Dynamique des paysages végétaux depuis la fin du Petit Âge Glaciaire au Spitsberg (79°N). Analyse intégrée de la reconquête végétale des marges proglaciaires.

Myrtille Moreau

▶ **To cite this version:**

Myrtille Moreau. Dynamique des paysages végétaux depuis la fin du Petit Âge Glaciaire au Spitsberg (79°N). Analyse intégrée de la reconquête végétale des marges proglaciaires.. Géographie. Université Blaise Pascal - Clermont-Ferrand II, 2005. Français. NNT : . tel-00011178

HAL Id: tel-00011178

https://theses.hal.science/tel-00011178

Submitted on 21 Dec 2005

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

UNIVERSITÉ BLAISE PASCAL – CLERMONT-FERRAND II
FACULTÉ DES LETTRES ET SCIENCES HUMAINES

THÈSE DE DOCTORAT

DISCIPLINE: GÉOGRAPHIE

PRÉSENTÉE ET SOUTENUE PUBLIQUEMENT PAR

MYRTILLE MOREAU

LE 7 DÉCEMBRE 2005

DYNAMIQUE DES PAYSAGES VÉGÉTAUX DEPUIS LA FIN DU PETIT ÂGE GLACIAIRE AU SPITSBERG (79°N)

ANALYSE INTÉGRÉE DE LA RECONQUÊTE VÉGÉTALE DES MARGES PROGLACIAIRES

SOUS LA DIRECTION DU PROFESSEUR MARIE-FRANÇOISE ANDRÉ

JURY

M. AMAT Jean-Paul, Professeur, Université de Paris IV
Mlle ANDRÉ Marie-Françoise, Professeur, Université de Clermont-Ferrand II
M. BROSSARD Thierry, Directeur de Recherches CNRS, Université de Franche-Comté
M. MERCIER Denis, Maître de Conférences, Université de Paris IV
M. MÉTAILIÉ Jean-Paul, Directeur de Recherches CNRS, Université de Toulouse II
M. PEIRY Jean-Luc, Professeur, Université de Clermont-Ferrand II
M. SIMON Laurent, Professeur, Université de Paris I

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

Photo de couverture – Soleil de minuit sur le Kongsfjord. *Prise de vue depuis la base J. Corbel vers le nord-est, juillet 2001. Photos de fleurs, de gauche à droite,* Saxifraga oppositifolia, Draba species, Draba species, Minuartia rubella, Oxyria digyna, Papaver dahlianum, Sagina nivalis, Saxifraga aizoïdes, Saxifraga cespitosa, Cochlearia officinalis *et* Silene acaulis.

UNIVERSITÉ BLAISE PASCAL – CLERMONT-FERRAND II
FACULTÉ DES LETTRES ET SCIENCES HUMAINES

THÈSE DE DOCTORAT

DISCIPLINE : GÉOGRAPHIE

PRÉSENTÉE ET SOUTENUE PUBLIQUEMENT PAR

MYRTILLE MOREAU

LE 7 DÉCEMBRE 2005

DYNAMIQUE DES PAYSAGES VÉGÉTAUX DEPUIS LA FIN DU PETIT ÂGE GLACIAIRE AU SPITSBERG (79°N)

ANALYSE INTÉGRÉE DE LA RECONQUÊTE VÉGÉTALE DES MARGES PROGLACIAIRES

SOUS LA DIRECTION DU PROFESSEUR MARIE-FRANÇOISE ANDRÉ

JURY

M. AMAT Jean-Paul, Professeur, Université de Paris IV
Mlle ANDRÉ Marie-Françoise, Professeur, Université de Clermont-Ferrand II
M. BROSSARD Thierry, Directeur de Recherches CNRS, Université de Franche-Comté
M. MERCIER Denis, Maître de Conférences, Université de Paris IV
M. MÉTAILIÉ Jean-Paul, Directeur de Recherches CNRS, Université de Toulouse II
M. PEIRY Jean-Luc, Professeur, Université de Clermont-Ferrand II
M. SIMON Laurent, Professeur, Université de Paris I

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

à Dom

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

Avant-propos

Le Spitsberg n'est pas une expérience qui peut s'envisager seule. Ma passion pour cette terre arctique est devenue un projet de recherche né de la rencontre et de la collaboration avec des scientifiques qui ont parcouru depuis longtemps les versants et sandurs de cette terre arctique. Je les remercie ici pour leurs connaissances de terrain, leur écoute et la confiance avec laquelle ils ont guidé mes pas.

Mes remerciements s'adressent en tout premier à Marie-Françoise André qui m'a donné l'opportunité de réaliser cette thèse. Sa disponibilité, son efficacité pour l'obtention de financements, son expertise du monde polaire et sa connaissance du terrain ont été des atouts précieux pour accompagner ce travail.

C'est sur le terrain que j'ai rencontré Thierry Brossard, dans le cadre de missions auxquelles il m'a permis de participer. Au cours des séjours à la base française J. Corbel, Thierry Brossard m'a transmis sa passion pour l'observation et l'échantillonnage de la végétation jusque dans les moindres aspérités des moraines. Son accompagnement m'a été précieux dans l'apprentissage de la construction du discours scientifique que ce soit pour cette thèse, mais aussi dans le cadre élargi des colloques et des publications. Enfin, le Bast, cuisinier d'exception, compagnon de chaleureuses soirées et amateur de zodiac par tous temps, a contribué au plaisir que j'ai eu à séjourner au Spitsberg. Pour toute sa connaissance du Spitsberg, la présence de Thierry Brossard dans ce jury est pour moi un honneur.

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

Denis Mercier m'a introduit dans le monde de la recherche arctique en m'invitant à participer aux réunions du GDR et en m'intégrant dans un programme de recherche de l'Institut Polaire Français Paul Émile Victor. C'est à ses conseils que je dois la concrétisation de mon projet au Spitsberg. Je lui dois également son soutien sur le terrain mais aussi jusque dans les dernières étapes de la rédaction. C'est avec beaucoup de plaisir que j'ai arpenté la presqu'île de Brøgger aux côtés du chef de mission portant le fusil et du maître de la crêpe arctique. Je le remercie d'être membre du jury.

Je remercie également Messieurs les professeurs Jean-Luc Peiry, Jean-Paul Métailié, Jean-Paul Amat et Laurent Simon pour avoir accepté de siéger dans le jury. Mes premier pas en biogéographie ont été initiés lors des cours de Laurent Simon, à l'Université de Paris I, sur les bancs des TD de Deug et, plus tard, sur la montagne de Lure.

C'est dans le cadre de ma maîtrise de géographie que j'ai débuté les observations de terrain sur la reconquête végétale, sur la marge du glacier des Évettes (Alpes de Savoie). Je dois ces débuts à Pierre Pech, professeur à l'université de Paris I, que je remercie pour son encouragement dans cette thématique. Le Spitsberg ne serait peut-être resté qu'un rêve lointain si Béatrice Collignon, maître de conférences à l'Université de Paris I, n'avait donné écho à mes propos en me mettant en relation avec Denis Mercier.

Le Spitsberg aurait été une expérience tout à fait différente sans la présence, à mes côtés, de Dominique Laffly. Il a imperturbablement accompagné de son expérience de terrain toutes les prospections, réalisées de 2001 à 2004, à l'intérieur des marges proglaciaires. Quels mots pourraient le remercier pour sa patience au cours de longues heures d'immobilité autour des plantes ? Mais plus encore, c'est à lui que je dois mon initiation aux méthodes statistiques et aux traitements d'images. À cela s'ajoute la patience du quotidien, pour tout ceci, je lui témoigne ma reconnaissance.

Les missions conduites au Spitsberg sont, avant tout, des projets d'équipes au sein desquelles j'ai pu bénéficier des collaborations de Daniel Joly, directeur de recherche au laboratoire ThéMA grâce à qui j'ai pu disposer du MNT et des variables topoclimatiques de la marge du glacier Midre Lovén. Je remercie très chaleureusement

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

les botanistes norvégiens Arve Elvebakk et Lennart Nilsen. Ils m'ont épaulée dans la connaissance des plantes du Spitsberg et les techniques d'échantillonnage. Ont également participé à ces missions Samuel Etienne, Angélique Prick, Joëlle Dupont, Dominique Sellier, François-Pierre Tourneux, René Fury, Pieter Beck. Je les remercie pour leur soutien.

La mission d'août 2003 nous a conduite dans un secteur du Spitsberg que nous ne connaissions pas. L'organisation du séjour a été possible grâce à Grzegorz Rachlewicz, maître de conférences à l'Université de Poznań. Il connaissait bien le terrain et disposait de données relatives à la région dont il nous a fait bénéficier. Par ailleurs, Grzegorz Rachlewicz et son équipe nous ont aidés à faire face aux surprises de l'arrivée par leur soutien logistique qui tient autant au zodiac qu'à la vodka.

Je tiens également à remercier ceux qui ne furent pas avec moi sur le terrain, mais ont contribué, de près ou de loin, à la concrétisation de cette recherche. En tout premier lieu, c'est à Madeleine Griselin que je témoigne ma reconnaissance pour avoir accepté de relire plusieurs fois mes écrits. Sa patience, son soutien moral, son tact et ses pertinentes remarques ont été autant d'atouts dans l'aboutissement de la rédaction de ce manuscrit. Harald Faste Aas, du Norsk Polarinstitutt, a été un intermédiaire efficace dans l'obtention des photographies aériennes et des images du MNT. Je tiens également à remercier Maciej Dabski qui m'a gracieusement permis de disposer des données météorologiques de Ny-Ålesund, Martha Raynolds pour les informations au sujet de la carte de la végétation circumarctique et Carl J. Markon pour ses corrections d'anglais.

Du fait de l'éloignement, les missions de terrain au Spitsberg nécessitent des supports financiers que je dois à l'UMR 6042 « Géodynamiques de milieux naturels et anthropisés » de Clermont-Ferrand, dirigée par M.-F. André et au GDR 049 CNRS « recherches arctiques » de Besançon, dirigé jusqu'en 2002 par Th. Brossard et depuis par M. Griselin. De 2002 à 2004, ce travail a été inscrit dans un programme de recherche sur les espaces proglaciaires coordonné par D. Mercier et soutenu par l'Institut Polaire Français (IPEV, programme n°400 « Géomorphoclim). Au-delà des financements, je remercie également l'IPEV pour le soutien logistique dont nous avons bénéficié pour la mission d'août 2003, dans la baie de Pétunia, et plus particulièrement Martin Mellet pour son efficacité. Pour cette mission, je remercie également le Norsk

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

Polarinstitutt qui a permis la réception et le stockage du matériel acheminé à Longyearbyen.

Je remercie la famille Pinard et Béatrice, ces hôtes qui m'ont accueillie lors de mes séjours clermontois. Pour mes séjours bisontins, plus particulièrement à Bonboillon, c'est à Manola que je témoigne ma reconnaissance pour son chaleureux accueil et les petits plats qui font du bien après les grosses journées de travail.

Mon parcours personnel n'a pas été un long fleuve tranquille pour arriver jusqu'à la thèse. Mais des encouragements de mes proches est née ma persévérance. Je remercie mes amis, mes grands-parents, ma sœur et mes parents. Ce sont ces derniers qui ont initié mes premiers pas au Spitsberg et jusqu'aux derniers, pour Totote, qui a eu la lourde charge des corrections. Enfin, une thèse prend beaucoup de place dans le quotidien et je remercie Clara et Ninon pour leurs intermèdes de rires et de détente.

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

Sommaire

Introduction générale 13

Première partie - Cadre biogéographique de l'étude et méthodologie d'observation et d'analyse de la reconquête végétale 29

Chapitre 1 - Le contexte biogéographique de l'étude 33

1. Particularité de la toundra du Spitsberg 35
2. Contexte morphoclimatique récent : les marges proglaciaires 62
3. Terrains d'étude 85

Chapitre 2 - Méthodologie 99

1. Données exogènes : constitution d'une base d'informations géographiques 102
2. Collecte des données endogènes 123
3. Analyse des données 155

Deuxième partie - Les modalités régionales de la reconquête végétale au Spitsberg 171

Chapitre 3 – Le contexte des cinq marges proglaciaires étudiées 175

1. Datation des surfaces morainiques déglacées 177
2. Hétérogénéité des secteurs intramorainiques 187
3. Modelés morainiques 195

Chapitre 4 - Les rythmes et les modalités de la reconquête végétale des marges proglaciaires 207

1. Spécificités biogéographiques des marges proglaciaires 209
2. Les rythmes de la reconquête végétale 226
3. Modalités spatio-temporelles de la reconquête végétale 239
4. Mise en perspective synthétique 248

Troisième partie - Le rôle de la microtopographie dans l'évolution du paysage intramorainique 259

Chapitre 5 - Le rôle des facteurs environnementaux sur le couvert végétal et sa structuration 263

1. Remarques préliminaires concernant les résultats des échantillonnages sur la marge du glacier Midre Lovén 265
2. Rôle des formes et des processus géomorphologiques 269
3. Le rôle des paramètres climatiques locaux 287

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

Chapitre 6 - Organisation paysagère de l'espace intramorainique 293

1. Étude des liens entre végétation et conditions mésologiques 295
2. Identification des faciès paysagers intramorainiques 300
3. Essai de diagnostic spatial de la reconquête végétale 315

Conclusion générale 329

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

Avertissement

Nous avons choisi de ne pas traduire les appellations norvégiennes des sites au Spitsberg. Cependant, quelques aménagements ont été nécessaires afin de faciliter la lecture et ne pas surcharger les cartes. Nous avons choisi de ne pas garder les suffixes de noms des lieux figurant dans l'orthographe norvégienne et indiquons par exemple « Kongsfjord » au lieu de « Kongsfjorden ». De même, « Brøggerhalvøya » sera traduit par « presqu'île de Brøgger ».

Suffixes norvégiens principaux d'après A. Moign (1973) :

Aust (re) : est, oriental
Bekk (en) : ruisseau
Berg (et) : montagne rocheuse
Botn (en) : cirque glaciaire
Bre (en) : glacier
Bukt (a) : baie
By (en) : ville
Dal (en) : vallée
Egg (a) : arête
Elv (a) : cours d'eau
Fjell (et) : montagne
Fjord (en) : fjord
Fonn (a) : champ de neige, inlandsis de taille réduite
Gatt (et) : petit cirque
Hall (et) : versant
Halvøya (a) : péninsule, presqu'île
Holme (n), pl. holmane : île
Huk (en) : cap, pointe
Hytte (hytta) : hutte
Is (en) : glace
Jøkel (en) : langue glaciaire
Ham (men) : crête, arête montagneuse
Kile (n) : longue baie étroite
Land (et) : terre
Morene (morena) : moraine
Nes (et) : pointe
Odde (n) : pointe, cap
Pynt (en) : pointe
Renne (renna) : chenal
Rygg (en) : chaîne de montagne
Slette (sletta) : plaine
Stein (en), pl. steinane : pierre, roche
Astrand : rivage
Sund (et) : détroit
Topp (en), pl. toppane : pic, sommet
Vest (re) : ouest, occidental
Øy (a) : île

Les espèces végétales sont appelées par leur nom scientifique (cité en italique dans le texte). Pour la nomenclature syntaxonomique, les noms des espèces sont tirés des ouvrages de O.I. Rønning (1996) et du catalogue de E. Elven et A. Elvebakk (1996).

La description des caractéristiques végétales implique l'utilisation d'un vocabulaire peu courant que nous définissons au fil du texte. L'ensemble des définitions est rassemblé dans un glossaire à la fin de l'ouvrage.

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

Introduction générale

> *Les moraines présentent un intérêt bio-géographique particulier, puisqu'elles évoluent d'une manière sensible à l'échelle humaine, et permettent en cela l'observation directe du processus de colonisation végétale depuis le stade minéral initial, jusqu'aux stades plus évolués qui mettent en valeur les aptitudes spécifiques de micromilieux différenciés* (Th. Brossard, 1985).

L'avancée glaciaire du Petit Âge Glaciaire et le recul contemporain des glaciers, depuis le début du XX^{e} siècle, ont induit des changements environnementaux aux répercussions importantes sur la végétation. Le processus de colonisation végétale après le retrait des glaciers se traduit par la mise en place de séquences floristiques depuis les stades pionniers jusqu'aux stades matures de la toundra. Notre problématique est centrée sur l'étude de la reconquête végétale comme principale entrée dans le système paysager des marges proglaciaires.

