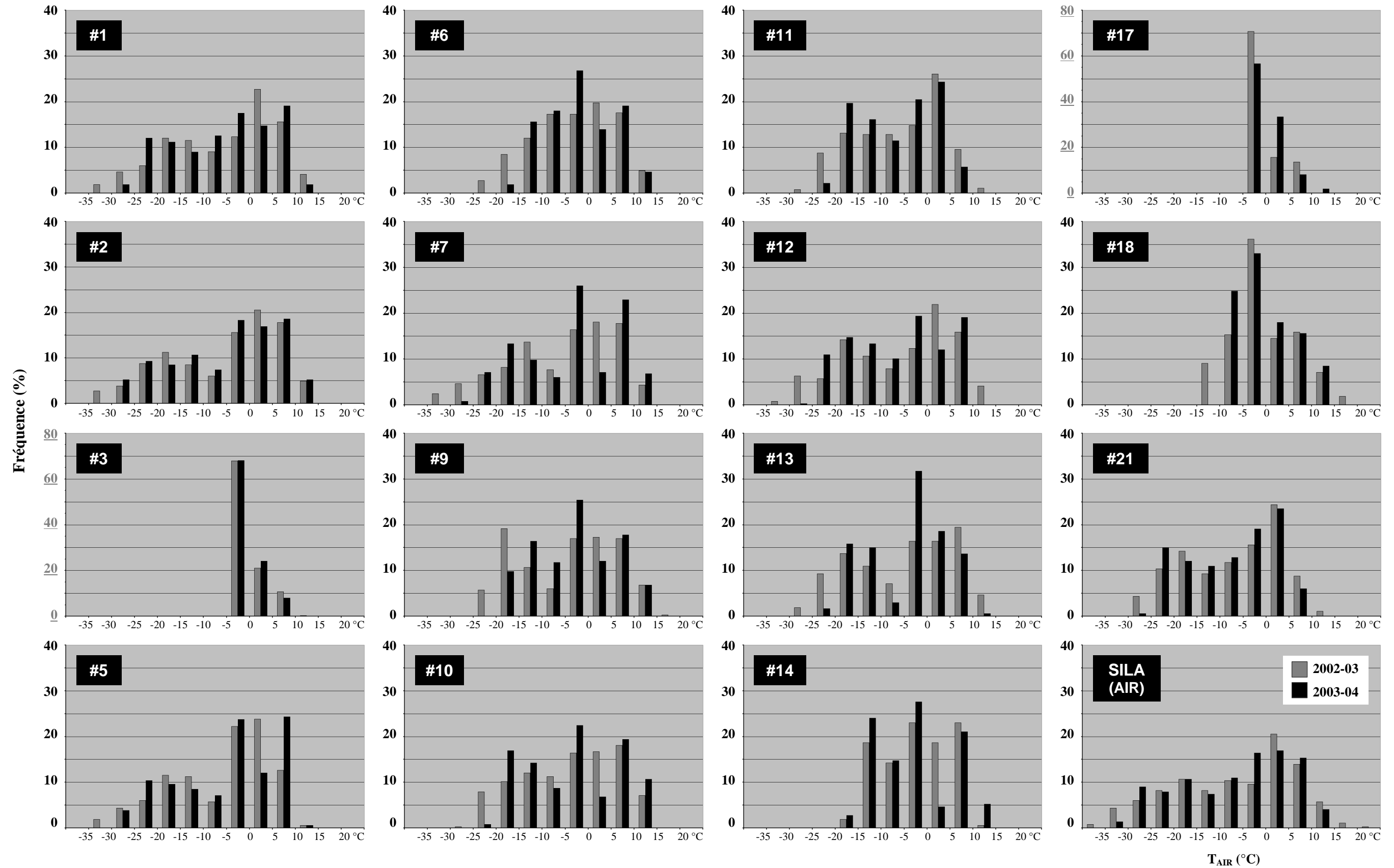


Figure 30 : Histogrammes de fréquences de température de surface, sites microclimatiques.

Par ailleurs, quelques sites ont montré une distribution bi-modale semblable à celle des températures dans l'air (double cloche montrant distinctement les deux « saisons thermiques ») : #1 (sol fissuré), #2 (plateau argileux), #11 (école), #12 (colluvions) et #21 (maison). D'autres sites ont plutôt montré une distribution uni-modale (cloche simple) : #6 (dans le glissement) et #18 (bord de route). La tendance a été moins claire pour les autres sites, sauf dans le cas des combes à neige (#3 et #17) : la distribution y a été très concentrée (>60%) au sein de la classe dominante (-5 à 0 °C). Ces cas d'exception seront étudiés plus en détail dans la sous-section 3.2.3 portant sur la variabilité en fonction des facteurs géographiques.

Quoi qu'il en soit des formes de distribution ou des classes dominantes, la majorité des sites partagent un autre aspect de ce qui avait été observé dans l'air : l'augmentation durant la deuxième année de mesure de la fréquence de la classe comprise entre -5 et 0 °C, de même que la diminution de la fréquence de la classe comprise entre 0 et 5 °C. Les sites #3, #13, #17 et #18 ont toutefois fait exception. Ces sites ont d'ailleurs eu des fréquences dominantes dépassant les 30% en 2003-04.

Il convient de préciser ces résultats par l'analyse attentive des statistiques mensuelles. Les courbes des températures moyennes et des extrêmes mensuels (Figure 31) montrent d'abord des comportements comparables, en général, à ce qui avait été enregistré dans l'air. En effet, les réchauffements en 2003-04 des mois de décembre, février et mars, de même que les refroidissements des mois de janvier, mai et août ont été enregistrés à la plupart des sites. Ces tendances ont toutefois été nettement moins marquées à la surface du sol que dans l'air, comme en témoignent les courbes plus rapprochées. Ces résultats se répercutent directement dans le comportement des amplitudes mensuelles absolues (Figure 32).

Les combes à neige (#3 et #17) ont par contre montré des comportements très différents. D'abord, les courbes elles-mêmes ont des allures particulières, surtout durant les mois d'hiver où la variabilité est presque nulle et les courbes concentrées près du point de congélation (effet isolant et régulateur de la neige). De plus, les tendances estivales se redressent abruptement à partir des mois de mai (#3) et juin (#17), soit lors des premiers dégels. À ce titre, l'allure des courbes au site #17, surtout en 2003-04, est particulièrement évocatrice.

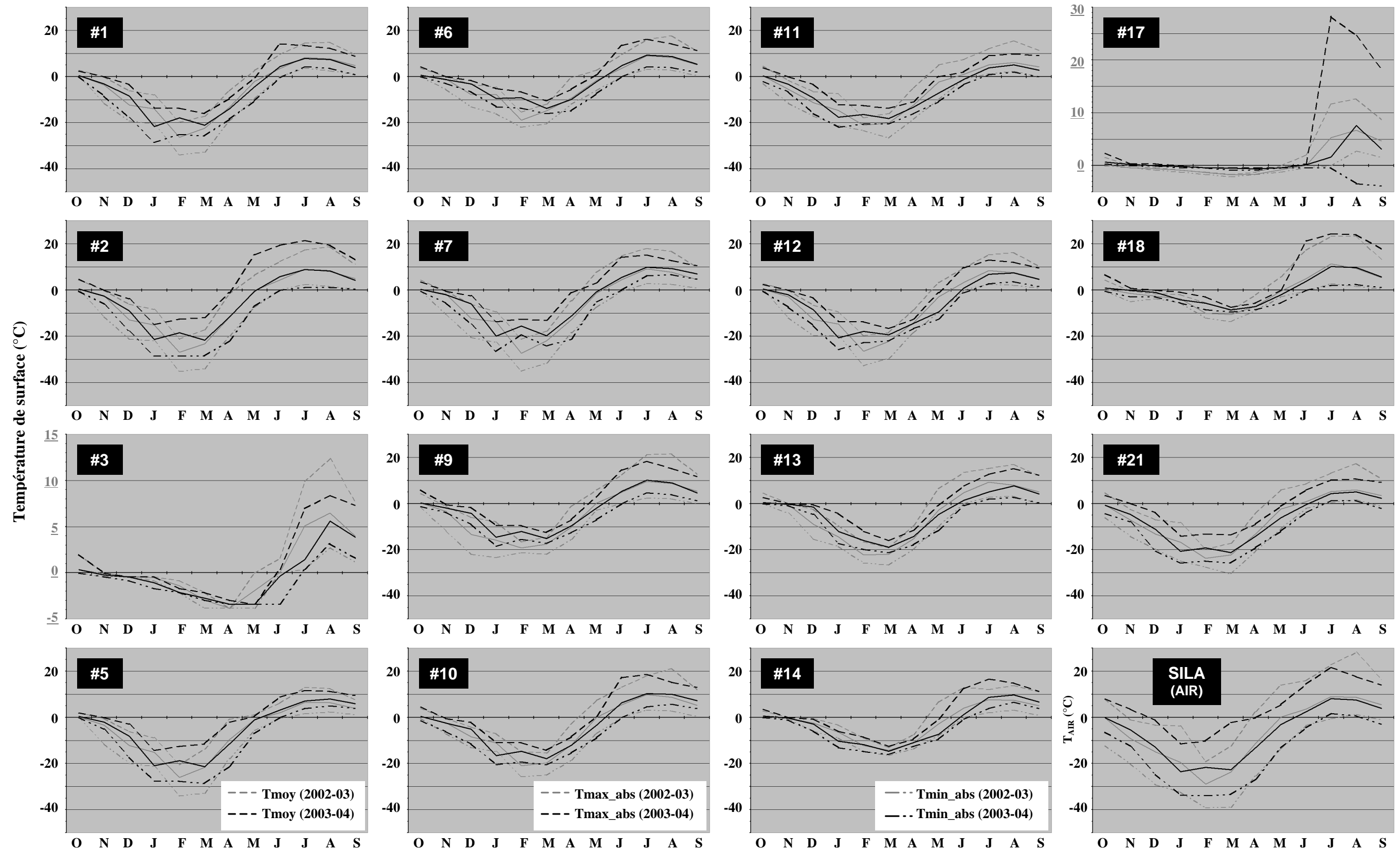


Figure 31 : Températures moyennes et extrêmes mensuelles en surface, sites microclimatiques.

Dans l'ensemble, les courbes des maxima absolus n'ont que rarement dépassé la barre des 20 °C. Seuls les sites #2 (2003-04), #9 (2002-03), #10 (2002-03), #17 (2003-04) et #18 (2 années) ont enregistré de telles températures. En ce qui concerne les minima absolus, ils ont été plus bas en 2002-03 et ce, partout sauf au site #17. Le minimum absolu, pour toute l'année 2003-04 (près de -4 °C), y a d'ailleurs été atteint à la fin de l'été (septembre) et non durant l'hiver comme l'année précédente ou comme aux autres sites.

Ces résultats sont complémentaires aux comportements des amplitudes mensuelles absolues (Figure 32). Les valeurs sont d'abord nettement inférieures dans la plupart des sites à celles obtenues dans l'air (SILA), ce qui témoigne de la diminution rapide du signal thermique à mesure qu'il se propage dans le sol. Les sites #2, #17 et #18 montrent toutefois des valeurs significativement plus élevées qu'ailleurs, surtout en été dans le cas des sites #17 et #18. Par ailleurs, certains sites recouverts de neige (#3, #14, #17 et #18) montrent des amplitudes hivernales réduites, surtout dans les combes à neige (#3 et #17).

Si les amplitudes *annuelles* absolues ont montré, sauf exceptions, une diminution générale en 2003-04, les résultats mensuels ont été légèrement plus nuancés. La majorité des sites ont vu leur amplitude mensuelle diminuer pour 8 à 10 mois durant l'année (10 mois pour SILA). Par contre, pour certains sites, cette diminution n'a affecté que la moitié des mois de l'année ou moins : #2 (3 mois), #3 (6 mois), #5 (6 mois), #14 (6 mois), #17 (6 mois) et #18 (6 mois).

En somme, la variabilité des données de températures a montré dans l'ensemble une légère diminution en 2003-04. Cette tendance s'est illustrée par un écart moins prononcé entre les extrêmes et une distribution plus concentrée des températures (fréquences relatives). Par ailleurs, une majorité de sites ont vu leur moyenne annuelle augmenter légèrement et ont enregistré des tendances mensuelles comparables à celles obtenues dans l'air : réchauffement aux mois de décembre, février et mars; refroidissement aux mois de janvier, mai et août.

Par contre, les sites recouverts de neige, en particulier les combes à neige (#3 et #17), ont montré des comportements très différents : des températures moyennes annuelles près de 0°C; une distribution (fréquences relatives) des températures très concentrée; des minima hivernaux très doux; des amplitudes thermiques hivernales très faibles.

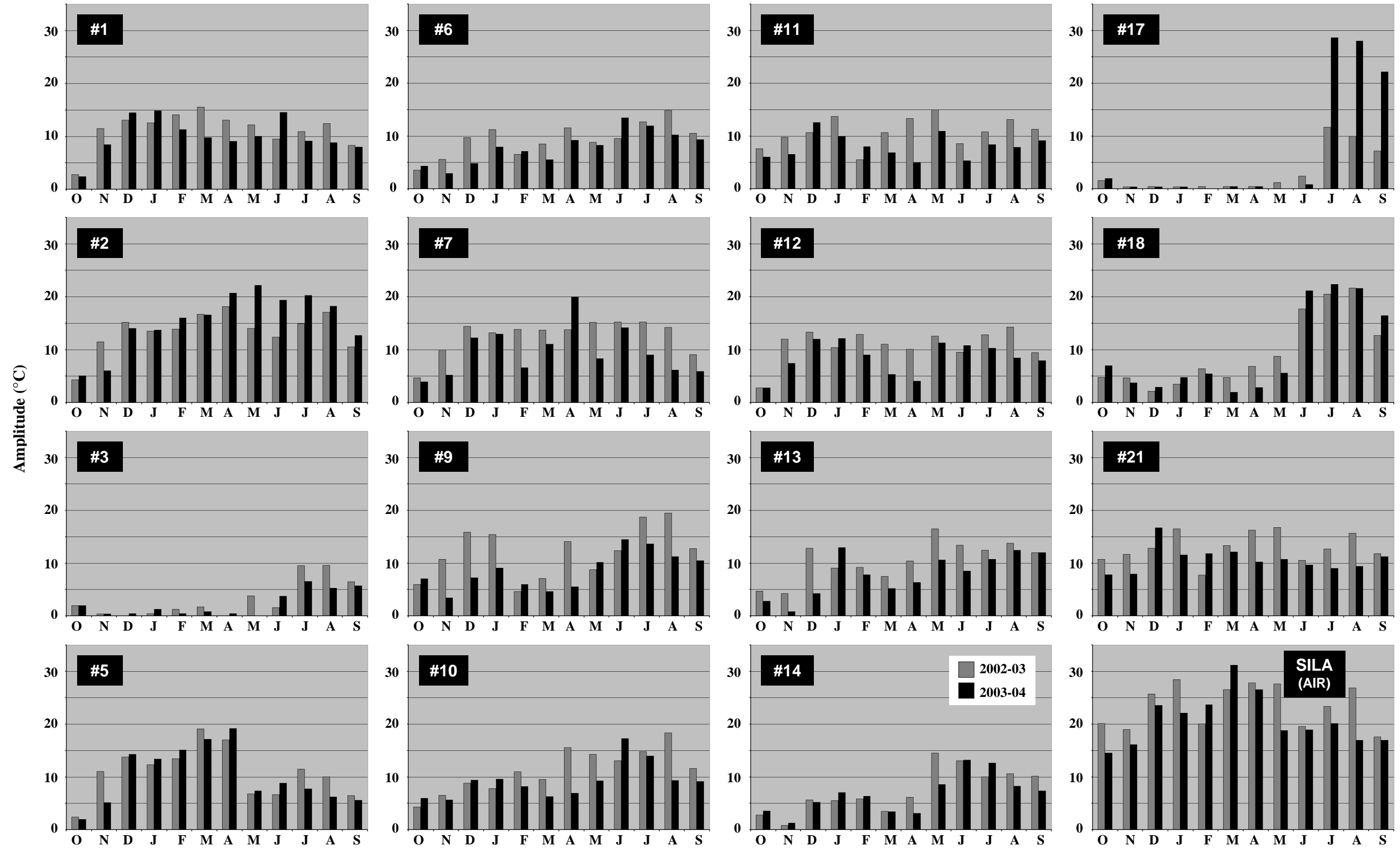


Figure 32 : Amplitudes mensuelles absolues, sites microclimatiques.

3.2.2 Indices thermiques

Les statistiques mensuelles des températures ont montré une nette différence entre les résultats hivernaux et estivaux. Ces résultats méritent d'être approfondis par les calculs d'indices thermiques saisonniers. Une première analyse de la durée des saisons de gel et de dégel est d'abord nécessaire (Figure 33). Ces résultats proviennent des données quotidiennes de température à chaque site.

Dans la majorité des cas, les saisons de gel et de dégel ont montré des comportements comparables à celles observées pour l'air (SILA). En 2002-03, le gel a affecté le sol un peu moins de 60% du temps (entre 210 et 220 jours), et le dégel un peu plus de 40% (environ 150 jours). Les comportements ont été plus variables d'un site à l'autre pour l'année 2003-04. Mais en général, la saison de gel (hiver 2003-04) y a été plus longue, et la saison de dégel (été 2004) plus courte et nettement plus tardive (au moins deux semaines de retard par rapport à l'année précédente). Ces résultats sont semblables à ce qui avait été observé aux trois stations topoclimatiques.

Quelques sites ont toutefois fait exception. D'abord, les sites localisés sous les bâtiments (#11-école et #21-maison) ont vu leur saison de gel prolongée de plusieurs jours par rapport à la moyenne. Le gel y a d'ailleurs affecté le sol durant près de 65% du temps en 2002-03 et 70% du temps en 2003-04. Par conséquent, le nombre de jours de dégel y a été beaucoup moins élevé qu'ailleurs. Ces sites ne sont pas recouverts de neige durant l'hiver et sont à l'abri du rayonnement solaire direct durant toute l'année. Le site #4 (glissement), plus profond dans le sol (25 cm), a montré une tendance semblable.

Les combes à neige (#3 et #17) ont aussi montré des comportements différents. Le nombre de jours de gel y a été plus élevé qu'ailleurs (plus de 65% du temps), ce qui a retardé le début de la saison de dégel. En effet, la température y est demeurée sous le point de congélation tant qu'il y restait une couverture de neige, soit jusqu'en juin ou juillet. Le site #17 a par ailleurs subi un net changement de comportement durant la deuxième année de mesure : la saison de gel y a été beaucoup plus courte (plus de 50 jours de moins) et tardive, ce qui a favorisé le nombre élevé de jours de dégel (près de 160 jours, soit plus que partout ailleurs). Le site #18 (bord de route) a également connu un tel changement, mais de façon plus modeste.

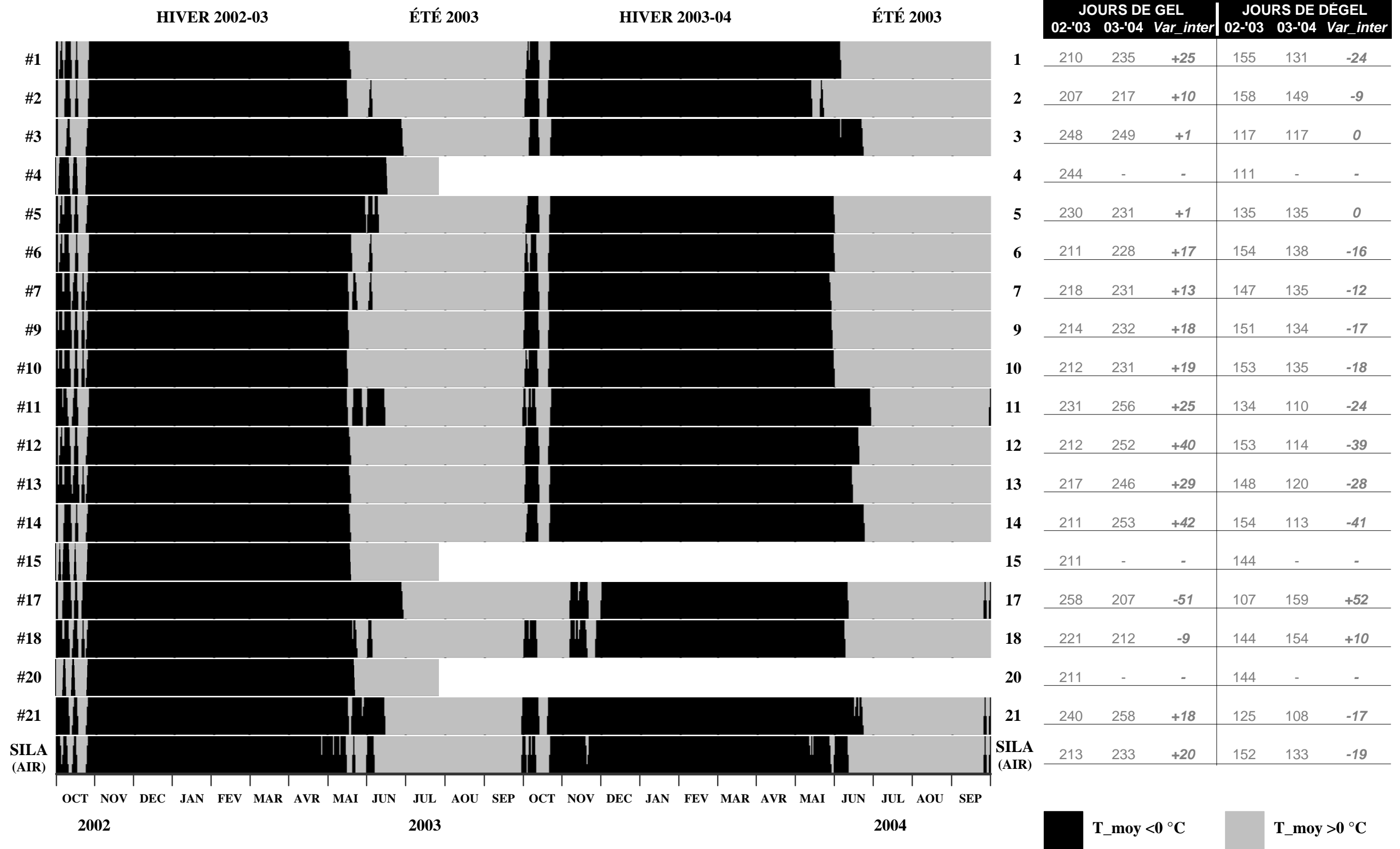


Figure 33 : Jours de gel et de dégel au sol (octobre 2002 – septembre 2004), sites microclimatiques.

Il importe de mettre ces résultats en relation avec les indices annuels – ou degrés-jours – de gel et de dégel (Figure 34, histogramme du haut). Sauf exceptions, l'indice de gel a diminué en 2003-04, surtout aux sites #6 (glissement), #7 (plateau), #9 (plage) et #13 (colluvions). La tendance de l'indice de dégel a par contre été plus variable : il a diminué dans près de la moitié des cas et augmenté dans l'autre moitié. Le site #6 (glissement) a d'ailleurs vu doubler son indice de dégel en 2003-04 (de 400 à plus de 800 degrés-jours).

Par conséquent, le rapport entre l'indice de gel et l'indice de dégel (Figure 34, histogramme du bas) est apparu très variable d'un site à l'autre et d'une année à l'autre. En général, ce rapport a diminué significativement aux sites où l'indice de dégel avait augmenté (ex : #5, #6, #7 et #10), alors qu'il a connu une augmentation là où l'indice de dégel avait diminué (ex : #11, #12, #13 et #21).

Encore une fois, certains sites se sont systématiquement démarqués. Les sites localisés sous les bâtiments (#11 et #21) ont montré un rapport « gel/dégel » nettement supérieur aux autres sites et même beaucoup plus élevé que celui observé dans l'air. Ces résultats découlent directement d'un indice de gel élevé (2500 à 3000 degrés-jours) et d'un indice de dégel plutôt faible (inférieur à 500 degrés-jours). Ce rapport a d'ailleurs augmenté considérablement en 2003-04, grâce à la diminution de l'indice de dégel. L'écart avec les résultats obtenus dans l'air s'est d'ailleurs fortement creusé. Le site #4 (25 cm de profondeur) a aussi enregistré un rapport très élevé.

Par contre, les combes à neige ont montré un rapport « gel/dégel » très faible (1 et moins). En effet, malgré une saison de gel plus longue, ces sites n'ont accumulé que peu de degrés-jours de gel (quelques centaines de degrés-jours). Par conséquent, même avec un faible indice de dégel provoqué par une courte saison estivale, l'accumulation de chaleur y a été égale ou supérieure à l'accumulation de froid, surtout au site #17. Le bord de route (#18) a aussi obtenu de faibles rapports durant les deux années de mesure, mais avec des indices plus élevés (près de 1000 degrés-jours).

En somme, les conditions d'enneigement et d'ensoleillement (rayonnement solaire direct) ont joué un rôle déterminant dans le bilan thermique des surfaces.

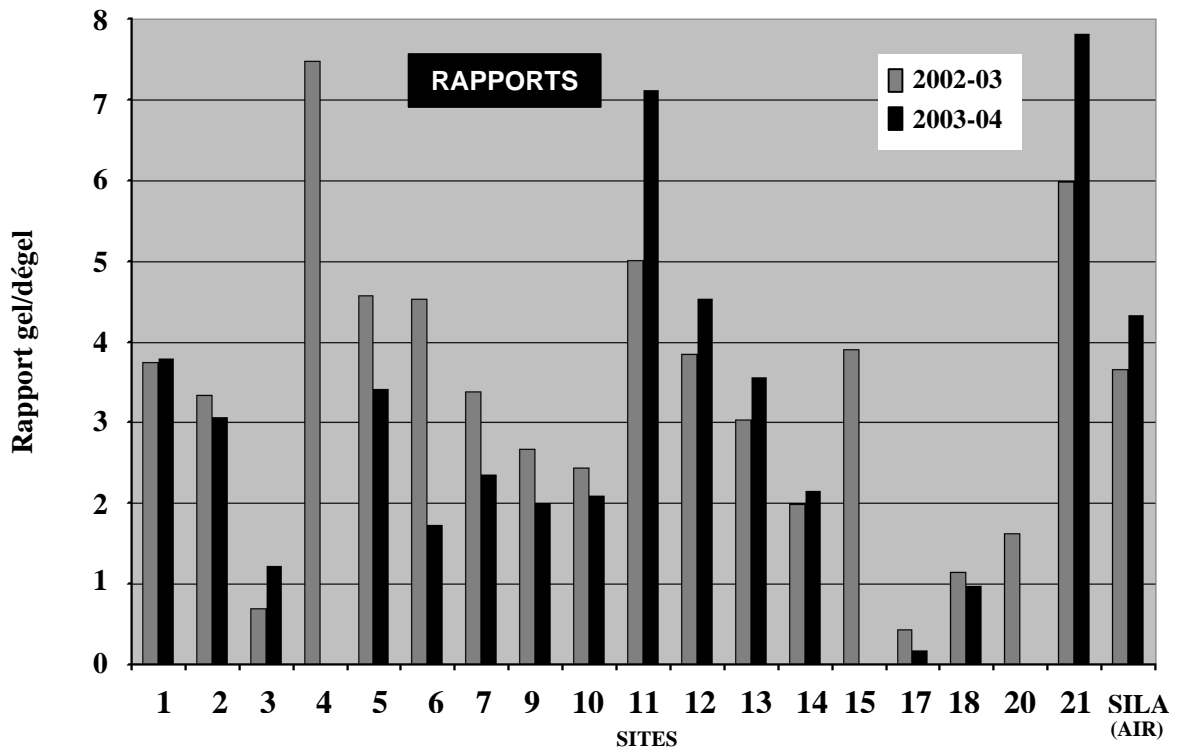
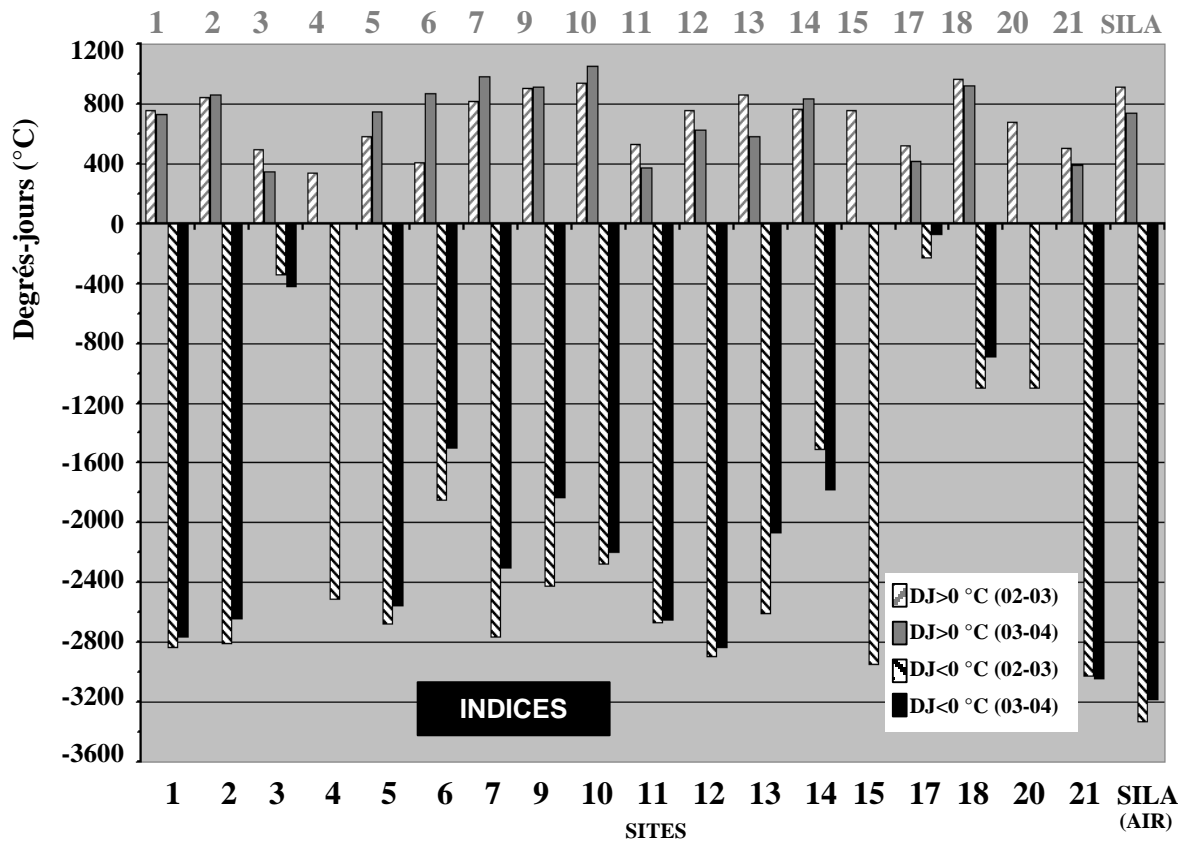


Figure 34 : Indices et rapports de gel et de dégel au sol, sites microclimatiques.

Afin de quantifier plus précisément l'importance du transfert de chaleur ou de froid à la surface du sol, les « facteurs-n » ont été calculés pour l'ensemble des sites (Figure 35). Il s'agit du rapport entre l'indice (gel ou dégel) à la surface du sol (5 cm) et l'indice (gel ou dégel) dans l'air. Ainsi, plus le résultat est près de 1, plus le transfert (chaleur ou froid) est efficace; à l'inverse, un résultat près de 0 témoigne d'une surface peu conductrice de chaleur ou de froid. Il est à préciser que puisque le facteur-n représente un rapport, ses variations inter-annuelles à un site particulier résultent soit d'un changement de la température du sol à cet endroit, soit d'un changement dans la température de l'air, soit des deux à la fois. L'analyse qui suit dépend donc de cette nuance importante.

Dans plus de la moitié des cas, le facteur-n de dégel a nettement augmenté durant la deuxième année de mesure. Il a même presque triplé au site #6 (glissement). De plus, le nombre de sites ayant enregistré des résultats au-dessus de 1 (donc une accumulation de chaleur supérieure à celle dans l'air) a fortement augmenté : il est passé de 2 (2002-03) à 8 (2003-04). Le site #10 (village) a même enregistré une valeur au-dessus de 1,4 en 2003-04.

Par contre, les sites localisés sous les bâtiments (#11 et #21) et les combes à neige (#3 et #17) ont plutôt vu leurs facteurs-n de dégel diminuer légèrement. Ces valeurs sont d'ailleurs demeurées faibles durant les deux années de mesure (en-dessous de 0,6). Les deux sites localisés dans les colluvions (#12 et #13) ont également montré des comportements différents : alors que le facteur-n n'a que très peu augmenté au site #12, il a diminué de plus de 15% au site #13.

Les facteurs-n de gel sont toutefois demeurés plus réguliers d'une année à l'autre. Si la plupart des sites ont capté plus de 60% du froid de l'air (facteur-n supérieur à 0,6), certains ont même enregistré des valeurs d'environ 90% (sites # 12, #13, #15 et #21). Par ailleurs, les sites recouverts de neige (ou d'eau) ont montré des tendances inverses : alors qu'environ 50% du froid de l'air s'est propagé à la surface des sites #6 (glissement) et #14 (versant de till), ce pourcentage est descendu à environ 30% pour les sites #18 (bord de route) et #20 (lit de rivière) et a chuté à 10% et moins pour les combes à neige (#3 et #17). En 2003-04, au site #17, à peine 2% du froid ambiant s'est propagé à la surface du sol.

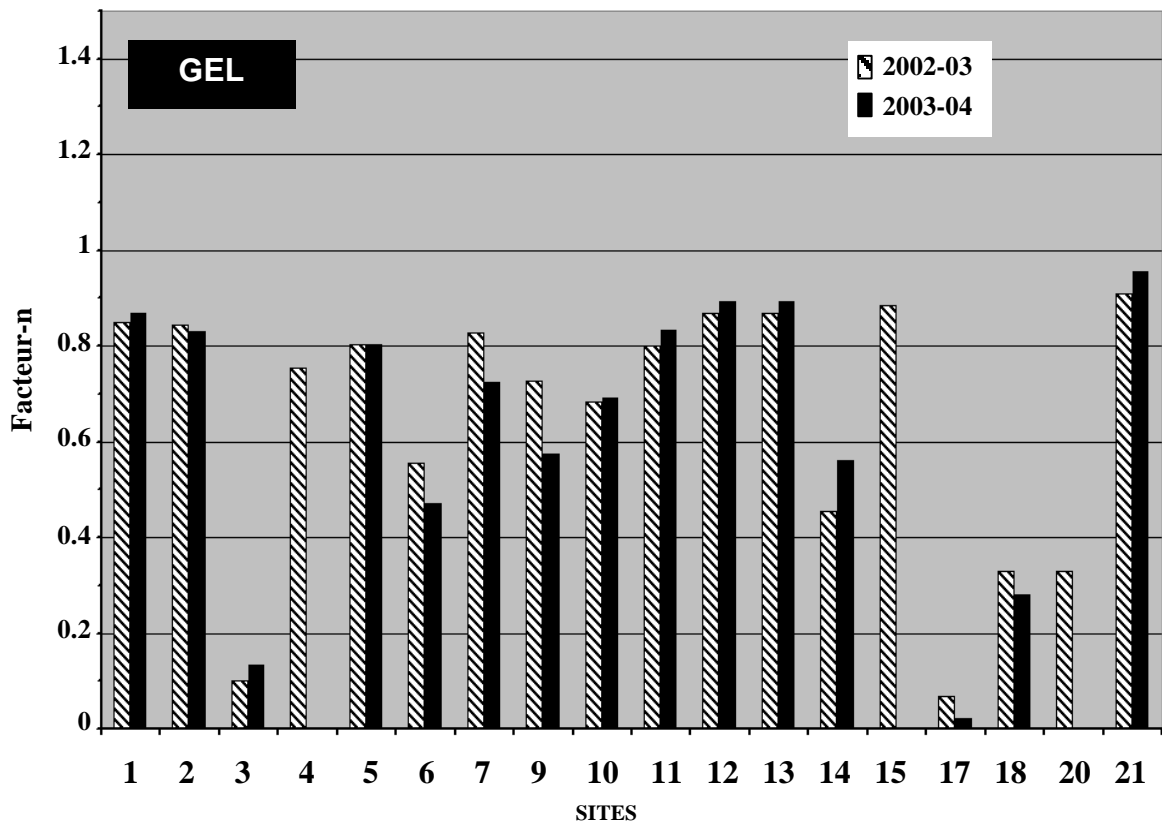
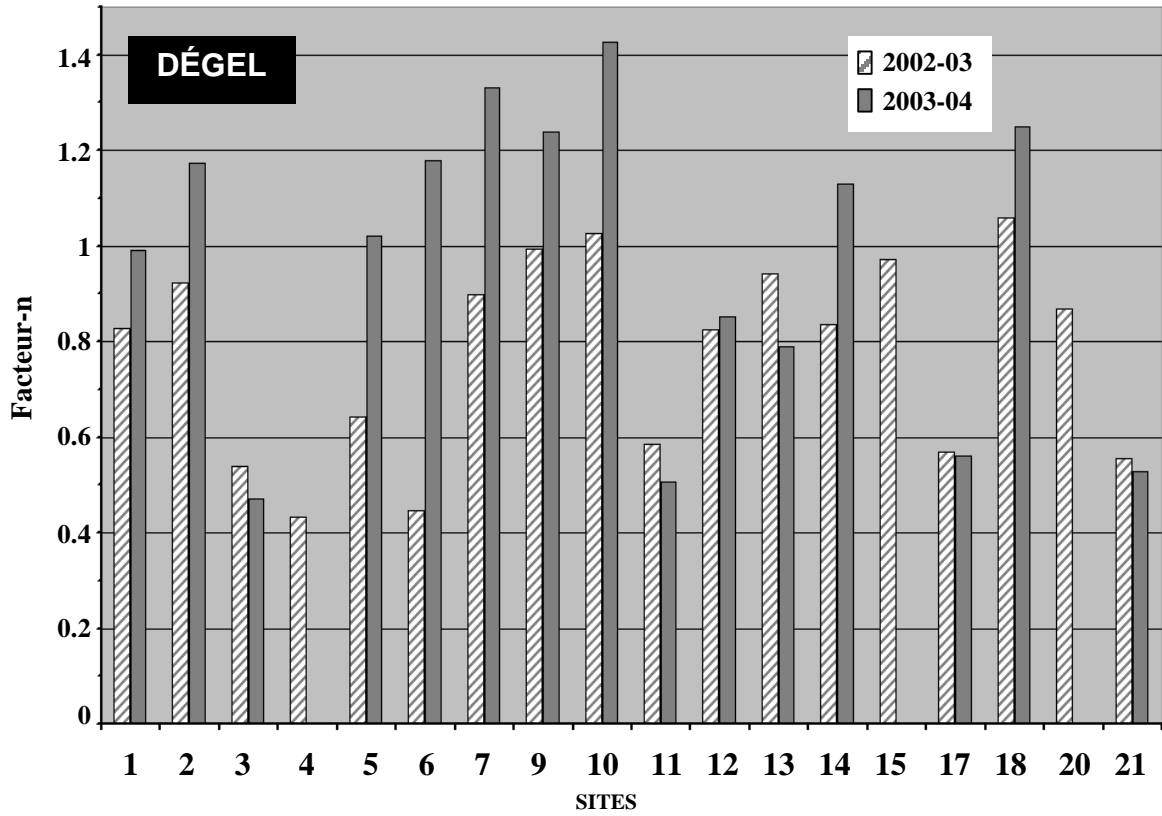


Figure 35 : Facteurs-n de gel et de dégel, sites microclimatiques.

Les résultats des températures et des indices thermiques peuvent être résumés ainsi :

- En général, le comportement thermique des surfaces a été comparable à celui enregistré dans l'air, mais de façon beaucoup moins prononcée. Ce « signal affaibli » a été observé dans les températures (moyennes, min-max et extrêmes), les amplitudes thermiques et les indices saisonniers de gel et de dégel.
- Dans la majorité des cas, la variabilité des données a diminué durant la deuxième année de mesure. Ce phénomène s'est traduit par des maxima plus faibles et des minima plus élevés (donc des amplitudes plus faibles), de même que par la réduction du nombre de classes de température.
- Les résultats saisonniers et mensuels ont généralement suivi la tendance observée dans l'air, mais plus modestement. D'une part, la saison de gel a été plus longue mais plus douce en 2003-04, ce qui s'est répercuté dans la diminution des indices de gel et dans le réchauffement des mois de décembre, février et mars. D'autre part, la saison de dégel a été plus courte et plus tardive, bien que la transmission de chaleur dans le sol ait été beaucoup plus efficace (facteurs-n de dégel plus élevés presque partout).
- Les combes à neige (sites #3 et #17) ont toutefois fait exception. Les températures moyennes y sont demeurées près de 0 °C durant la majeure partie de l'année et la variabilité thermique y a été nettement réduite, surtout en hiver. Par conséquent, les indices et les facteurs-n de gel y ont été très faibles.
- Les sites localisés sous les bâtiments (#11 et #21) ont également montré des comportements différents. L'absence de neige et la protection contre le rayonnement solaire direct y ont favorisé un indice de gel plus élevé et un indice de dégel plus faible qu'ailleurs, de même qu'une température moyenne annuelle près de celle de l'air.
- La présence de neige et la proximité d'infrastructures semblent être des facteurs déterminants dans le comportement thermique des surfaces, surtout en ce qui concerne l'accumulation saisonnière de chaleur et de froid (Figure 36). Or ils ne sont pas les seuls à avoir un impact sur le climat de surface, c'est pourquoi une analyse plus approfondie des facteurs géographiques est nécessaire (sous-section suivante).

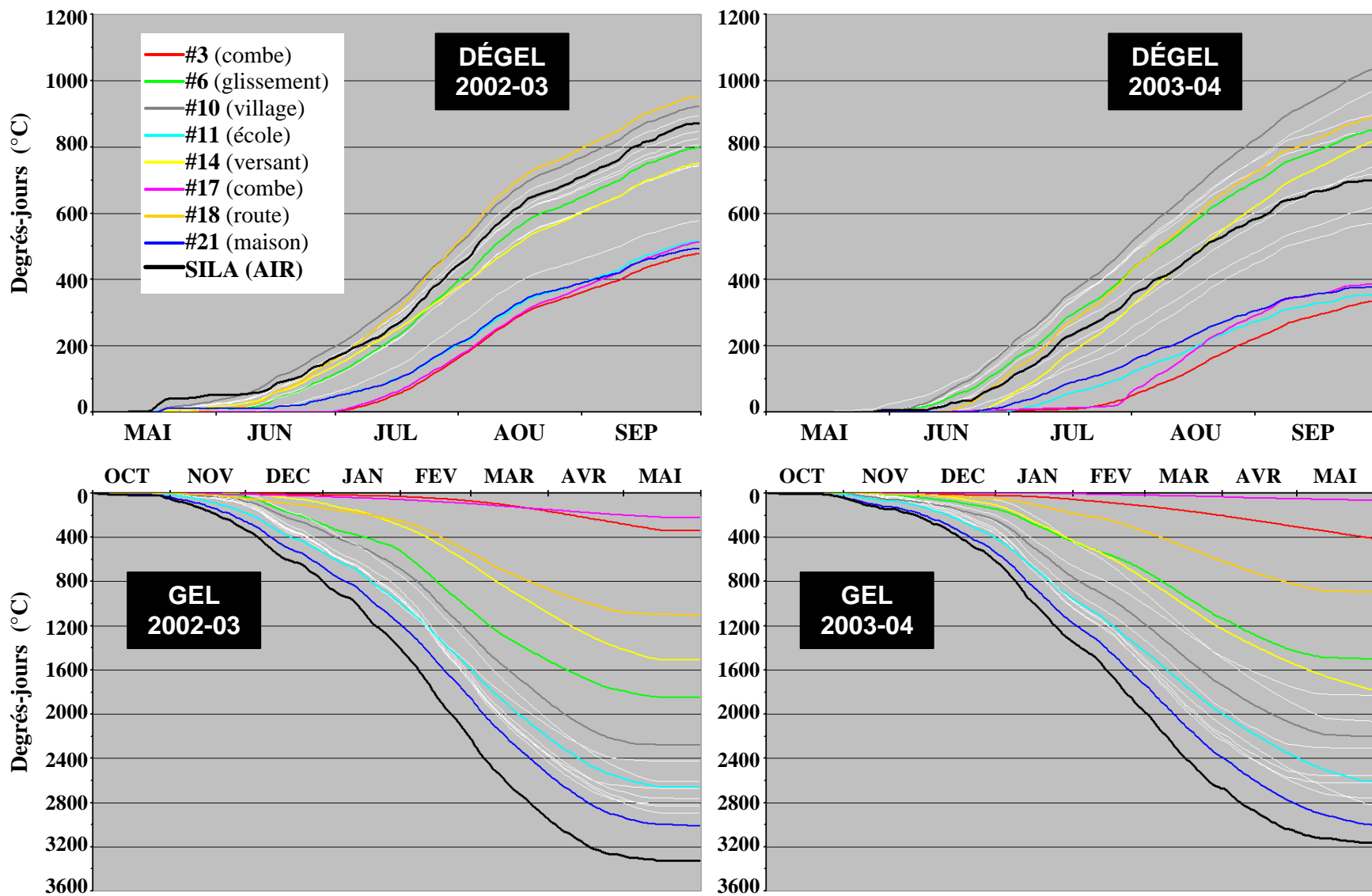


Figure 36 : Degrés-jours cumulatifs de gel et de dégel, sites microclimatiques.

3.2.3 Variabilité microclimatique en fonction des facteurs géographiques

L'analyse des deux dernières sous-sections concernant les environnements microclimatiques a démontré l'hétérogénéité thermique des différentes surfaces de la vallée. Les facteurs géographiques jouent donc un rôle déterminant dans le comportement des températures, ce qui se répercute dans celui des indices de gel ou de dégel au sol. Ces résultats sont précisés dans la prochaine partie, en mettant l'accent sur chacun de ces facteurs pris séparément.

Couvert de neige

L'effet isolant et régulateur du couvert nival demeure de loin le facteur qui influence le plus le bilan thermique de la surface du sol. Cet effet, quoique saisonnier, se manifeste durant une majeure partie de l'année, même lorsque les précipitations ne tombent plus sous forme de neige. Durant la fonte, l'importante quantité d'humidité produite continue d'affecter le comportement thermique de la surface.

Par ailleurs, l'épaisseur et la densité de neige sont largement contrôlées par l'exposition du site aux vents dominants qui érodent et compactent la couverture de neige. Ainsi, à épaisseurs égales, un couvert nival fraîchement tombé (densité faible) devrait isoler beaucoup plus efficacement qu'un couvert nival compact (densité élevée).

Les sites #3 et #17 (combes à neige) avaient été choisis en fonction de leur topographie (Figure 37) : des dépressions localisées à l'abri des vents dominants. Comme l'ont montré les relevés de l'hiver 2003, ces sites ont accumulé une épaisseur de neige dépassant les 50 centimètres. Cette situation s'est répercutée directement dans le comportement des températures et des indices thermiques à la surface du sol, nettement différents de ceux observés aux autres sites.

Cette différence est d'ailleurs évidente sur les histogrammes de fréquences de température (Figure 30). En effet, durant les deux années de mesure, la majeure partie des températures mesurées (60% et plus) se situe au sein de quelques classes seulement. Une analyse plus précise a donc été effectuée en réduisant l'étendue des classes à 1 °C (Figure 38).



Figure 37 : Sites de combes à neige.

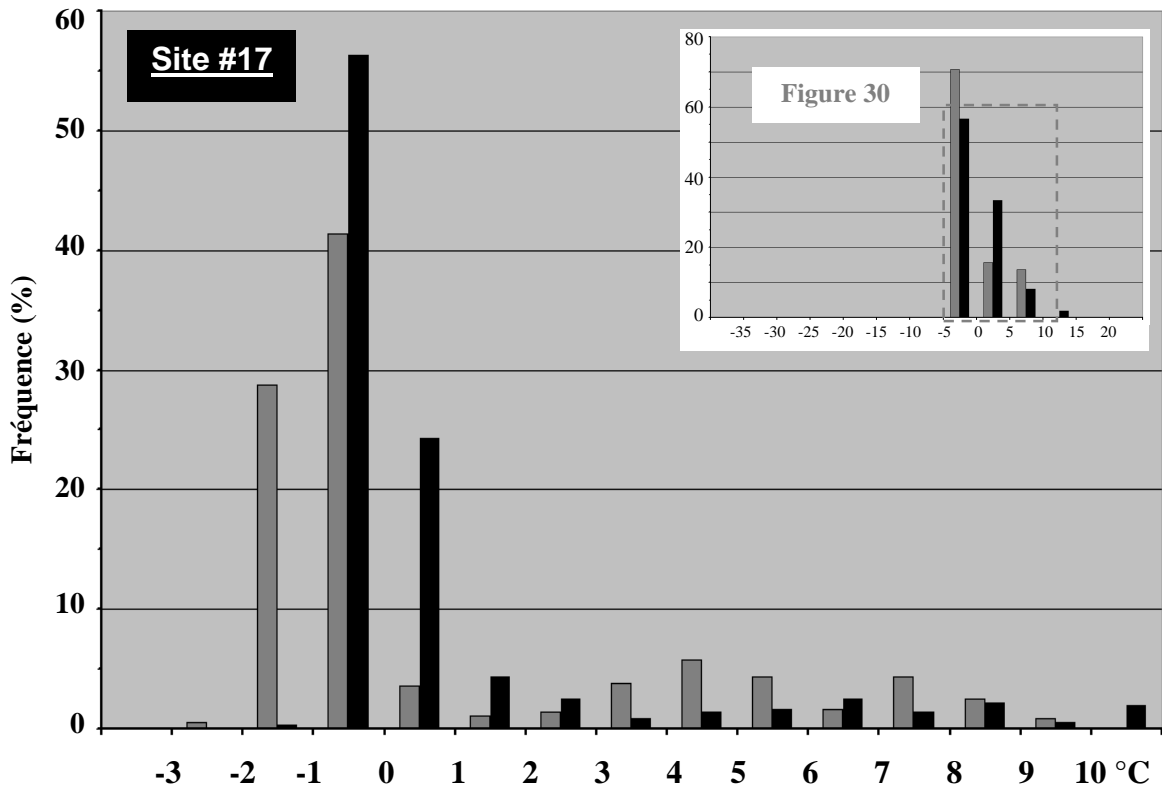
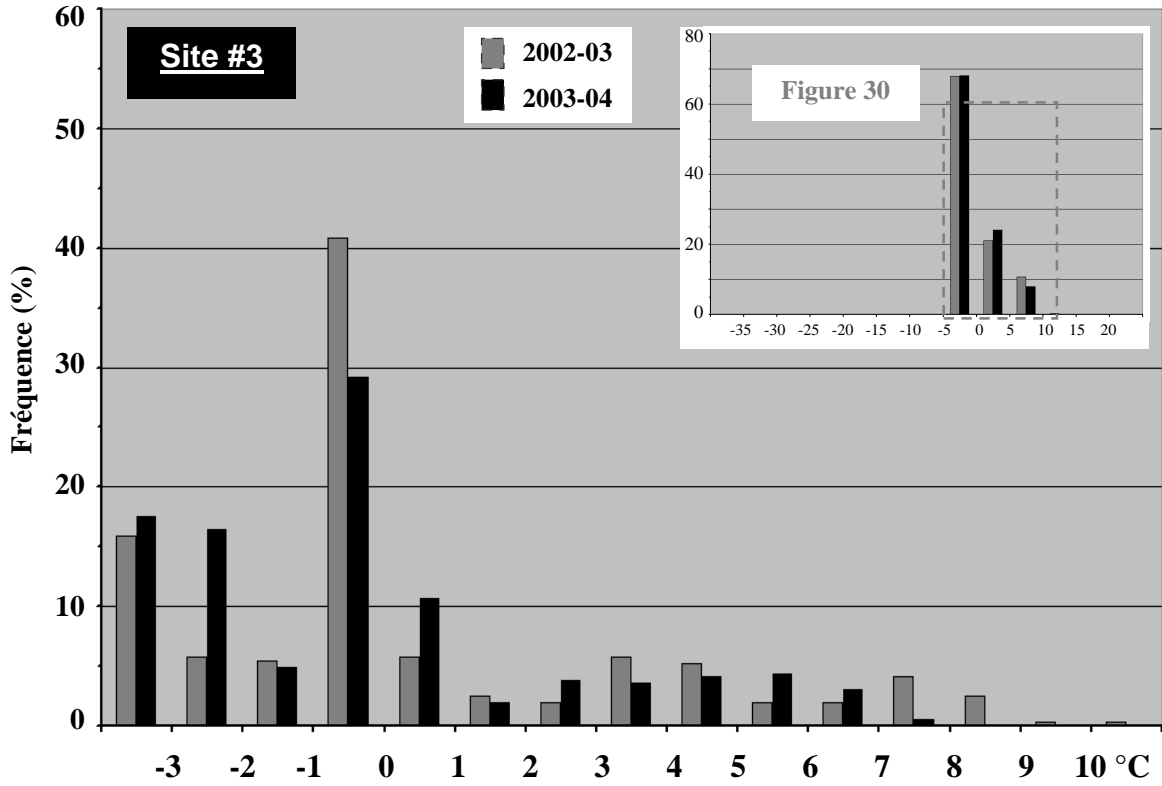


Figure 38 : Histogrammes de fréquence de température de surface, combes à neige.

Pour les deux sites, la classe comprise entre 0 et -1 °C a été la plus fréquente et ce, durant les deux années de mesure. Toutefois la tendance inter-annuelle de cette classe dominante n'a pas été la même d'un site à l'autre. D'une part, sa fréquence a diminué au site #3 (de 40 à 30%), ce qui a favorisé une distribution plus large au profit des classes avoisinantes, surtout celles en-dessous de 0 °C. D'autre part, elle a fortement augmenté au site #17 (de 40 à plus de 55%) et a été accompagnée d'un décalage des températures vers les classes situées près de 0 °C. Ces comportements opposés expliquent en grande partie les différences observées entre les deux sites dans les histogrammes de la Figure 30 : peu de variation au site #3 et forte augmentation de la classe comprise entre 0 et 5 °C au site #17.

Ces résultats peuvent être précisés grâce au comportement des températures quotidiennes et des indices thermiques mensuels aux deux sites (Figure 39). D'abord, l'impact de la neige sur les températures hivernales a été nettement perceptible, autant dans le tracé des courbes quotidiennes que dans les indices mensuels de gel. Cet effet a d'ailleurs été plus marqué au site #17, surtout à l'hiver 2003-04. Or l'effet isolant de la neige n'est pas demeuré uniforme durant toute la saison de gel. Comme le montrent les facteurs-n mensuels de gel, cet effet est apparu plus marqué en début de saison, alors que la neige était peu compactée et que le froid n'était que très faiblement transmis à la surface du sol. En fin de saison (mai-juin), le couvert neigeux était par contre plus mince et moins isolant (neige plus compacte) et le froid a pénétré plus efficacement dans le sol (facteurs-n graduellement plus élevés). Encore une fois, la saison de gel très douce (2003-04) du site #17 est à noter.

La fonte complète de la neige, aux mois de juin et juillet, a amorcé un changement notable dans le comportement des températures. Après avoir stagné pendant plus d'une quarantaine de jours près du point de fusion, les températures ont rapidement augmenté et ont été affectées de variations thermiques comparables (quoique moins marquées) à celles enregistrées dans l'air. Les indices de dégel des mois d'août et septembre ont d'ailleurs rapidement atteint des sommets annuels (de 100 à 200 degrés-jours), ce qui s'est traduit dans des facteurs-n de dégel près de 1. Ainsi, la chaleur estivale a été efficacement transmise, durant ces mois, à la surface du sol. L'allure de la courbe des températures quotidiennes au site #17 durant les mois d'août et septembre 2004 illustre cette tendance de façon très marquée (Figure 39).

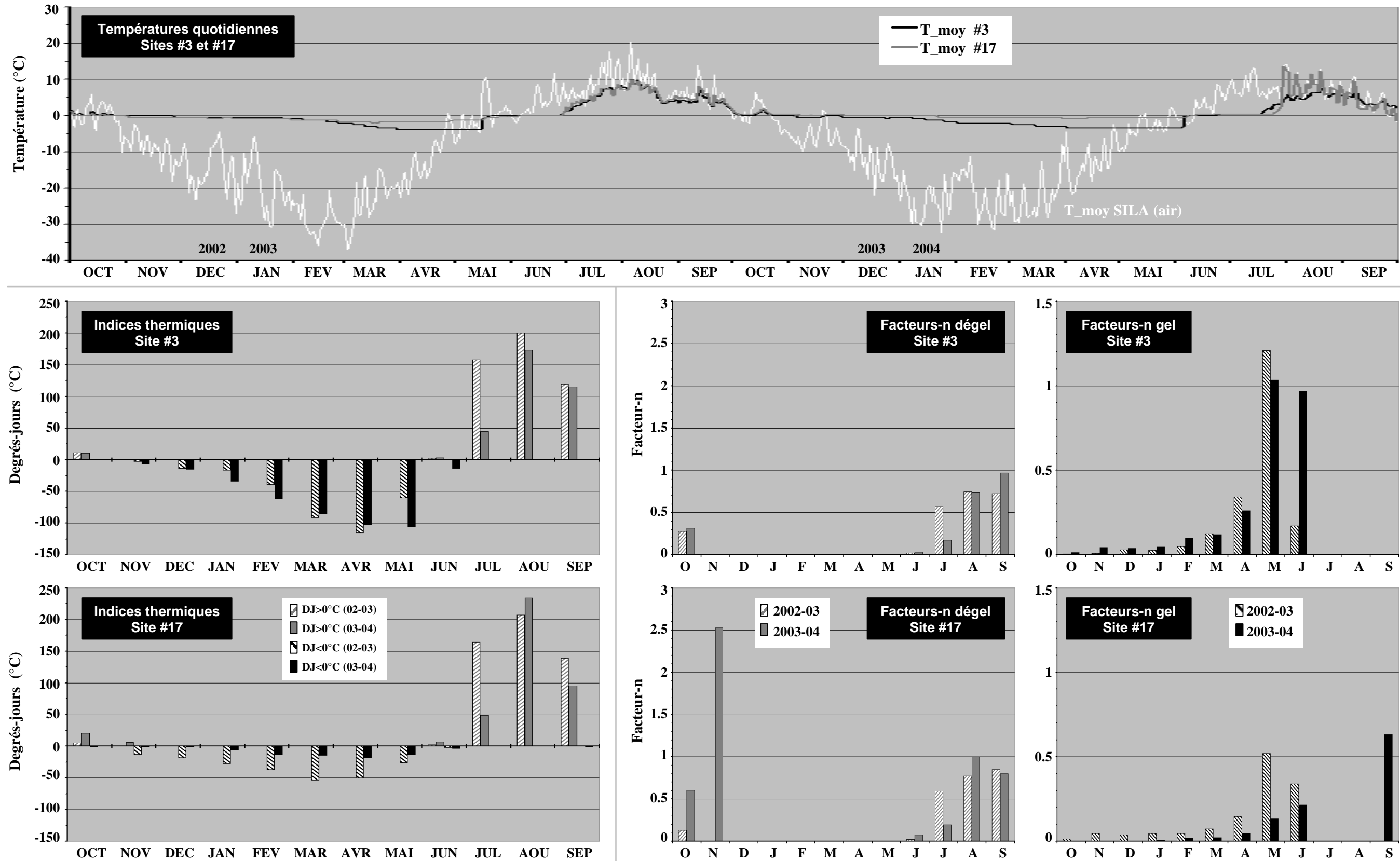


Figure 39 : Températures quotidiennes et indices thermiques mensuels au sol, combes à neige.