Contexte de recherche

La Terre connaît depuis le milieu du XIX^{e} siècle un changement climatique marqué par une hausse des températures de 0,6°C ±0,2°C (IPPC, 2001, fig. 1). L'essentiel du réchauffement est survenu au cours du XX^{e} siècle sur les périodes 1910-1945 et 1976-2000. Il est particulièrement accentué sous les latitudes septentrionales où, depuis le début du XX^{e} siècle, il atteint 2 à 3°C sur le pourtour du bassin Arctique (ACIA, 2005, fig. 2).

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

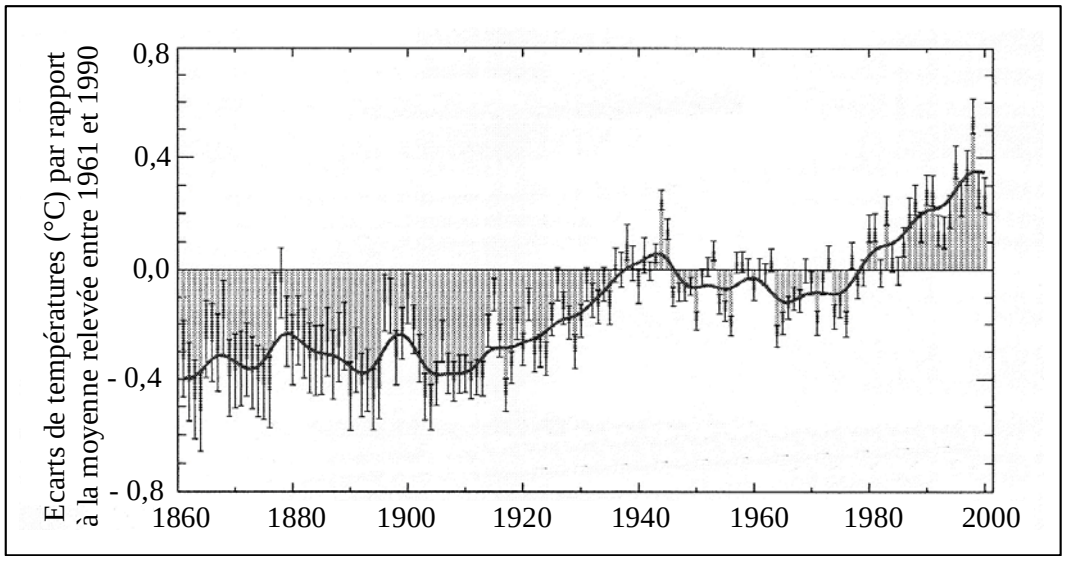


Fig. 1 – Variations de la température à la surface de la Terre au cours des 140 dernières années *(d'après IPCC, 2001). La température à la surface de la Terre est indiquée année par année (barres grises) et décennie par décennie (la courbe annuelle filtrée supprimant les fluctuations au-dessous des échelles de temps quasi décennales). Les barres noires représentent l'intervalle de confiance de 95 % lié aux incertitudes par rapport à des insuffisances de données, à des erreurs et incertitudes instrumentales aléatoires, aux incertitudes dans les corrections de justesse des données relatives à la température à la surface des océans et aux ajustements de la températures à la surface du sol en fonction des effets de l'urbanisation.*

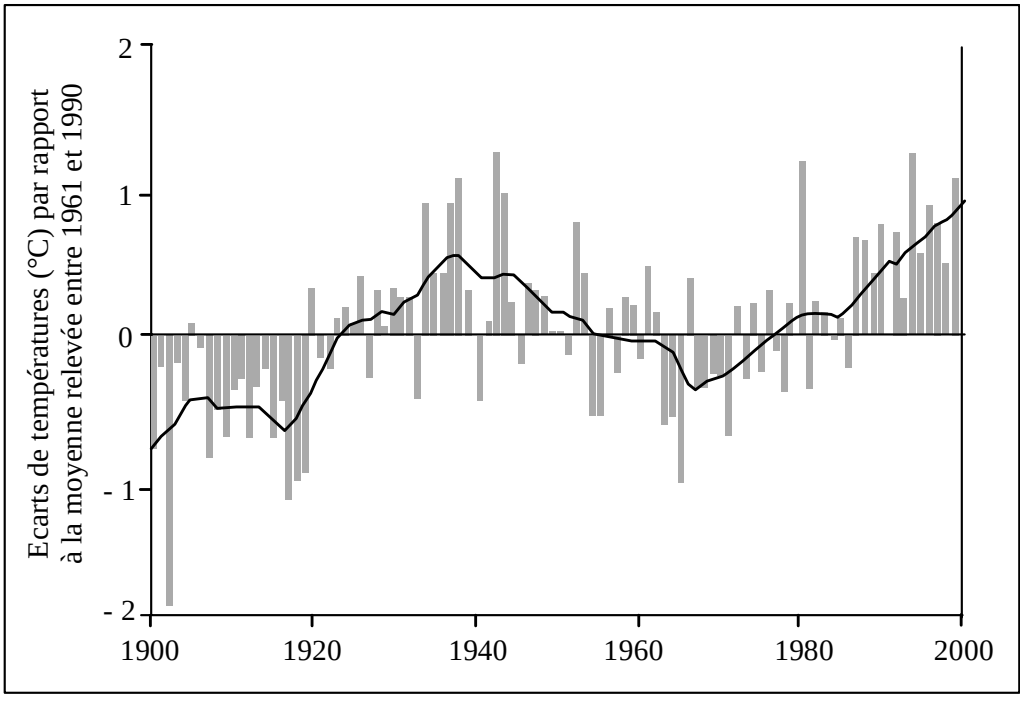


Fig. 2 – Variations des températures de surface en Arctique depuis 1900 pour les régions comprises entre 60 et 90°N *(d'après ICIA, 2005). La température à la surface de la Terre est indiquée année par année (barres grises) et décennie par décennie (la courbe annuelle filtrée supprimant les fluctuations au-dessous des échelles de temps quasi décennales).*

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

L'évolution du climat affecte l'écosystème arctique en entraînant le dégel précoce des rivières (R. Sagarin et F. Micheli, 2001), l'augmentation du nombre de lacs (D.A. Stow *et al.*, 2004), la fonte du pergélisol (T.E. Osterkamp et V.E. Romanosky, 1999), le recul des glaciers (M. Hoelzle *et al.*, 2003), la diminution de la couverture neigeuse (IPCC, 2001), l'allongement de la saison végétative au printemps et à l'automne (C.C. Wallén, 1986). L'influence des changements climatiques sur la végétation s'exprime à travers dans les fluctuations des limites entre la forêt boréale et la toundra arctique. Ainsi la remontée en latitude de la forêt (K.J. Ranson *et al.*, 2004) et l'expansion de la toundra à arbrisseaux (D.A. Stow *et al.*, 2004) traduisent un déplacement vers le nord de la limite méridionale de la toundra.

Le recul des glaciers concerne essentiellement le Groenland, la Nouvelle-Zemble et le Spitsberg qui sont les principales terres englacées de l'Arctique. Depuis un siècle le recul des glaciers a progressivement libéré d'importantes surfaces, constituées par les marges proglaciaires, et il s'accompagne encore aujourdd'hui d'une dynamique active de ruissellement (fig. 3).

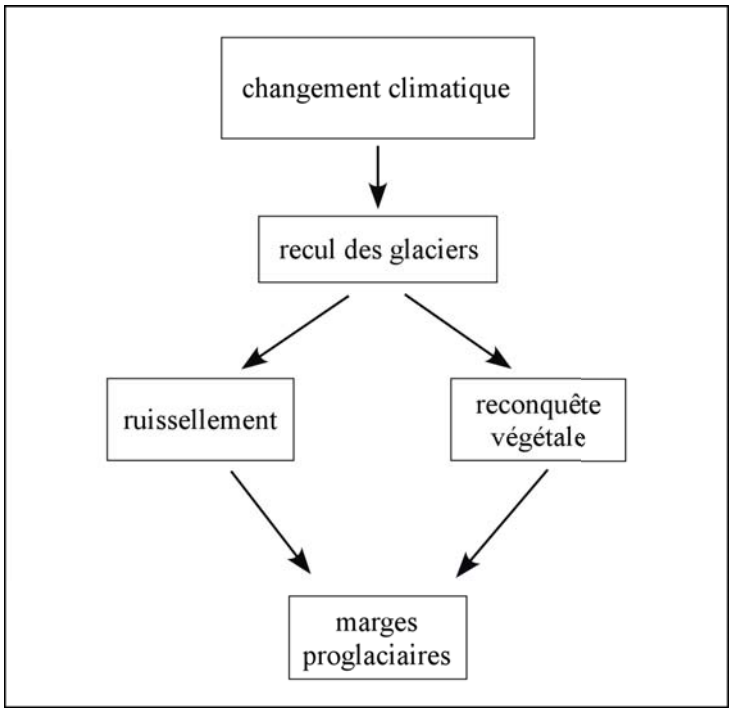


Fig. 3 - Dynamiques paysagères en relation avec le changement climatique sur les marges proglaciaires de l'Arctique. *Les marges proglaciaires sont le siège de dynamiques paysagères nées du conflit entre érosion fluvioglaciaire et phytostabilisation.*

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

Plusieurs chercheurs se sont penchés sur les évolutions paysagères des marges proglaciaires notamment à travers l'étude de la colonisation végétale, à la fois en Arctique[1] mais aussi en montagne[2] où le recul des glaciers est également sensible. Une grande partie de ces travaux a montré qu'il était possible de suivre la progression du développement végétal dans le temps. D'autres recherches ont établi que la colonisation végétale répondait de manière plus complexe aux contraintes environnementales imposées notamment par la microtopographie[3].

Il reste cependant à approfondir l'analyse pour établir le rôle respectif du temps, qui détermine globalement la maturation des milieux, et des facteurs locaux qui conduisent à leur diversification. Ensuite, comment repérer parmi ces facteurs, ceux qui sont déterminants dans la structure hiérarchique des paysages et dans la définition de leur potentiel écologique ? Les marges proglaciaires sont, à l'échelle du Spitsberg et plus généralement de l'Arctique, des espaces pionniers pour la végétation.

Les fluctuations des fronts glaciaires, depuis le début du XX^{e} siècle, ne sont pas des épisodes singuliers à l'échelle de l'Holocène. Des pulsations glaciaires à la faveur de périodes de refroidissement comme au Sub-Boréal de 4 000 à 2 000 BP[4] (J.I. Svendsen et J. Mangerud, 1997) ont précédé le Petit Âge Glaciaire et se sont accompagnées d'avancées suivies d'un recul des glaciers. À chaque période de retrait, la colonisation végétale peut redémarrer comme c'est le cas aujourd'hui.

Notre projet relève de la problématique du changement climatique et de ses conséquences dans le monde polaire. Le développement de ces recherches s'illustre au travers de l'année polaire internationale prévue pour 2007-2008 organisée par l'ICSU[5]. Les années polaires internationales précédentes ont eu lieu en 1882-1883, 1932-1933 et

[1] W.S. Cooper, 1923 ; A. Stork, 1963 ; M. Kuc, 1964 a ; F.S. Chapin III *et al.*, 1994 ; W. Ziaja et E. Dubiel, 1996 ; T. Natkatsubo *et al.*, 1998 ; Y. Bekku et *al.*, 1999; N. Wada, 1999 ; M. Moreau, 2002 ; I.D. Hodkinson *et al.*, 2003.

[2] W.H. Palmer et A.K. Miller, 1961 ; A. Moiroud, 1976 ; P. Wardle, 1980 ; P. Sommerville *et al.*, 1982 ; A.C. Messer, 1988 ; O.R. Vetaas, 1997 ; K. Mizuno, 1998 ; R. Ohtonen *et al.*, 1999 ; L. Gough et *al.*, 2000 ; M. Moreau, 2001 ; R. Kaufmann *et al.*, 2002.

[3] P. Worsley et M.R. Ward, 1974 ; R. Elven, 1978 ; H.H. Birks, 1980 ; Th. Brossard, 1985 ; J.A. Matthews et R.J. Whittaker, 1987, J.A. Matthews, 1992, R.J. Whittaker, 1993 ; D.J. Helm et E.B. Allen, 1995 ; J. Stöcklin et E. Bäumler, 1996 ; Y. Frenot *et al.*, 1998 ; A. Jumpponen *et al.*, 1999.

[4] BP : abréviation de l'anglais *Before Present* (avant le présent). Le présent est défini par convention comme étant l'année 1950.

[5] ICSU : International Council for Science, organisation non gouvernementale fondée en 1931 représentant une association de plus de 40 organisations gouvernementales et non gouvernementales scientifiques.

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

1957-1958 (ICSU, 2004). Ces manifestations avaient pour but d'impulser des recherches interdisciplinaires favorisant la collecte de mesures fournissant un témoignage, dans le temps, de l'état des régions polaires. La dernière en date, l'année internationale de géophysique en 1957-1958, a regroupé 80 000 scientifiques de 67 pays (ICSU, 2004). Cinquante ans plus tard, les développements technologiques ont connu de profonds changements parmi lesquels on peut noter, entre autres, l'observation de la terre par satellite, l'avènement de l'informatique, la localisation précise par GPS (*Global Positioning System*). Ces nouveaux moyens transforment les méthodes de recherche en géographie, et tout particulièrement en milieu polaire. Ainsi comme le soulignent S.J. Walsh et F.W. Davis (1994), *the technologies have contributed to a resurgence of interest in vegetation pattern and processes over regional and global domains, and have also facilited research into the role of landscape heterogeneity in determining plant community and ecosystem dynamics*. L'analyse des mutations paysagères actuelles qui touchent l'Arctique est, parmi six autres, un des thèmes de cette année polaire, puisqu'il s'agit de quantifier et de comprendre les dynamiques environnementales naturelles passées et présentes et les changements à l'œuvre dans les régions polaires (ICSU, 2004).

Le Spitsberg, domaine de la toundra arctique

Le Spitsberg[1] est l'île principale de l'archipel du Svalbard (61 000 km²) situé entre 74° et 81° de latitude nord et 10° et 34° de longitude est (fig. 4). L'archipel est situé au cœur du monde polaire, à mi-chemin entre le pôle nord et le cercle polaire (fig. 5). Sa position en latitude explique la faible énergie reçue au sol, le maintien de basses températures, l'opposition entre nuit polaire, du 26 octobre au 15 février, et jour continu, du 10 avril au 23 août, à la latitude de Longyearbyen. Le Spitsberg appartient à la zone arctique dont la limite sud est définie par l'isotherme 10° C du mois le plus chaud, juillet, et la limite du pergélisol continu (fig. 5). Les conditions bioclimatiques de la zone arctique imposent des contraintes aux végétaux qui se développent au sein de formations végétales basses dont l'arbre est exclu. L'absence d'arbre est le critère distinctif de la toundra (R.M.M. Crawford, 1989 ; fig. 6). En effet le terme « toundra », qui signifie

[1] À l'origine le Spitsberg est l'appellation utilisée pour désigner cinq îles (A. Moign, 1973) qui sont respectivement : le Vestspitsbergen (37 673 km²), le Nordauslandet (14 443 km²), l'île d'Edge (5 074 km²), l'île de Barents (1 288 km²) et l'île de Prins Karls (615 km²). Aujourd'hui l'usage a réservé le terme de Spitsberg à l'île principale (Vestspitsbergen).

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

colline sans arbre, est d'origine lapone. Le mot a été adopté par le russe pour décrire la végétation de buissons nains, d'herbes et de mousses des régions polaires trop froides pour permettre la croissance d'arbustes (R.M.M. Crawford, 1989). Cette formation végétale est caractérisée par une faible biomasse et une diversité spécifique moins développée que dans les autres biomes[1]. Approximativement 250 000 espèces vasculaires sont recensées sur terre. Parmi elles seules 1 000, soit 0,4 % du total sont présentes en Arctique (W.D. Billings, 1992). Par ailleurs, du sud au nord de la zone, le nombre de plantes vasculaires diminue dans les flores[2] locales, puisqu'on passe de 500 espèces, au sud de la toundra à la limite de l'arbre, à 50 au voisinage des déserts polaires (M.D. Walker *et al.*, 2001).