Les précédents résultats illustrent donc l'impact considérable de la couverture de neige sur les températures au sol. Les degrés-jours cumulatifs de gel à chacun des sites (Figure 36) semblent même suggérer que cet impact est quasi-proportionnel à l'épaisseur de neige accumulée en surface : alors que les combes à neige (#3 et #17) ont enregistré les plus faibles valeurs, les sites localisés sous les bâtiments (#11 et #21) ont enregistré de très fortes valeurs et les autres sites recouverts de neige (#6, #14 et #18) ont montré des comportements intermédiaires. Il est donc apparu pertinent d'évaluer la relation entre la température moyenne annuelle au sol et l'épaisseur de neige en tenant compte de sa densité (Figure 40).

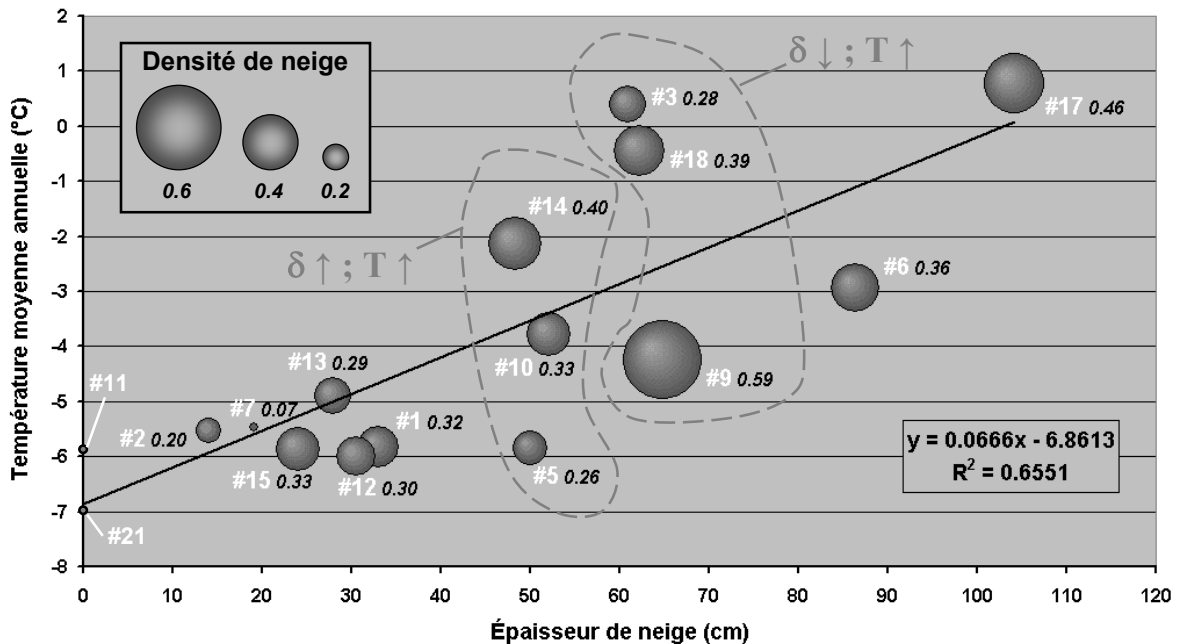


Figure 40: Température moyenne annuelle au sol (2002-03) et couvert de neige (mars 2003), sites microclimatiques.

Il existe une corrélation entre la température moyenne annuelle et l'épaisseur de neige, comme le montre le coefficient de détermination R^2 de 0,655. La droite de régression linéaire simple a une ordonnée à l'origine de $-6,9\text{ °C}$ pour un couvert nival absent, soit une valeur comparable à la température enregistrée dans l'air ($-6,8\text{ °C}$) ou au site #21 ($-7,0\text{ °C}$) où l'épaisseur de neige était nulle. La pente de cette droite correspond à une augmentation de la température moyenne annuelle d'environ deux tiers de degré ($0,67\text{ °C}$) par décimètre de neige accumulée.

La densité de la neige, représentée par la taille des bulles sur le graphique de la Figure 40, varie entre 0,3 et 0,4 pour la plupart des sites. En considérant le groupe formé par les sites #3-18-9 (groupe de droite), il semblerait que les écarts de température annuelle de part et d'autre de la droite « moyenne » soient inversement proportionnels à la densité. En effet, de la neige moins dense donc plus isolante (ex : site #3) contribuerait à maintenir la température annuelle de surface plus élevée, et inversement pour de la neige plus dense (ex : site #9).

Le groupe formé par les sites #14-10-5 (groupe de gauche) montre toutefois la tendance inverse : l'augmentation de la température de surface est plutôt accompagnée d'une augmentation de densité. Une autre caractéristique de la couverture de neige mérite ici d'être évoquée : son accumulation précoce à l'automne. À cette période de l'année, deux éléments peuvent contribuer à maintenir la surface du sol à une température plus élevée (Goodrich, 1982) : d'une part, la chaleur latente accumulée dans le sol durant l'été n'est pas encore entièrement libérée et d'autre part, les premières neiges de l'automne fraîchement tombées ont généralement une faible densité, donc un pouvoir isolant plus élevé.

Ce double effet semble observable dans le comportement des températures moyennes quotidiennes pour ces deux groupes (Figure 41). Durant la majeure partie de l'automne, les sites #3 (graphique du haut) et #14 (graphique du bas) ont vu leur température de surface demeurer près de 0 °C. Ce phénomène, vraisemblablement attribuable au dégagement de chaleur latente estivale et à la présence d'une couverture de neige fraîchement tombée, a eu un impact significatif sur le bilan thermique annuel. Dans le cas du site #18, ce double effet s'est additionné à des températures estivales sensiblement plus chaudes qu'ailleurs. Pour ces raisons, ces trois sites (#3, #14 et #18) se situent au-dessus de la droite de la Figure 40.

À l'inverse, il est fort probable qu'en raison de leur exposition face aux vents, les sites #9 (graphique du haut) et #5 (graphique du bas) aient vu leur couvert nival érodé ou compacté dès les premières neiges de l'automne. D'ailleurs, les variations thermiques hivernales y ont été nettement plus marquées et ce, dès le milieu de l'automne en novembre. Cela pourrait expliquer que ces sites se soient trouvés en-dessous de la droite de la Figure 40, peu importe la densité mesurée en mars 2003. La nature des sols (granulométrie, humidité, albédo) pourrait également avoir joué un rôle durant l'été, comme il en sera fait mention plus loin.

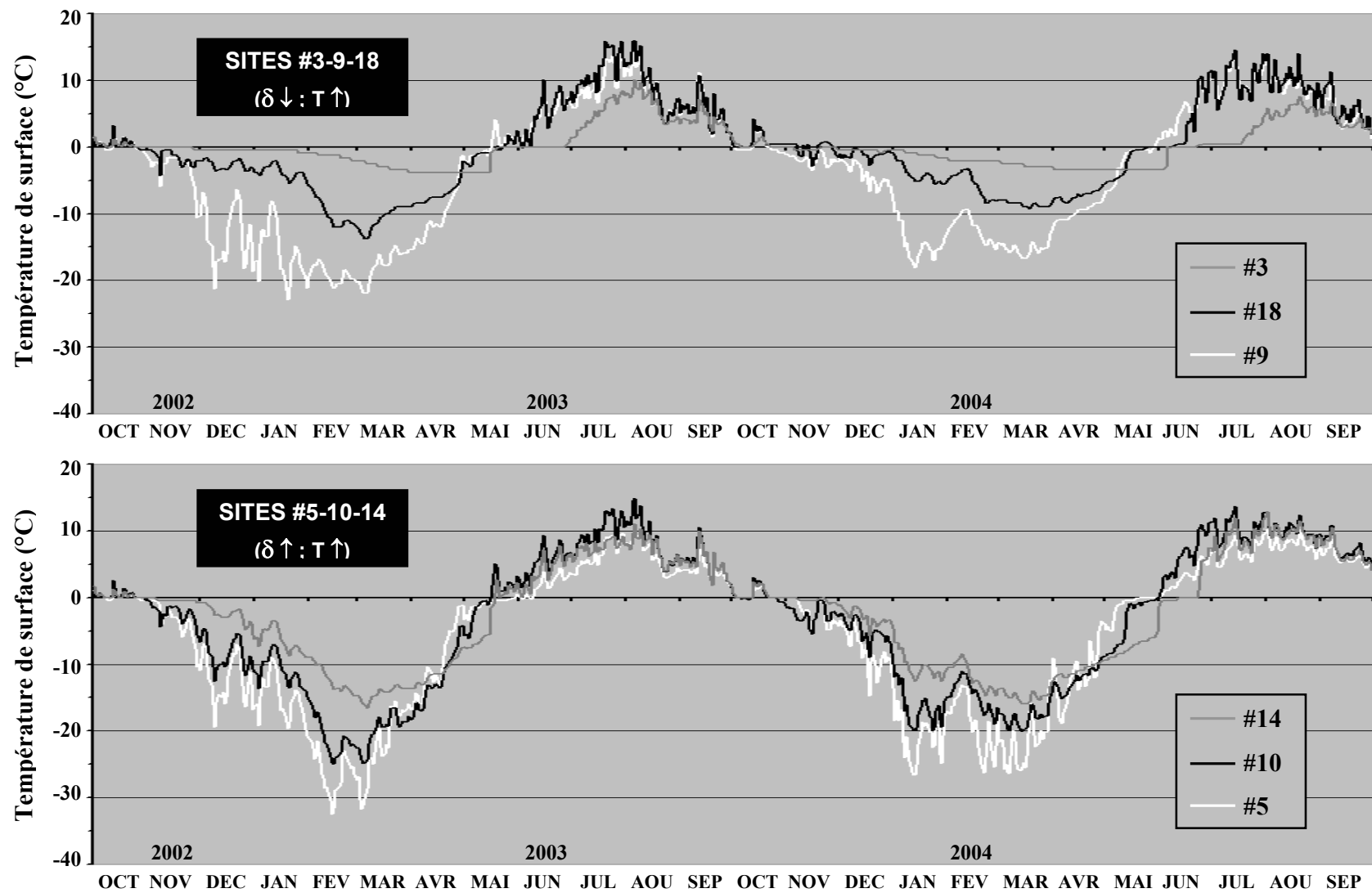


Figure 41 : Températures moyennes quotidiennes au sol pour deux groupes de sites microclimatiques.

Présence d'infrastructures

Si la neige a sans contredit affecté le bilan thermique de certaines surfaces, il en est allé tout autrement aux sites localisés sous les bâtiments (#11 et #21). La présence, l'orientation et la configuration de ces bâtiments déterminent leur performance thermique (Figure 42). D'abord, leur élévation à environ 1 mètre du sol permet la circulation et l'accélération d'air à la surface du sol (sous le bâtiment), ce qui empêche la formation d'un couvert nival durant l'hiver. En fait, la neige s'accumule contre la façade « sous le vent » des bâtisses (au nord). De plus, ces bâtiments protègent la surface du sol contre le rayonnement solaire direct, ce qui tempère fortement les températures estivales.



Figure 42: Sites localisés sous les bâtiments.

Ces impacts méritent ici d'être approfondis (Figure 43). Premièrement, les températures moyennes quotidiennes ont suivi de près la tendance observée dans l'air. Durant l'été, les courbes des deux sites se sont presque superposées alors que les températures hivernales ont été légèrement plus élevées sous l'école (site #11). En effet, les grandes dimensions du bâtiment et la présence d'une clôture de protection, tout autour à sa base, ont pu freiner partiellement les vents et provoquer le dépôt d'une mince couche de neige.

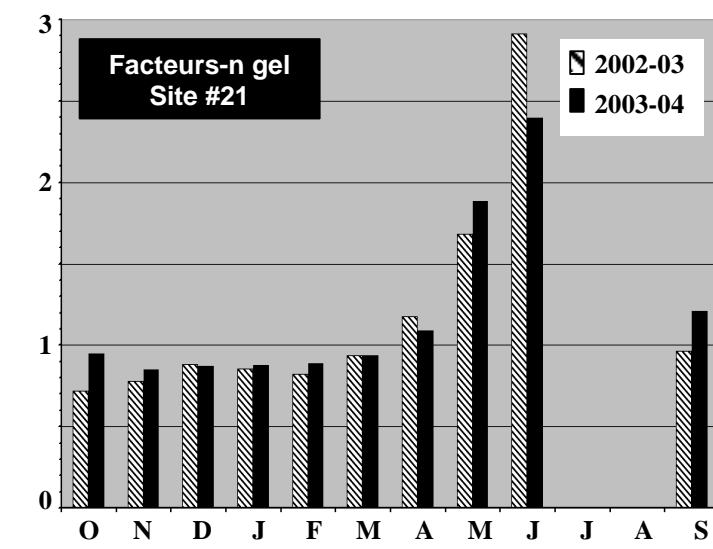
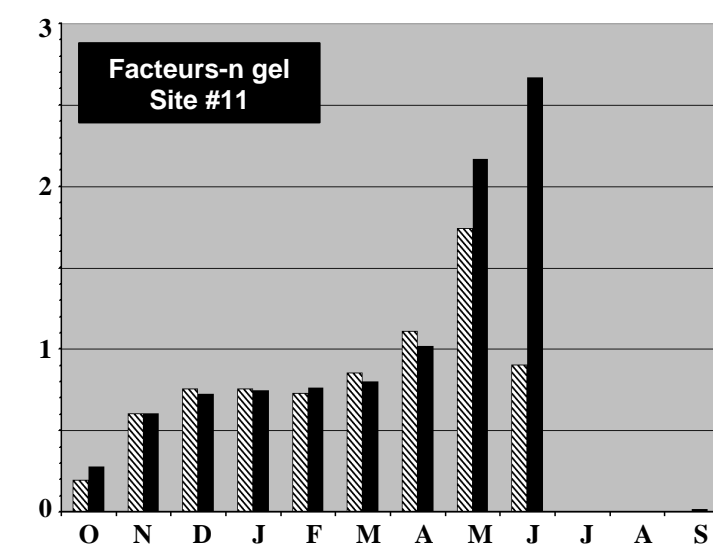
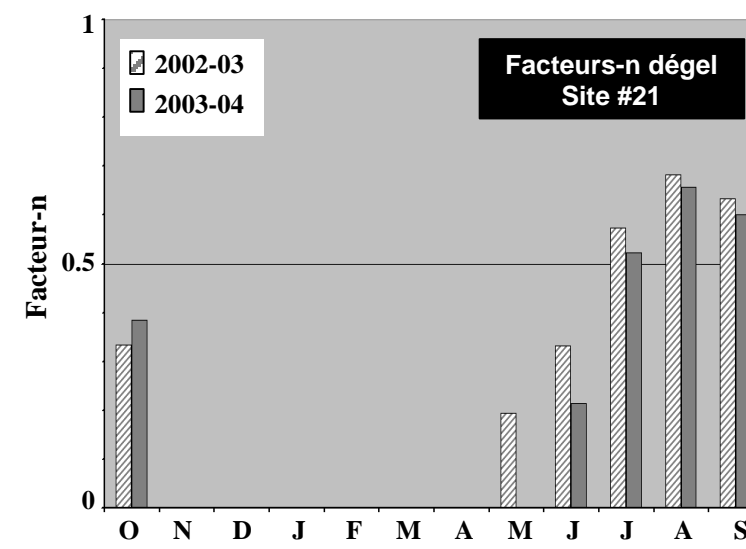
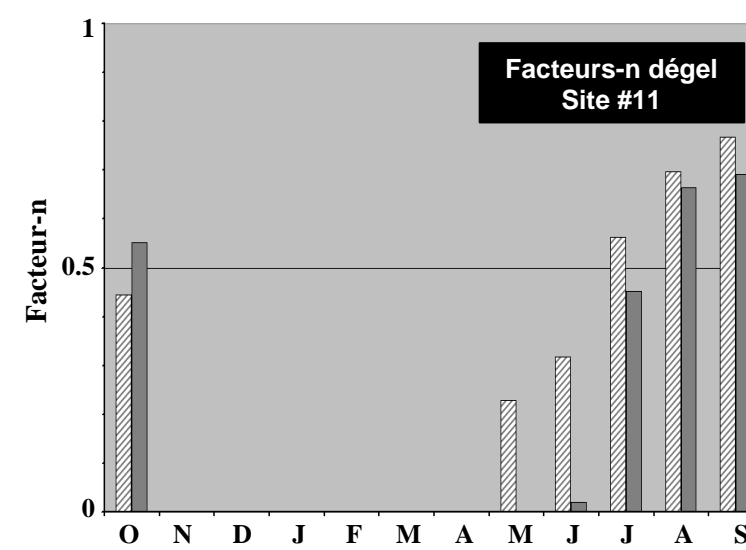
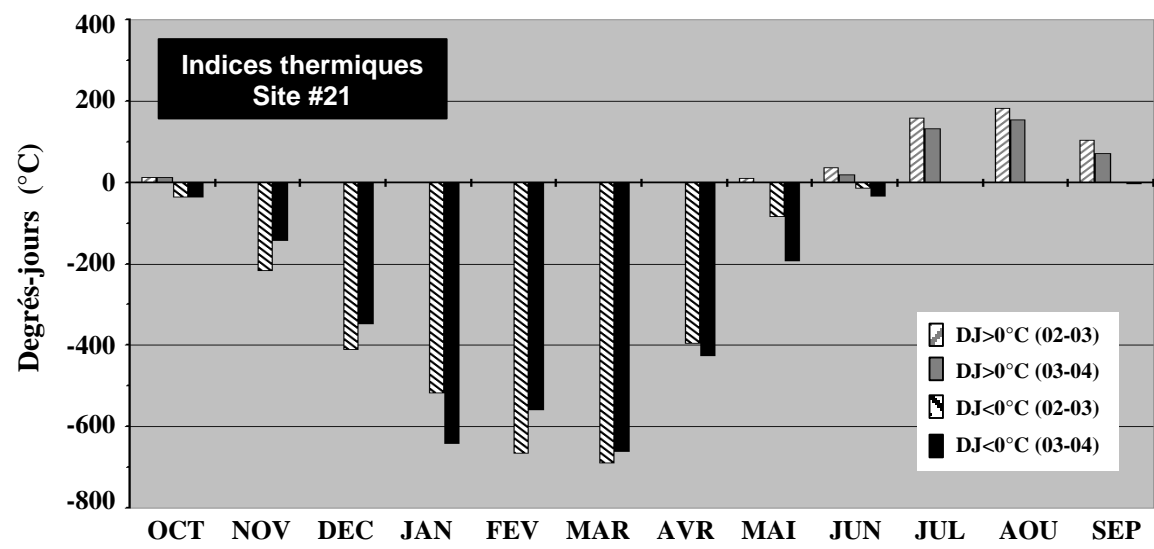
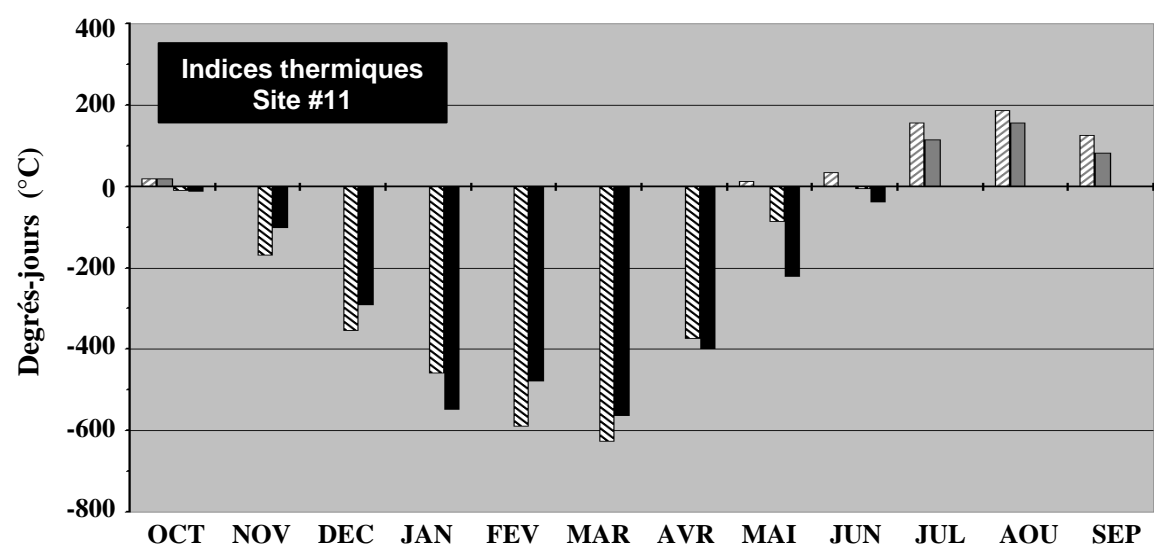
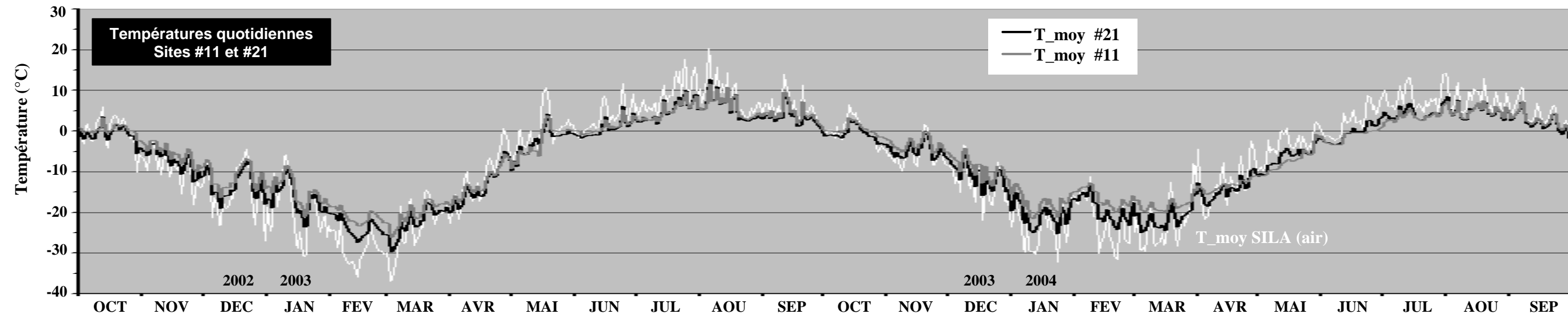


Figure 43 : Températures quotidiennes et indices thermiques mensuels au sol, sites localisés sous les bâtiments.

Ce léger écart hivernal est observable dans la tendance des degrés-jours mensuels de gel. La quantité de froid accumulée au site #21 a été systématiquement plus importante qu'au site #11 et ce, jusqu'en avril. Par ailleurs, les deux sites ont enregistré assez fidèlement les changements inter-annuels mesurés dans l'air : réchauffement de l'hiver 2003-04 (sauf décembre) et refroidissement de l'été 2004. Les facteurs-n mensuels de gel sont demeurés près de 1 durant la majeure partie de l'hiver (surtout au site #21) et témoignent de cette tendance.

Les tendances printanières ont toutefois été différentes. Les mois de mai et juin ont été nettement plus frais au sol (sous les bâtiments) que dans l'air, surtout durant la deuxième année de mesure, comme le montrent les facteurs-n mensuels correspondants (gel et dégel). Enfin, la chaleur estivale accumulée à la surface du sol y a été plus faible que dans l'air, ce qui explique les faibles valeurs des facteurs-n de dégel : à peine 70% de la chaleur ambiante a été transmise au sol durant les mois d'été (juillet, août et septembre).

Ces résultats peuvent être précisés sur une base quotidienne, en calculant l'écart de température entre la surface du sol et l'air (Figure 44). Ces graphiques montrent que les températures printanières et estivales (avril à septembre) ont été presque toujours plus fraîches à la surface du sol (sous les bâtiments) que dans l'air. À cet égard, les résultats de la deuxième année de mesure sont très nets. Par ailleurs, les températures automnales et hivernales (octobre à mars) ont été généralement plus chaudes au sol que dans l'air, cet écart demeurant légèrement plus faible au site #21 (moins de 10 °C de différence avec l'air).

À titre de comparaison, les mêmes écarts quotidiens ont été calculés pour un site plat localisé en milieu naturel, exposé aux vents dominants et recouvert d'une faible épaisseur de neige (site #2, graphique du bas de la Figure 44). Les températures automnales et hivernales y ont été généralement plus chaudes que dans l'air, avec toutefois des écarts plus irréguliers et plus marqués qu'aux deux autres sites (jusqu'à 15-16 degrés). Par contre, les écarts printaniers et estivaux ont montré une variation d'une année à l'autre : alors qu'ils ont oscillé successivement du positif au négatif durant l'été 2003, ils ont été plus fréquemment au-dessus de 0 durant l'été 2004. Il est à noter que les propriétés du sol à cet endroit diffèrent de celles des deux autres sites. Ce facteur sera analysé plus loin.

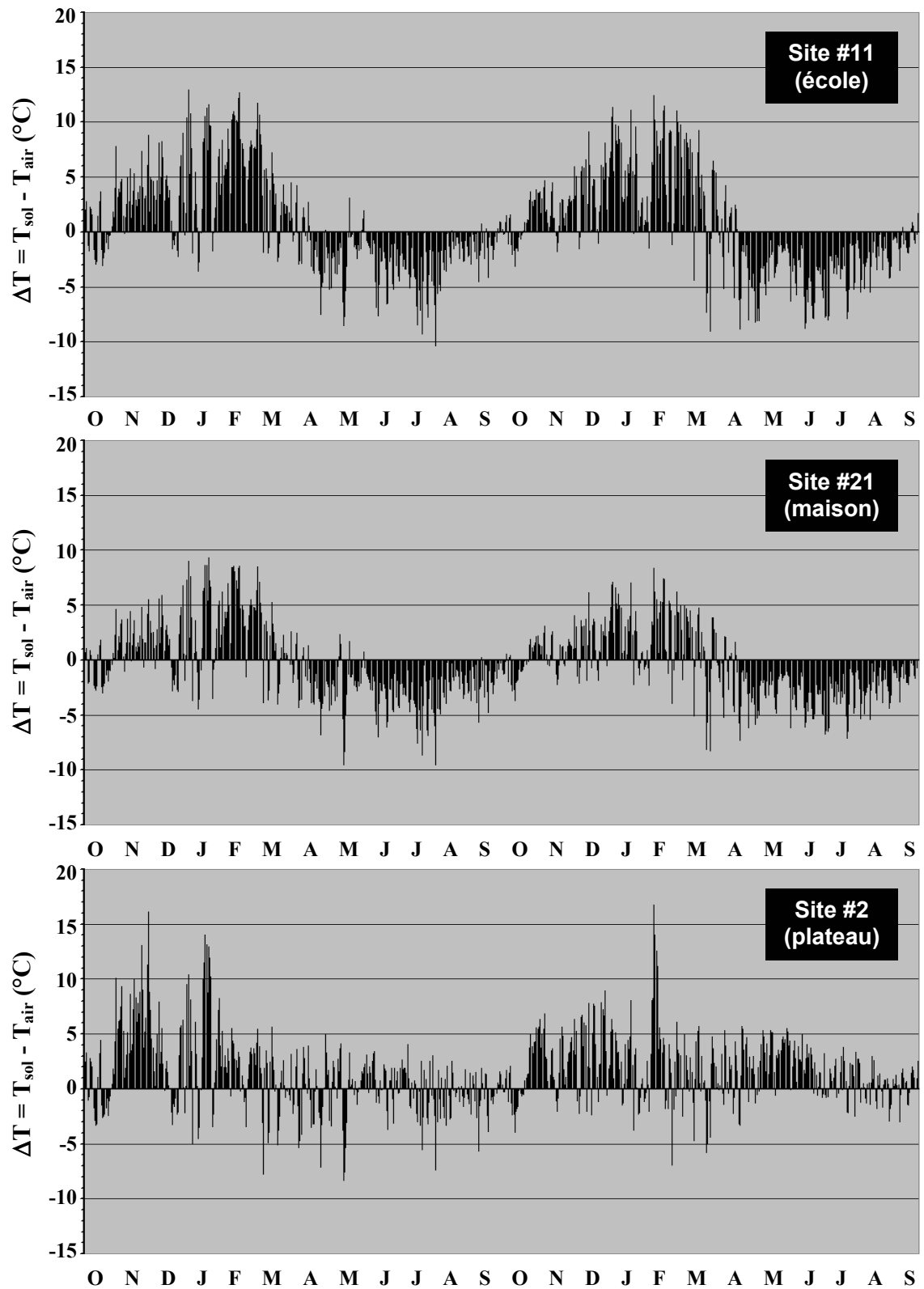


Figure 44 : Écarts de température entre la surface du sol et l'air, bâtiments et terrain naturel.

Deux autres sites sont localisés dans les environs immédiats d'infrastructures du village (Figure 45) : #10 (dans le village, entre des maisons) et #18 (hors du village, au pied d'un remblai de route). Alors que le site #10 est localisé en terrain naturel (gravier et blocs recouverts de touffes d'herbacées), le site #18 est plutôt localisé en sol « remanié » (gravier recouvert de prêles). Or, ces deux surfaces ont été recouvertes de neige (plus de 50 centimètres en mars 2003) durant une partie de l'année, surtout le site #18.

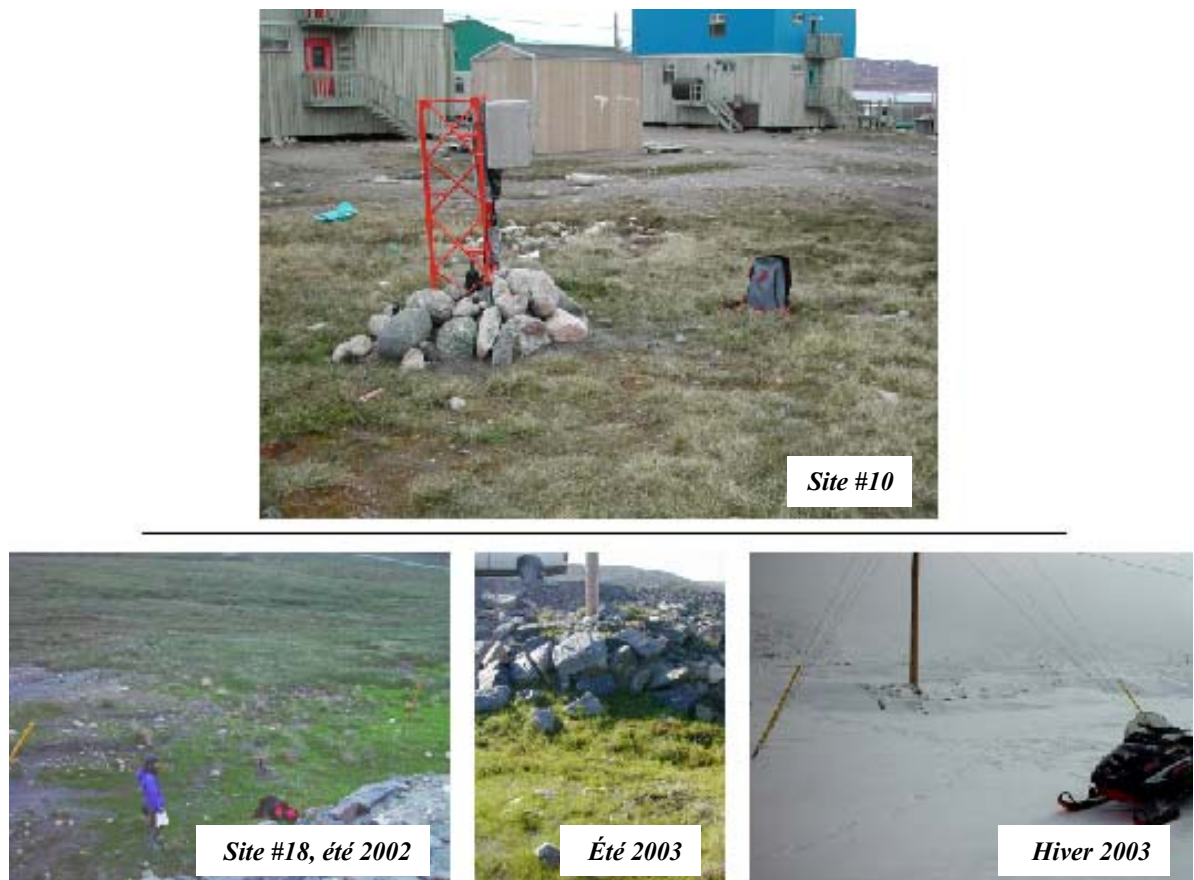


Figure 45: Sites localisés près des infrastructures du village.

En somme, la présence et l'orientation de ces infrastructures, face aux vents dominants, contrôlent en partie l'accumulation de neige et le bilan thermique qui en découle. Le comportement de ces sites est donc influencé par la conjugaison de deux facteurs géographiques étroitement liés : présence d'infrastructures agissant comme obstacle topographique et couvert de neige. Les températures moyennes quotidiennes et les indices thermiques mensuels illustrent cette situation (Figure 46).

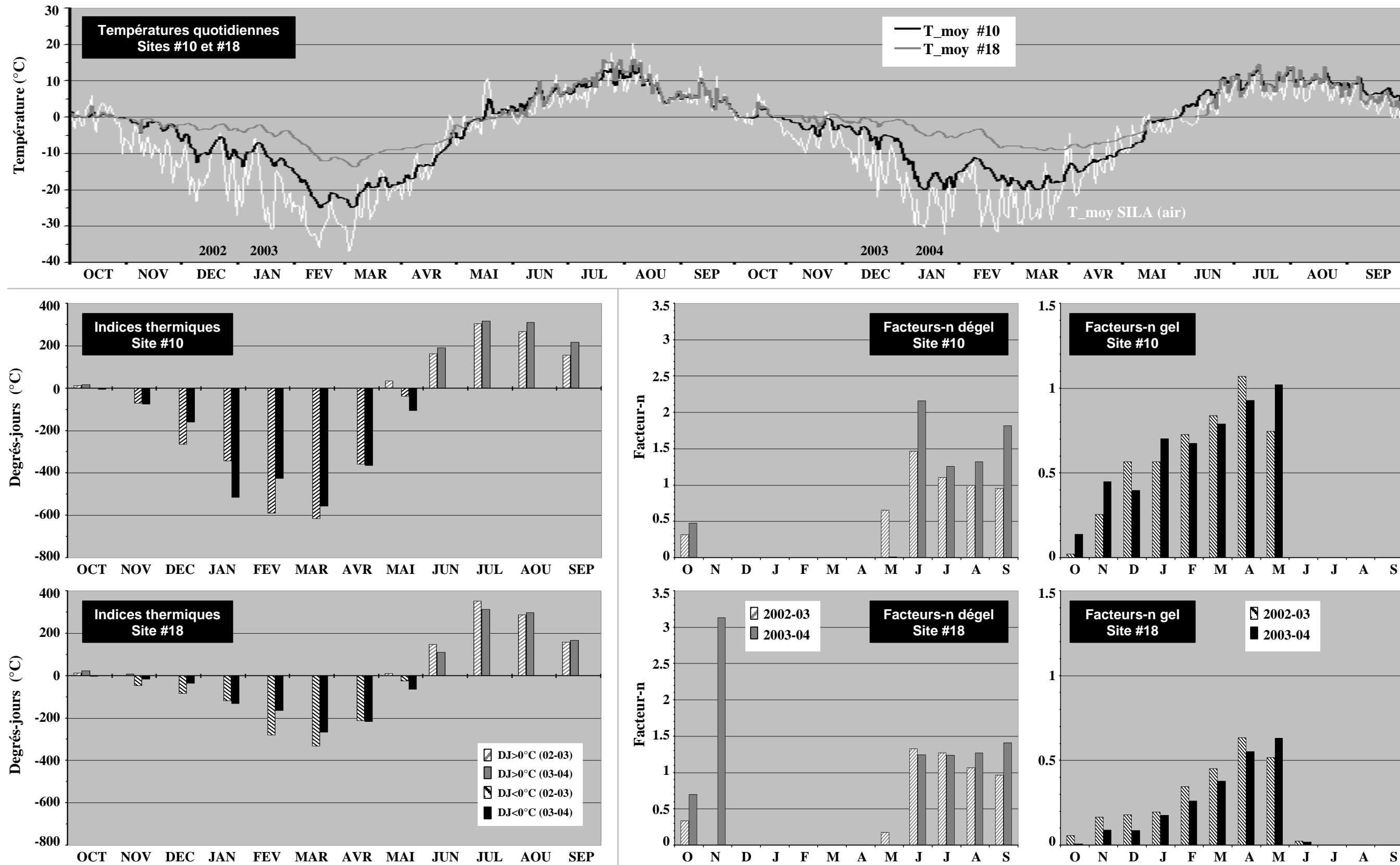


Figure 46 : Températures quotidiennes et indices thermiques mensuels au sol, sites localisés près des infrastructures du village.

En général, l'effet de la neige semble avoir joué un rôle beaucoup plus déterminant dans le cas du site #18. Les températures moyennes quotidiennes y ont été systématiquement plus chaudes qu'au site #10, sauf pour les périodes printanières de fonte de la neige (mai-juin). Durant ces épisodes, la température au site #18 est en effet demeurée près de 0 °C tant que toute la neige n'avait pas fondu. Par ailleurs, les températures estivales, aux deux sites, ont été significativement élevées, allant même jusqu'à dépasser les températures de l'air à plusieurs reprises.

Les indices mensuels de gel montrent également un écart net entre les deux sites : de novembre à mai, les degrés-jours de gel ont été deux fois plus élevés au site #10 qu'au site #18 et ce, durant les deux années de mesure. Ces résultats se sont répercutés dans les facteurs-n mensuels de gel, qui ont atteint des valeurs maximales à la fin de la saison de gel : près de 1 pour le site #10 et près de 0,5 pour le site #18.

L'écart entre les deux sites s'est toutefois fortement réduit durant les saisons de dégel, comme le montrent les tendances des indices mensuels de dégel. La quantité de chaleur accumulée au sol a été légèrement supérieure au site #10, surtout pour les mois de juin et septembre 2004 où les facteurs-n de dégel ont tourné autour de 2. Au site #18, ces valeurs ont plutôt oscillé entre 1 et 1,5 durant tout l'été (juin à septembre). Un résultat très élevé (>3) dû aux faibles indices de dégel dans l'air a été enregistré en novembre 2004.

En somme, la présence d'infrastructures dans les environs immédiats des sites #10 et #18 s'est surtout manifestée durant la saison de gel, où elle a favorisé l'accumulation de neige en surface. Cet effet, encore plus marqué au site #18, s'est également illustré dans les écarts quotidiens de températures entre le sol et l'air (Figure 47). En effet, les températures hivernales ont été nettement plus chaudes à la surface du sol que dans l'air, surtout au site #18 où cet écart a régulièrement dépassé les 20 °C (valeur jamais atteinte au site #10).

Ces résultats peuvent être comparés aux valeurs obtenues pour un site localisé en terrain naturel (#9, graphique du bas) sur le haut de la plage (sable et gravier). Les résultats y sont similaires à ceux obtenus pour le site #10, ce qui confirme le rôle important joué par le couvert de neige au site #18.

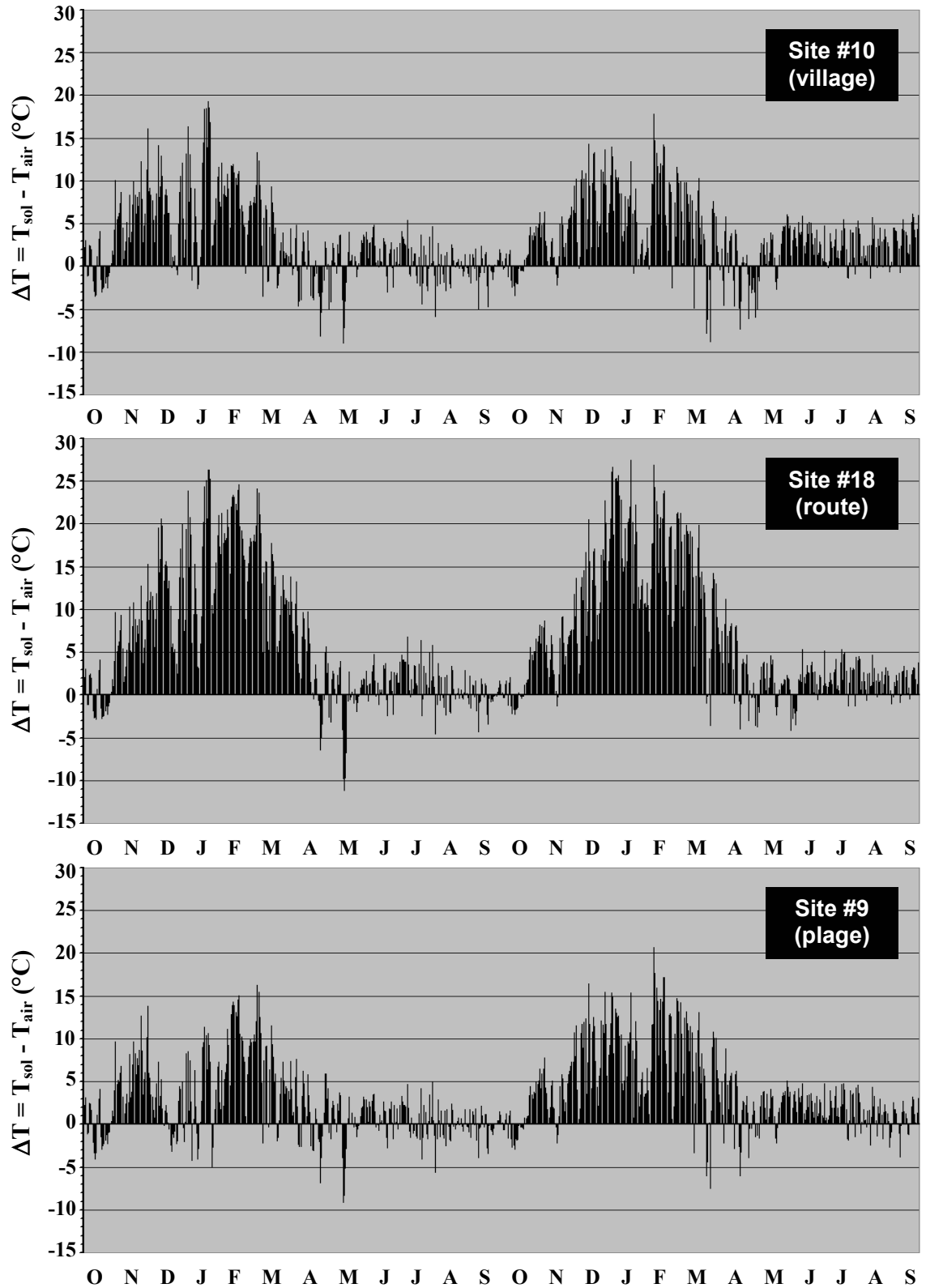


Figure 47 : Écarts de température entre la surface du sol et l'air, sites d'infrastructures et terrain naturel.

Glissement de terrain

Le glissement de terrain de septembre 1998 dans le secteur de Salluit-2 est au centre de la problématique concernant village (section 1.1.5 sur la dynamique climatique récente). Les causes de ce processus de détérioration du pergélisol demeurent au moins en partie d'origine anthropique (drainage, déneigement). Cependant d'autres signes de déstabilisation, survenus la même année en milieu naturel, ont également été observés. Parmi eux, le glissement de terrain situé immédiatement à l'est de la rivière en marge du plateau argileux surnommé « Cowboy Hill » (Figure 48).

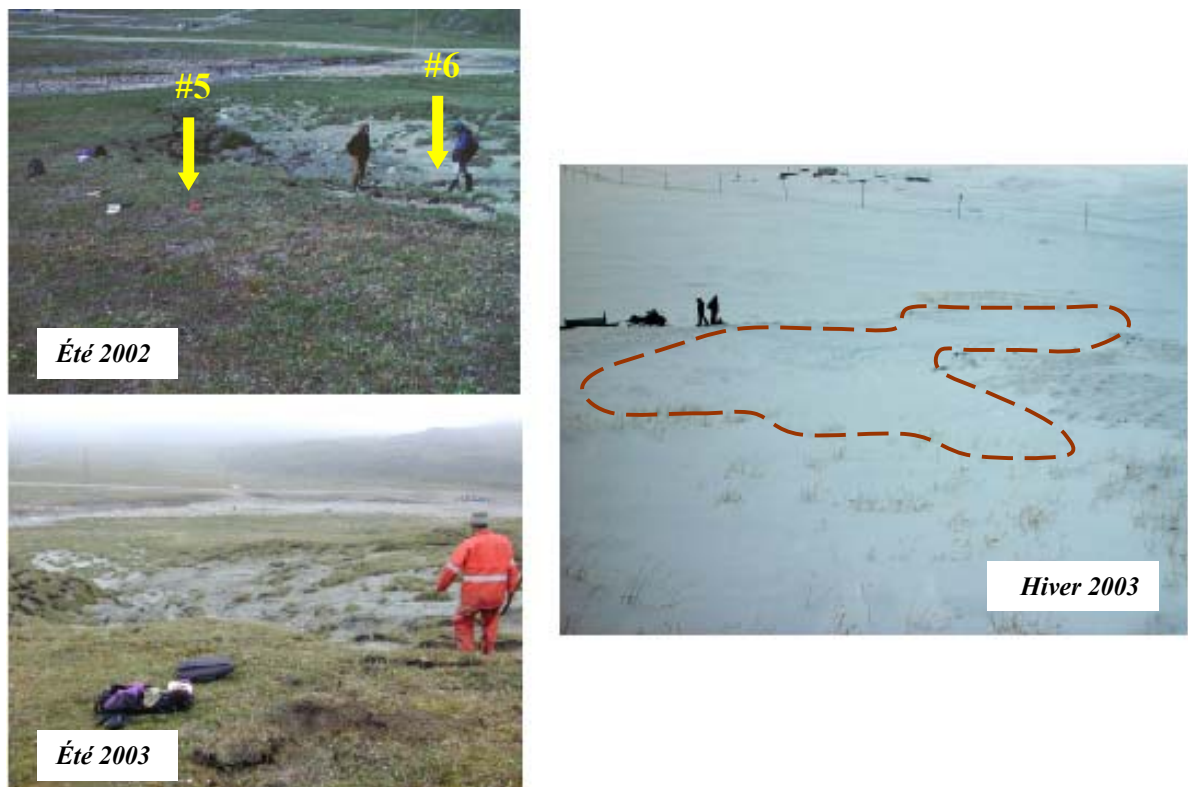


Figure 48: Glissement de terrain en milieu naturel.

La trace laissée en surface par ce glissement contrôle étroitement la micro-topographie, donc la répartition locale de la neige. C'est pourquoi il est apparu pertinent de comparer le comportement thermique de la surface en bordure du glissement (site #5) par rapport à l'intérieur du glissement, en sol presque entièrement dénudé (site #6). Les résultats illustrant le comportement des températures et des indices thermiques apparaissent à la Figure 49.

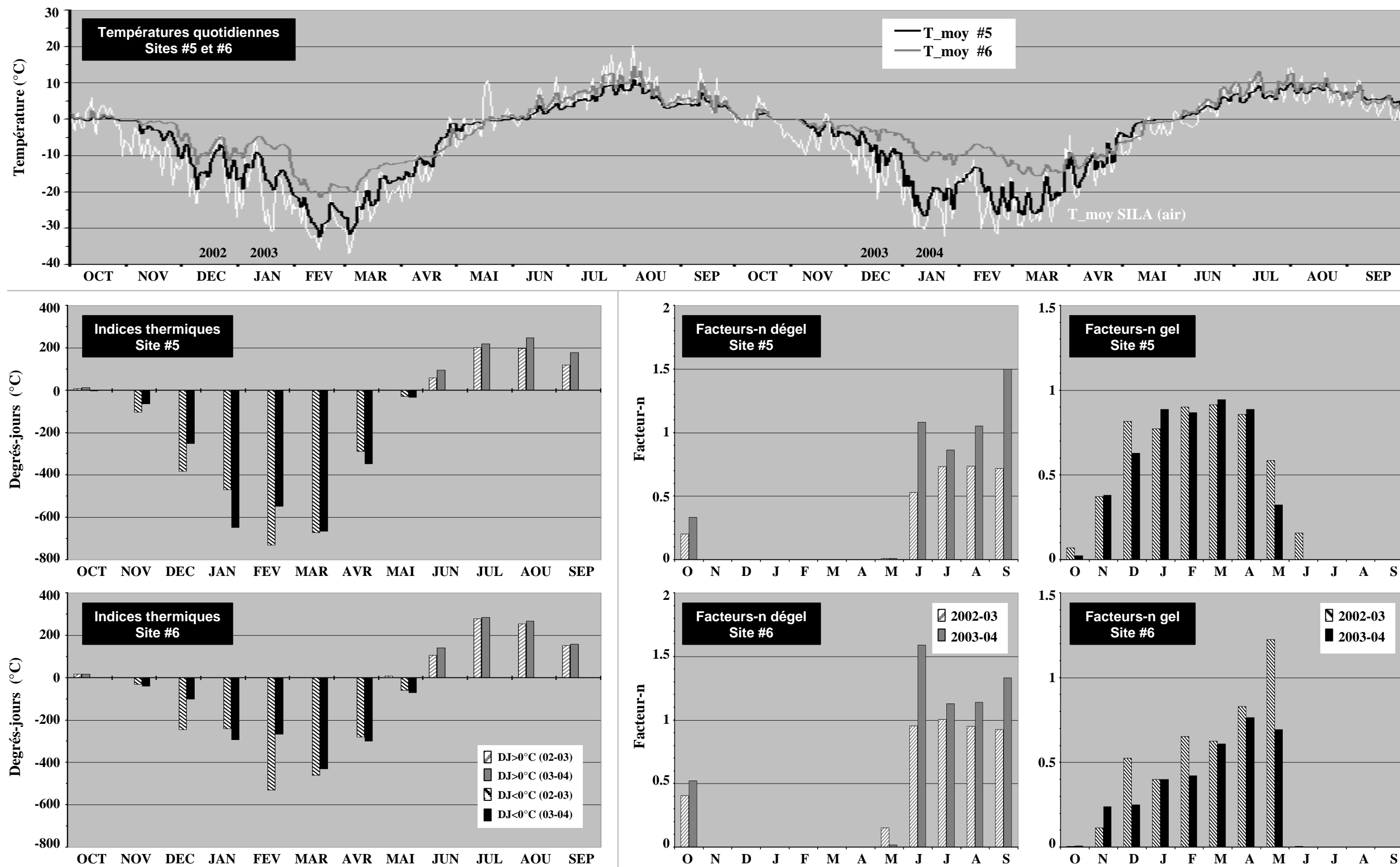


Figure 49 : Températures quotidiennes et indices thermiques mensuels au sol, glissement de terrain en milieu naturel.

Les températures moyennes quotidiennes ont été généralement plus élevées dans le glissement (site #6) qu'en bordure de celui-ci (site #5). Durant la saison de gel, les conditions d'accumulation et de fonte du couvert neigeux, déjà évoquées au début de cette section, ont joué un rôle important. En effet, l'épaisseur de neige a été sensiblement plus élevée dans le glissement qu'en marge de celui-ci. Durant la saison de dégel, ce sont plutôt les conditions de la surface du sol qui ont contrôlé le bilan thermique des surfaces. À ce titre, la quasi-absence de végétation à l'intérieur du glissement (touffes éparses) a eu un rôle déterminant.

Cet écart entre les 2 sites a d'abord eu des effets directs dans la tendance des indices mensuels de gel. De novembre à avril, les degrés-jours de gel ont été systématiquement plus importants au site #5, souvent deux fois plus qu'au site #6. Cette différence a affecté la tendance des facteurs-n de gel : alors qu'ils sont demeurés près de 1 durant une majeure partie de l'hiver au site #5, ils n'ont que graduellement augmenté au site #6 pour atteindre un maximum en avril ou mai. Le réchauffement hivernal des mois de décembre et février 2004 a d'ailleurs été plus sévère au site #6 : la réduction des degrés-jours, pour la deuxième année de mesure, y a été de 50% et plus. Ce réchauffement marqué est aussi observable dans le comportement des facteurs-n de gel mensuels, nettement réduits au site #6 durant les mois de décembre et février.

Les résultats de la saison de dégel sont plus nuancés : les degrés-jours de dégel accumulés au site #6 ont été légèrement plus élevés qu'au site #5, sauf en septembre 2004. Il est à noter que les facteurs-n de dégel ont été plus élevés à l'été 2004 qu'à l'été 2003 et ce, aux deux sites. Au site #6, ces valeurs sont même demeurées au-dessus de 1 durant tout l'été 2004.

Les écarts de température entre ces surfaces et l'air montrent des résultats comparables (Figure 50). En effet, les températures hivernales enregistrées au site #6 ont été significativement plus chaudes que dans l'air et cet écart est demeuré beaucoup moins marqué au site #5. De plus, le réchauffement de l'été 2004 par rapport à l'été 2003 est observable aux deux sites : les écarts quotidiens avec la température de l'air y ont été plus fréquemment positifs durant l'été 2004 que durant l'été précédent. En fait, ce réchauffement au sol est relatif au refroidissement dans l'air (déjà évoqué en début de chapitre) durant la même période. À titre de comparaison, les mêmes écarts de température ont été calculés pour le site #1 (sol fissuré). Si les tendances hivernales sont semblables à celles observées au site #5, les tendances estivales demeurent plus irrégulières. D'autres facteurs (albédo et humidité de surface) sont aussi à considérer.

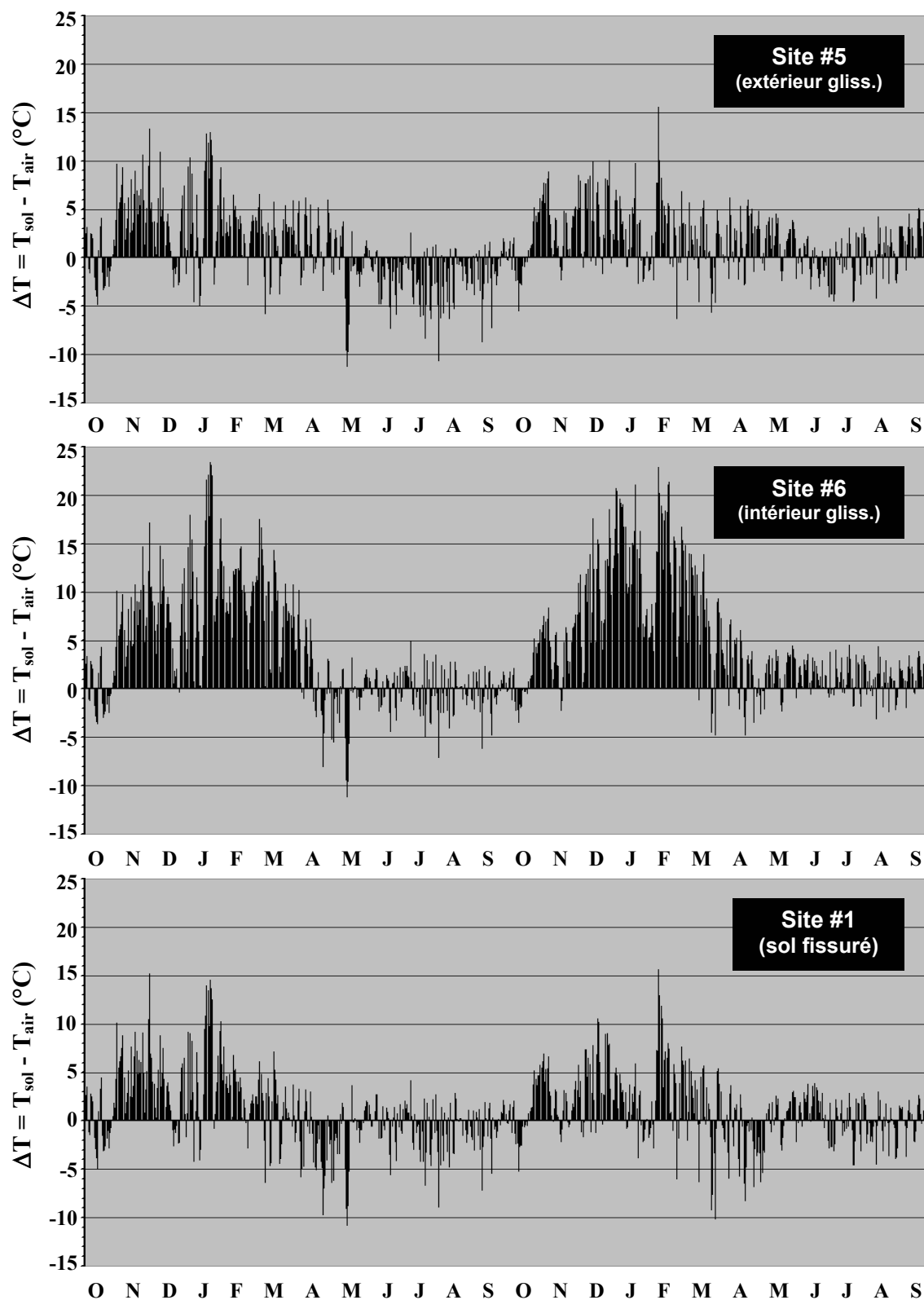


Figure 50 : Écarts de température entre la surface du sol et l'air, glissement de terrain et sol fissuré.

Propriétés du sol

Outre l'épaisseur et la densité du couvert neigeux, contrôlées par l'exposition aux vents dominants et la présence d'obstacles (infrastructures, bâtiments) ou creux topographiques (glissements), les propriétés du sol peuvent également influencer le bilan thermique de la surface. Quoique moins marqué que celui de la neige, l'effet combiné de la nature du sol et de son humidité de surface joue un rôle non négligeable, surtout durant la saison de dégel.

Les sols mal drainés et saturés d'eau en surface durant une période prolongée ont un comportement thermique particulier. Les sites #7 et #13 sont localisés dans de tels sols humides (Figure 51) : plateau argileux au site #7 ou marécageux (tourbe et argile) au site #13.



Figure 51: Sites localisés en terrain humide.

Certains traits particuliers à ces types de sols peuvent être déduits des températures quotidiennes et des indices thermiques mensuels (Figure 52). D'abord, les températures quotidiennes automnales (octobre-novembre), près de 0 °C, semblent illustrer l'inertie thermique de ces surfaces. Leur rapide refroidissement durant les mois suivants suggère que le couvert neigeux y a été plutôt faible ou rapidement érodé et compacté par le vent. Les épaisseurs de neige mesurées à l'hiver 2003 y étaient d'ailleurs inférieures à 30 cm.

Alors que les deux sites ont montré des comportements comparables en 2002-03, un changement net des températures quotidiennes s'est produit durant l'année suivante. Non seulement le « plateau » automnal s'est prolongé jusqu'en décembre au site #13, mais le réchauffement printanier (avril-mai) y a été sensiblement retardé. De plus, les températures estivales ont été systématiquement plus froides qu'au site #7.