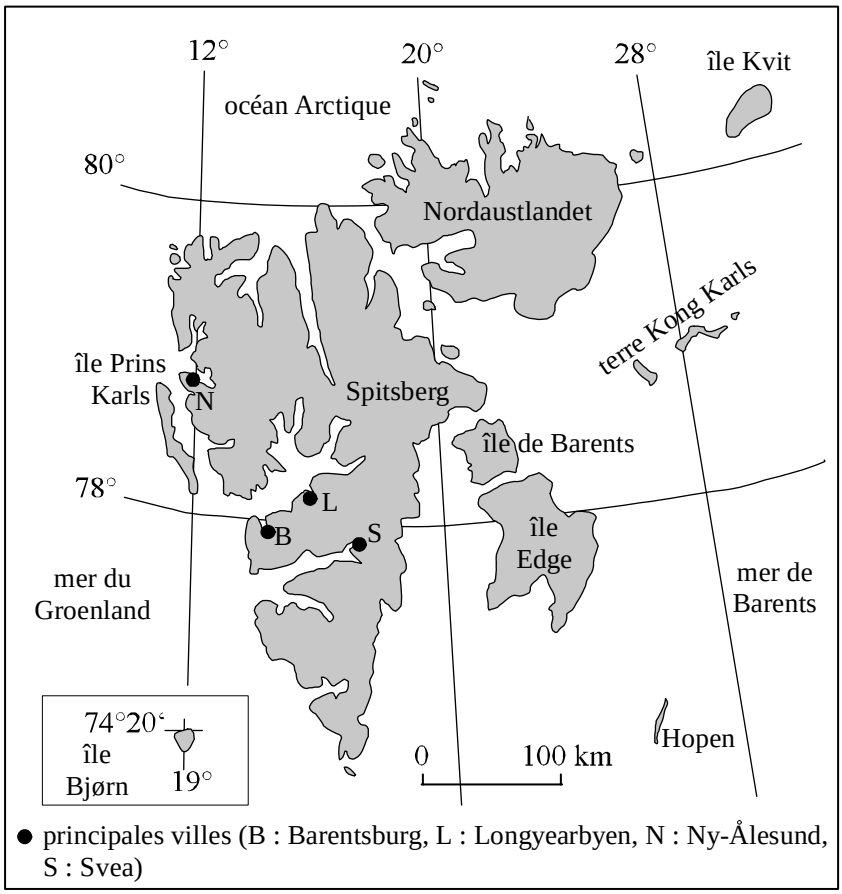


Fig. 4 – Carte de l'archipel du Svalbard et localisation des principales villes.

[1] Biome : ensemble des milieux semblables à l'échelle de la planète. Pour certains auteurs, entité écologique d'échelle continentale, caractérisée par un type dominant de formation végétale, qui correspond, avec les animaux qui leur sont inféodés, à l'aire bioclimatique (ex : savane, forêt tempérée…).

[2] Flore : ensemble des espèces végétales relevés sur un territoire déterminé.

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

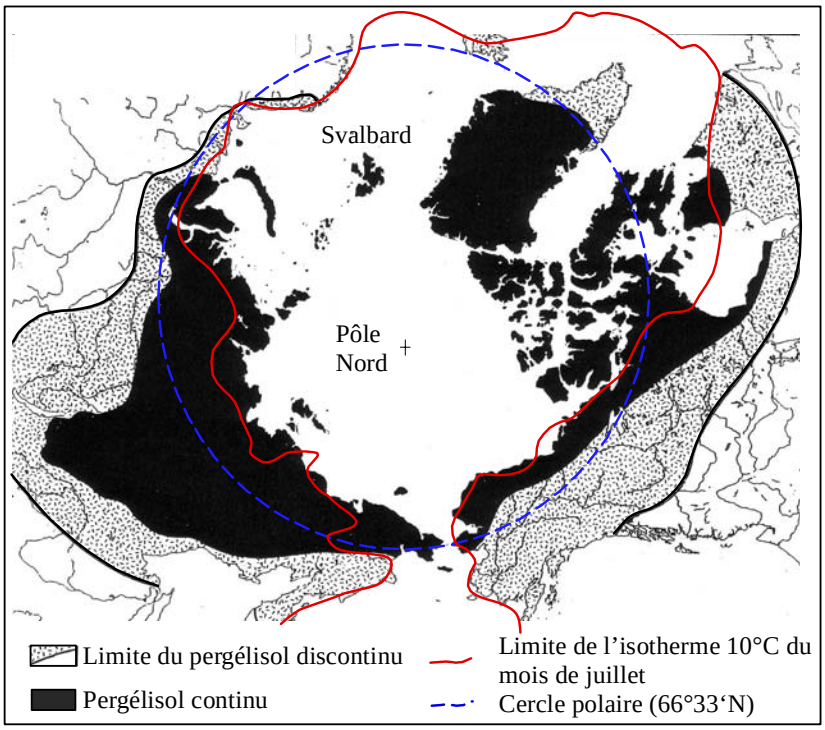


Fig. 5 - Carte des limites de la zone arctique *(d'après B. Stonehouse, 1989).*

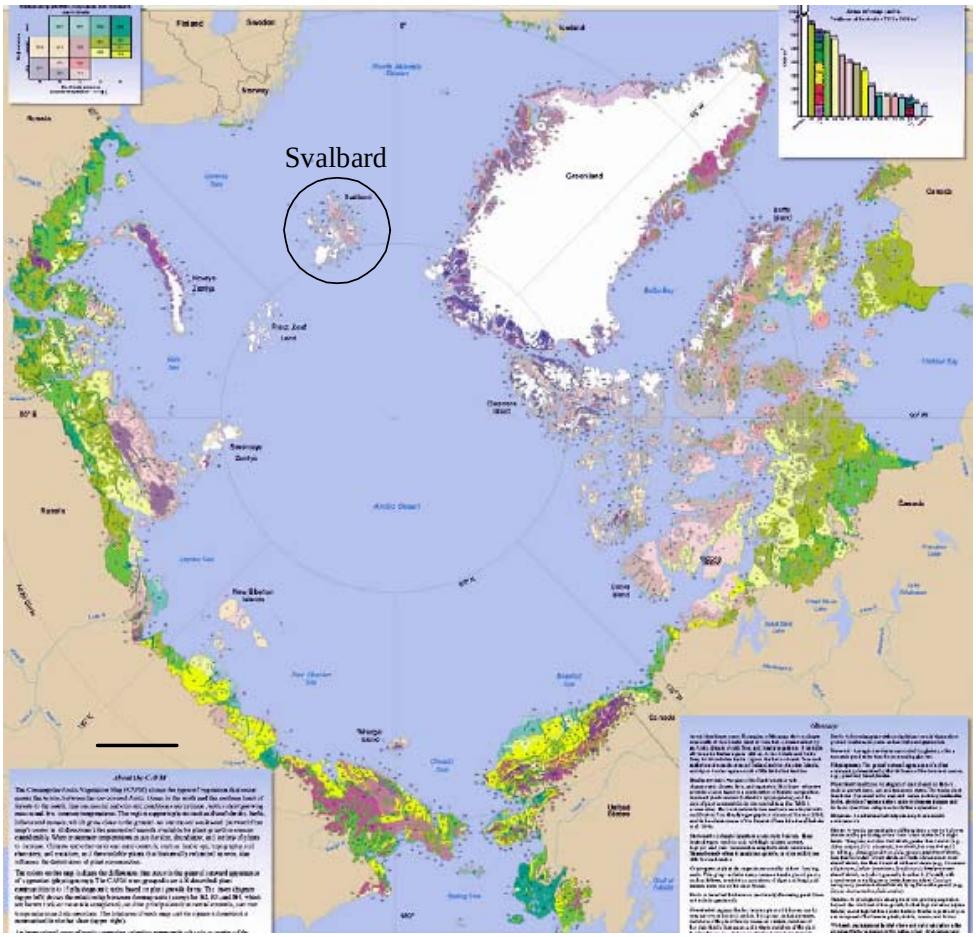


Fig. 6 – Carte de la végétation arctique circumpolaire au 1/7 500 000 *(d'après CVAM, 2003). La limite sud de la végétation cartographiée correspond à la limite nord d'extension de la forêt. La carte n'est pas présentée ici pour permettre la lisibilité de ses informations mais afin de montrer les secteurs couverts par la toundra auxquels appartient le Spitsberg.*

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

La zone arctique peut être subdivisée en deux sous-zones de part et d'autre de l'isotherme de juillet fixé à 5° C. Au nord, le haut Arctique auquel appartient le Spitsberg est caractérisé par une végétation discontinue tandis que le bas Arctique est marqué par une formation végétale continue (B. Stonehouse, 1989). P. Birot (1965) précisait que *l'absence d'arbres est le seul caractère commun à une végétation naine, mais extrêmement variée*. C'est ce qu'illustre la carte de la végétation circumpolaire qui distingue 15 types de végétation (fig. 6), répartis en six groupes dominants (barren[1], graminoïdes[2], buissons prostrés[3], buissons dressés, zone humide). Au total, pour l'ensemble des 15 types, sont recensés 400 communautés végétales (D.A. Walker *et al.*, 2004). Cette diversité des toundras en Arctique s'explique par la conjonction des facteurs environnementaux propres à chaque secteur : températures, nature et composition chimique du substrat, texture du sol et topographie (A. Elvebakk, 1997).

Le Spitsberg occupe une position intermédiaire entre les grands domaines groenlandais et eurasiatique, ce qui induit une diversité floristique intéressante ; sept des quinze types de formation végétale de la zone arctique y sont présents. À cela s'ajoute l'intérêt particulier de son écosystème qui est très peu affecté par les activités humaines.

Originalité historique de la végétation du Spitsberg et présentation du cadre géographique du l'étude

La végétation du Spitsberg n'a pas subi d'impact anthropique important comme il arrive parfois dans les autres régions de l'Arctique (fig. 7). Aucune trace de présence des Vikings n'a été trouvée au Spitsberg (V. Romanosky, 1999) et seules quelques communautés de chasseurs de baleines ont résidé épisodiquement dans l'île au XVII^{e} siècle (W.O. Van Der Knapp, 1985). Aux premiers temps de la chasse à la baleine blanche (*Balaena mysticetus)*, la graisse était fondue à terre, ce qui nécessitait d'y faire séjour. M.-F. André (1993) rapporte que vers 1630, un millier d'hommes vivaient en été dans le nord du Spitsberg, dont 700 à bord d'une vingtaine de navires, et 300 à terre. Les installations de cette époque étaient éphémères et furent abandonnées lorsque les

[1] Barren : surfaces rocheuses ou pierreuses périglaciaires ne portant qu'une végétation éparse, très claire, floristiquement pauvre et homogène.
[2] Graminoïde : se dit d'une formation dominée par les graminées (Poacées, Cypéracées, Joncacée…).
[3] Prostré : se dit d'une plante appliquée au sol et rampante.

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

baleiniers basques trouvèrent le moyen de faire fondre la graisse à bord des navires, à la fin du XVII^{e} siècle (V. Romanosky, 1999). Aujourd'hui, les vestiges que l'on trouve de cette époque constituent un patrimoine historique, à l'image des cimetières de marins morts du scorbut qui furent enterrés dans des cercueils de planches en bois flottés recouverts de galets (M.-F. André, 1993 ; photo 1 a). Un habitat permanent se développe au début du XX^{e} siècle avec l'exploitation des ressources minières. Les principales villes datent de cette époque : Longyearbyen créée en 1904, Barentsburg en 1909 et Ny-Ålesund et Svea en 1917 (fig. 4 et photo 1 b et c). En 1920, le traité de Paris assigne la souveraineté du Svalbard à la Norvège stipulant un accès égal aux ressources des îles pour les 42 états aujourd'hui signataires, et constituant une terre démilitarisée (M.H. West et A.P. Maxted, 2000). En 2003, le Svalbard comptait une population de 2 489 personnes (Official Statistics of Norway, 2003) dont 63 % de nationalité norvégienne, 33 % russe et 1 % autre (polonaise, thaïlandaise, suédoise, danoise…). La population se concentre dans deux villes principales, Longyearbyen (photo 1 b), la capitale, dont la population est surtout norvégienne, et Barentsburg rassemblant l'essentiel de la population russe. De nos jours encore, l'impact anthropique au Spitsberg reste limité au voisinage des villes. Seuls quelques secteurs portent les traces de déplacements par véhicules, essentiellement dans le centre de l'île (fig. 8).

Par ailleurs, le Svalbard est une terre qui compte pour la Norvège, puisqu'elle conforte son identité arctique (M.K. Raynolds *et al.*, 2004). Ce pays a consenti des efforts de longue date pour protéger l'environnement de l'archipel. Les premiers plans de protection datent de 1932, moment où deux réserves protégées de plantes sont créées. En 1973 s'ajoutent trois parcs nationaux, deux réserves naturelles et 15 sanctuaires à oiseaux (Miljøverndepartementet, 2002). Enfin en 2002, le Svalbard compte 19 réserves naturelles (fig. 9). Au total près de 38 200 km² du Svalbard, soit 62 % du territoire sont protégés.

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

Photos 1 a, b, c – Le peuplement du Spitsberg. *(a) anciennes tombes de baleiniers morts du scorbut au XVII^e siècle, pointe nord de l'île de Prins Karl (Fuglehuken), juillet 2003 ; (b) la rue principale de Longyearbyen, la capitale du Spitsberg, créée en 1904, où résident principalement les Norvégiens, août 1998 ; (c) Ny-Ålesund est une ancienne ville minière créée en 1917, reconvertie en cité scientifique internationale. Le bâtiment rouge, au premier plan et au centre, rassemble les locaux de l'Institut Polaire français Paul Emile Victor (IPEV), fin juin 2002.*

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

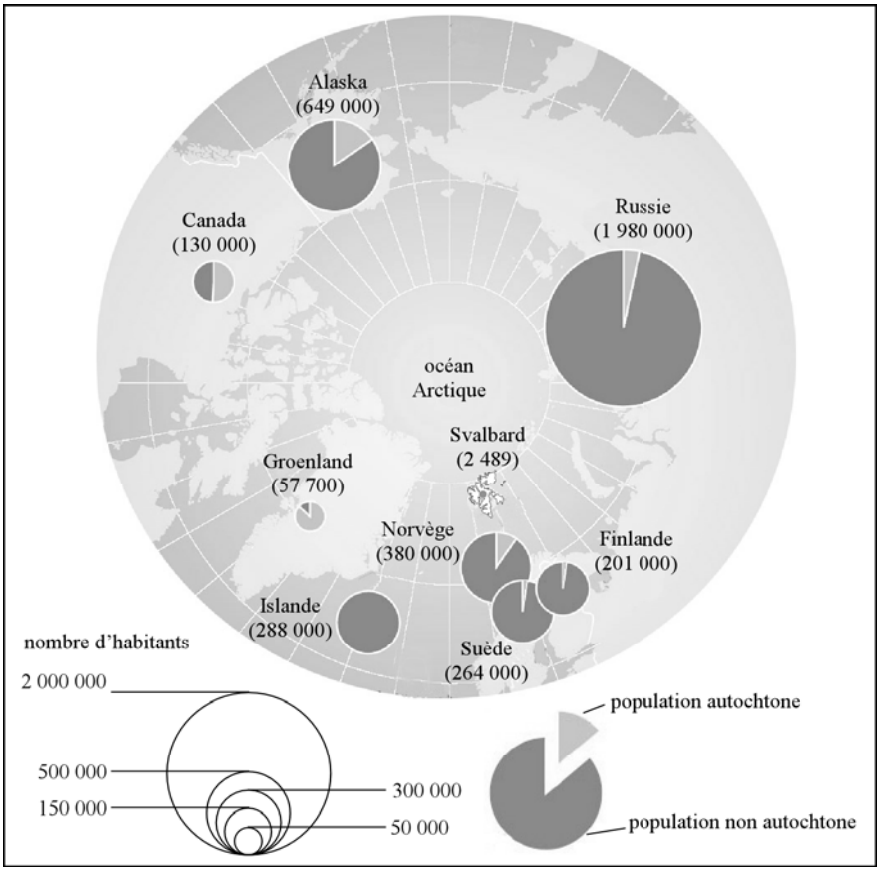


Fig. 7 – Origine et répartition de la population en Arctique *(d'après UNEP 2002 et Official statistics of Norway pour le Svalbard, 2003)*

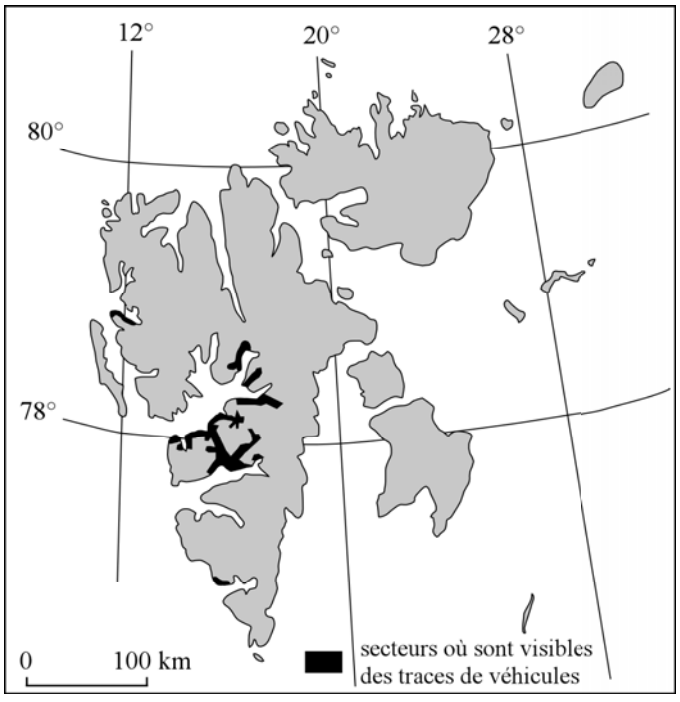


Fig. 8 - Secteurs de l'île affectés par les déplacements en véhicules *(d'après E. Råheim, 1992). Les zones où les traces de véhicules ont été détectées par image satellite ont été dessinées. Ces traces ne sont pas forcément le signe d'une circulation régulière.*

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

La protection de l'environnement passe également par la maîtrise des flux touristiques et par la restriction d'accès à quelques parties de l'île seulement (R. Hindrum, 1998 ; A. Viken, 1998 ; A. Viken et F. Jørgensen, 1998). Depuis 1975, le Spitsberg est doté d'un aéroport international qui aujourd'hui relie, à raison de deux vols quotidiens en juillet et août, l'archipel à l'Europe (86 261 passagers en 2002, Official Statistics of Norway, 2003). À cela s'ajoutent de nombreuses croisières, soit 42 453 passagers en 2002 (Official Statistics of Norway, 2003) qui font de l'île un pôle important du tourisme arctique. Du fait de ces facilités d'accès comparé aux autres régions de l'Arctique, le Spitsberg offre un attrait particulier qui favorise le développement touristique. Le nombre de touristes est passé de 14 000 par an, dans les années 1980, à plus de 35 000 en 1999 (M.H. West et H.P. Maxted, 2000). Les activités scientifiques se sont également développées sous l'impulsion du Norsk Polarinstitutt (Institut polaire norvégien) et de l'UNIS (Université du Svalbard), une base scientifique internationale à Ny-Ålesund gérée par une compagnie privée, la Kings Bay A/S (M.H. West et H.P. Maxted, 2000). Cette compagnie qui assurait autrefois l'exploitation des mines de Ny-Ålesund, s'est aujourd'hui reconvertie dans l'assistance logistique aux équipes scientifiques, faisant de cette station un centre de recherche international important. En 2002, plus de 9 900 nuitées furent enregistrées pour les scientifiques (19 063 en tout ; Official Statistics of Norway, 2003) et 106 programmes de recherche étant conduits par 16 pays[1].

Bien avant ce regain d'activité scientifique, les chercheurs français avaient choisi l'île comme terrain d'investigation pour la glaciologie, la géomorphologie et l'hydrologie. C'est le géographe J. Corbel qui a initié les recherches au Spitsberg en établissant en 1963, en presqu'île de Brøgger à 6 km de Ny-Ålesund, une base qui porte aujourd'hui son nom (Ch.-P. Péguy et Th. Brossard, 1993 ; photo 2). Suite au décès de J. Corbel, le 22 février 1970, la base a été laissée à l'abandon avant que le renouveau de la vie scientifique, à la base française, soit impulsé à partir de 1974 par Th. Brossard et D. Joly. Ils ont utilisé ce secteur comme champ d'expérimentation pour y promouvoir, parmi les premiers, les méthodes quantitatives. Le travail que nous poursuivons s'inscrit dans le droit fil de ces recherches. La base française est sans aucun doute un port d'attache d'exception à partir duquel nous avons pu conduire quatre missions de terrain au cours des étés 2001 à 2004.

[1] Les programmes scientifiques concernent l'ensemble de la recherche conduite au Svalbard par des scientifiques. 32 % sont norvégiens, 22,6 % allemands, 10,4 % polonais, 7,5 % anglais, 5,6 % français, 3,7 % américains, 3,7 % japonais, 2,8 % belges (Research Council of Norway, 2002).

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

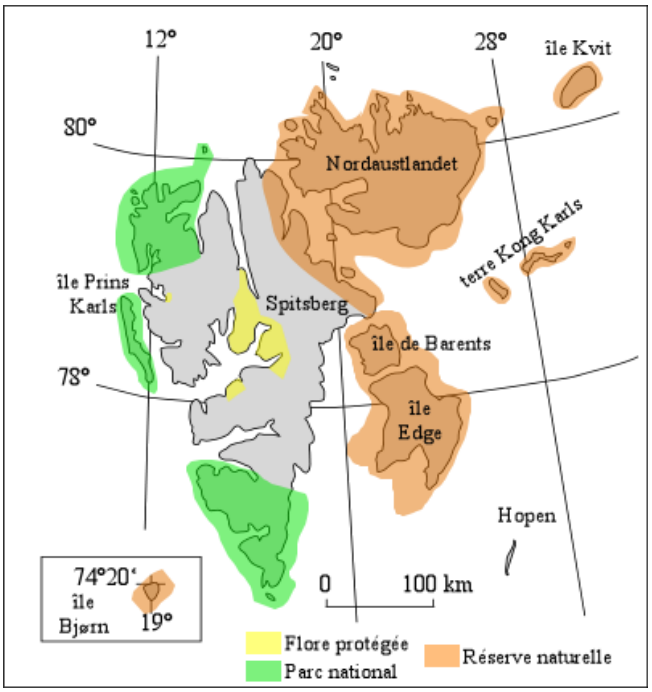


Fig. 9 – Secteurs protégés du Svalbard *(d'après Official Statistics of Norway, 2003). Un grand nombre de petites îles de l'archipel sont classées comme réserve naturelle.*

Photo 2 – Les bâtiments de la base J. Corbel, entourée par la toundra à **Dryas octopetala.** *Prise de vue vers le nord-est, juillet 2004.*

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

Démarche d'analyse du paysage

Notre problématique relève du positionnement suivant : quels sont les facteurs spatio-temporels qui règlent l'organisation et la dynamique du paysage dans les marges proglaciaires ? Pour y répondre, il convient, en premier lieu, de développer une méthode d'observation d'un paysage jeune, où les dynamiques végétales sont commandées par les rythmes de déglaciation et par les conditions mésologiques[1] locales.

Pour asseoir notre protocole, il conviendra dans une première partie de faire le point sur l'histoire de la végétation du Spitsberg et sur ses particularités floristiques. Nous y détaillerons ensuite le cadre environnemental dans lequel nous avons observé la végétation, celui des marges proglaciaires, dont nous verrons qu'elles sont devenues un objet de recherche particulièrement dynamique sur le plan international. Nous serons ensuite amenée à nous positionner par rapport à ces travaux antérieurs en précisant les différentes phases de la chaîne méthodologique mise en place pour appréhender notre terrain et ses échelles d'organisation (fig. 10).

Dans la deuxième partie, nous avons cherché à mettre en évidence l'évolution globale des cortèges floristiques sur cinq marges proglaciaires, situées dans deux régions de l'île, dans le centre (baie de Pétunia) et sur la façade ouest (Kongsfjord). La comparaison des cinq secteurs permettra de dégager ce qui est commun dans le calendrier de la reconquête végétale et ce qui signe les particularités de chaque marge.

En troisième partie, sera conduite une analyse à échelle fine, à l'intérieur d'une seule marge, pour préciser les différenciations locales des milieux. Sur ce secteur, nous disposons d'un Modèle Numérique de Terrain (MNT), à très haute résolution (2 mètres), autorisant une étude intégrée de nombreux paramètres stationnels associés à la microtopographie. Cette approche devrait permettre de relier les changements floristiques aux changements de contexte environnemental et d'identifier les conditions locales structurant le couvert végétal. Enfin, cette étude débouchera sur la mise en place d'une nomenclature de faciès paysagers qui seront l'objet d'une cartographie précise grâce à l'utilisation d'un modèle de probabilité conditionnelle.

[1] Mésologique : relatif au milieu (à l'échelle stationnelle ou locale).

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

Le croisement des deux niveaux d'analyse nous permettra de proposer un schéma global de dynamique des marges proglaciaires, qui intégrera des tendances générales avec les facteurs qui les gouvernent, mais également commandées par les contraintes des facteurs locaux.

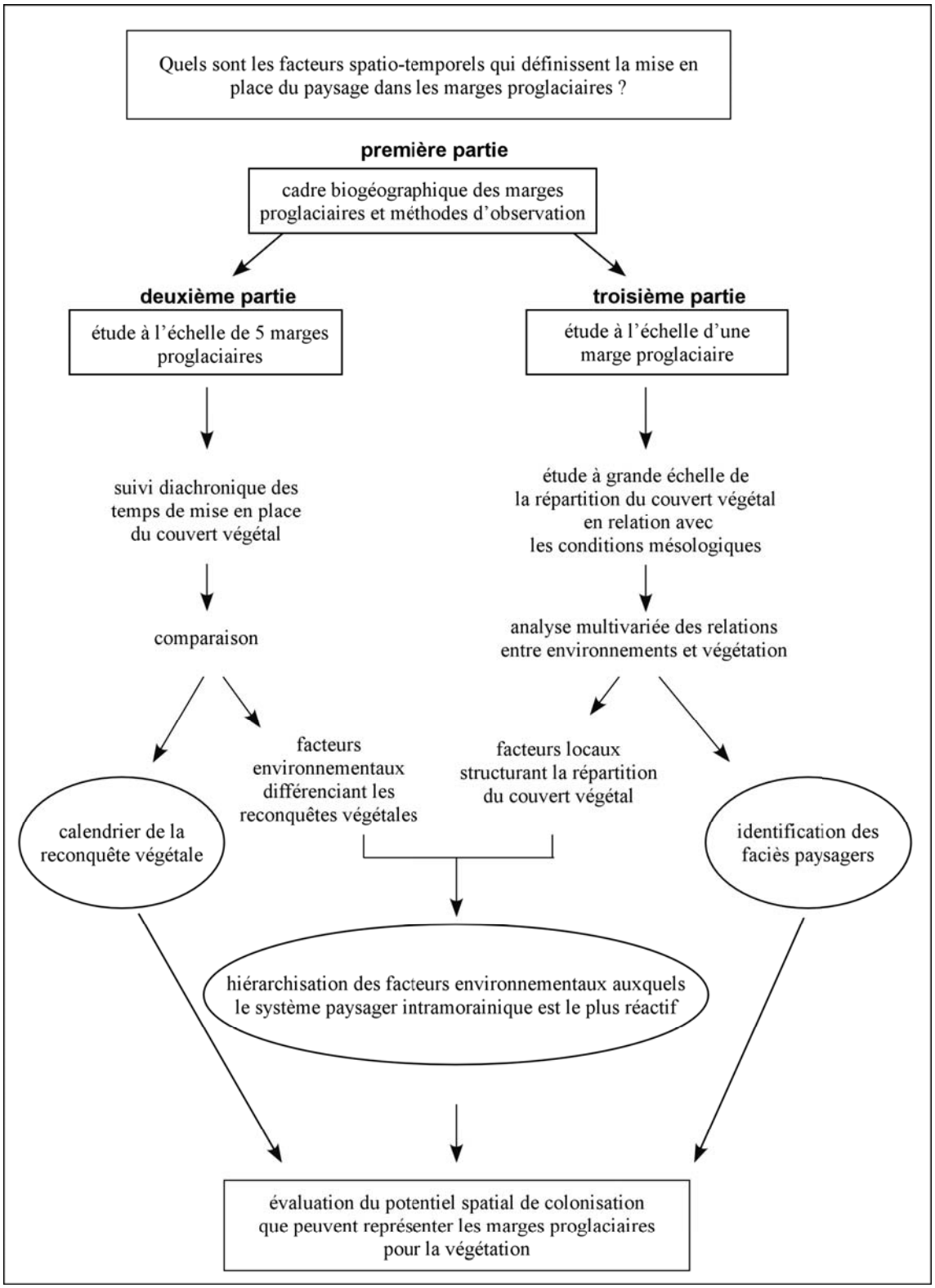


Fig. 10 – Démarche suivie pour observer l'évolution du paysage intramorainique depuis la fin du Petit Âge Glaciaire.

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

Première partie

Biogéographie du terrain d'étude, méthodologie d'observation et d'analyse de la reconquête végétale

Sur cette croûte, un glacier s'est traîné. Il y a quelque chose comme dix-huit à vingt mille ans. Force colossale, montagne glauque aux arêtes friables venue du Labrador, lentement, lentement. Avance irrésistible. La roche toute neuve, le glacier l'a façonnée à sa fantaisie. Enfoncée, rabotée, usée, crevassée et parfois recouverte de tout ce qu'il portait dans son ventre d'énorme hiver en marche. Ce qui dépasse ici de la platitude sans bornes, ce sont les excréments du glacier disparu. Les débris du combat qui s'est livré entre la glace et la roche, entre ce qui était établi et ce qui passait. Entre le statique et le mouvant. (B. Clavel, 2005).

Photo 3 – Les glaciers Lovén. *Prise de vue depuis le glacier Conway vers le sud, juillet 2002.*

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

Introduction de la première partie

La végétation du Svalbard, comme le remarque A. Elvebakk (1994), est sans doute la mieux connue de l'Arctique. Elle fut l'objet d'un intérêt scientifique remarquable dès les premiers découvreurs, à l'image du naturaliste Sven Lovén qui explorait en 1837 la végétation des îles du Kongsfjord (Ch. Rabot, 1900). Ce qui fascine au Spitsberg, comme ailleurs dans l'Arctique, plus encore que la résistance des plantes aux rigueurs du climat, c'est le lien fort qui les unit aux milieux et à leurs aptitudes. G. Rougerie (1970) écrit à ce propos : *Deux relevés systématiques nous ont permis d'apprécier l'extrême degré de finesse qu'atteint l'exploitation des conditions offertes par les micro-milieux, sur quoi repose la diversification des paysages végétaux.* L'hétérogénéité surprenante des milieux renvoie à des facteurs d'explication dont les échelles spatiales et temporelles sont subtilement combinées : latitude, altitude, nature du substrat, histoire paléogéographique… Aussi, avant de nous intéresser plus précisément aux marges proglaciaires il convient de fournir quelques repères d'ensemble sur les paysages du Spitsberg et la végétation qui les caractérise et plus particulièrement sur les deux régions dans lesquelles se situent les terrains d'étude (fig. 11). Sur les cinq sites retenus, quatre sont situés sur la façade ouest, dans la région du Kongsfjord, et le dernier, au centre de l'île, dans la baie de Pétunia. Chacune des régions se différencie par quelques particularités climatiques qui nécessitent également d'être présentées.

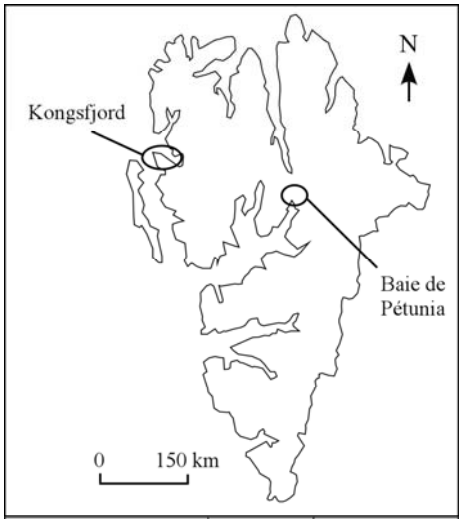


Fig. 11 – Localisation des deux régions étudiées au Spitsberg.

Les deux niveaux d'échelle d'observation, envisagés globalement sur les cinq marges que l'on compare, puis localement sur un secteur que l'on détaille, requièrent la mise en place de deux chaînes méthodologiques distinctes. Les termes spécifiques de celles-ci seront abordés : collecte des données existantes, modes d'observation, techniques d'échantillonnage, méthodes de traitement et de modélisation, présentation des résultats. Nos choix méthodologiques seront présentés dans un deuxième chapitre, car ils répondent à des questionnements scientifiques présentés dans un « état de l'art » intégré au premier chapitre (cf. 2.3.2. et fig. 28 p. 84).