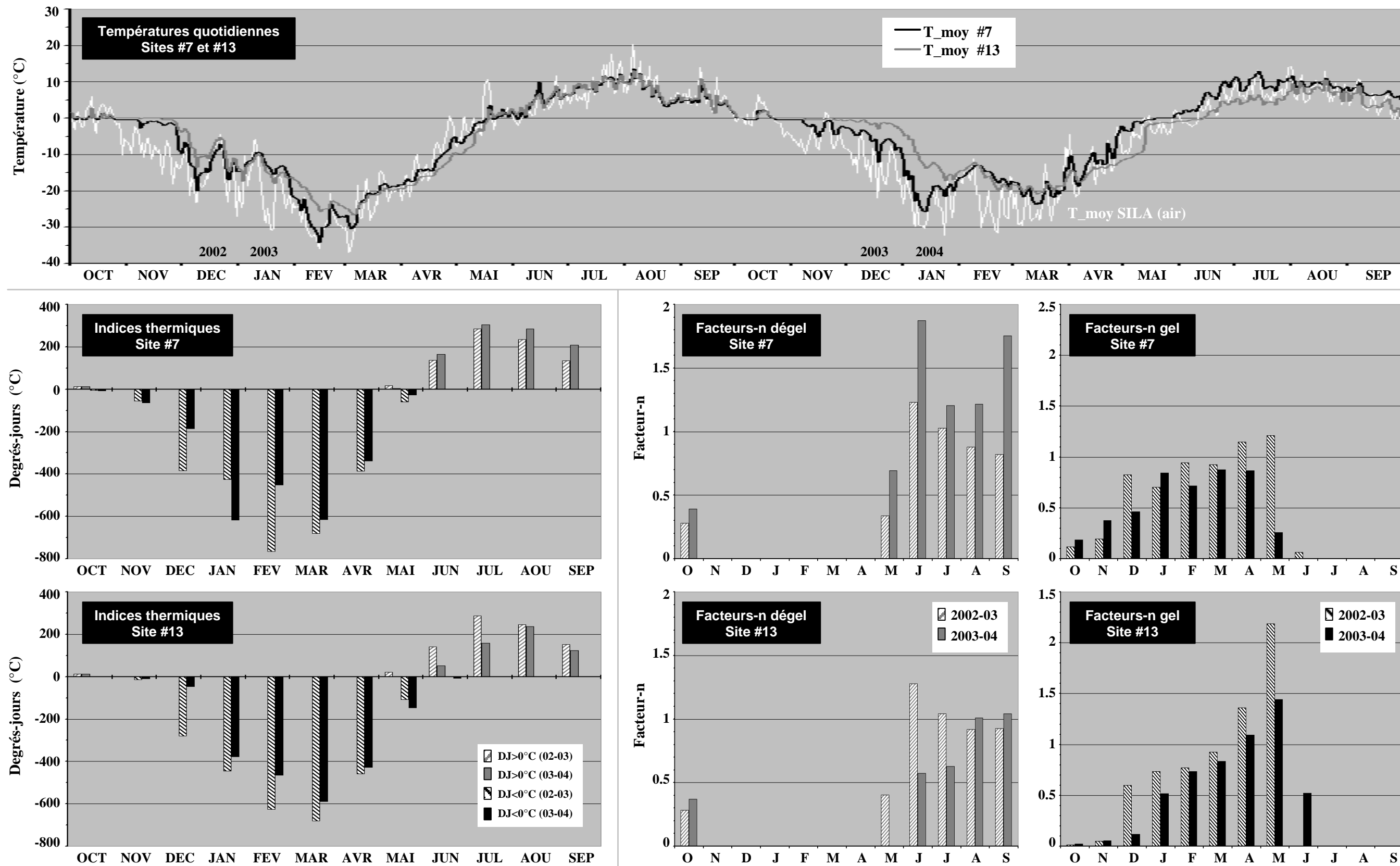


Figure 52 : Températures quotidiennes et indices thermiques mensuels au sol, terrain humide.

Les indices mensuels de gel rappellent le réchauffement hivernal de l'année 2003-04 déjà évoqué. Au site #7, les degrés-jours de gel ont en effet fortement diminué en décembre et février alors qu'ils ont augmenté en décembre, comme cela avait été le cas dans l'air et à plusieurs sites microclimatiques. Or, au site #13, ce réchauffement s'est fait sentir durant tous les mois d'hiver, même en décembre. Par conséquent, les facteurs-n de gel y ont fortement diminué durant la deuxième année de mesure, surtout en décembre. Ces valeurs ont par ailleurs augmenté graduellement durant l'hiver pour atteindre un maximum au mois de mai, alors qu'elles sont demeurées plus constantes (près de 1) au site #7.

Les indices de dégel montrent également les comportements différents entre les deux sites durant l'année 2003-04. Alors que les degrés-jours ont augmenté au site #7, ils ont plutôt diminué au site #13, surtout en juin et juillet. Les facteurs-n de dégel ont donc varié en conséquence : alors qu'ils ont fortement augmenté au site #7, où ils sont demeurés au-dessus de 1 durant tout l'été (juin à septembre), ils ont sensiblement diminué en juin-juillet au site #13. Les conditions locales d'humidité, découlant en partie des conditions d'enneigement sur les versants environnants, ont donc favorisé l'inertie thermique au site #13 en 2003-04. Par ailleurs, la tourbe (présente au site #13) demeure un isolant très efficace. Cela pourrait aussi expliquer en partie son comportement particulier.

Il importe de comparer ces résultats avec ceux obtenus dans des sols de nature semblable, mais dont l'humidité de surface a été réduite durant la saison de dégel. Les sites #2 et #12 sont localisés, respectivement, dans l'argile et dans les colluvions (Figure 53). Ils présentent donc des caractéristiques comparables aux sites #7 et #13, l'humidité en moins. Les températures quotidiennes et les indices thermiques mensuels ont été analysés pour ces sites (Figure 54).



Figure 53: Sites localisés en terrain sec.

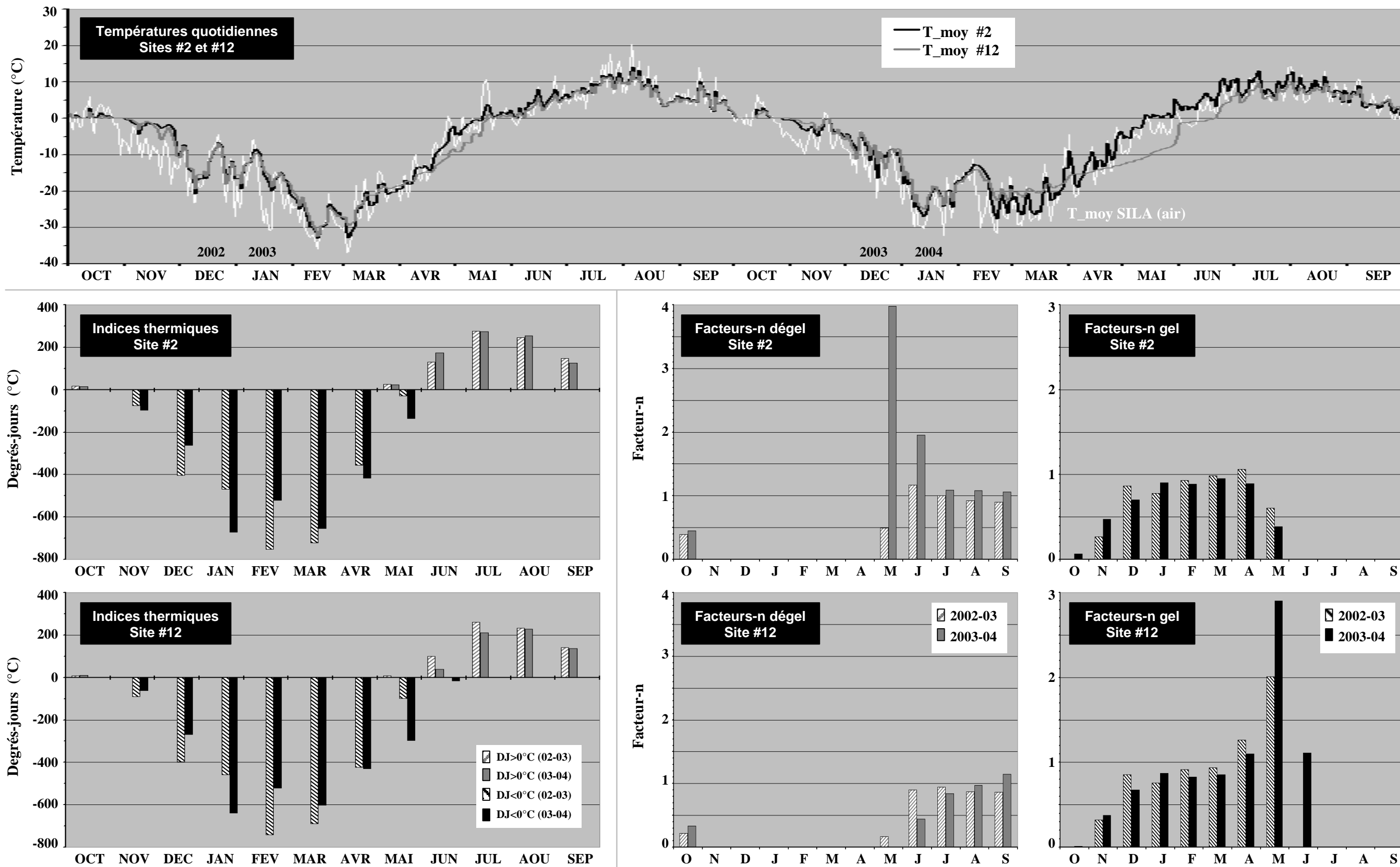


Figure 54 : Températures quotidiennes et indices thermiques mensuels au sol, terrain sec.

Premièrement, les températures quotidiennes automnales sont descendues plus rapidement sous 0 °C qu'aux sites localisés en terrain humide. En effet, dès le mois de novembre, les températures de la surface du sol (aux deux sites) ont presque rejoint les températures de l'air, et cette superposition des courbes a duré une majeure partie de l'hiver et de l'été. Le réchauffement printanier (avril-mai) a toutefois été retardé au site #12, surtout durant la deuxième année de mesure où ce décalage s'est perpétué jusqu'en juillet. Les conditions d'humidité peuvent avoir été modifiées à cet endroit par les conditions d'enneigement plus « en amont » à l'hiver précédent, d'autant plus que ce site est localisé « en aval » d'un secteur de déneigement.

Par ailleurs, alors que les indices thermiques de l'hiver (décembre à avril) et de l'été (juillet-août) ont montré des comportements semblables d'un site à l'autre et d'une année à l'autre, les comportements des mois de mai et juin ont sensiblement varié durant l'année 2003-04. Au site #2, la chaleur accumulée à la surface du sol a été franchement supérieure à celle dans l'air aux mois de mai (400%) et juin (200%) 2004, comme en témoignent les facteurs-n de dégel. La courbe des températures quotidiennes y est d'ailleurs demeurée au-dessus de celle de l'air durant ces mois. Au site #12, c'est plutôt un net rafraîchissement qui a affecté les indices thermiques et les facteurs-n des mois de mai et juin. La quantité de froid accumulée au sol au mois de mai y a d'ailleurs été 3 fois plus importante que dans l'air et la quantité de chaleur du mois de juin inférieure de 50% à celle dans l'air.

L'humidité de la surface du sol, surtout au début de la période de dégel, joue donc un rôle important dans le bilan thermique des premiers centimètres du sol. Cet effet est en partie contrôlé, en amont, par les conditions d'enneigement de l'hiver précédent. Cependant, il se manifeste de façon plus ou moins marquée selon les propriétés du sol en aval (Figure 55). Les sédiments imperméables et recouverts d'une couche de végétation (ex : tourbe) amortissent davantage les variations thermiques en surface et retardent le réchauffement printanier de la surface du sol. Les sédiments plus grossiers (sable et gravier) et faiblement recouverts de végétation (ex : site #10) enregistrent plus fidèlement ces variations, surtout à partir des mois de juin et juillet. Il est noté que l'inertie thermique des sols plus imperméables (ex : colluvions) s'est manifesté de façon plus marquée en 2004.

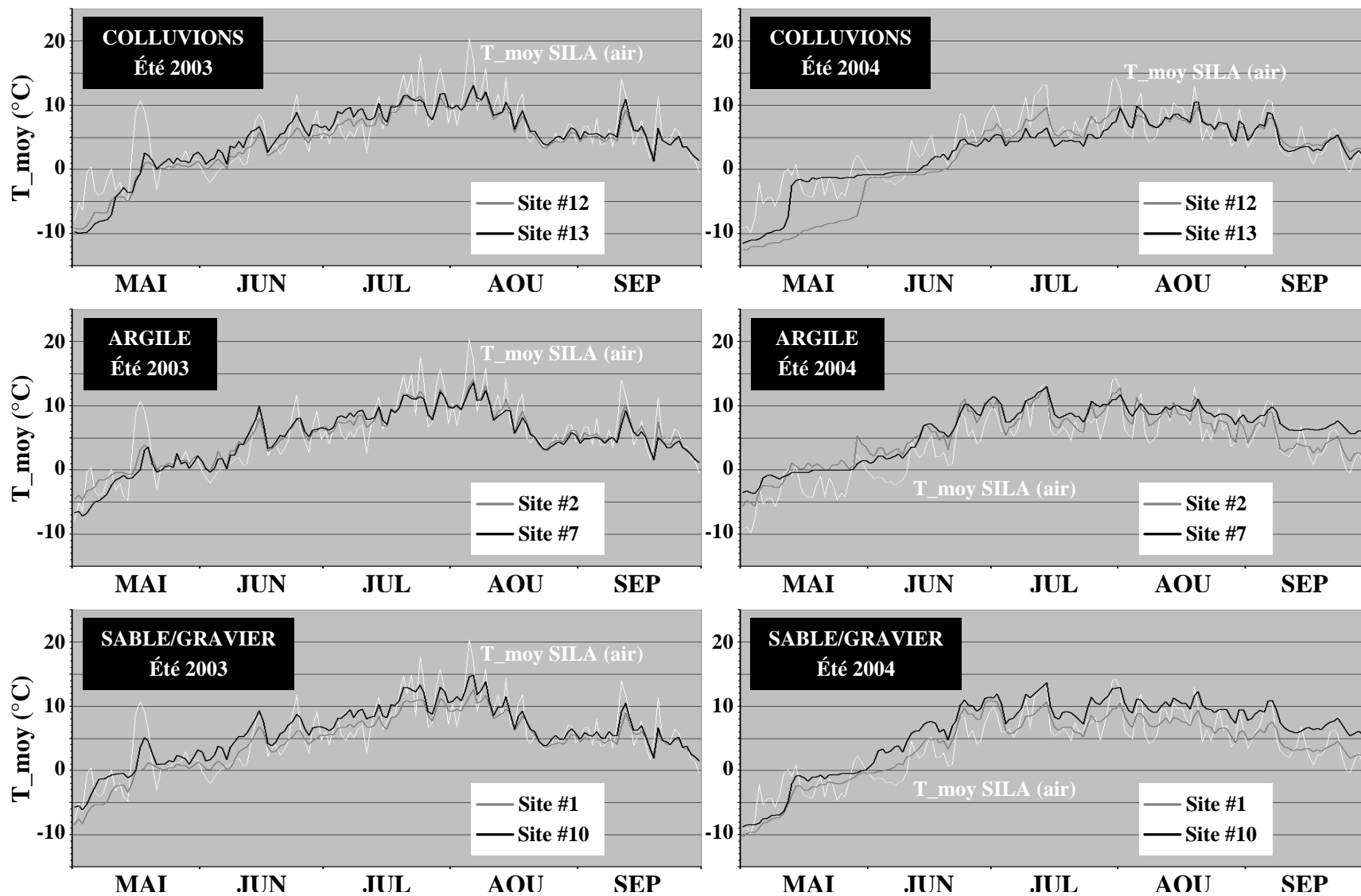


Figure 55 : Températures quotidiennes de surface durant la saison de dégel selon les types de sols.

Inclinaison et orientation des versants

L'effet de l'inclinaison et de l'orientation de différentes pentes devait être analysé. Cependant, 2 des 4 instruments de mesure qui avaient été prévus à cette fin n'ont pas donné les résultats escomptés : l'un d'entre eux n'a jamais été retrouvé (site #8, versant orienté vers l'ouest); l'autre s'est avéré défectueux (site #16, versant orienté vers le sud). Par conséquent, seuls les sites #14 (versant orienté vers le nord-est) et #15 (versant orienté vers le nord) ont pu être étudiés. Les types de sols et les conditions de surface (enneigement, humidité, végétation, albédo) y sont toutefois très différents (Figure 56).



Figure 56: Sites localisés sur des versants inclinés.

Bien qu'il n'ait fourni des données que pour une seule année, les résultats du site #15 ont démontré la grande conductivité thermique de l'affleurement rocheux environnant (Figure 57). En effet, les températures quotidiennes y ont suivi de très près les températures dans l'air, hiver comme été. Cette tendance s'est traduite par des facteurs-n (gel et dégel) mensuels près de 1, sauf durant les mois de « transition » au-dessus ou en-dessous de 0 °C (octobre et mai).

Le site #14 a par contre été grandement affecté par le couvert neigeux le recouvrant durant une majeure partie de l'année, soit près de 50 cm en mars 2003. Le refroidissement automnal et le réchauffement printanier, surtout en 2004, ont été nettement retardés par la présence de neige et l'humidité de surface qui en a découlé. Les facteurs-n de gel ont par conséquent augmenté graduellement au cours de la saison de gel alors que les facteurs-n de dégel ont montré des comportements différents d'une année à l'autre. Les conditions d'enneigement et d'humidité en surface, contrôlées en partie par la topographie, ont donc influencé le bilan thermique.

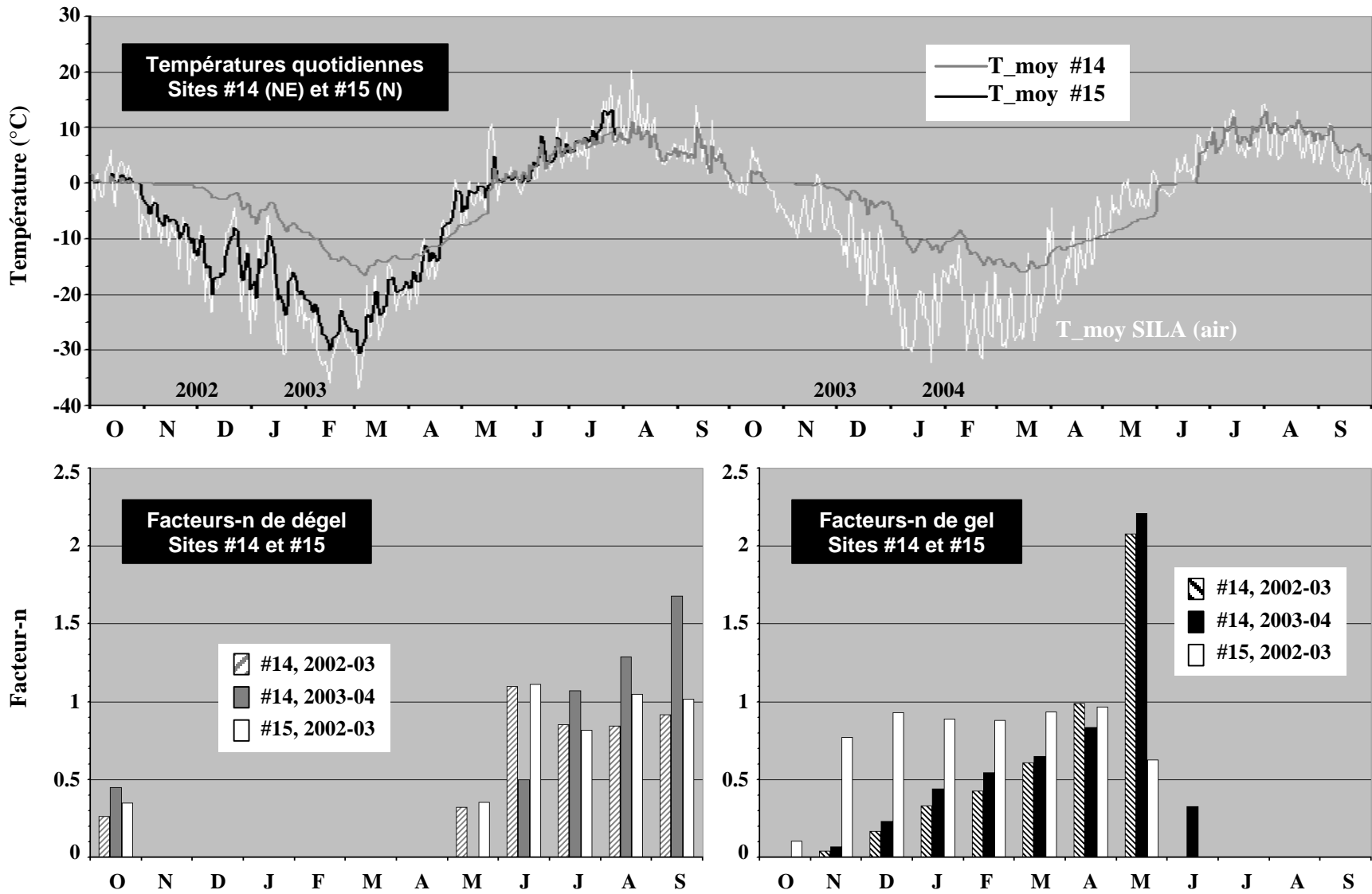


Figure 57 : Températures quotidiennes et facteurs-n mensuels au sol, versants inclinés.

Présence d'un plan d'eau

L'inertie thermique des plans d'eau restait enfin à analyser. Deux sites très différents ont été retenus (Figure 58) : le haut de la plage bordant le fjord (site #9) et le lit de la rivière (environ 1 m de profondeur en juillet) traversant le village (site #20), dont l'appareil de mesure a cessé de fonctionner après une année.



Figure 58: Sites localisés près ou dans des plans d'eau.

L'inertie thermique de la rivière est directement observable dans le comportement des températures quotidiennes et des facteurs-n mensuels (Figure 59). Durant presque tout l'automne (jusqu'à la mi-décembre), la température y est demeurée à 0 °C jusqu'à ce que toute l'eau ait gelé. Cela a contribué à maintenir les facteurs-n de gel très bas au début de l'hiver (30% et moins). Au printemps (mai-juin), c'est plutôt le réchauffement des températures qui a été légèrement retardé, comme l'ont montré les faibles facteurs-n de dégel pour ces mois.

L'effet thermique du fjord au site #9 est toutefois impossible à évaluer, car d'autres facteurs géographiques (couvert de neige, nature du sol) ont joué un rôle prédominant dans le bilan thermique de la surface. Les températures hivernales ont été légèrement plus chaudes que dans l'air, ce qui s'est traduit par des facteurs-n de gel oscillant entre 0,5 et 1 durant la majeure partie de l'hiver (janvier à avril). Le couvert de neige y avait d'ailleurs été supérieur à 60 cm en mars 2003. Par contre, les températures estivales (juin à septembre) sont demeurées plus élevées que dans l'air, comme le montrent les facteurs-n de dégel nettement supérieurs à 1. Les conditions de la surface du sol (sable et gravier, terrain sec et faiblement recouvert de végétation) sont à considérer pour cette tendance estivale.

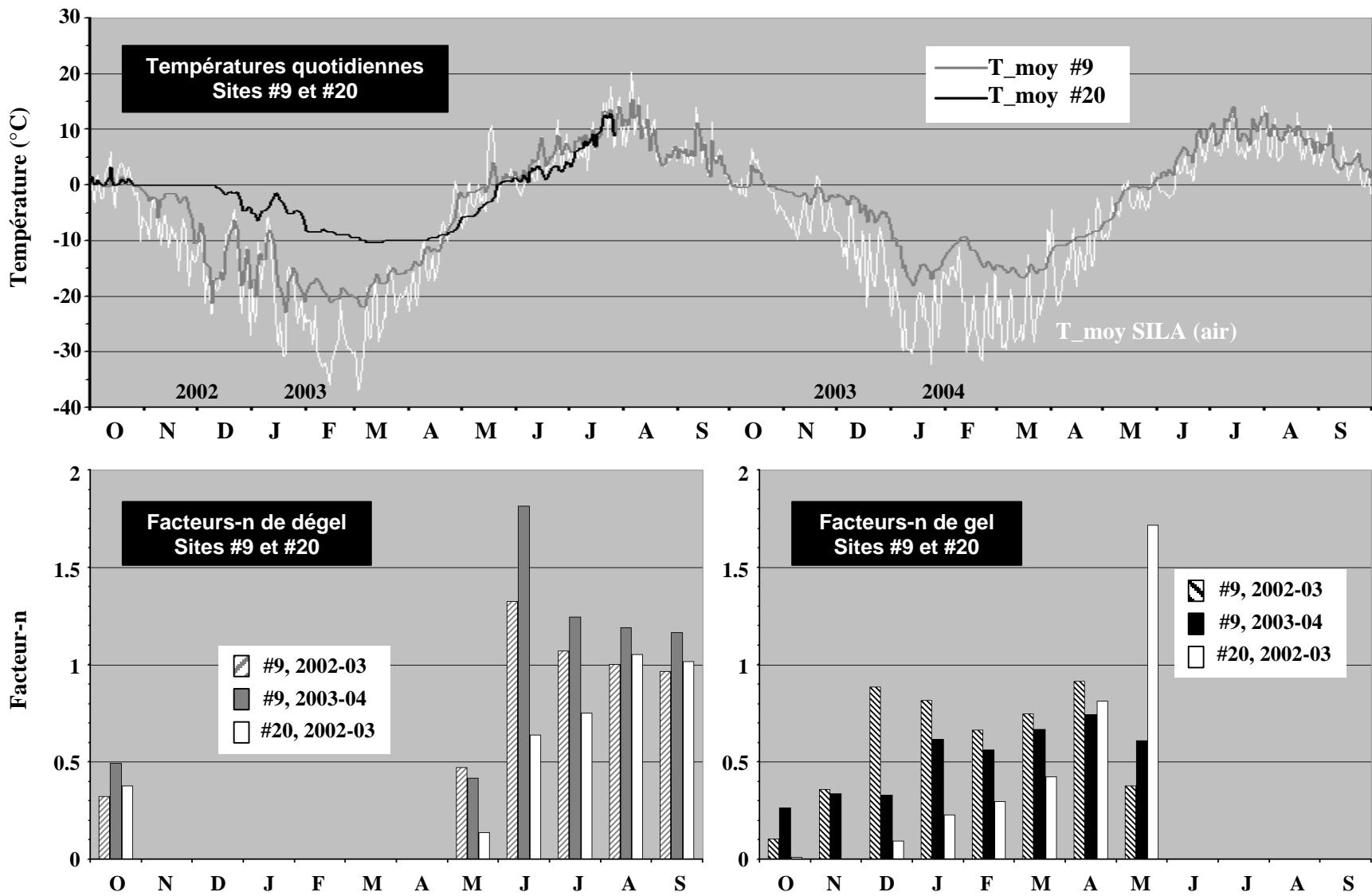


Figure 59 : Températures quotidiennes et facteurs-n mensuels au sol, plans d'eau.

En résumé, la dernière sous-section montre que :

- Les nombreux facteurs géographiques se superposent de façon complexe pour influencer la variabilité thermique des surfaces microclimatiques. Ces facteurs peuvent être classés et hiérarchisés en fonction du rôle qu'ils jouent dans le bilan thermique des surfaces (Tableau XIV). Ces effets se répercutent autant dans le comportement des températures et leur variabilité que dans la durée et l'importance des saisons de gel et de dégel (nombre de jours, indices thermiques et facteurs-n).
- Le facteur le plus marqué demeure le couvert de neige (épaisseur et densité) qui affecte la surface du sol pendant une grande partie de l'année. Localement, ce facteur dépend toutefois des conditions topographiques locales (obstacles et dépressions) et leur orientation par rapport aux vents dominants. Par ailleurs, il est modulé durant la saison de dégel par les caractéristiques de la surface du sol comme la densité et la nature du couvert de végétation (donc l'albédo de surface) et l'humidité.

Tableau XIV: Impacts des facteurs géographiques sur les surfaces microclimatiques.

| | COUVERT DE NEIGE | BÂTIMENT (dessous) | ROUTE / OBSTACLE | GLISSE-MENT | TYPE DE SOL | HUMIDITÉ / EAU |
|--------------------------------|---|--|--|--|---|---|
| Effet(s) thermique(s) | Isolation (gel) Ruissellement | Ventilation Ombre | Accumulation de neige/eau | Accumulation de neige/eau | Isolation (tourbe) | Inertie thermique |
| Température annuelle | $T_{moy} \uparrow$ $T_{min} \uparrow$ | $T_{moy} \downarrow$ $T_{min} \downarrow$ | $T_{moy} \uparrow$ $T_{min} \uparrow$ | $T_{moy} \uparrow$ $T_{min} \uparrow$ | $T_{max} \downarrow$ (tourbe) | $T_{moy} \uparrow$ $T_{min} \uparrow$; $T_{max} \downarrow$ |
| Variabilité (amplitude) | Amplitude \downarrow (hiver) | Amplitude \uparrow | Amplitude \downarrow (hiver) | Amplitude \downarrow (hiver) | Amplitude \downarrow (tourbe) | Amplitude \downarrow |
| Saison de gel | Durée \uparrow (printemps) | Durée \uparrow (printemps) | - | - | Retard (tourbe) | Léger retard (automne) |
| Indices de gel | DJ \downarrow Fact-N \downarrow | DJ \uparrow Fact-N \uparrow | DJ \downarrow Fact-N \downarrow | DJ \downarrow Fact-N \downarrow | - | DJ \downarrow Fact-N \downarrow |
| Saison de dégel | Durée \downarrow (printemps) | Durée \downarrow (printemps) | - | - | Retard (tourbe) | Léger retard (printemps) |
| Indices de dégel | DJ \downarrow (mai-juil) Fact-N \downarrow | DJ \downarrow Fact-N \downarrow | - | - | DJ \downarrow (tourbe) Fact-N \downarrow | DJ \downarrow Fact-N \downarrow |
| Précisions | Accumulation précoce : T \uparrow | Remblai : bon conducteur th. | Remblai : bon conducteur th. | Absence de végétation | Sol grossier : effet contraire | Selon le type de sol |

4

CHAPITRE 4 : DISCUSSION

Sommaire

La discussion s'ouvre d'abord sur une brève évaluation critique des résultats par rapport à l'atteinte des objectifs de recherche. Cela permet ensuite d'approfondir la réflexion dans l'espace et dans le temps au contexte climatique et géomorphologique régional. Puis la performance thermique des infrastructures du village est précisée et expliquée plus en détail à la lumière des résultats dans leur ensemble (échelles topoclimatique et microclimatique). Enfin, la stabilité future du pergélisol est envisagée selon les tendances saisonnières et la variabilité des températures.