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

Chapitre 1

Le contexte biogéographique de l'étude

1. Particularités de la toundra du Spitsberg

2. Contexte morphoclimatique récent : les marges proglaciaires

3. Terrains d'étude

Photo 4 - Toundra à* Dryas octopetala *avec* Cassiope tetragona *sur un ancien niveau glacio-marin du Kongsfjord. *Prise de vue sur la rive nord de la presqu'île de Brøgger, vers l'est, 12 juillet 2004.*

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

Frappé par les montagnes qui s'offraient à son regard en abordant les côtes de l'île, en juin 1596, l'explorateur hollandais W. Barents lui donna le nom de Spitsberg qui signifie *montagnes pointues*. Ch.-P. Péguy (1969) intitula son ouvrage sur le Spitsberg : *Ces montagnes qui flottent sur la mer*. La montagne confère son trait caractéristique au Spitsberg, effet que renforce la plongée des versants dans la mer lorsque la bande littorale du strandflat échappe à la vue. Depuis les secteurs élevés du centre de l'île, où culminent les monts Newton (1 713 m) et Perrier (1 712 m), (Y. Vallette, 2001), s'écoulent les calottes glaciaires qui se ramifient en de nombreux émissaires pour atteindre la mer en formant d'imposantes falaises de glace. À côté de ces grands ensembles glaciaires, de nombreux petits glaciers se logent dans les cirques montagneux. Des fjords s'enfoncent profondément à l'intérieur des terres ; parmi les plus remarquables, le Widjdefjord, qui entaille l'île du nord au sud sur environ 108 km, et l'Isfjord très ramifié qui s'enfonce au centre sur plus de 107 km. L'indentation de l'île par de nombreux fjords crée un très long linéaire côtier de 3 919 km (Official Statistics of Norway, 2003). C'est sur le pourtour des fjords que sont concentrées 75 % des espèces végétales du Spitsberg (O.I. Rønning, 1996) et dans des vallées intérieures déglacées. Ainsi, les secteurs favorables à la végétation, en dessous de 200 mètres d'altitude, couvrent 12 074 km², soit 20 % du Svalbard (I. Brattbakk, 1986). La physionomie paysagère telle que nous la voyons, s'est mise en place au début de l'Holocène, période de réchauffement qui a signé l'amorce de la déglaciation au Spitsberg et la libération des côtes.

1. Particularités de la toundra du Spitsberg

L'insularité du Spitsberg fait que l'île est déconnectée des franges septentrionales de la forêt boréale, contrairement à ce qui se passe sur les continents eurasiatique et nord-américain. Aussi, au cours de la dernière grande glaciation du Pléistocène, durant le Weichselien Supérieur, alors que la végétation, sur les continents, était repoussée vers le sud à la marge des fronts glaciaires, au Spitsberg, les espèces végétales se sont réfugiées dans quelques secteurs restés sans glace. Au cours de la déglaciation qui a suivi, la végétation a assuré la reconquête des continents eurasiatique et canadien à partir des zones méridionales tandis qu'au Spitsberg, la végétation s'est reconstituée surtout à partir des refuges locaux, donnant naissance à une formation végétale jeune pour le bassin arctique.

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

1.1. Une végétation jeune

La dernière poussée glaciaire a affecté le Spitsberg au Weichselien supérieur, de 17 500 à 12 500 BP (J. Mangerud et J.I. Svenden, 1990). Les glaciers recouvraient alors l'ensemble des terres du Spitsberg d'où émergeaient seulement les nunataks. Sur ces espaces sans glace, les espèces les mieux adaptées ont pu « hiverner ». Une forte sélection s'est opérée lors des étés les plus froids de chaque glaciation (Th. Brossard, 1991). W.D. Billings (1992) avance que certaines espèces vasculaires[1] sont probablement restées au Svalbard durant la glaciation weichselienne telle *Pedicularis dasyantha*, espèce endémique du Svalbard et de la Nouvelle-Zemble, qui a une tolérance au froid qui lui permet de survivre jusqu'à – 70°C (photo 5).

Photo 5* – Pedicularis dasyantha, *espèce endémique du Spitsberg. *Prise de vue en rive sud de la presqu'île de Brøgger sur un ancien niveau glacio-marin, 5 juillet 2002.*

[1] Vasculaires : végétaux supérieurs à tige, racine et feuilles.

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

1.1.1. Déglaciation holocène, libération des secteurs côtiers et des vallées intérieures du Spitsberg

Le Weichselien supérieur prend fin à différentes époques selon les régions du Svalbard. Il se termine vers 13 000 BP dans le Kongsfjord, 12 500 BP dans l'Isfjord (J. Mangerud et J.I Svenden, 1990) et entre 11 000 à 10 000 BP dans le nord (fig. 12).

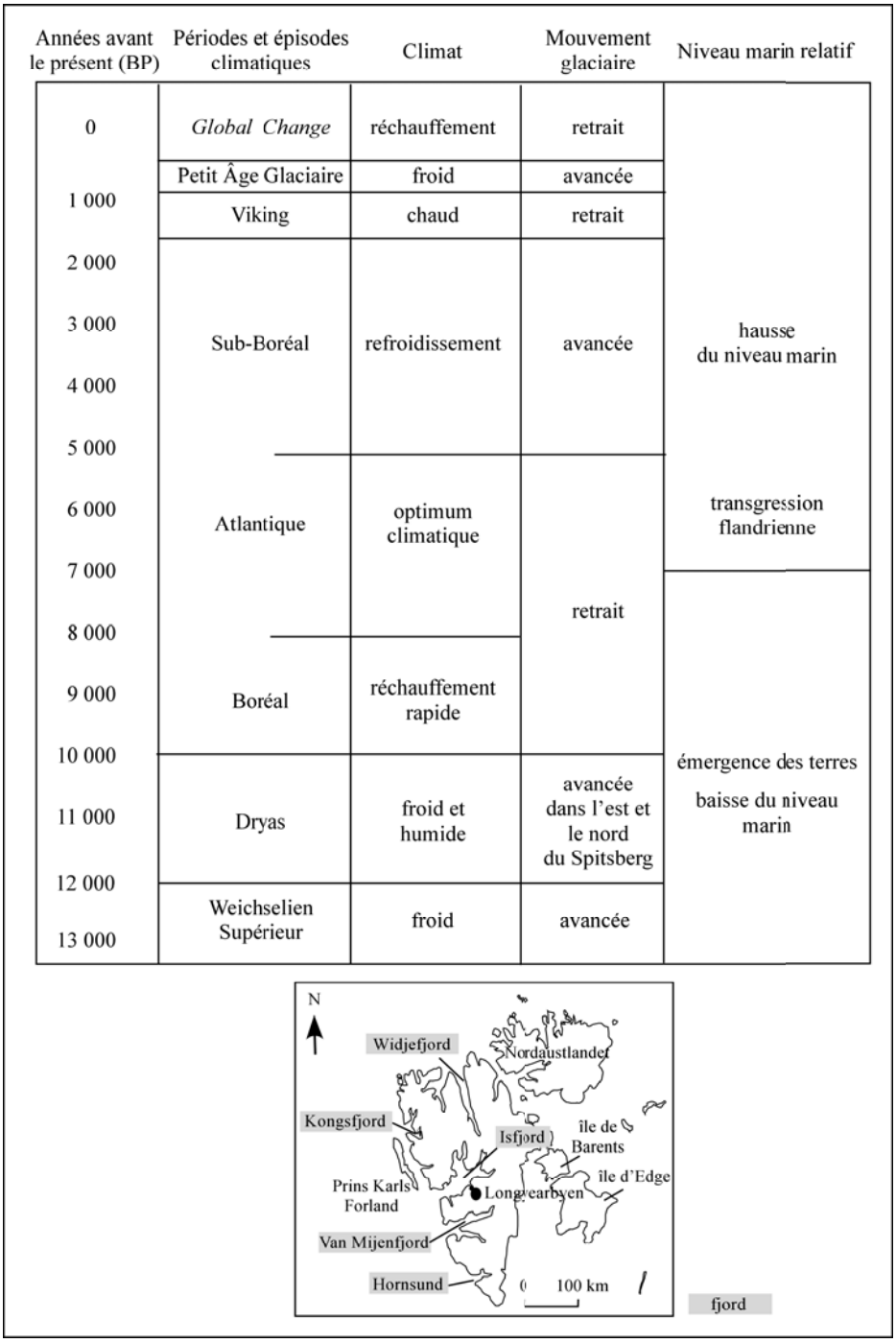


Fig. 12 – Chronologies climatique, glaciaire et littorale holocène du Spitsberg. *La chronologie est établie à partir des différents travaux cités dans le texte. La carte du Spitsberg présente les principaux lieux à partir desquels les épisodes climatiques du Spitsberg ont pu être identifiés et qui sont cités dans le texte.*

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

Cependant, la déglaciation ne connaît pas un mouvement uniforme. Elle est interrompue par un épisode de reprise, le Dryas, qui entraîne quelques réavancées glaciaires dans l'est et le nord du Spitsberg (J.Y. Landvik *et al.*, 1987 ; S.J. Lehman *et al.*, 1992). Le Dryas prend fin vers 10 000 ans BP avec la période de réchauffement dénommée Boréal (G.S. Boulton, 1979 ; G.D. Alastair, 1992 ; J. Adams *et al.*, 1999). Ce changement climatique est le fait d'un réchauffement marin lié à l'advection des eaux atlantiques vers le Svalbard durant la glaciation du Weichselien supérieur (S.L. Forman, 1990).

Le Boréal est une phase climatique chaude, qui débute dans le Kongsfjord vers 10 000 – 9 000 BP. Il est identifiable par la présence d'abondants mollusques thermophiles dans les dépôts côtiers, tel *Mytilus edulis* (A. Héquette, 1988). Ces mollusques témoignent d'un climat plus chaud que le climat actuel du Spitsberg. Le réchauffement entraîne un recul glaciaire et le Kongsfjord est complètement déglacé à partir de 9 440 ± 130 BP (S.J. Lehman et S.L. Forman., 1992). Parallèlement à la déglaciation, il y a une accélération de l'émergence des terres (15 à 30 m/1 000 ans) qui avait débuté au cours du Weichselien supérieur. Le soulèvement glacio-isostatique est visible en presqu'île de Brøgger à travers la présence de terrasses soulevées. Près de la base J. Corbel, par exemple, trois niveaux successifs sont identifiés : à 20 m de 9 650 ± 350 BP, à 13 m de 9 350 ± 350 BP et à 11 m de 9 260 ± 350 BP (J. Corbel, 1966 c). Un abaissement relatif du niveau marin accompagne l'émergence des terres que A. Héquette et M.-H. Ruz (1986) mettent en évidence à la pointe de la presqu'île de Brøgger (Kvadehuk). Les auteurs rapportent que des coquilles de l'espèce *Hiatella arctica* ont été prélevées dans des ostioles submergés à 1,5 m sous le niveau moyen actuel des basses eaux de mer. La datation au carbone 14 des coquilles indique un âge de 9 895 ±120 BP. La présence de coquilles à l'intérieur des ostioles témoigne d'un ancien niveau marin alors plus bas que le niveau actuel car de telles formes n'ont pu se développer qu'au cours d'une séquence aérienne.

1.1.2. Développement de la végétation pendant le réchauffement holocène

Le réchauffement culmine pendant la période Atlantique, à laquelle correspond la transgression flandrienne, qui intervient entre 8 000 et 5 000 BP (H. Österholm, 1990). J.Y. Landvik *et al.* (1987) et W.O. Van der Knaap (1989) trouvent les signes du réchauffement dans l'analyse de pollens, spores et mousses prélevés à l'île d'Edge, dans

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

l'est du Svalbard (fig. 12). C'est au cours de la période située entre 7 900 et 6 700 BP que la végétation était la plus riche en espèces vasculaires.

En presqu'île de Brøgger, la transgression marine est attestée par l'existence d'une plate-forme de 10-15 mètres qui témoigne de la présence de la mer au pied de la falaise de la base J. Corbel et qui aurait duré jusque vers 5 000 BP (J. Corbel, 1966 c). M. Hald *et al.* (2001) ont identifié dans le Van Mijenfjord, au centre du Spitsberg (fig. 12), un niveau marin situé entre 5 et 10 mètres au-dessus du niveau actuel. Cependant, l'intrusion des eaux a peu affecté les niveaux marins dégagés au début du Boréal, vers 9 000 BP.

L'optimum climatique prend fin vers 5 000 BP avec une tendance générale au refroidissement durant le Sub-Boréal (S.L. Forman, 1990) entraînant une avancée glaciaire qui débute à Hornsund vers 3 000 BP (S. Baranowski et W. Karlén, 1976). L'avancée glaciaire est stoppée par une nouvelle période chaude, appelée au Spitsberg le « petit optimum Viking », qui se déroule de 1 500 à 750 BP. Les conditions climatiques étaient alors plus chaudes autour du bassin arctique, avec une température moyenne en juillet qui devait être supérieure de 2°C à celle d'aujourd'hui (H.J.B. Birks, 1991). Ce réchauffement a entraîné une rétraction de la glace de mer, qui a permis l'établissement de colonies vikings au Groenland, ainsi qu'un retrait glaciaire généralisé. Les espaces alors déglacés ont été le siège d'une reconquête végétale, mise en évidence par S. Baranowski et W. Karlén (1976) à Hornsund : la découverte de fragments d'une toundra fossile sur la marge du glacier Werenskiold témoigne en effet d'une occupation par la végétation des espaces nouvellement déglacés. Les datations au carbone 14 du fragment de toundra fossile situent son développement de 1 565 ± 235 BP à 760 ± 145 BP. Cette reconquête végétale s'est arrêtée au Petit Âge Glaciaire, pendant lequel la toundra viking a été recouverte par le glacier.

Le réchauffement holocène, même s'il a été entrecoupé de brèves phases de refroidissement, a entraîné la réduction du domaine glaciaire, une modification dans la zonation de la végétation sur l'archipel et une baisse rapide du niveau marin. Sur les bandes littorales et les fonds de vallées déglacées depuis 9 000 ans, la toundra s'est progressivement installée. Ce sont les contraintes climatiques et environnementales fortes, propres à la zone arctique, qui ont entraîné une sélection des espèces les plus adaptées.

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

1. 2. Capacité d'adaptation des espèces végétales aux contraintes environnementales arctiques

Les espèces végétales qui composent la toundra du Svalbard sont adaptées aux conditions climatiques rigoureuses, surtout à celles qui sévissent durant la saison végétative. Cette période dure, de mi-juin à mi-août, de 40 à 70 jours pour le Spitsberg (O.I. Rønning, 1996). Elle est caractérisée par des températures basses, avec une moyenne de juillet sur le Svalbard comprise entre 2 et 6°C selon la latitude (Th. Brossard *et al.*, 2002). Durant un laps de temps limité, les plantes doivent se développer, fleurir et produire des graines pour permettre leur survie qui dépend de leur stratégie d'adaptation aux contraintes environnementales.

1.2.1. Contraintes mésologiques locales

- **La topographie**

La topographie est très importante car elle détermine, entre autres, les températures locales, les conditions de drainage, l'exposition au vent et les caractéristiques de la couverture neigeuse entraînant des différenciations dans le couvert végétal. Ainsi P.L. Nimis (1985), au cours d'une étude sur la végétation en presqu'île de Brøgger, a montré qu'un changement de l'ordre de 10° dans l'inclinaison du sol entraîne une modification nette de la couverture végétale.

La couverture neigeuse est un facteur qui intervient fortement dans la composition des communautés végétales. Pour les espèces chionophiles[1] telles *Cassiope tetragona* et *Deschampsia alpina*, la couverture neigeuse a de multiples effets : réduire le taux de dessiccation[2], protéger de l'abrasion éolienne, isoler des basses températures, modifier la lumière reçue, augmenter la disponibilité en eau de fonte et restreindre la saison de croissance (J.A. Schaefer et F. Messier, 1995 ; A. Elvebakk, 1997). Cependant, la couverture neigeuse peut entraîner une régression du couvert végétal lorsque la neige est persistante. Enfin, à l'inverse, certaines espèces dites chionophobes[3] telles *Polygonum viviparum, Carex rupestris, Saxifraga oppositifolia* (J.A. Schaefer et F. Messier, 1995) sont associées à de minces couvertures de neige. A. Elvebakk (1994)

[1] Chionophile : se dit d'une espèce ou d'un groupement qui supporte un enneigement prolongé ou qui en profite.
[2] Dessiccation : perte importante de l'eau constitutive d'un organisme. Une dessiccation excessive peut conduire un végétal à son flétrissement ou à sa mort.
[3] Chionophobe : se dit d'un groupement qui craint l'enneigement.

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

a proposé un schéma mettant l'accent sur les rôles conjoints des formes topographiques et du manteau neigeux comme déterminant des conditions stationnelles (fig. 13).

Chaque situation topographique détermine un habitat particulier pour ces plantes. En situation d'abri, la plante peut tirer profit des conditions du milieu (climatique, édaphique et biologique) qu'elle affectionne et, de manière indirecte, la neige permet de pallier le déficit hydrique de l'été arctique.

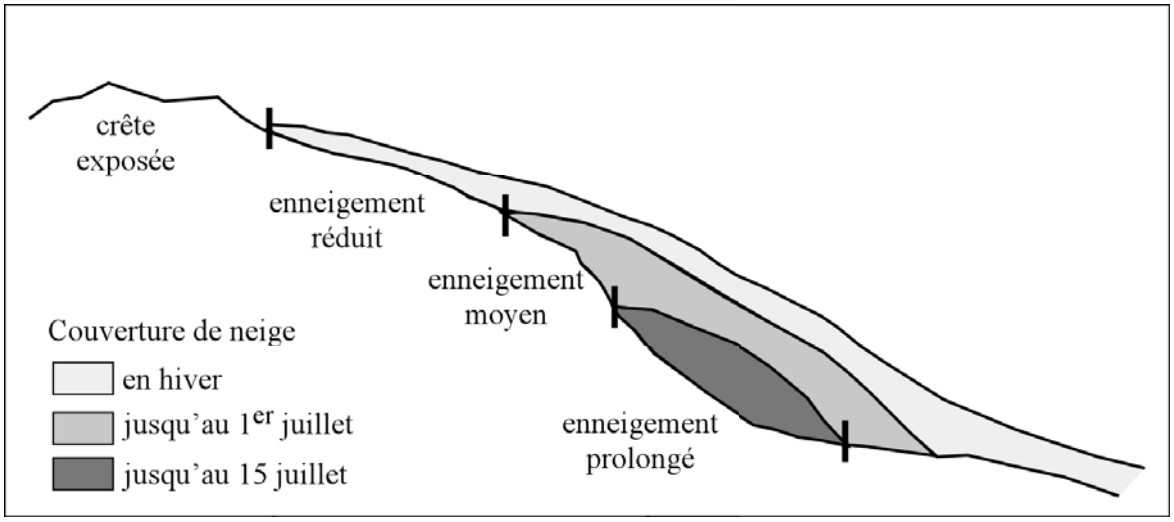


Fig. 13 – Distribution de quatre habitats majeurs selon la topographie et la durée du manteau neigeux. *Les traits désignent les limites de chaque habitat (d'après A. Elvebakk, 1994).*

- **La disponibilité en eau**

Si les basses températures constituent une contrainte, la disponibilité en eau est une autre. En effet, l'alimentation en eau au Spitsberg n'est pas satisfaisante et ce pour plusieurs raisons. Les totaux annuels pluviométriques sont de 386 mm seulement à Ny-Ålesund (fig. 14), dont la moitié tombe sous forme neigeuse durant les mois d'hiver. D. Mercier (1998) a calculé la moyenne annuelle du coefficient nivométrique (1969-1996) et indique qu'à Ny-Ålesund, 47 % du volume global des précipitations sont sous forme de neige. La fraction des précipitations liquides disponibles pour la végétation est donc restreinte soit en cumulé sur les quatre mois de l'été, 130 mm, dont plus de la moitié ne tombe qu'à la fin de la saison végétative (août et septembre, fig. 14).

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

Enfin, l'eau contenue dans le sol n'est pas toujours mobilisable car elle est stockée pendant l'essentiel du temps sous forme de glace et très vite le pergélisol est atteint en profondeur. Le pergélisol est défini comme tel lorsque les températures du sol se maintiennent au-dessous de 0°C pendant au moins deux années consécutives (D.I. Benn et D.J.A. Evans, 1998). Il est profond, continu sur 40 % du Svalbard, et correspond à la surface qui n'est pas couverte par les glaciers. Le Svalbard représente la zone de pergélisol la plus large d'Europe après la Russie (O. Humlum *et al.*, 2003). Des mesures effectuées à Janssonhaugen, à quelques kilomètres à l'est de Longyearbyen (78°10'N, 16°28'E, 270 m d'altitude), en mai 1998, indiquent une épaisseur de 220 m ; celle-ci varie de moins de 100 m à proximité des côtes à plus de 500 m dans les hauteurs (O. Humlum *et al.*, 2003).

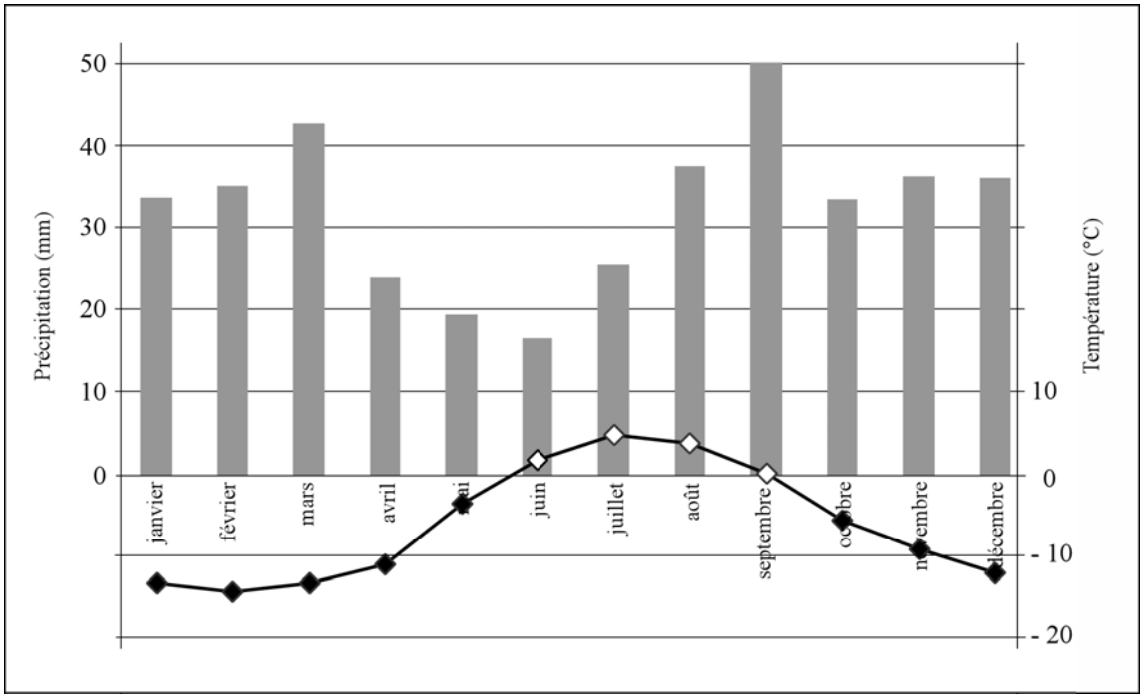


Fig. 14 - Températures et précipitations moyennes mensuelles à Ny-Ålesund (1969-2000). *La température moyenne annuelle pour la période est de -5,8°C et les précipitations moyennes annuelles de 386 mm (Offical Statistics of Norway, 2003). Les mois où les températures moyennes sont supérieures à 0°C sont signalés par les figurés blancs sur la courbe.*

Si, en profondeur, le sol reste gelé en permanence, la fonte se produit saisonnièrement en surface : c'est la couche active. L'épaisseur de la couche active à Janssonhaugen, au cours de l'été 1998, était de 1,54 m avec un maximum atteint le 4 septembre (E. Isaksson *et al.*, 2001). À Kvadehuk, en presqu'île de Brøgger, elle est de 1 m à 1,5 m (B. Hallet et S. Prestrud, 1986), mais peut être inférieure (0,5 m, voire moins) sur

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

les pentes fortes ou lorsque la conduction thermique est mauvaise (M.-F. André, 1993). Le dégel du sol est indispensable à la vie des plantes et intervient sur la disponibilité en eau, contribuant à structurer la distribution spatiale du couvert végétal (O.I. Rønning, 1969). La réserve présente dans la couche active et libérée pendant l'été, permet de pallier, dans une certaine mesure, au déficit des précipitations. Cependant, en cas d'engorgement, la couche active devient un milieu répulsif.

- **L'activité morphogénique « estivale »**

Les processus périglaciaires sont la conséquence d'un changement d'état de l'eau qui crée des alternances de cycles de gel-dégel (H.M. French, 1996). Le cycle est actif sur les surfaces libres de neige et lorsque le dégel est possible, il se cale donc sur le cycle végétatif. Trois mécanismes principaux sont distingués (photo 6).

- La gélifraction est un processus qui conduit à l'éclatement de la roche sous l'effet des changements de phase de l'eau (solide/liquide). Son impact direct sur les phanérogames[1] est négligeable, car il ne concerne que les roches support dont les qualités mécaniques excluent l'implantation de plantes supérieures (photo 6 a).

- La géliturbation affecte les sols meubles. Elle est associée à des topographies planes ou faiblement déclives qui favorisent la rétention d'eau. Sa dynamique est liée à l'alternance gel-dégel et détermine ce que A. Pissart (1987) appelle des géliformes. Son action sur les plantes est sensible car elle peut casser ou abîmer les racines (B. Van Vliet Lanoë, 1988). Aussi les plantes ne peuvent coloniser l'intérieur des formes structurées tant que la géliturbation est active. La photo 6 b illustre le cas de l'ostiole où la végétation colonise uniquement la périphérie, hors de la zone active.

- La gélifluxion requiert l'existence d'une pente et est donc associée aux versants. Elle se traduit par un déplacement du matériel sous l'effet d'un glissement en masse parfois très lent, pouvant déchirer le couvert végétal et le déplacer en bas de pente. La photo 6 c témoigne d'un tel phénomène, la végétation est plus dense à la marge des loupes et seules les espèces pouvant supporter de tels déplacements colonisent la zone active. Les formes qui en résultent sont surtout des langues ou loupes de gélifluxion. La forte

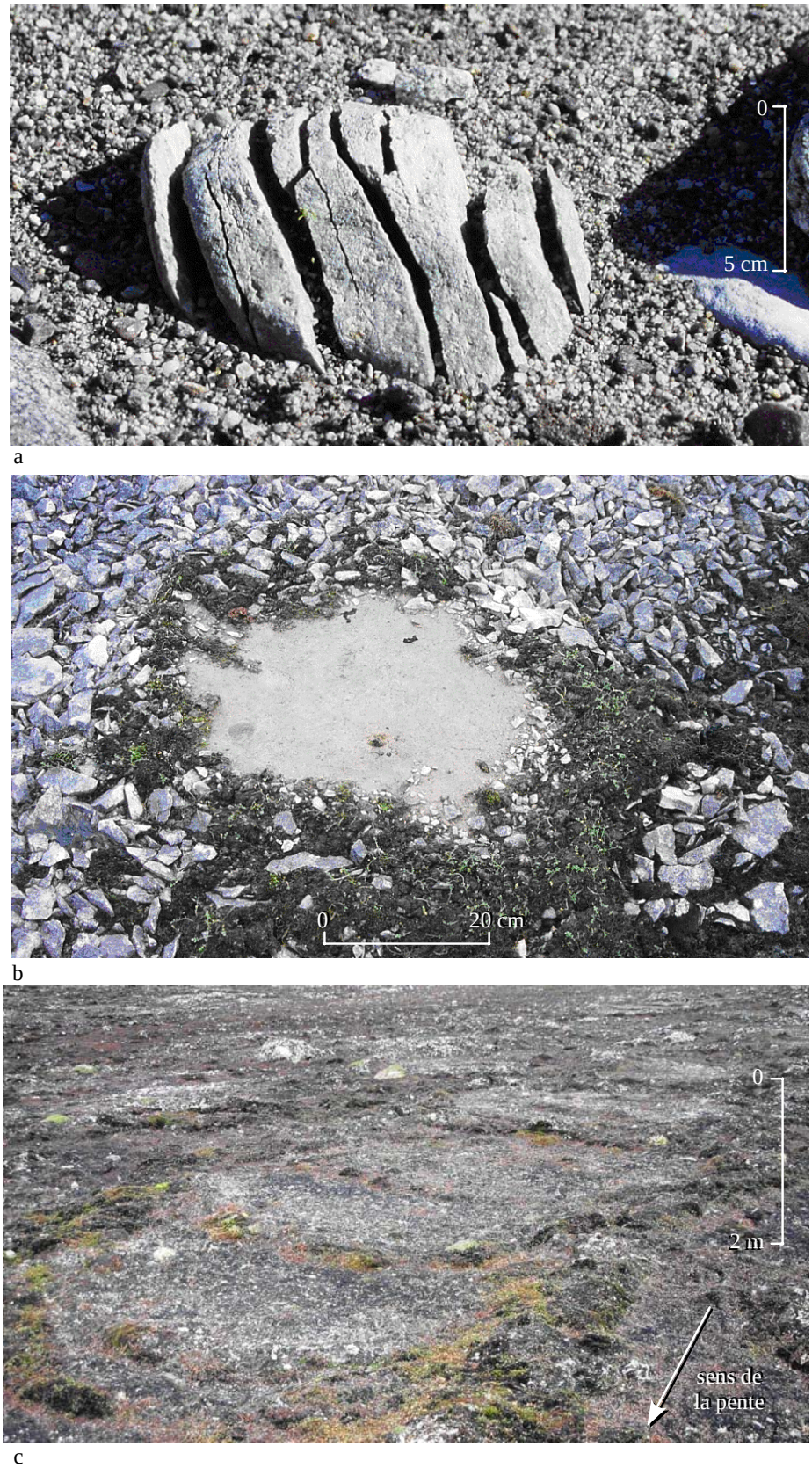
[1] Phanérogame : plante dont les organes reproducteurs, visibles, sont les fleurs.

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

présence de fines (limons et argiles) associée à l'apport d'eau durant l'été, contribue aux mouvements de surface auquel s'ajoute le phénomène d'absorption que Th. Brossard (1991) décrit : *les liaisons électriques entre le film d'eau absorbé et les particules maintiennent une bonne cohésion du sol, mais un choc mécanique léger est suffisant pour briser les liaisons et redonner à la roche meuble saturée sa consistance boueuse.* Il peut se produire des glissements brutaux de type « foirage », déclenchés lorsqu'est franchi le seuil de plasticité ou de liquidité ; mais ce type de phénomène a un caractère relativement ponctuel, détruisant localement le couvert végétal en même temps que le substrat se déplace (photo 7 a). Les dynamiques de solifluxion et de foirage ont des conséquences plus radicales sur le couvert végétal.

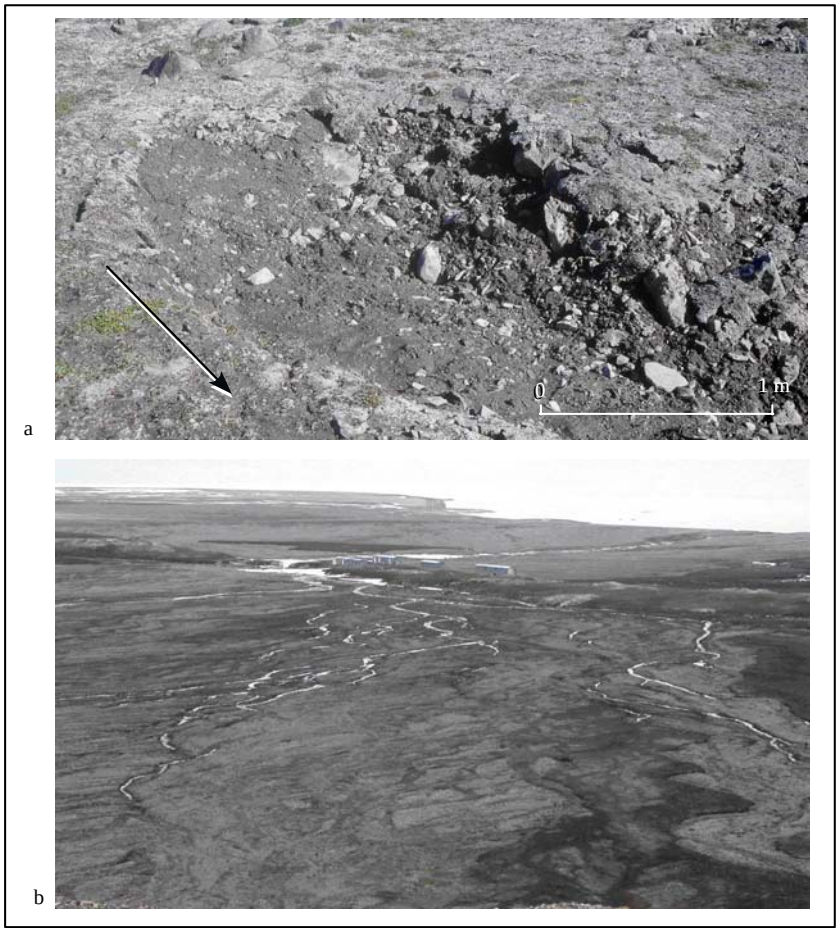
Le ruissellement a un effet qui structure le couvert végétal à une échelle plus large. Outre les précipitations saisonnières, le ruissellement peut mobiliser les stocks d'eau gelée dans le sol depuis des années (D. Mercier, 1998). De larges secteurs de sandur actif viennent parfois attaquer des pans entiers de toundra mature, stabilisés depuis des millénaires (photo 7 b). Tant que les écoulements sont actifs, la végétation peut difficilement coloniser les sandurs et dépasser le stade pionnier.