4.1 Bref retour sur les résultats

Les données précédemment analysées font ressortir l'étroite relation qui existe entre le climat d'un lieu et les caractéristiques du terrain. Les deux sections du chapitre précédent s'y attardent selon deux échelles spatiales d'analyse. Par conséquent, les résultats confirment l'hypothèse de départ de ce mémoire à l'effet que « *le relief d'un lieu influence directement le climat de surface et ce, à différentes échelles spatiales* » (section 1.2, p. 14).

À l'échelle topoclimatique, les données de vents et de température de l'air ont d'abord démontré le comportement particulier de la vallée de Salluit. Grâce à son encaissement topographique, elle canalise l'écoulement d'air le long de son axe lorsque les vents régionaux sont forts ou donne plutôt naissance à des brises de pentes de différentes directions par temps dégagé, lorsque ces vents régionaux sont faibles. Les contrastes d'ensoleillement (durant le jour) et de perte thermique par radiation (durant la nuit) entre le fond de la vallée et le sommet de ses versants sont à l'origine de tels phénomènes topoclimatiques. Par ailleurs, l'influence climatique majeure du fjord de Sugluk, lui aussi encaissé au fond d'une vallée, s'est répercutée dans les données de vents (effet canalisateur) et de température (inversions thermiques). Ces considérations sont à intégrer dans le contexte climatique régional tel qu'observé au sommet des plateaux rocheux environnants. Par conséquent, elles satisfont totalement les attentes du premier objectif général de recherche qui était de « *décrire le climat local de la vallée de Salluit (topoclimat) et le situer dans son contexte climatique régional, soit par rapport au climat affectant les plateaux environnants* » (p. 14). Il s'agit là d'un aspect novateur et peu documenté pour les régions nordiques.

À l'échelle microclimatique, le relief joue également un rôle déterminant dans le bilan thermique de la surface du sol. En effet, la répartition et les propriétés du couvert de neige représentent le facteur géographique le plus important dans le comportement des températures de surface. Or, c'est justement la topographie locale qui contrôle ce facteur, outre les paramètres atmosphériques régionaux (précipitations hivernales et vents). Toutefois, l'influence des autres facteurs géographiques tels que l'orientation et l'inclinaison des versants, les types de sols et de végétation ou la proximité de plans d'eau est apparue beaucoup plus difficile à mesurer, du moins séparément selon chaque facteur. Durant la saison

de dégel, l'humidité, le flux de chaleur sensible et l'albédo de la surface représentent des facteurs-clés du bilan thermique saisonnier. Or, ces paramètres n'ont pas pu être mesurés précisément dans le cadre de ce projet, ce qui en limite quelque peu les interprétations.

À ce titre, l'analyse (même exhaustive) des résultats ne remplit que partiellement le deuxième objectif de recherche, soit sa première partie : « *observer les variations de température enregistrées à la surface du sol dans plusieurs environnements microclimatiques situés à l'intérieur de la vallée* ». Quant à sa seconde partie, qui consistait à « *évaluer l'influence de ces variations sur la dynamique du pergélisol* » (p. 14), elle n'a pu qu'être effleurée. Seuls les effets du couvert nival et des infrastructures du village ont pu être suffisamment analysés et expliqués. Par ailleurs, les contraintes logistiques ont fait en sorte que le régime thermique de la partie supérieure du pergélisol (les premiers mètres) n'a été mesuré qu'à quelques endroits dans la vallée, et non à tous les sites microclimatiques. Conséquemment, l'influence du (micro)climat de surface sur la dynamique de la partie supérieure du pergélisol n'a pu être démontré que partiellement.

Il importe enfin de mentionner que la constante comparaison entre les deux années de mesure (2002-03 et 2003-04) ne prend pas en compte leur représentativité par rapport à la tendance climatique régionale à plus long terme. Après que les températures de l'ensemble de l'Est de l'Arctique aient augmenté significativement lors de la période comprise entre 1993 et 2002, elles semblent s'être stabilisées au cours des dernières années. En fait, les années 2002-03 et 2003-04, bien que différentes entre elles quant à leur variabilité et leurs tendances saisonnières, ne sont pas des années « record ». De plus, il est impossible pour l'instant d'évaluer dans quelle mesure elles seront représentatives des prochaines « normales » climatiques sur 30 ans.

Quoiqu'il en soit, le présent chapitre a pour but d'approfondir davantage la réflexion : d'une part, en expliquant plus en détail les interactions entre le climat de surface et les infrastructures anthropiques du village puisque cette étude est en grande partie « appliquée »; d'autre part, en élargissant l'interprétation climatique au contexte régional à plus long terme.

4.2 Dynamique climatique et géomorphologique

Bien qu'exhaustive, l'analyse des nombreux résultats du chapitre précédent se limite à une superficie très restreinte, soit quelques kilomètres carrés seulement. De plus, elle se concentre sur une période de mesure d'à peine deux ans. Cette très fine résolution spatiale et temporelle mérite ici d'être élargie, dans l'espace comme dans le temps.

4.2.1 Contexte climatique régional (1970-2000)

Le topoclimat de la vallée de Salluit possède son caractère propre et cette particularité se manifeste surtout par temps clair et dégagé. Il s'agit d'un trait commun aux milieux topographiques encaissés ou montagneux (Lamothe, 1983; Weiss, 1987; Fallot, 1992). Or, puisque ce sont les conditions atmosphériques régionales qui contrôlent d'abord et avant tout le climat d'un lieu, il est pertinent de situer la vallée de Salluit dans son contexte régional étendu : celui du Grand Nord québécois (Nunavik) et de la partie sud-est du Nunavut. En d'autres mots, la région située de part et d'autre du détroit d'Hudson et de la baie d'Ungava.

Par sa latitude, Salluit est situé environ à mi-chemin entre les villages de Kuujjuaq (58° 6' N) et d'Iqaluit (63° 45' N). Pour ces deux villages, les données climatiques sont disponibles depuis plusieurs décennies (Environnement Canada, *site Internet* 2005). Ainsi, les températures moyennes annuelles de la plus récente période admissible pour le calcul des « normales climatiques » (1971-2000) montrent une évolution comparable pour ces deux sites (Figure 60). À ce titre, les moyennes mobiles sur 5 ans confirment nettement leur similarité, de même que l'augmentation des températures affectant toute la région durant la dernière décennie.

La corrélation entre les deux sites (Figure 61) confirme également cette tendance. La droite de corrélation possède un coefficient de détermination R^2 de 0,89. À chacune de ses extrémités figurent les points représentant des années « charnières » de la dernière décennie. En effet, c'est durant cette période que les valeurs extrêmes par rapport à la normale ont été atteintes : les minima au début des années '90 et les maxima à la fin de cette même décennie.

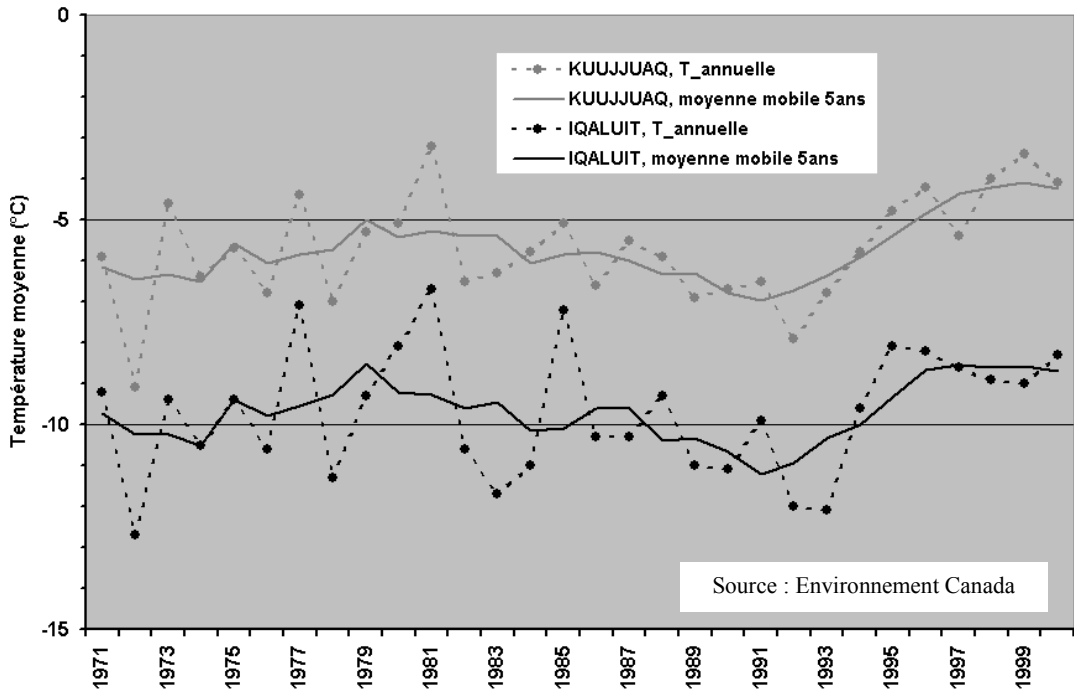


Figure 60: Températures annuelles de l'air (1971-2000), Kuujuaq et Iqaluit.

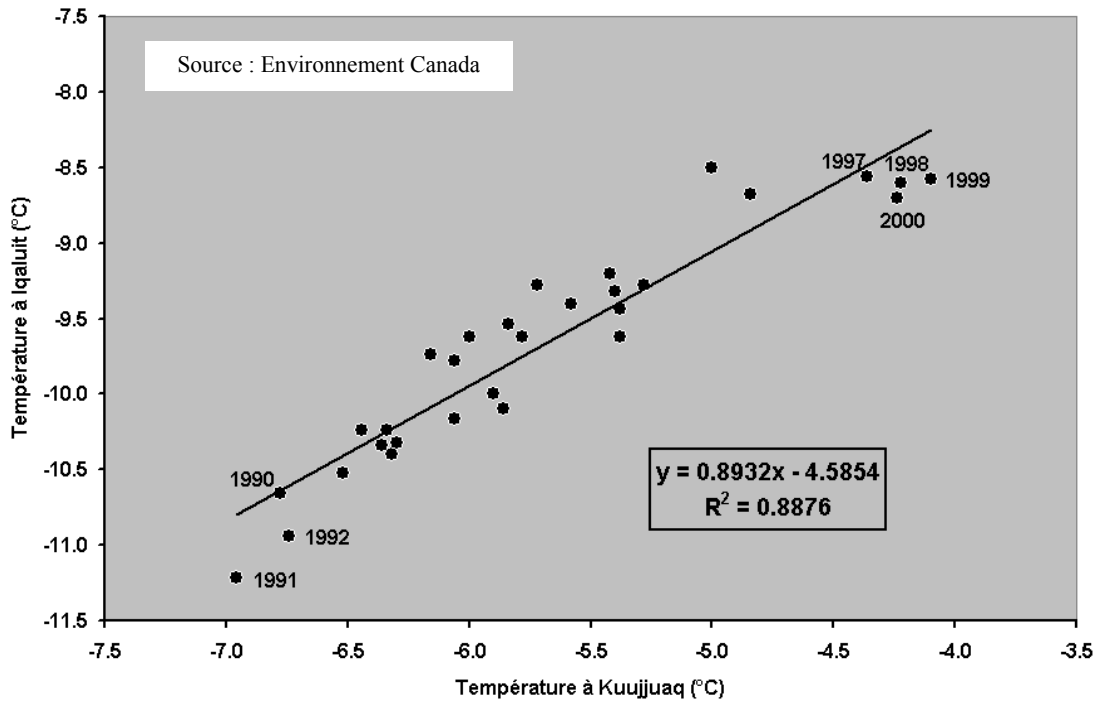


Figure 61: Corrélation des températures de l'air (1971-2000), Kuujuaq et Iqaluit.

Bien qu'il n'existe pas de telles séries continues de données dans l'air pour Salluit, il est raisonnable de penser que la tendance des dernières décennies y a été comparable et intermédiaire entre ces deux sites. C'est d'ailleurs ce que les données dans le sol ont démontré : un refroidissement jusqu'au début des années '90 (Allard et *al.*, 1995; Wang & Allard, 1995), suivi d'un réchauffement rapide jusqu'à aujourd'hui (Allard et *al.*, 2004).

À l'échelle saisonnière, les températures moyennes de l'air montrent également une certaine tendance régionale (Figure 62). Le réchauffement hivernal de 2003-04 et le raccourcissement de la saison estivale en 2004 semblent avoir affecté l'ensemble de la région, surtout Salluit et Iqaluit. En somme, les phénomènes climatiques locaux doivent être mis en relation avec l'état régional de l'atmosphère qui exerce un contrôle sur ces mêmes phénomènes. À cet égard, des travaux menés dans l'Arctique canadien ont démontré la pertinence de tenir compte à la fois des températures et des précipitations à l'échelle régionale (Young et *al.*, 1997). C'est le sujet de la prochaine sous-section.

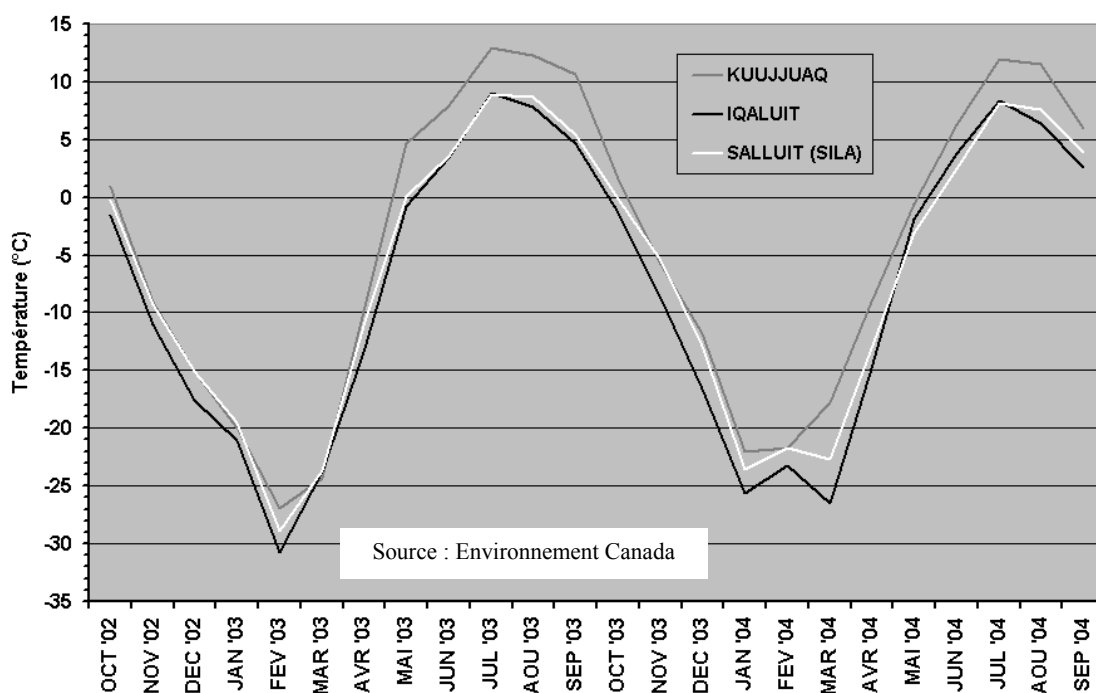


Figure 62: Températures moyennes mensuelles de l'air (octobre 2002 - septembre 2004) pour Salluit, Kuujuaq et Iqaluit.

4.2.2 Températures et précipitations

Si les prévisions des modèles climatiques semblent relativement unanimes sur le devenir des températures pour les prochaines décennies, les résultats concernant les précipitations demeurent plus nuancés. Les échelles spatiales où se déroulent ces phénomènes demeurent d'ailleurs très variables. Or, puisque les paramètres météorologiques sont étroitement reliés entre eux, il est fort probable que les variations annuelles et décennales des températures soient liées au moins en partie à celles des précipitations. C'est du moins ce qui ressort des données régionales couvrant la période 1971-2000 pour Kuujuaq et Iqaluit (Figure 63).

Les périodes de 5 ans semblent en effet démontrer l'interconnexion des températures et des précipitations : des périodes plus chaudes sont en général associées à des périodes plus humides. Non seulement de l'air plus chaud peut emmagasiner une plus grande quantité d'humidité, mais la hausse des températures favorise une plus grande évaporation, à condition qu'il y ait suffisamment d'eau disponible.

L'augmentation prévue des températures pour les hautes latitudes (Salluit inclus) pourrait ainsi donner lieu à une augmentation quasi-simultanée des précipitations, surtout si l'on considère de longues périodes de temps (décennies). De cette augmentation découleraient au moins deux conséquences géomorphologiques pour la surface du pergélisol : d'une part, une plus grande quantité de neige isolerait davantage le sol du froid hivernal, ce qui contribuerait à réchauffer le profil thermique de la partie supérieure du pergélisol; d'autre part, une plus grande quantité d'eau disponible à la surface du sol (fonte de neige et pluie) jouerait un rôle dans l'importance et la fréquence des processus morphologiques de surface (érosion thermique, concentration d'eau à la base du mollisol, gélifluxion, glissements de terrain, etc.).

Ces effets seraient toutefois modulés par les conditions locales de la surface du sol. Premièrement, l'hétérogénéité de l'humidité de surface est associée à d'importantes variations microclimatiques, surtout dans les sols tourbeux (Halliwell et *al.*, 1990). Deuxièmement, la profondeur maximale du front de dégel est grandement contrôlée par les caractéristiques de la végétation et du sol sous-jacent (Young et *al.*, 1997). Enfin, la température de surface du sol est fortement corrélée à l'épaisseur de neige (Ménard et *al.*, 1998). Les résultats présentés dans la section 3.2 sur les environnements microclimatiques confirment ces constats.

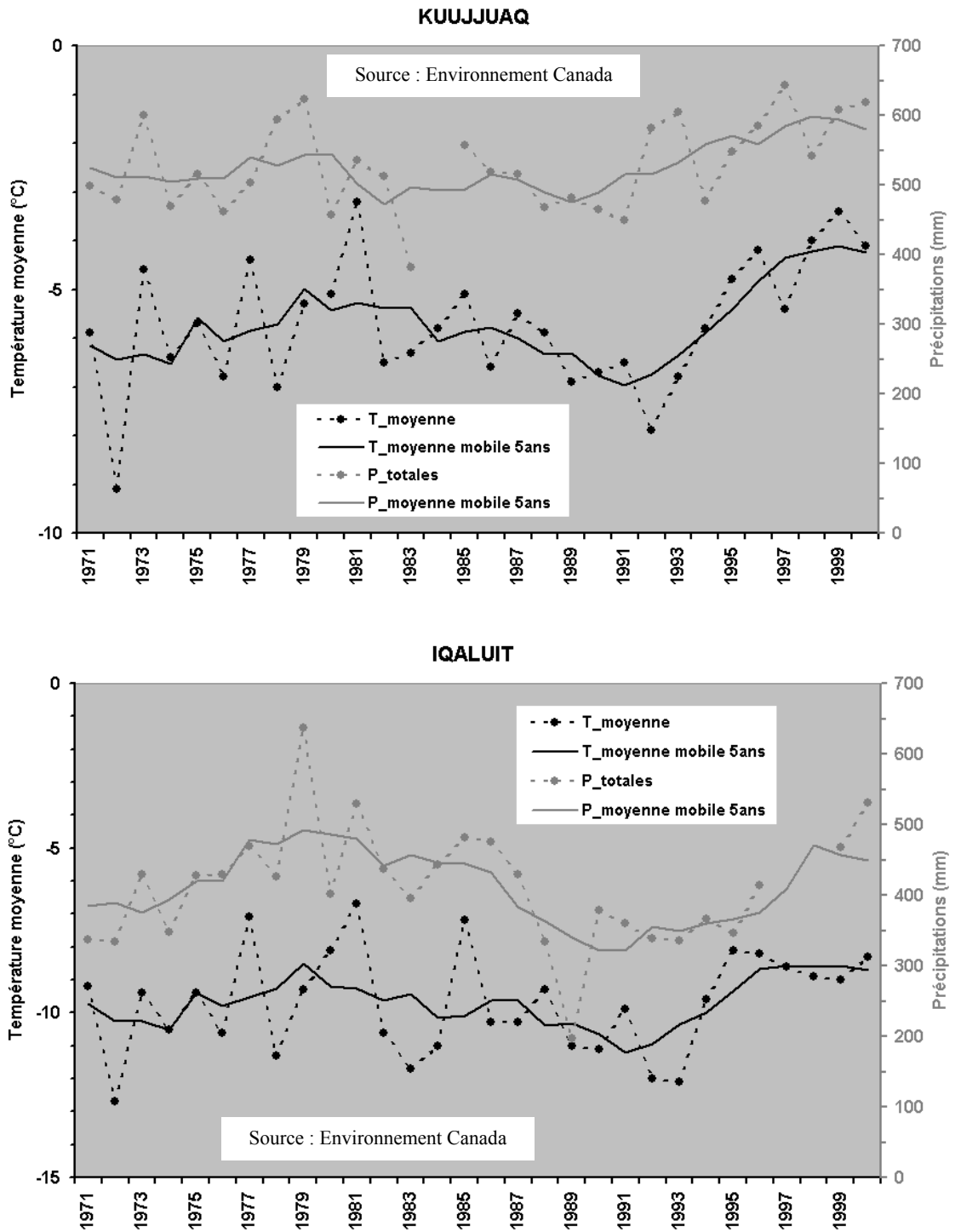


Figure 63: Températures annuelles de l'air et précipitations annuelles (1971-2000), Kuujuaq et Iqaluit.

4.2.3 Interactions air-sol

Les résultats de cette étude suggèrent que le topoclimat de la vallée de Salluit serait composé d'une mosaïque d'environnements microclimatiques qui influencent les échanges thermiques et hydrologiques entre l'air et la surface du sol. Or, la façon dont ces échanges se propagent plus en profondeur dans le sol reste à évaluer. Le mollisol et le pergélisol ont des propriétés thermiques différentes qui, en plus de la nature du sol, contrôlent l'ampleur et la vitesse de propagation de telles variations.

Les données sur les températures du sol à différentes profondeurs sont disponibles pour trois sites (Figure 64) : la station topoclimatique SILA (fond de la vallée), reposant sur plusieurs mètres de till; le site du forage FP-2 (dans le village), effectué dans des silts argileux; la station de l'AÉROPORT (plateau rocheux).

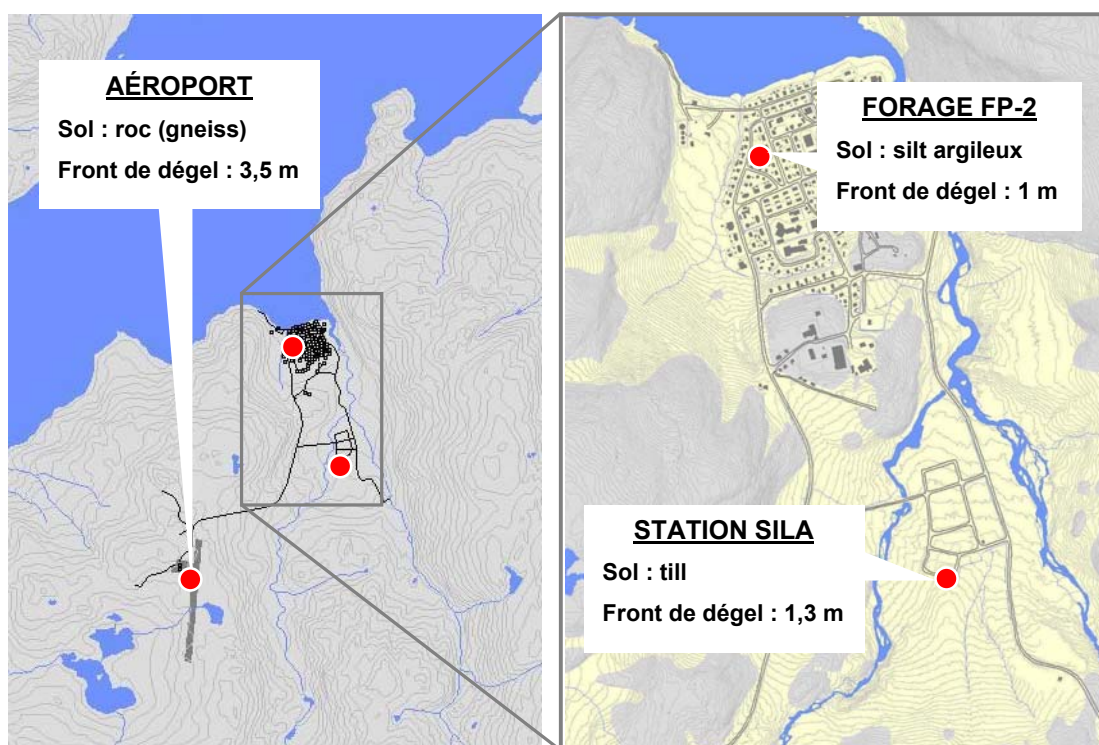


Figure 64: Sites de mesures de température du sol.

Les températures et les indices thermiques dans l'air, à la surface du sol et à plusieurs profondeurs dans le sol ont été synthétisés pour ces trois sites (Tableau XV).

Tableau XV: Synthèse des températures et des indices thermiques dans l'air et dans le sol pour trois stations climatiques.

| | T_moy_annuelle (°C) | | | Indices de gel (DJ) | | | Facteurs-n de gel | | | Indices de dégel (DJ) | | | Facteurs-n de dégel | | |
|-----------------|---------------------|--------|-------------|---------------------|--------|-------------|-------------------|--------|--------------|-----------------------|--------|-------------|---------------------|--------|--------------|
| SILA | 02-'03 | 03-'04 | Var_inter | 02-'03 | 03-'04 | Var_inter | 02-'03 | 03-'04 | Var_inter | 02-'03 | 03-'04 | Var_inter | 02-'03 | 03-'04 | Var_inter |
| Air | -6.8 | -6.7 | +0.1 | 3332 | 3181 | -151 | - | - | - | 911 | 736 | -175 | - | - | - |
| Sol (2 cm) | -6.2 | -5.9 | +0.3 | 2997 | 2857 | -140 | 0.90 | 0.90 | 0.00 | 781 | 702 | -79 | 0.86 | 0.95 | +0.10 |
| Sol (25 cm) | -6.2 | -5.3 | +0.9 | 2769 | 2437 | -331 | 0.83 | 0.77 | -0.06 | 557 | 523 | -34 | 0.61 | 0.71 | +0.10 |
| Sol (100 cm) | -5.9 | -5.1 | +0.9 | 2237 | 1920 | -317 | 0.67 | 0.60 | -0.07 | 89 | 73 | -16 | 0.10 | 0.10 | 0 |
| Sol (150 cm) | -5.9 | -5.0 | +0.9 | 2140 | 1837 | -303 | 0.64 | 0.58 | -0.06 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Sol (400 cm) | -5.6 | -5.1 | +0.5 | 2044 | 1866 | -177 | 0.61 | 0.59 | -0.03 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| FP-2 | | | | | | | | | | | | | | | |
| Air | -6.8 | -6.7 | +0.1 | 3332 | 3181 | -151 | - | - | - | 911 | 736 | -175 | - | - | - |
| Sol (5 cm) | -3.8 | -3.2 | +0.6 | 2279 | 2202 | -77 | 0.68 | 0.69 | +0.01 | 936 | 1051 | +115 | 1.03 | 1.43 | +0.40 |
| Sol (25 cm) | -3.9 | -4.0 | -0.2 | 1854 | 1873 | +19 | 0.56 | 0.59 | +0.03 | 462 | 402 | -60 | 0.51 | 0.55 | +0.04 |
| Sol (100 cm) | -4.0 | -3.9 | +0.1 | 1445 | 1433 | -11 | 0.43 | 0.45 | +0.02 | 1 | 0 | -1 | 0 | 0 | 0 |
| Sol (150 cm) | -4.2 | -4.1 | +0.1 | 1512 | 1487 | -25 | 0.45 | 0.47 | +0.01 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Sol (400 cm) | -4.3 | -4.3 | +0.1 | 1585 | 1559 | -26 | 0.48 | 0.49 | +0.01 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| AÉROPORT | | | | | | | | | | | | | | | |
| Air | -8.0 | -7.9 | +0.0 | 3607 | 3487 | -120 | - | - | - | 743 | 593 | -150 | - | - | - |
| Sol (100 cm) | -6.2 | -5.5 | +0.8 | 2628 | 2378 | -250 | 0.73 | 0.68 | -0.05 | 387 | 393 | +7 | 0.52 | 0.66 | +0.14 |
| Sol (200 cm) | -6.1 | -5.5 | +0.7 | 2374 | 2127 | -248 | 0.66 | 0.61 | -0.05 | 147 | 131 | -17 | 0.20 | 0.22 | +0.02 |
| Sol (300 cm) | -6.1 | -5.4 | +0.6 | 2205 | 1983 | -222 | 0.61 | 0.57 | -0.04 | 3 | 1 | -2 | 0 | 0 | 0 |
| Sol (400 cm) | -6.0 | -5.5 | +0.5 | 2193 | 2001 | -192 | 0.61 | 0.57 | -0.03 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Sol (1000 cm) | -5.8 | -5.6 | +0.2 | 2106 | 2056 | -51 | 0.58 | 0.59 | +0.01 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Ces résultats font d'abord ressortir des comportements différents à l'intérieur même de la vallée : les températures annuelles ont été à toutes les profondeurs plus froides dans le till (SILA) que dans les silts argileux (FP-2). Cela s'est traduit au site SILA par des indices de gel nettement plus élevés (plusieurs centaines de degrés-jours de différence) et des facteurs-n qui sont demeurés au-dessus ou près de 0,6 jusqu'à une profondeur de 4 m (contre à peine 25 cm pour le site FP-2). D'autre part le réchauffement hivernal de la deuxième année de mesure, comme en témoignent les variations des degrés-jours de gel, a été enregistré avec beaucoup plus d'ampleur dans le till. La plus grande conductivité thermique de ce type de sol, sa plus faible teneur en glace et l'absence d'un couvert de neige en surface (contrairement à une cinquantaine de centimètres pour FP-2 à l'hiver 2003) peuvent expliquer cet écart.