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005



Photos 6 a, b, c – Processus périglaciaires actifs au Spitsberg. *(a) roches éclatées sous l'action de la gélifraction (marge du glacier Conway, juillet 2002) ; (b) l'activité du gel dans le sol, la géliturbation, crée des formes structurées : l'ostiole (rive nord de la presqu'île de Brøgger, Kvadehuk, 15 juillet 2002) ; (c) lent mouvement de déplacement du sol lié à la gélifluxion (niveau glacio-marin en rive sud de la presqu'île de Brøgger, 4 juillet 2002).*

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005



Photos 7 a, b ***– Morphodynamiques actives au Spitsberg.*** *(a) niche d'arrachement liée à un « foirage » localisé. Prise de vue d'un niveau glacio-marin en baie de Pétunia, 17 août 2003 ; (b) le ruissellement affecte d'importantes surfaces et détruit le couvert végétal. Prise de vue depuis le vallum du glacier Austre Lovén vers le sud ouest, 8 juillet 2003.*

- **Impact de la faune**

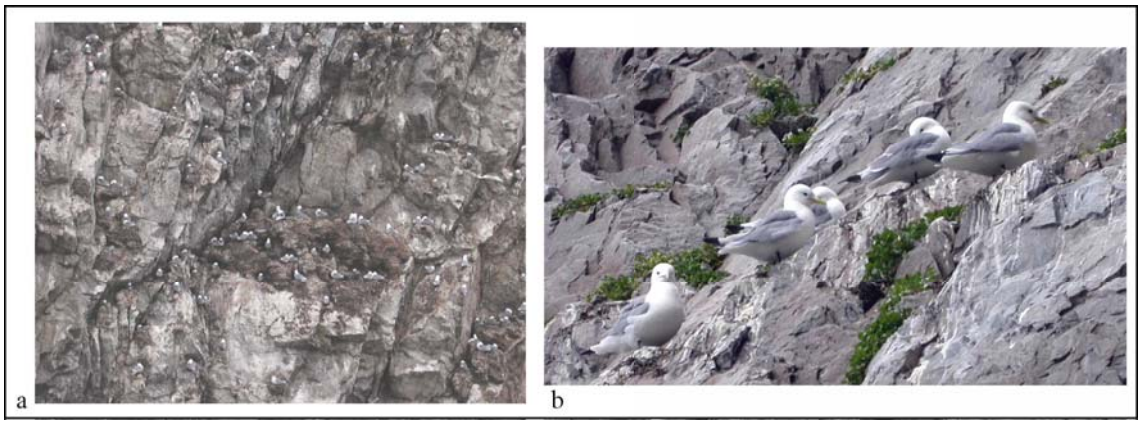
Le renne du Svalbard (*Rangifer tarandus ssp. platyrhynchus*) est une sous-espèce endémique à l'archipel qui est isolée depuis 40 000 ans (photo 8). Les populations de rennes sont irrégulièrement réparties au Spitsberg à cause de la chasse ponctuelle de l'animal dans certains secteurs jusqu'en 1925, date à laquelle les animaux ont été protégés. De plus, l'activité migratoire du renne est fortement contrainte en raison de la fragmentation des habitats par les fjords et les glaciers ce qui ne facilite pas le repeuplement lorsqu'un troupeau est localement décimé.

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

***Photo 8 – Le renne du Svalbard* Rangifer tarandus ssp. Platyrhynchus.** *Prise de vue au voisinage de la base J. Corbel, 13 juillet 2002.*

Photo 9 – Espèces pâturées par les rennes du Spitsberg. *Les fleurs du* Dryas octopetala, *les lichens* Cetraria delisei *(brun) et* nivalis *(jaune pâle) font partie des espèces les plus affectées par le pâturage sélectif des rennes. Prise de vue sur la côte sud de l'île de Blomstrand, 15 juillet 2002.*

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005



Photos 10 a, b – Colonies de mouettes tridactyles nichant en falaise. *Cliché de gauche, prise de vue rive nord de la presqu'île de Brøgger, juillet 2001 ; cliché de droite, prise de vue rive nord de la pointe de l'île de Prins Karl, juillet 2004.*

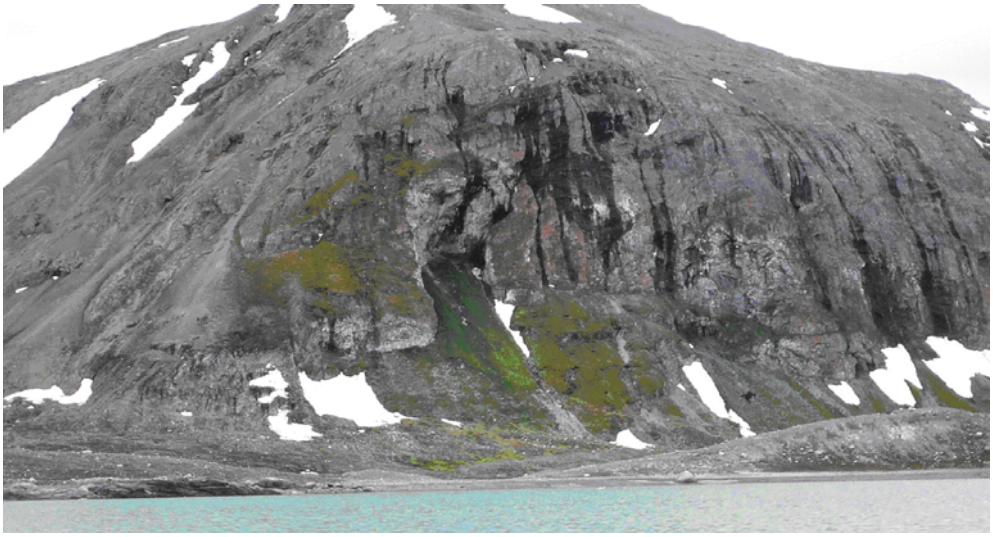


Photo. 11 – Falaise à oiseaux accompagnée de végétation nitrophile. *Les oiseaux alimentent le pied de la falaise en guano favorisant une végétation particulièrement luxuriante. Prise de vue depuis le fjord sur le versant ouest de l'île de Blomstrand, 16 juillet 2002.*

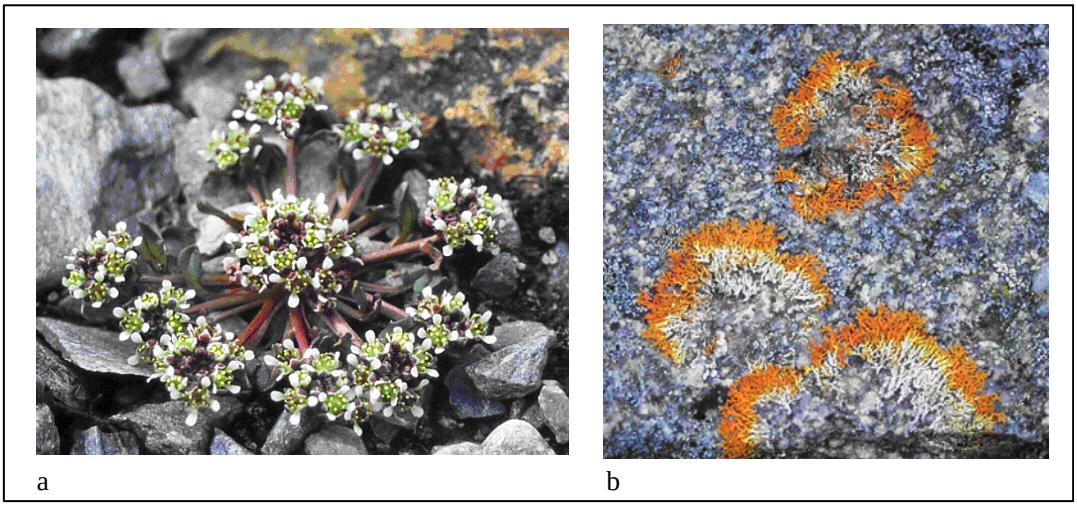


Fig. 12 a, b – Espèces caractéristiques des formations végétales de falaises à oiseaux. *(a)* Cochlearia officinalis *; (b) le lichen du genre* Xanthoria*. Prise de vue à l'île de Prins Karl, 10 juillet 2004.*

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

En presqu'île de Brøgger, selon A. Elvebakk (1997), la population de rennes a probablement été exterminée par la chasse avant le début du XX^{e} siècle. En 1978, 12 rennes y ont été réintroduits dans le cadre du programme *Man and Biosphere* du Svalbard. Leur nombre est passé à 46 en 1984 et à 300 en 1991 (A. Elvebakk, 1997). Avec l'augmentation de la population, le surpâturage a détruit 30 à 50 % des lichens fruticuleux[1] et notamment *Cetraria delisei* (photo 9). Les plantes les plus faiblement protégées par la neige durant l'hiver sont plus particulièrement exposées à la prédation qui entraîne la disparition des tapis de lichens (O.I. Rønning, 1996). L'impact de l'animal est également sélectif. Au printemps, le renne se nourrit des fleurs de *Salix polaris, Saxifraga oppositifolia* et, en été, d'*Alopecurus borealis* et autres herbacées. À la fin de l'été et en automne, *Saxifraga oppositifolia* et *Cetraria delisei* constituent l'essentiel de leur pâture (O.I. Rønning, 1996). En presqu'île de Brøgger, les rennes broutent aussi les fleurs de *Dryas octopetala, Saxifraga nivalis* et *Silene acaulis* (N. Wada, 1999). Ainsi 33 % des fleurs et des bourgeons de *Dryas octopetala* sont mangés par les rennes. L'impact du renne sur la végétation est donc particulièrement sensible d'autant qu'il s'agit d'un phénomène récent marqué par un ajustement entre le prédateur et la ressource.

Les oiseaux ont également un impact sur la végétation qu'ils alimentent en nutriments, tels que l'azote et le phosphore. La végétation qui se développe au pied des falaises, où nichent les colonies d'oiseaux comme les fulmars ou les mouettes tridactyles (photo 10 a, b), forme un tapis dense et continu avec un cortège d'espèces spécifiques (photo 11). Sur les rochers, les lichens aux teintes orangées du genre *Xanthoria* (*X. elegans, X. aureola* et *X. sorediata)* en sont la marque ainsi que des espèces vasculaires comme *Cochlearia officinalis, Oxyria digyna, Saxifraga cernua* et *cespitosa* (M.-F. André, 1993 ; photos 12 a, b).

- **La nature géologique du substrat**

A. Elvebakk (1982) attribue certaines différenciations spatiales du couvert végétal aux variations du pH lié au substrat géologique. Il distingue huit groupes végétaux en fonction de leurs affinités acido-basiques.

[1] Fruticuleux : se dit d'un lichen dont le port rameux évoque une structure frutescente.

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

1.2.2. Adaptations végétales

La courte période végétative empêche la survie de plantes annuelles[1], si bien qu'au Spitsberg une seule plante de ce type est recensée : *Koenigia islandica* (R.M.M. Crawford, 1989). Les espèces sont avant tout pérennes[2], ce qui leur évite d'avoir à reconstituer leur appareil végétatif avant de commencer leur cycle de reproduction (Th. Brossard, 1977). Les espèces pérennes présentent des tailles et des ports variés pour s'adapter aux diverses contraintes. Ainsi, le nanisme est fortement développé, réduisant la surface d'exposition de la plante au froid. Il touche en particulier les formes « arborées » comme le saule nain (*Salix polaris*) et peut atteindre des formes extrêmes comme *Sagina nivalis* dont la hauteur n'excède pas 1 cm (fig. 15).

Le nanisme permet aux végétaux d'être recouverts par la neige et de bénéficier de la protection thermique du manteau neigeux durant l'hiver, moyen de survivre aux températures négatives et au gel. Par ailleurs, les formes prostrées permettent aussi aux plantes de profiter des températures généralement plus élevées à proximité du sol pour pallier le déficit thermique. Par exemple, R. Fury et D. Joly (2003) relèvent, sur une série de mesures collectées entre le 19 et 20 juillet, en presqu'île de Brøgger, des pics de température à 22° C (à 20 cm au-dessus du sol). Les ports prostrés peuvent être rampants (*Saxifraga oppositifolia, Salix polaris*), en boule et en coussinet (*Arenaria pseudofrigida, Silene acaulis* ; fig. 15). Pour optimiser le fonctionnement thermique de la plante, les fleurs de *Dryas octopetala, Saxifraga oppositifolia* et *Papaver dahlianum* prennent la forme d'un capteur qui concentre le rayonnement et suit la course du soleil (N. Wada, 1999). Ce phénomène a un double effet : le centre de la fleur est toujours chaud et ainsi attractif pour les insectes pollinisateurs potentiels ; il accélère le processus de croissance et de production des graines (R.M.M. Crawford, 1989). *Salix polaris* et *Eriophorum scheuchzeri* développent des chatons autour de leurs organes de reproduction, qui leur permettent de maintenir une température supérieure de plusieurs degrés à la température atmosphérique voisine (fig. 15). En effet, les poils des chatons renvoient les radiations du soleil vers l'intérieur de la plante, produisant un effet comparable à l'effet de serre (R.M.M. Crawford, 1989).

[1] Annuelle : se dit d'une plante qui accomplit son cycle biologique dans une période inférieure ou égale à un an.
[2] Pérenne : se dit d'une plante pluriannuelle.