Par ailleurs, les indices de la saison de dégel ont diminué beaucoup plus rapidement en profondeur, surtout dans les silts (FP-2). Le front de dégel y a été stoppé à environ 1 m de profondeur, alors qu'il s'est propagé plus profondément dans le till (entre 1 et 1,5 m). Ces résultats concordent avec les profondeurs maximales atteintes en 2003 par les isothermes de 0 °C, qui définissent l'épaisseur du mollisol (Allard et *al.*, 2004) : environ 1,3 m dans le till (SILA) et 1 m dans les silts argileux (FP-2).

Il est intéressant de comparer ces deux sites en observant l'évolution des températures mensuelles dans l'air et dans le sol à différentes profondeurs (Figure 65). Ces diagrammes illustrent le transfert thermique et les variations saisonnières des températures à différents niveaux : d'une part entre l'air et le mollisol à 25 cm de profondeur (diagrammes du haut); d'autre part entre le mollisol (25 cm) et la partie supérieure du pergélisol à 150 cm de profondeur (diagrammes du bas). Les points se rejoignent le long d'ellipses plus ou moins allongées dont les déformations dépendent des variations thermiques en surface et des contrastes de conductivité dans les différentes couches du sol (Smith et *al.*, 1998).

La variabilité réduite de l'année 2003-04 par rapport à 2002-03 est illustrée dans des ellipses plus petites, en général plus étroites et plus courtes. Le réchauffement de février 2004 se démarque d'ailleurs nettement, même en-dessous de la limite inférieure du mollisol (150 cm). De plus, la pente du grand axe des ellipses de droite (FP-2) est demeurée légèrement plus faible que celle des ellipses de gauche (SILA), ce qui confirme la plus faible conductivité thermique des silts argileux. Il est à noter que le site FP-2 a été recouvert de neige (>50 cm).

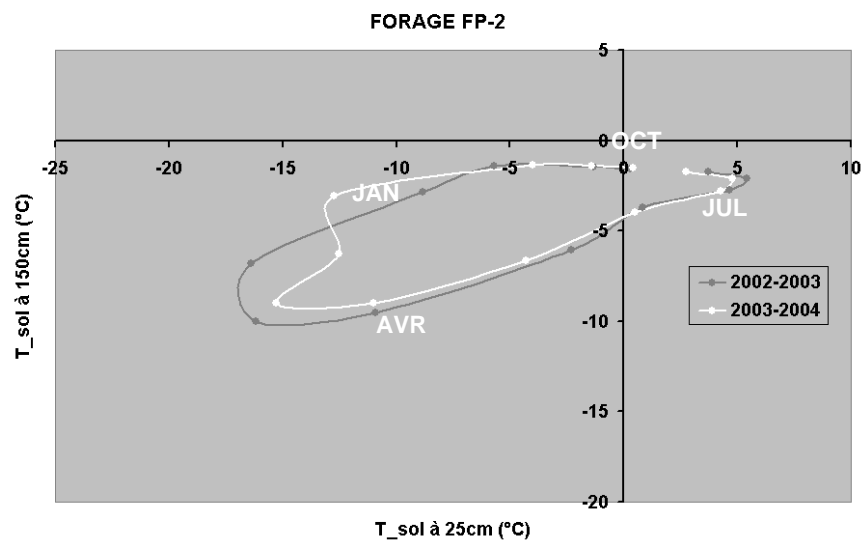
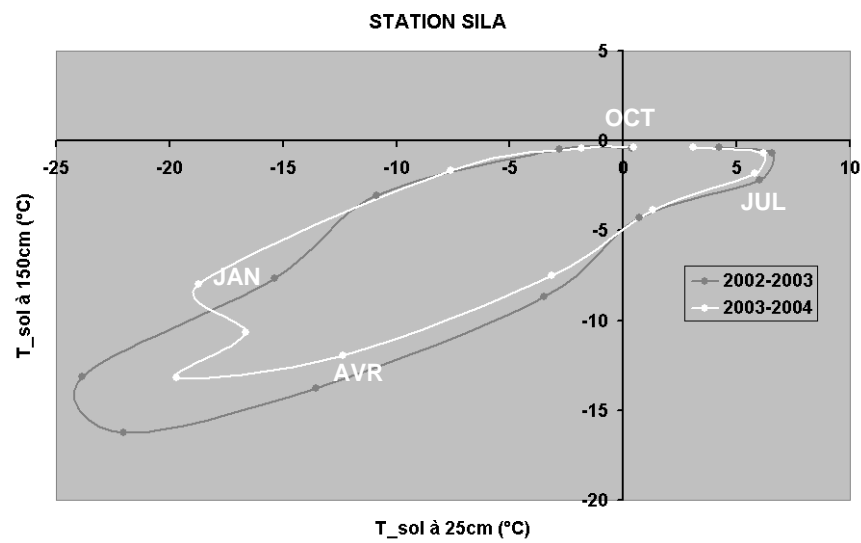
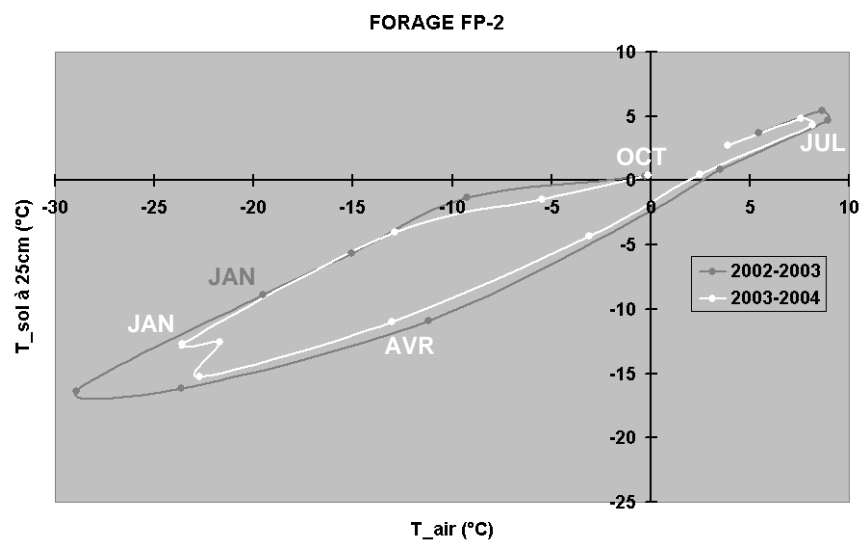
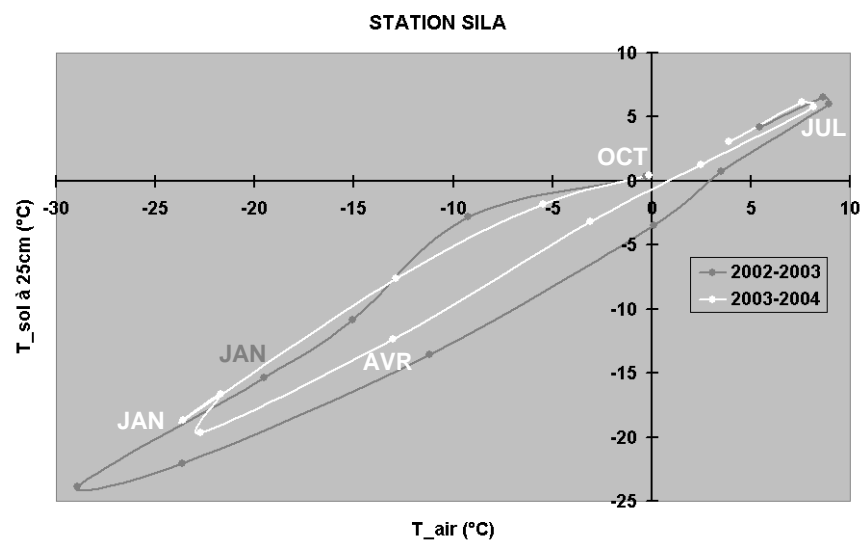


Figure 65 : Températures moyennes mensuelles dans l'air et dans le sol pour deux sites, vallée de Salluit.

Le transfert thermique saisonnier de l'air à travers le sol est donc fortement contrôlé par les conditions de surface et les contrastes de conductivité thermique dans le sol, comme c'est le cas pour les sites situés à l'intérieur de la vallée. En élargissant l'analyse au contexte plus régional, il est pertinent de comparer cette dynamique thermique dans la vallée par rapport à celle observée au sommet des versants à la station de l'aéroport (Tableau XV).

Comme mentionné plus haut (section 3.1.1), la température de l'air a été plus froide à l'aéroport qu'à la station SILA. Cela s'explique par le dénivelé entre les deux stations. En supposant un gradient altitudinal moyen de $-0.65\text{ °C} / 100\text{ m}$, l'écart de température d'environ $1,2\text{ °C}$ correspond effectivement à un dénivelé de 180m (225 m à l'aéroport contre 45 m au site SILA). Cet écart entre les deux sites diminue fortement dans le sol avec la profondeur, mais la température demeure quand même systématiquement plus froide à l'aéroport.

Les indices thermiques de gel montrent une tendance comparable. L'écart entre les deux sites, de plus de 400 degrés-jours à 1 m de profondeur, a diminué à 200 degrés-jours à 4 m de profondeur. Par conséquent, les facteurs-n de gel ont été plus élevés à l'aéroport en surface et cet écart s'est constamment réduit avec la profondeur : à 4 m de profondeur, les facteurs-n ont d'ailleurs été égaux aux deux sites (autours de 0,6).

Les indices de dégel confirment la forte conductivité thermique du roc. Le dégel estival s'y propage plus profondément (au-delà de 3 m de profondeur) que dans le till (entre 1 et 1,5 m), ce qu'ont confirmé les profondeurs atteintes par les isothermes de 0 °C à l'été 2003 (Allard et *al.*, 2004) : 3,5 m pour le roc et 1,3 m pour le till. D'ailleurs, à 1 m de profondeur, à peine 10% de la chaleur estivale a été transmise au sol dans le till, contre plus de 50% dans le roc.

Les graphiques des températures mensuelles de l'air et à différentes profondeurs dans le sol (Figure 66) permettent d'évaluer les écarts de transferts thermiques saisonniers entre la vallée et les plateaux rocheux environnants. En général, les ellipses pour l'année 2003-04 sont plus étroites et plus courtes que pour l'année 2002-03, ce qui confirme la réduction de la variabilité des températures durant cette année de mesure. De plus, la pente des grands axes des ellipses est plus faible dans le till que dans le roc. Cela témoigne du contraste de conductivité thermique entre les deux types de sol. À 4 m de profondeur, le maximum annuel a d'ailleurs été atteint en automne (octobre) dans le roc mais en hiver (décembre-janvier) dans le till.

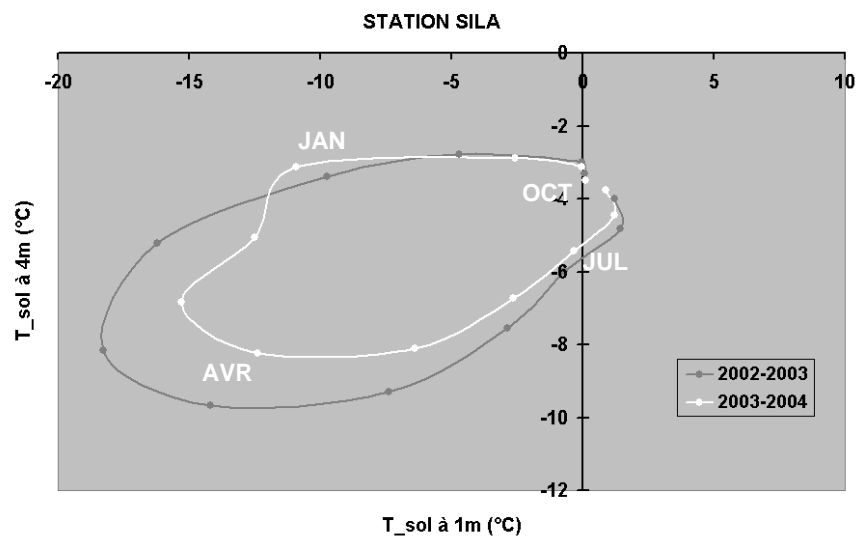
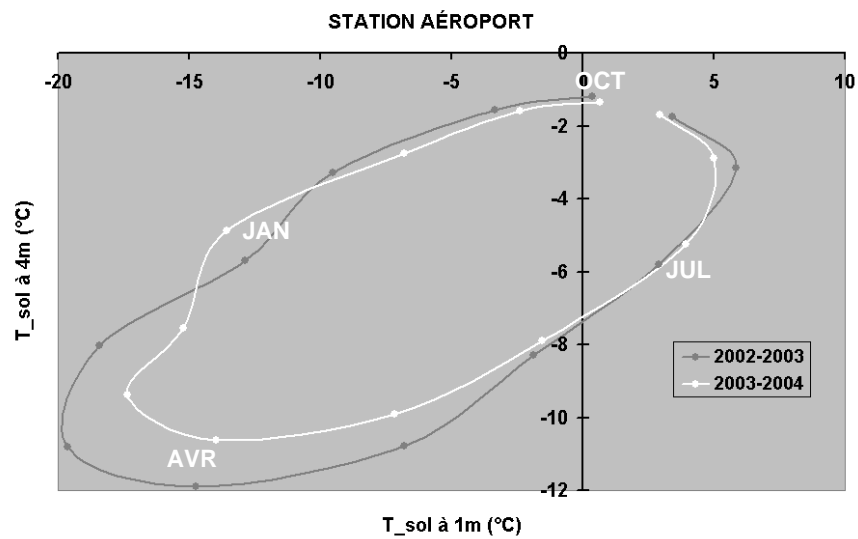
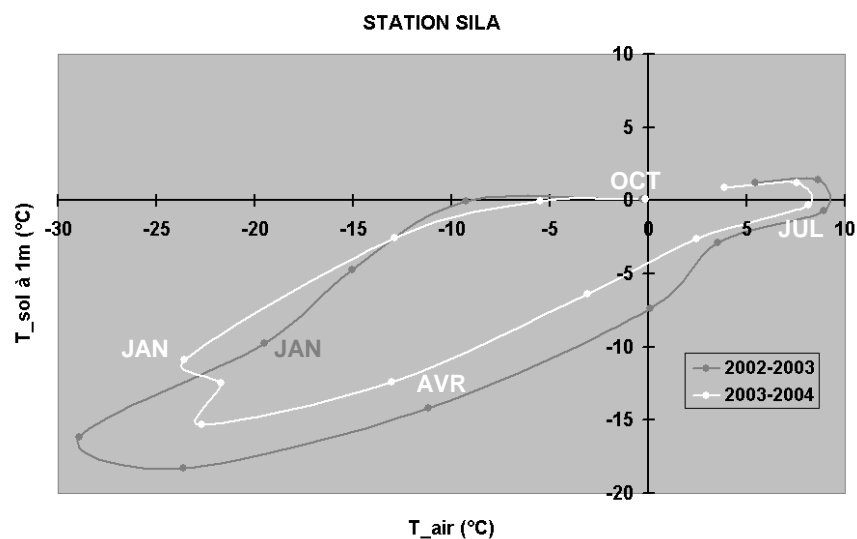
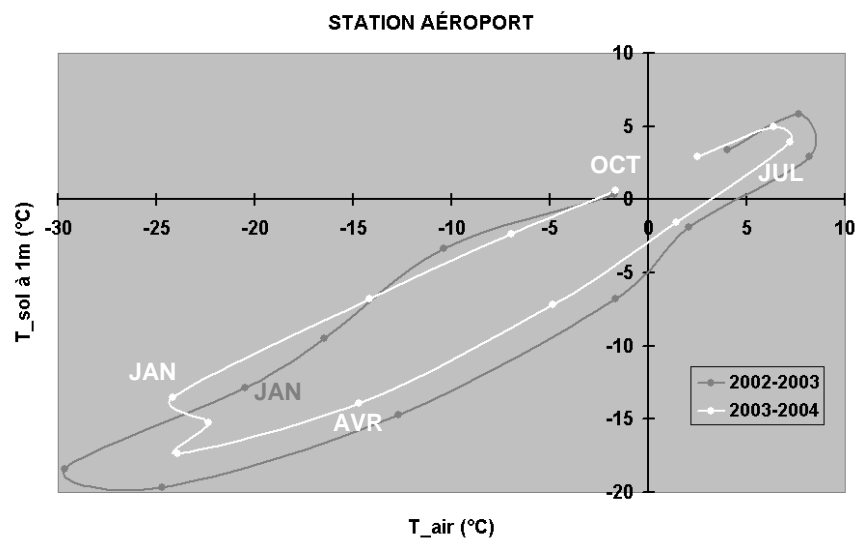


Figure 66 : Températures moyennes mensuelles dans l'air et dans le sol, plateau rocheux (aéroport) et vallée de Salluit (SILA).

4.3 Performance thermique des infrastructures

En milieu naturel, la répartition et la densité de la couverture de neige sont contrôlées exclusivement par la micro-topographie et son exposition face aux vents dominants. Certains sites microclimatiques déjà analysés en détail (section 3.2) ont ainsi été recouverts pendant plusieurs mois d'une épaisse couche de neige qui a fortement influencé le bilan thermique de la surface du sol (ex : les combes à neige des sites #3 et #17). En milieu construit, où la topographie est généralement plate et homogène, ce sont plutôt les infrastructures qui, par leur présence et leur orientation face aux vents dominants, ont contrôlé l'accumulation ou l'érosion de neige à la surface du sol (ex : les bâtiments des sites #11 et #21; le bord de route du site #18). La performance thermique des infrastructures, en particulier celle des bâtiments, mérite ici d'être approfondie à la lumière des résultats topoclimatiques et microclimatiques. Il s'agit d'un aspect peu documenté et important dans la planification des aménagements futurs.

4.3.1 Bâtiments surélevés

L'épaisseur (~50 m) des silts argileux sur lesquels repose la majeure partie du village empêche l'utilisation de pieux pour la construction. De plus, quelques bâtiments construits sur des dalles de béton ont montré des signes importants de tassement dû au transfert de chaleur vers le sol. Par conséquent, la plupart des bâtiments du village ont été construits sur des châssis d'acier surélevés (environ 1 m) reposant sur des tétrapodes et dont l'élévation est ajustable au moyen de vérins. Ainsi, les légers tassements du sol causés par les cycles saisonniers de gel-dégel peuvent être corrigés d'une année à l'autre.

Les données thermiques enregistrées aux sites microclimatiques localisés sous ce genre de bâtiments (#11-école et #21-maison) ont démontré leur stabilité. En effet, les températures et les indices thermiques au sol y sont demeurés semblables – et même plus froids par endroits – à ce qui avait été observé dans l'air. La saison de gel y a d'ailleurs été nettement plus longue qu'aux autres sites. Deux principaux facteurs contribuent à maintenir une telle efficacité thermique sous les bâtiments : la quasi-absence de neige durant l'hiver et la protection contre le rayonnement solaire direct durant l'été.

La situation hivernale est tributaire des précipitations de neige mais surtout des vents dominants. L'espacement entre le sol et le plancher des bâtiments permet le passage et l'accélération de l'air au niveau du sol (Figure 67). Puisque les vents dominants proviennent du sud, leur déviation dans les environs et sous les bâtiments provoque l'accumulation de neige du côté « sous le vent », soit près de la façade nord. La neige ainsi accumulée forme une série de congères stratifiées en forme de vagues dont la hauteur est généralement comprise entre 1 et 2 m (Figure 67, photo de droite). Par conséquent, la surface du sol sous les bâtiments est entièrement exposée au froid hivernal, qui se propage efficacement dans les remblais de gravier sur lesquels reposent ces bâtiments. Les degrés-jours et les facteurs-n de gel mesurés à la surface du sol y ont d'ailleurs été très élevés.

Durant la saison de dégel, le sol entourant les bâtiments reçoit une grande quantité d'énergie solaire : soit directement, soit par réflexion le long de la façade sud des bâtiments (Figure 68). Cette chaleur accumulée contribue à un léger affaissement du sol sous-jacent. Une dépression s'y développe parfois et récolte les eaux de fonte de la neige et des précipitations estivales. Ce tassement affecte également les tétrapodes supportant la partie sud des bâtiments, comme en témoignent les madriers et coins de bois successivement ajoutés (Figure 68, photo de gauche). Le sol situé sous les autres façades et sous la partie centrale des bâtiments, mieux protégé du rayonnement solaire direct, est généralement intact et plus stable à long terme. Par conséquent, les degrés-jours de dégel accumulés y ont été significativement plus faibles que dans l'air et ce, durant la majeure partie de la saison de dégel (mai à septembre). Les facteurs-n de dégel ont à peine dépassé les 70%.

La comparaison des résultats topoclimatiques entre les deux années de mesure peut également amener un éclairage nouveau. Comme il en a été fait mention au chapitre précédent (section 3.1), les températures moyennes annuelles de l'air n'ont que très faiblement *augmenté* dans la vallée de Salluit (station SILA). Durant la même période, c'est plutôt une *diminution* qui a affecté les températures moyennes annuelles de la surface du sol aux sites situés sous les bâtiments (Tableau XII, p. 67). Cette diminution a atteint 0,3 °C pour les deux sites (#11-école et #21-maison). Une explication envisageable de ce phénomène pourrait provenir des données de vitesse des vents durant la même période (Figure 21, p. 49 et Figure 23, p. 53).



Figure 67 : Accumulation de neige du côté nord des bâtiments.

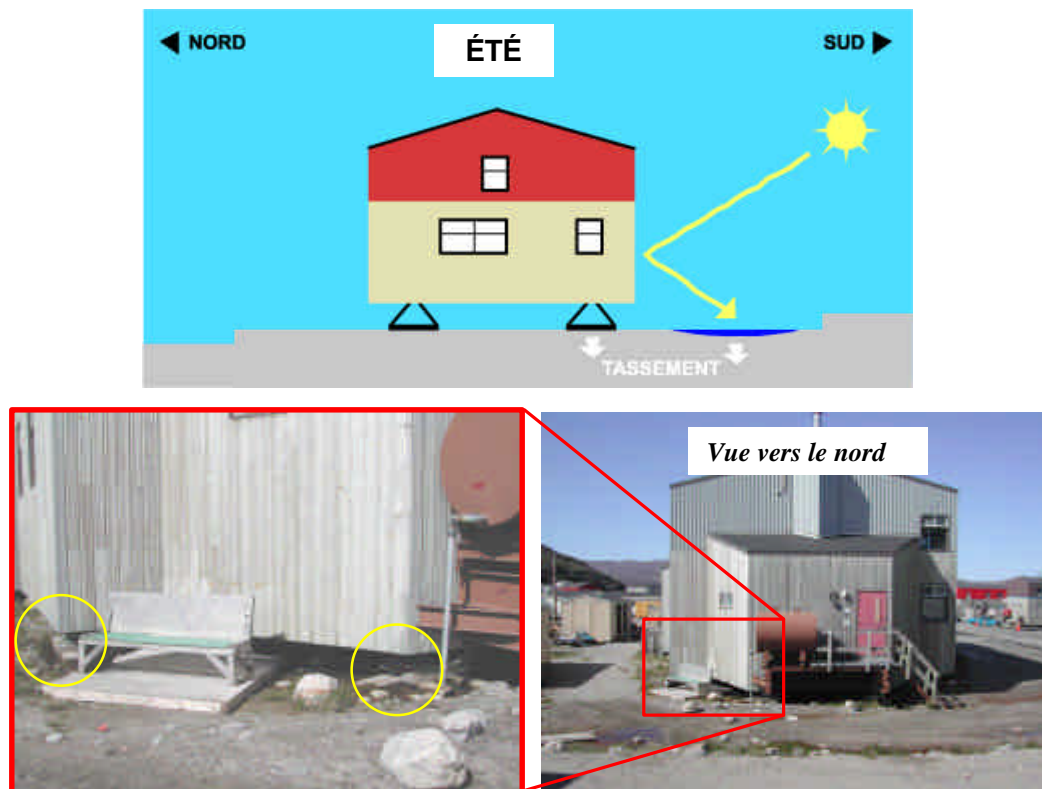


Figure 68 : Ruissellement et tassement du côté sud des bâtiments.

En effet, les vents d'hiver ont été nettement plus forts durant la deuxième année de mesure, surtout aux mois de mars et d'avril 2004. L'écoulement d'air sous les bâtiments et le refroidissement éolien qui l'accompagne ont donc été plus importants sous les bâtiments lors du deuxième hiver. Cela a vraisemblablement contribué au refroidissement observé de la température de la surface du sol.

Par ailleurs, les vents d'été ont été légèrement plus faibles durant la deuxième année, surtout aux mois de mai, juin et août 2004. À l'inverse de la situation hivernale, l'écoulement d'air sous les bâtiments a donc été réduit, ce qui a conséquemment diminué le réchauffement estival du sol. Ainsi, la couche d'air immédiatement au-dessus du sol a pu être maintenue légèrement plus fraîche, ce qui a contribué en partie aux résultats déjà évoqués de l'année 2003-04. La comparaison inter-annuelle des conditions de vents et de température (dans l'air et à la surface du sol), à l'échelle topoclimatique comme à l'échelle microclimatique, permet donc de décrire et d'expliquer des phénomènes très « appliqués » et directement observables sur le terrain.

En somme, en empêchant l'accumulation de neige et en maintenant le sol à l'abri d'une partie du rayonnement estival, la plupart des bâtiments contribuent à leur propre efficacité thermique et donc, à leur stabilité. Cela est d'autant plus vrai lorsque les vents d'hiver sont plus forts et les vents d'été plus modérés. Par un suivi régulier, le ruissellement et le tassement du sol qui affectent la façade sud des bâtiments peuvent être gérés d'une année à l'autre.

Les maisons construites durant les dernières années sont toutefois moins surélevées que les anciennes (0,6 m au lieu de 1 m). De plus, les réservoirs d'eau et de rejets domestiques, qui doivent être préservés du gel, y ont été installés sous les planchers. Cela réduit d'autant l'espace entre le bâtiment et le sol en plus de générer une quantité supplémentaire de chaleur. Cette disposition risque donc de nuire à la ventilation du sol et de modifier le bilan thermique de sa surface. Cela sera à surveiller étroitement au cours des prochaines années.

4.3.2 Routes et remblais

Outre les bâtiments, certains autres aménagements anthropiques modifient localement l'écoulement d'air ainsi que l'accumulation de neige et d'eau. C'est le cas des remblais de routes et des radiers constitués de matériaux grossiers (graviers et blocs de gneiss), dont la hauteur peut atteindre plus d'un mètre (Figure 69, photo de gauche). Leur orientation face aux vents dominants contrôle en partie l'accumulation locale de neige sur leur bordure « sous le vent », de même que l'érosion ou la compaction de la neige sur leur bordure « au vent ». Or, l'intervention humaine modifie cette répartition : le déneigement des routes contribue à accumuler de grandes épaisseurs de neige de chaque côté des remblais, comme ce fut le cas au site microclimatique #18. Une épaisse couche de neige (>50 cm) s'y était accumulée, bien que le site soit exposé aux vents dominants. Par conséquent, les indices thermiques de gel y sont demeurés très faibles et la température moyenne annuelle, près de 0 °C. Durant l'été, la grande quantité d'eau de surface a aussi influencé le bilan thermique (facteurs-n de dégel >1).

Dans le village, les secteurs d'accumulation de la neige (ex : près du site microclimatique #12) demeurent une source importante d'eau de ruissellement qui provoque ou accélère l'érosion thermique (Figure 69, photo de droite). Certains types de sols (ex : colluvions), bien qu'ils contribuent habituellement à maintenir une faible profondeur de dégel, peuvent ainsi devenir instables et sensibles aux processus morphologiques de surface.



Figure 69: Remblai de route et radier près du site microclimatique #12.

En somme, la répartition de la neige et de l'eau de surface, qu'elle résulte de processus naturels ou anthropiques, contrôle directement la performance thermique des infrastructures. La stabilité du pergélisol sous-jacent, à court comme à long terme, y est directement liée.

4.4 Stabilité future du pergélisol

La nature du sous-sol de la vallée de Salluit est amenée à influencer la rapidité avec laquelle surviendront les premiers impacts du réchauffement climatique annoncé. En effet, la salinité de l'eau contenue dans les argiles marines, telle que mesurée dans les premiers mètres du pergélisol, pourrait abaisser la température de fusion du sol jusqu'à des valeurs comprises entre -0,4 et -0,5 °C (Allard et *al.*, 2004). Cette température a déjà été atteinte durant les deux années de mesure à certains sites microclimatiques (Tableau XII).

Cette contrainte pourrait devancer dans le temps les premiers signes de détérioration du pergélisol. L'ampleur et la vitesse de tels changements seraient influencées non seulement par les variations annuelles moyennes du climat de surface, mais aussi par les tendances saisonnières et leur variabilité.

4.4.1 Tendances saisonnières

Comme mentionné plus haut (section 3.3.1), la partie Est de l'Arctique canadien a connu, jusqu'au début des années '90, des conditions climatiques sensiblement plus froides qu'aujourd'hui, ce qui a eu des répercussions dans le régime thermique du pergélisol. Or, ce refroidissement général des températures est davantage attribuable à des hivers plus rigoureux qu'à un refroidissement durant toute l'année (Wang & Allard, 1995; Kasper & Allard, 2001). Alors que les indices de gel ont augmenté significativement, les indices de dégel n'ont que peu varié. Certains étés de cette période (ex : 1991) sont même demeurés relativement chauds par rapport à la normale climatique de 30 ans.

Par ailleurs, le réchauffement de la fin du XX^{ème} siècle a surtout affecté les mois d'hiver et du printemps alors que les variations n'ont été que très faibles durant l'été (Allard et *al.*, 2004). Les taux mensuels de variation calculés pour Salluit à partir des données régionales (Kuujuaq et Iqaluit) ont montré les plus fortes augmentations en décembre (+0.9 °C) et mars (+0.5 °C) et les plus faibles en juillet (+0.03 °C) et août (+0.14 °C).

Plus récemment, l'année 2003-04 a montré des températures hivernales plus chaudes qu'en 2002-03, autant dans l'air que dans le sol. Ce réchauffement a également affecté les températures extrêmes mensuelles (minima et maxima) et son ampleur a varié en fonction des

environnements microclimatiques. À l'opposé, le léger refroidissement observé dans l'air à l'été 2004 semble n'avoir affecté que les maxima absolus, les minima n'ayant que peu varié. Ce refroidissement estival n'a été que faiblement transmis à la surface du sol, comme l'ont montré les facteurs-n mensuels de dégel élevés (supérieurs à 1 dans plusieurs sites microclimatiques).

Il en ressort que les fluctuations des températures, dans l'air comme dans le sol, ne sont pas homogènes et régulières durant toute l'année. Les tendances mensuelles et saisonnières sont plus significatives et expliquent davantage la dynamique du climat de surface et, conséquemment, celle du pergélisol.

Ainsi, une augmentation des températures hivernales dans l'air n'aurait pas le même effet sur la stabilité du pergélisol qu'un réchauffement équivalent réparti sur toute l'année. À l'échelle synoptique, les masses d'air arctiques de passage au-dessus de la région durant l'hiver, habituellement froides et sèches, pourraient devenir graduellement plus chaudes et plus humides, ce qui aurait une influence sur les précipitations et éventuellement sur la quantité de neige au sol, donc sur le bilan thermique des différentes surfaces.

4.4.2 Moyennes vs variabilité

Outre les valeurs moyennes, la variabilité (écart-type, amplitudes moyenne et absolue) de la température change selon la latitude ou le moment de l'année. Les contrastes de variabilité thermique, d'un mois à l'autre, d'une année à l'autre ou d'une décennie à l'autre, ne suivent pas nécessairement les fluctuations des valeurs moyennes.

Par exemple, pour la période 1971-2000, les amplitudes moyennes annuelles à l'échelle régionale (Kuujuuaq et Iqaluit) n'ont pas montré de tendances semblables aux températures moyennes pour la même période (Figure 70). Certes, une légère diminution des amplitudes a accompagné le refroidissement des années '80, mais l'allure des courbes a par la suite été beaucoup plus variable, montrant des tendances contraires entre les deux stations. Sur une base saisonnière, les données montrent pour la même période un écart-type plus élevé durant l'hiver que durant l'été (Environnement Canada (*site Internet*), 2005).

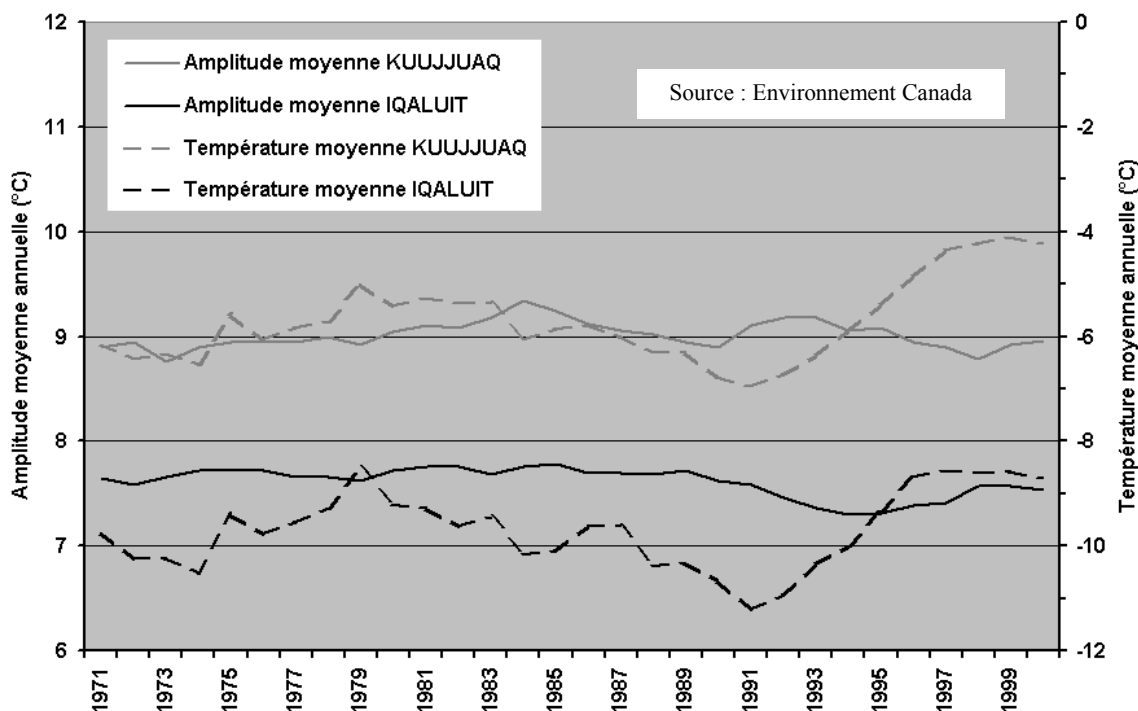


Figure 70: Amplitudes et températures annuelles de l'air (moyennes mobiles sur 5 ans, 1971-2000), Kuujuaq et Iqaluit.

Dans les environs de Salluit, la variabilité absolue a diminué durant la deuxième année de mesure (2003-04). Or, cette diminution a affecté tous les mois de l'année, sauf février et mars. De plus, les écarts-types mensuels ont diminué durant toute l'année, sauf en février. Il est pertinent de rappeler que le mois de février a connu, de loin, le réchauffement mensuel le plus important entre les deux années de mesure (+7,2 °C au site SILA). Ce réchauffement s'est propagé dans le sol, plus ou moins fortement selon les propriétés du sol et de la surface (surtout la neige), comme l'ont montré les températures mensuelles dans l'air et à différentes profondeurs dans le sol (Figure 65). Ainsi, au cours d'un hiver moins contrasté et plus doux, un mois plus variable et nettement plus chaud a eu un impact sur le bilan thermique du sol.

Les prévisions pour les prochaines décennies font état d'une augmentation « *très probable* » de la variabilité et des épisodes météorologiques extrêmes, ce qui se traduirait entre autres par le réchauffement des maxima (IPCC, 2001). Dans les hautes latitudes, cela pourrait se traduire par l'approfondissement du front de dégel estival, ce qui augmenterait le ruissellement d'eau

interstitielle au sommet du pergélisol et les risques de glissements de terrain. Durant l'hiver, ce réchauffement serait modulé localement en fonction du couvert neigeux.

À Salluit, l'année 2002-03 a montré une plus forte variabilité (sauf février) mais elle a connu un hiver plus froid (surtout février) et un été plus chaud, comme le confirme la corrélation entre les températures moyennes quotidiennes pour les deux années de mesure (Figure 71). Selon la pente de la meilleure droite passant par l'ensemble des points ($R^2 = 0,75$), la variabilité de l'année-2003-04 correspond à environ 80% de celle de l'année 2002-03.

Il demeure prématuré d'y déceler un avant-goût de la tendance future, mais il semble à tout le moins que la variabilité ait été plus élevée durant les mois d'hiver que durant le reste de l'année. La stabilité future du pergélisol risque d'y être sensible de façon plus ou moins marquée, selon les conditions d'enneigement et les caractéristiques du sol.

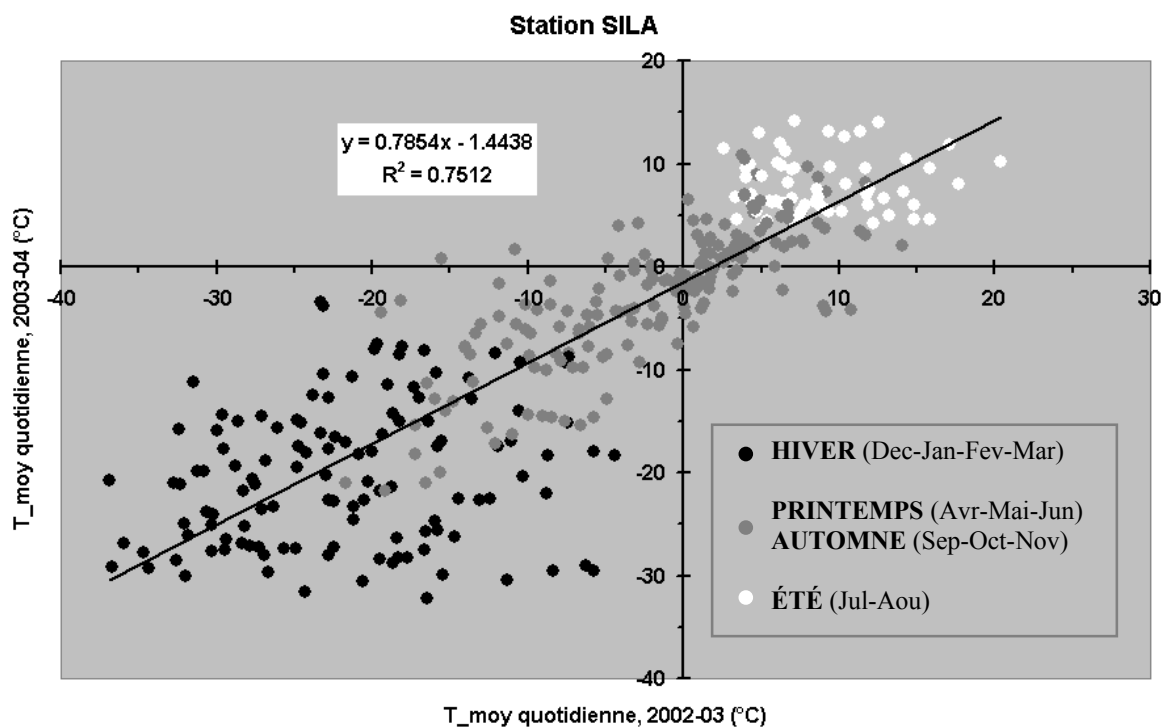


Figure 71: Corrélation des températures moyennes quotidiennes de l'air entre l'année 2002-03 et l'année 2003-04, station SILA.

Plusieurs points importants de cette discussion méritent ici d'être rappelés :

- La présente étude documente de façon originale et très détaillée le climat local d'une vallée encaissée en zone de pergélisol. Toutefois, les résultats obtenus sont limités dans l'espace (quelques km²) et dans le temps (2 ans).
- La partie Est de l'Arctique canadien a enregistré, au cours des dernières décennies, une évolution des températures dans l'air et dans le sol à laquelle n'a pas échappé la vallée de Salluit : un refroidissement continu jusqu'au début des années '90, suivi d'un réchauffement rapide de plusieurs degrés jusqu'à aujourd'hui. Ce réchauffement semble s'être stabilisé aujourd'hui mais ses impacts sont mesurables sur le terrain.
- Les interactions thermiques entre l'air et le sol ont varié d'un site à l'autre en fonction des propriétés du sol (conductivité thermique et granulométrie) et de la surface (neige, humidité, végétation, albédo). Les transferts thermiques saisonniers dans le mollisol et au sommet du pergélisol ont fait ressortir les écarts de variabilité entre les deux années de mesure.
- La performance thermique des bâtiments situés dans le village est assurée par leur élévation et leur orientation face aux vents dominants : l'absence de neige sous leurs planchers et la protection du sol contre le rayonnement solaire direct leur permet de maintenir un bilan thermique stable et froid. Cette efficacité thermique est renforcée lorsque les vents hivernaux sont forts et les vents estivaux faibles. Les autres infrastructures (radiers et routes) sont toutefois plus sensibles aux interventions et aménagements anthropiques (canalisation, déneigement). Les bilans thermiques près de 0 °C observés sur leurs flancs le démontrent.
- La stabilité future du pergélisol à l'échelle régionale sera sensible aux changements climatiques dans l'air mais les conditions locales du sol (dont la salinité) pourraient accélérer ou retarder les impacts de ces changements. De plus, les tendances saisonnières seront à considérer puisque les changements les plus importants risquent d'affecter les températures et les amplitudes hivernales.

Conclusion générale

Le climat local de la vallée de Salluit est tributaire, d'une part, du relief environnant et, d'autre part, des conditions atmosphériques régionales dans lesquelles il s'inscrit. Par temps dégagés et calmes, l'hétérogénéité thermique des différentes surfaces peut provoquer des phénomènes topoclimatiques comme des brises de pentes et des inversions thermiques. Ces phénomènes ont été observés à Salluit, surtout au milieu de l'hiver (février) et de l'été (juillet). Leurs effets sur le bilan thermique du pergélisol sont toutefois demeurés limités.

Par temps plus couverts et venteux, les paramètres climatiques locaux évoluent plutôt au rythme des conditions régionales. Certains travaux ont d'ailleurs montré que Salluit avait connu des fluctuations annuelles et décennales comparables à celles enregistrées ailleurs dans l'Est de l'Arctique canadien. Par ailleurs, les fluctuations saisonnières enregistrées à Salluit durant les deux années de mesure (2002-03 et 2003-04) ont aussi montré une certaine simultanéité avec d'autres stations régionales (ex : Kuujuaq et Iqaluit).

Ce point apparaît important puisque les changements climatiques qui auront le plus d'impact sur la stabilité du pergélisol risquent d'être perceptibles d'abord à l'échelle saisonnière (températures hivernales, amplitudes thermiques mensuelles ou saisonnières, précipitations de neige). C'est du moins ce que suggéreraient les variations inter-annuelles entre les deux années de mesure au site de Salluit : un hiver 2003-04 nettement plus doux mais plus long qu'en 2002-03, ainsi qu'un été 2004 plus frais et plus court qu'en 2003. Autrement dit, une année 2003-04 nettement moins contrastée que l'année précédente. Les variabilités annuelle et saisonnière seront donc à surveiller dans les prochaines années.

À l'échelle microclimatique, ce sont plutôt les conditions locales de la surface (enneigement, humidité, végétation, type de sol, présence ou non d'infrastructures à proximité) qui influencent les échanges énergétiques entre l'air et le sol. Les résultats concernant les températures et les indices thermiques au sol (gel ou dégel) ont d'ailleurs varié très fortement selon les conditions topographiques et écologiques de la surface. Parmi celles-ci, l'épaisseur et la densité de la couverture de neige ont eu les effets thermiques les plus prononcés.

Il est toutefois important d'insister sur l'étroite imbrication des différents facteurs géographiques et, par conséquent, de leur influence commune ou complémentaire (ex : neige et humidité, végétation et type de sol, etc.). Non seulement il est vain d'espérer pouvoir les séparer complètement, mais la nécessité d'un tel exercice demeure de toute façon discutable puisque les manifestations climatiques résultent de la conjugaison d'un ensemble de paramètres physiques. Néanmoins, l'idée d'analyser le comportement thermique de plusieurs surfaces microclimatiques s'avère une approche pertinente pour de meilleures décisions d'aménagement.

À ce titre, l'observation des températures sous certains bâtiments du village a permis d'évaluer leur bonne performance thermique tout au long de l'année (été comme hiver) en fonction des conditions régionales de vents et d'ensoleillement. La même démarche effectuée près des autres infrastructures (routes, remblais) a contribué à déceler leur vulnérabilité face aux conditions naturelles, mais aussi face à de mauvaises pratiques d'aménagement (canalisation, déneigement concentré, passage de véhicules lourds, etc.).

Ailleurs dans la vallée, les conditions d'enneigement et d'humidité en surface sont apparues comme les principaux facteurs qui influencent le bilan thermique des environnements microclimatiques. Par exemple, les sites de combes à neige ont montré des températures moyennes annuelles à la surface du sol dépassant 0 °C et des indices annuels de gel très bas (quelques centaines de degrés-jours). À l'instar d'autres travaux, la présente étude a d'ailleurs démontré la corrélation existant entre la température moyenne annuelle de la surface et l'épaisseur de neige au sol.

Il est toutefois difficile d'extrapoler ces résultats ailleurs dans la vallée puisque les mesures de neige ont été effectuées ponctuellement (autant dans l'espace que dans le temps). Une cartographie continue et détaillée des conditions de neige dans l'ensemble de la vallée pourrait améliorer considérablement de tels résultats. Ainsi intégrés à un système d'information géographique (SIG), ils s'avéreraient très efficaces pour la planification future des aménagements, en plus d'éclairer sous un angle différent les interactions entre le climat de surface et la dynamique du pergélisol.

Bibliographie

Liste des ouvrages cités

- Allard, M., Fortier, R., Gagnon, O., 2002. Problématique du développement du village de Salluit, Nunavik. Rapport d'étape 1 (septembre 2002). *Inventaire et compilation de l'ensemble des sondages et études géotechniques; compte-rendu de la campagne de terrain 2002*. Centre d'études nordiques, Université Laval, Québec, 122 p. Produit pour le Ministère de la sécurité publique du Québec.
- Allard, M., Fortier, R., Gagnon, O., Michaud, Y., 2004. Problématique du développement du village de Salluit, Nunavik. Rapport final (mars 2004). *Salluit : Une communauté en croissance sur un terrain sensible au changement climatique*. Centre d'études nordiques, Université Laval, 93 p. Produit pour le Ministère de la sécurité publique du Québec.
- Allard, M., Séguin, M.K., 1987. Le pergélisol au Québec nordique : bilan et perspectives. *Géographie physique et quaternaire* 41, 141-152.
- Allard, M., Wang, B., Pilon, J.A., 1995. Recent cooling along the southern shore of Hudson strait, Quebec, Canada, documented from permafrost temperature measurements. *Arctic and Alpine Research* 27 (2), 157-166.
- Barrette, N., Bouchard, F., Gauthier, R., Blouin, S., 2004. *Températures et précipitations au Québec septentrional, 1971-2000*. Rapport synthèse (mars 2004). Université Laval, Québec, 127 p. Présenté au Programme d'Aide à la Recherche et au Développement en Environnement (PARDE). Produit pour le Ministère de l'Environnement du Québec.
- Brown, R.J.E., 1978. Influence of climate and terrain on ground temperatures in the continuous permafrost zone of northern Manitoba and Keewatin District, Canada. *Proceedings 3rd International Conference on Permafrost (Edmonton, Canada)* 1, 15-21.
- Choisnel, E., 1987. Aspects topoclimatiques: une méthodologie d'étude en région de moyenne montagne. *Agrométéorologie des régions de moyenne montagne (Les Colloques de l'INRA 39)*, 177-195.
- Douguedroit, A., 1987. Les topoclimats thermiques de moyenne montagne. *Agrométéorologie des régions de moyenne montagne (Les Colloques de l'INRA 39)*, 197-213.
- Fallot, J.-M., 1992. *Étude de la ventilation d'une grande vallée préalpine : la vallée de la Sarine en Gruyère*. Thèse de doctorat (#995), Institut de Géographie, Université de Fribourg, 475 p.
- Geiger, R., 1966. *The climate near the ground*. Harvard University Press, Cambridge, 611 p.

- Gendron, D., Pinard, C., 2000. Early paleo-eskimo occupations in Nunavik: a re-appraisal. *Identities and cultural contacts in the Arctic*. M. Appelt, J. Berglund & H.C. Gulløv (eds.). Danish National Museum & Danish Polar Center, Copenhagen, 129-142.
- Gerardin, V., McKenney, D., 2001. *Une classification climatique du Québec à partir de modèles de distribution spatiale de données climatiques mensuelles : vers une définition des bioclimats du Québec*. Contribution du Service de la cartographie écologique 60, 40 p. Direction du patrimoine écologique et du développement durable, Ministère de l'Environnement du Québec.
- Goodrich, L.E., 1982. The influence of snow cover on the ground thermal regime. *Canadian Geotechnical Journal* 19, 421-432.
- Gray, J.T., Lauriol, B., Bruneau, D., Ricard, J., 1993. Post-glacial emergence of Ungava Peninsula, and its relationship to glacial history. *Canadian Journal of Earth Sciences* 30, 1676-1696.
- Gray, J.T., Pilon, J.A., Poitevin, J., 1988. A method to estimate active-layer thickness on the basis of correlations between terrain and climatic parameters as measured in northern Quebec. *Canadian Geotechnical Journal* 25, 607-616.
- Guyot, G., 1999. *Climatologie de l'environnement*. Dunod, Paris, 525 p.
- Halliwell, D.H., Rouse, W.R., Weick, E.J., 1990. Surface energy balance and ground heat flux in organic permafrost terrain under variable moisture conditions. *Proceedings 5th Canadian Permafrost Conference*, Centre d'études nordiques, Université Laval, Québec. Collection Nordicana 54, 223-229.
- Henry, K., Smith, M., 2001. A model-based map of ground temperatures for the permafrost regions of Canada. *Permafrost and Periglacial Processes* 12, 389-398.
- IPCC, 2001. *Climate change 2001: the scientific basis*. Cambridge University Press, New York, 881 p.
- Jean, M., 1991. Évolution de la température du sol à Kuujuaq, Québec 1967-1989. *Le Climat* 9, 39-48.
- Kasper, J.N., Allard, M., 2001. Late-Holocene climatic changes as detected by the growth and decay of ice wedges on the southern shore of Hudson Strait, northern Québec, Canada. *The Holocene* 11, 563-577.
- Lamothe, A.-M., 1983. *Les topoclimats estivaux au Mont Sainte-Anne (Québec)*. Mémoire de maîtrise, Département de Géographie, Université Laval, 163 p.
- Lamothe, D., 1994. Géologie de la Fosse de l'Ungava, Nouveau-Québec. In : *Géologie du Québec*. Ministère des Ressources naturelles, Québec; MM 94-01, 67-74.

- Lauriol, B., Gray, J.T., 1987. The decay and disappearance of the late Wisconsin ice sheet in the Ungava Peninsula, Northern Quebec, Canada. *Arctic and Alpine Research* 19 (2), 109-126.
- MacHattie, L.B., McCormack, R.J., 1968. Forest microclimate : a topographic study in Ontario. *Ecology* 49, 301-323.
- MacKay, J.R., 1972. The world of underground ice. *Annals of the Association of American Geographers* 62 (1), 1-22.
- Ménard, É., Allard, M., Michaud, Y., 1998. Monitoring of ground surface temperatures in various biophysical micro-environments near Umiujaq, eastern Hudson Bay, Canada. *Proceedings 7th International Conference on Permafrost (Yellowknife, Canada)*, Collection Nordicana 55, 723-729.
- Mueller, G., Broll, G., Tarnocai, C., 1998. Soil temperature regimes and microtopographic contrasts, Baffin Island, N.W.T., Canada. *Proceedings 7th International Conference on Permafrost (Yellowknife, Canada)*, 771-775.
- Nelson, F.E., Lachenbruch, A.H., Woo, M.K., Koster, E.A., Osterkamp, T.E., Gavrilova, M.K., Guodong, C., 1993. Permafrost and changing climate. *Proceedings 6th International Conference on Permafrost (Beijing, China)*, Wushan, South China University of Technology Press 1, 987-1005.
- Paszynski, J., 1964. Topoclimatological investigations on heat balance. *Geographia Polonica* 2, 69-77.
- Roche, Y., 1994. *Variations du couvert nival et dynamique du pergélisol au détroit de Manitousuk, Hudsonie*. Thèse de doctorat, Département de Géographie, Université Laval, Québec, 190 p.
- Smith, C.A., Burn, C.R., Tarnocai, C., Sproule, B., 1998. Air and soil temperature relations along an ecological transect through the permafrost zones of northwestern Canada. *Proceedings 7th International Conference on Permafrost (Yellowknife, Canada)*, 1009-1016.
- Smith, K., 1975. *Principles of applied climatology*. Mcgraw-Hill Book Company, Maidenhead (UK), 233 p.
- Taylor, A., Judge A., 1979. Permafrost studies in northern Québec. *Géographie physique et Quaternaire* 33 (3-4), 245-251.
- Thorntwaite, C.W., 1954. Topoclimatology. *Proceedings Toronto Meteorological Conference 1953*, Royal Meteorological Society, London, 227-232.
- Wang, B., Allard, M., 1995. Recent climatic trend and thermal response of permafrost in Salluit, Northern Quebec, Canada. *Permafrost and Periglacial Processes* 6, 221-233.

- Washburn, A.L., 1979. *Geocryology : a survey of periglacial processes and environments*. Edward Arnold, London, 406 p.
- Weiss, E., 1987. *Recherches sur les topoclimats dans la vallée de Munster : contribution à l'étude des phénomènes de brises*. Mémoire de maîtrise (DEA), U.F.R. de Géographie, Université de Strasbourg, 66 p.
- Yoshino, M., 1975. *Climate in a small area : an introduction to local meteorology*. University of Tokyo Press, 549 p.
- Young, K.L., Woo, M.-k., Edlund, S.A., 1997. Influence of local topography, soils, and vegetation on microclimate and hydrology at a high Arctic site, Ellesmere Island, Canada. *Arctic and Alpine Research* 29 (3), 270-284.

Autres références consultées

- Allard, M., Tremblay, C., Pilon, J.A., Frydecki, J., 1993. Quaternary geology and geocryology in Nunavik, Canada. *Proceedings 6th International Conference on Permafrost (Beijing, China)*, Wushan, South China University of Technology Press 1, 5-10.
- An, V.V., Devyatkin, V.N., 1998. The influence of climatic, geodynamic and anthropogenic factors on permafrost conditions in western Siberia. *Proceedings 7th International Conference on Permafrost (Yellowknife, Canada)*, 13-17.
- Arya, S.P., 2001. *Introduction to micrometeorology (2nd edition)*. International Geophysics Series 79, Academic Press, San Diego, 420 p.
- Beltrando, G., Chémery, L., 1995. *Dictionnaire du climat*. Larousse, Paris, 344 p.
- Blumen, W. (Ed), 1990. Atmospheric processes over complex terrain. *Meteorological Monographs* 23 (45), American Meteorological Society, Boston, 323 p.
- Choisnel, E., 1984. Notions d'échelle en climatologie. *La Météorologie* 7 (4), 44-52.
- Flohn, H., 1969. Local wind systems. *World survey of climatology* 2 (chap. 4), Elsevier Publishing Company, Amsterdam - London - New York, 139-171.
- French, H.M., 1996. *The periglacial environment (2nd edition)*. Addison Wesley Longman Limited, Essex (England), 341 p.
- Hufty, A., 2001. *Introduction à la climatologie*. Les Presses de l'Université Laval, Québec, 542 p.
- Litynski, J., 1988. *Climat du Québec d'après la classification numérique*. Éditions Gamma, Montréal. Carte 100 x 130 cm.

- Lunardini, V.J., 1981. *Heat transfer in cold climates*. Van Nostrand Reinhold Company, New York, 731 p.
- Mahfouf, J.-F., Richard, E., Mascart, P., 1987. The influence of soil and vegetation on the development of mesoscale circulations. *Journal of climate and applied meteorology* 26, 1483-1495.
- Miller, D.H., 1981. *Energy at the surface of the earth : an introduction to the energetics of ecosystems*. International Geophysics Series 27, Academic Press, New York, 516 p.
- Organisation Météorologique Mondiale (OMM), 1990. *Guide des pratiques climatologiques*. OMM - N° 100, Genève.
- Petzold, D.E., 1982. *The summer weather types of Quebec-Labrador*. McGill Subarctic Research Paper No. 34, Centre for Northern Studies and Research, McGill University, Montréal, 160 p.
- Robitaille, A., Allard, M., 1996. *Guide pratique d'identification des dépôts de surface au Québec (Notions élémentaires de géomorphologie)*. Les Publications du Québec, Québec, 109 p.
- Taylor, A.E., 1995. Field measurements of n-factors for natural forest areas, Mackenzie Valley, Northwest Territories. *Current Research 1995-B*, Geological Survey of Canada, 89-98.
- Whiteman, C.D., 2000. *Mountain meteorology : fundamentals and applications*. Oxford University Press, New York, 355 p.

Sites Internet

- Institut de la statistique du Québec. *Données démographiques régionales*. Dernière mise à jour : 29 septembre 2005.
http://www.stat.gouv.qc.ca/donstat/societe/demographie/dons_regnl/regional/index.htm
- Environnement Canada. *Données climatologiques*. Archives nationales d'information et de données climatologiques. Dernière mise à jour : 12 avril 2005.
http://www.climate.weatheroffice.ec.gc.ca/climateData/canada_f.html