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

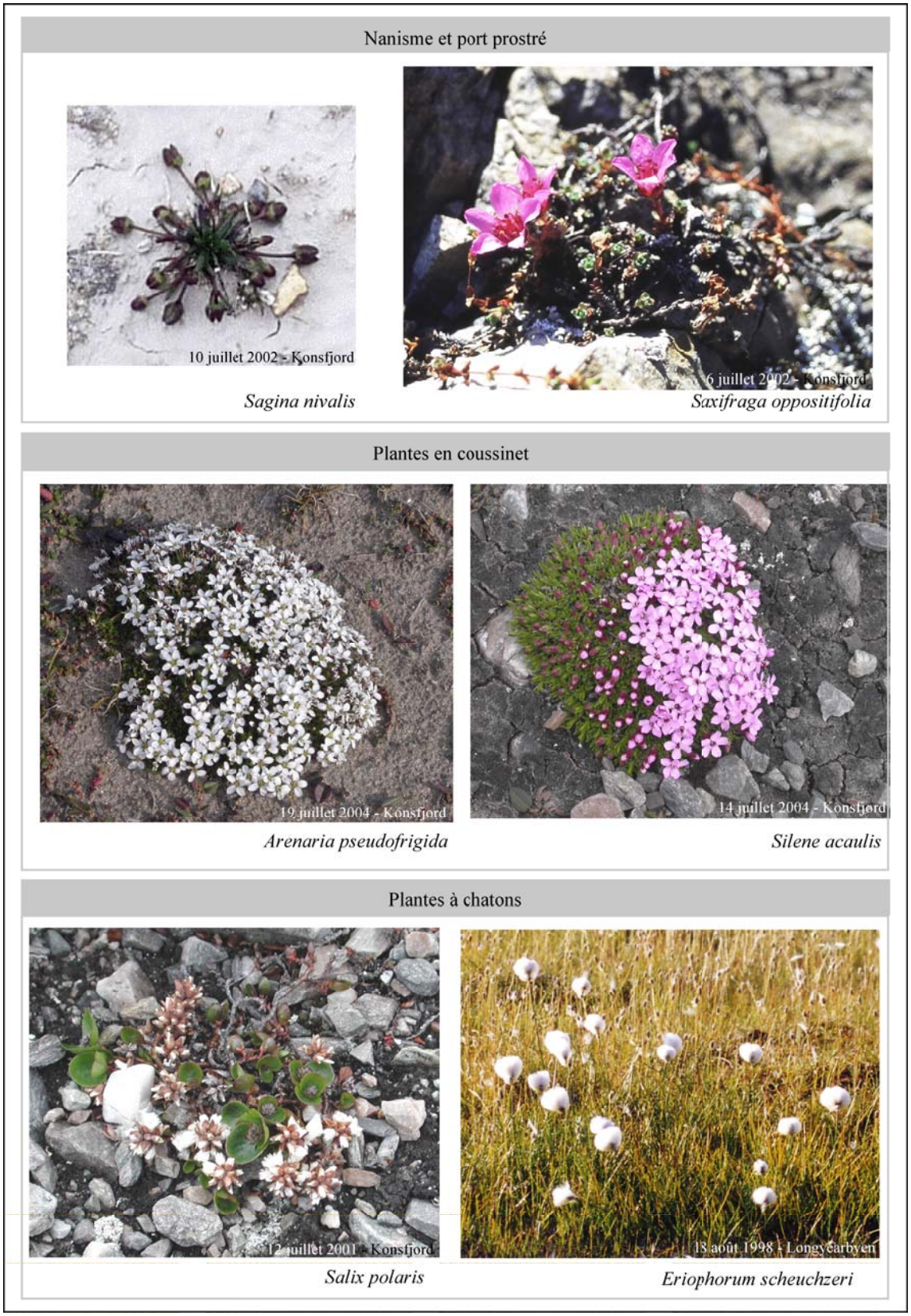


Fig. 15 – Stratégies adaptatives de quelques phanérogames du Spitsberg.

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

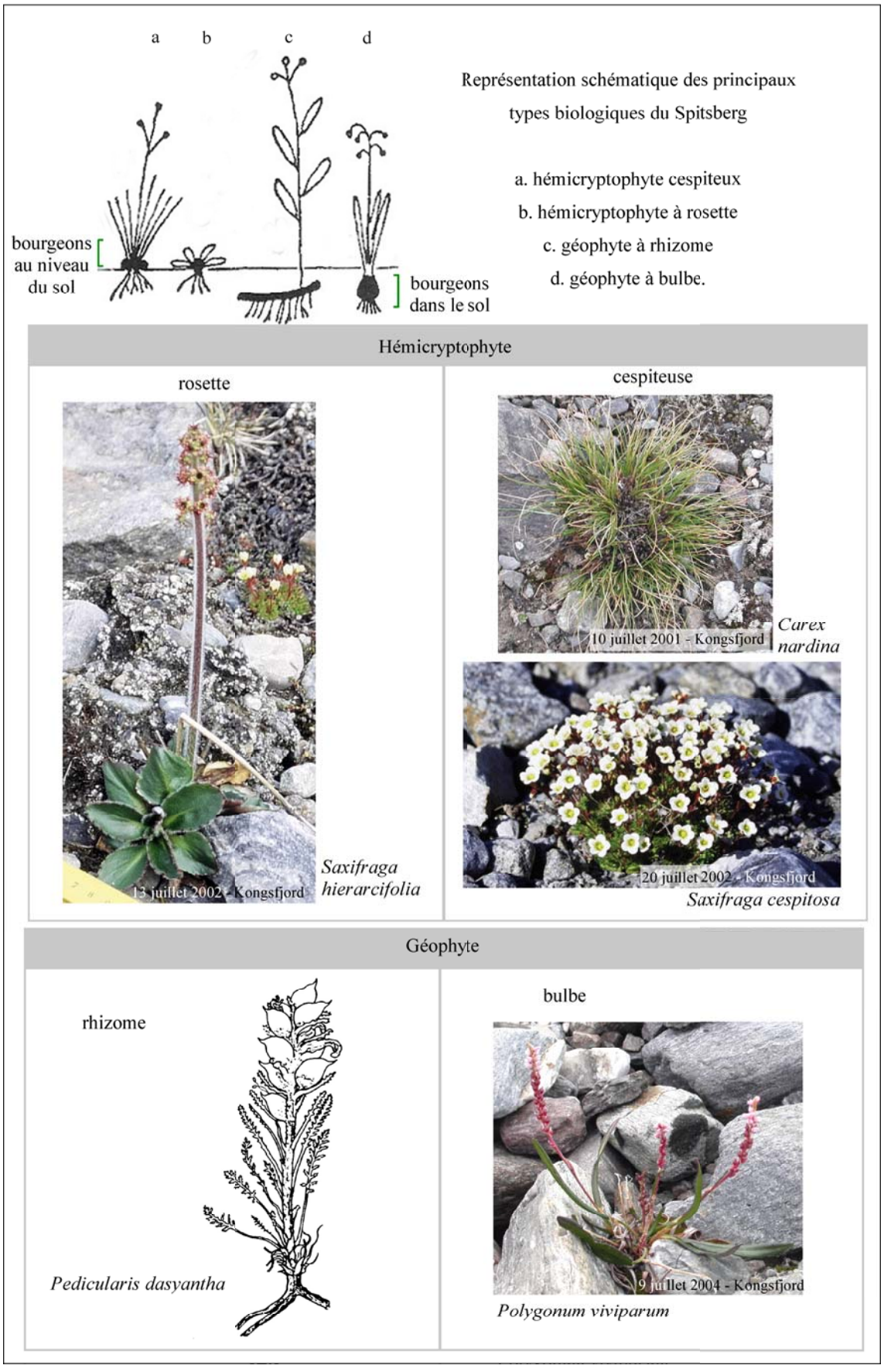


Fig. 16 - Exemples d'espèces aux types biologiques différents *(d'aprés R. Dajoz, 2000 et N. Polunin, 1959).*

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

La morphologie prostrée des végétaux amène leur bourgeon en position basse. Dans l'Arctique, deux types dominent.

- Les **hémicryptophytes** ont des bourgeons situés au ras du sol et protégés par la neige (espèces chionophiles). Ce sont les plantes à rosette[1], comme *Saxifraga hieracifolia,* et les plantes cespiteuses[2], comme *Carex nardina* et *Saxifraga cespitosa* (fig. 16). Beaucoup peuvent se reproduire végétativement par rhizome[3] et/ou stolon[4].
- Les **géophytes** sont les plantes dont les bourgeons sont dans le sol, comme les plantes à rhizomes telle *Pedicularis dasyantha* dont nous évoquions précédemment la résistance au froid. Les plantes à bulbes[5] (fig. 16) ne sont pas répandues dans le haut Arctique et au Spitsberg, seule *Polygonum viviparuum* est recensée en tant que plante bulbeuse.

Certaines espèces ont une reproduction à la fois sexuée et végétative. La multiplication végétative[6] se fait soit à partir de stolons, rameaux à croissance horizontale, aériens ou souterrains, soit à partir de bulbilles[7] ou bourgeons axillaires[8]. Cette prolifération facilite l'apparition de nouveaux individus. Parmi les espèces concernées, *Saxifraga cernua* produit à la fois fleur et bulbille sur son axe de floraison (R.M.M. Crawford, 1989).

Le nanisme des plantes entraîne *de facto* une très faible productivité en terme de biomasse, ce qui ne peut alimenter qu'une mince litière et consécutivement une pédogenèse peu intense d'autant que l'activité biologique et chimique est inhibée par la faiblesse des températures. Ainsi les micro-organismes, qui jouent un rôle déterminant dans la minéralisation de la matière morte, ne sont pas suffisamment actifs pour assurer une bonne transformation de la litière végétale (Th. Brossard, 1977). Enfin, le lessivage printanier fait que le peu de constituants biotiques déjà transformés est facilement pris

[1] Rosette : ensemble formé par les feuilles basales d'une herbacée, insérées au niveau du collet et étalées tout autour de la tige.
[2] Cespiteux : se dit d'une plante formant une touffe compacte à sa base, par resserrement des bourgeons.
[3] Rhizome : tige souterraine subhorizontale émettant saisonnièrement des racines et tiges feuillées.
[4] Stolon : tige à entre-nœuds rampant sur le sol.
[5] Bulbe : organe souterrain, lieu d'accumulation de réserves pour le végétal.
[6] Multiplication végétative : mode de reproduction d'un végétal à partir de certains tissus ou organe, sans intervention de la sexualité.
[7] Bulbilles : organes de propagation très efficaces chez certains végétaux dont ils assurent le bouturage naturel.
[8] Axillaire (bourgeon) : qui se localise à l'aisselle d'une feuille. Il pourra engendrer une ramification en se développant.

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

en charge et exporté (B. Van Vliet-Lanoë, 1988). Pour pallier les effets de cette activité pédogénique faible, certaines espèces, comme *Silene acaulis*, développent leur propre biotope sous la forme d'un coussinet riche en matière organique.

Au Svalbard, l'ensemble des facteurs limitants et des stratégies adaptatives qu'ils induisent, font que la végétation garde la physionomie modeste d'une toundra souvent rase, discontinue et exclusivement monostrate (Th. Brossard, 1977). Si la toundra continue reste l'exception, le véritable désert n'est jamais rencontré (photo 13).

Photo 13 – Toundra discontinue dans le Kongsfjord*. Sur cet ancien niveau glacio-marin alternent des* Dryas octopetala *(en jaune), des* Silene acaulis *(en rose) et des* Saxifraga oppositifolia *(en marron car les fleurs sont fanées). Prise de vue sur l'île de Blomstrand, 20 juillet 2002.*

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

1.3. Richesse floristique du Spitsberg

Les côtes ouest du Spitsberg, baignées par la mer du Groenland, sont réchauffées par une branche de la dérive nord atlantique (fig. 17). En conséquence, le Spitsberg connaît un climat relativement doux pour sa latitude, au moins à l'ouest. Ainsi, alors qu'à Resolute (74°43'N), au Canada, la température moyenne annuelle[1] est de – 16,2°C et à Mys Chelyuskin (77°43'N), en Russie, de – 14,1°C, elle est de – 3,5°C à Isfjord Radio (78°04'N) au Spitsberg (B. Stonehouse, 1989).

La dérive nord-atlantique entraîne la fonte des glaces de mer, en toutes saisons, et permet également aux masses d'air de se charger en humidité (D. Mercier, 1998). Ainsi la façade ouest du Spitsberg est relativement arrosée par rapport aux régions de même latitude. Au Canada, les stations d'Alert (82°30'N) et de Resolute (74°43'N) totalisent respectivement 154 mm et 131 mm de précipitation (D. Mercier, 1998) contre 385 mm à Ny-Ålesund (78°5°N).

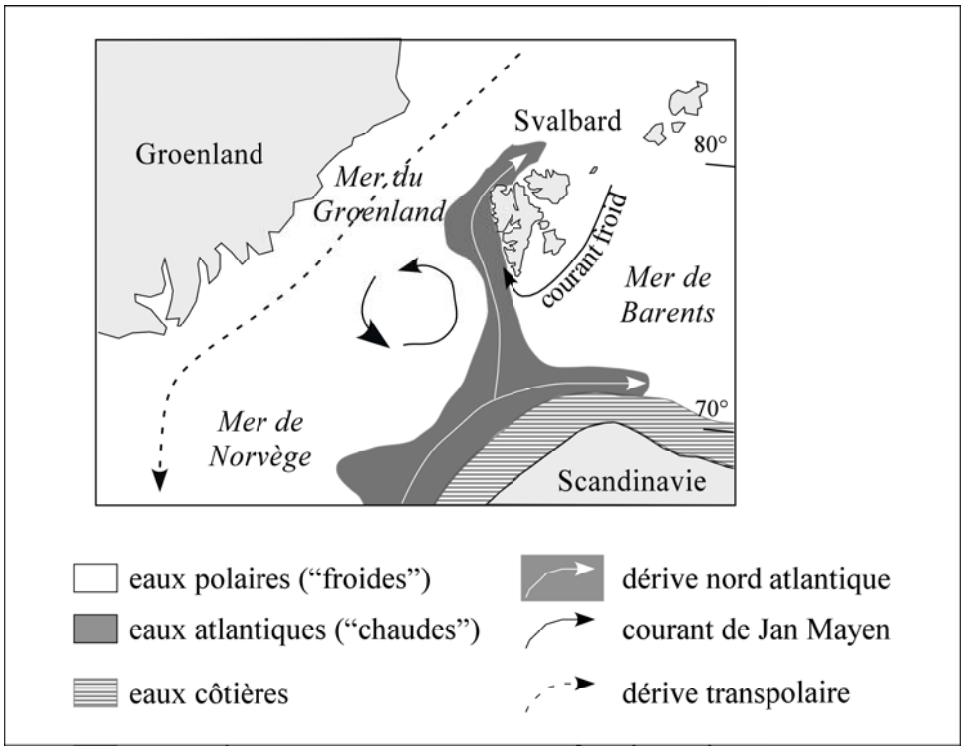


Fig. 17 – Circulation des courants marins et distribution thermique des eaux de mer *(d'après M. Hald* et al.*, 2001).*

[1] Les températures citées correspondent à des stations situées au niveau de la mer.

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

Le climat polaire maritime du Spitsberg favorise une certaine richesse floristique qui se marque par un nombre d'espèces vasculaires plus important qu'ailleurs. Le Svalbard totalise 164 espèces vasculaires pour des latitudes comprises entre 76° et 81°N, alors que la flore de l'île d'Axel Heiberg à 73°N, dans l'archipel nord canadien, compte 130 espèces, 127 espèces au lac d'Hazen, sur l'île d'Ellesmere, à 81°N et de 120 à 150 espèces dans la partie nord du Groenland comprise entre 78°N et 82°N (D.F. Murray, 1997).

La situation favorable du Svalbard est aussi confirmée par l'analyse de la distribution biogéographique des espèces. Ainsi, parmi 20 espèces thermophiles[1] recensées au Svalbard, 13 atteignent leur limite nord d'extension latitudinale. Par exemple *Ranunculus pallasi* est relevé au Spitsberg, à Bohemanflya à 78°25'N alors que cette espèce n'atteint que 73°N en Nouvelle-Zemble. De même, *Rhodiola rosea* atteint sa limite nord sur l'île Prins Karl à 78°45'N alors qu'elle ne dépasse pas 75°05'N dans le nord-est du Groenland (T. Engelskjøn *et al.*, 2003).

1.4. Variations régionales

Les traits climatiques généraux du Svalbard peuvent être affinés de manière à établir des différenciations régionales au sein de cet archipel arctique.

1.4.1. Contrastes climatiques

La côte est du Spitsberg ne bénéficie pas de la dérive nord atlantique. Au contraire, elle est sous l'influence d'un courant froid issu de la dérive transpolaire qui traverse la mer de Barents (fig. 17). En été, alors que la température moyenne de l'eau de surface est de 0°C en façade ouest, au large de l'Isfjord, elle descend à – 2°C au nord et à l'est. Un air froid et sec accompagne ce courant qui affecte toute la pointe sud (fig. 17). Il en résulte un conflit de masses d'air qui, au sud-ouest, détermine un climat brumeux très arrosé en été, et plus rude que celui des régions plus septentrionales bénéficiant directement de l'action tempérée de la dérive nord atlantique.

[1] Thermophile : se dit d'une espèce ou d'un groupement dont la présence est liée à des températures atmosphériques ou édaphiques élevées, du moins durant la période de végétation.

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

Un autre facteur de différenciation régionale est lié à un effet de continentalité que révèlent les totaux pluviométriques (fig. 18). Ainsi à Ny-Ålesund, les précipitations annuelles atteignent 386 mm pour la période 1969-2001 (Official Statistics of Norway, 2003) alors que Longyearbyen situé à l'intérieur des terres, ne reçoit en moyenne que 190 mm par an pour la période 1961-1990 (E.J. Førland et I. Hanssen-Bauer, 2003). Bien que les deux stations ne soient éloignées que d'une centaine de kilomètres, elles enregistrent un écart de précipitation qui va de un à deux. La carte des précipitations montre que les plus faibles totaux sont concentrés autour des deux fjords centraux (fig. 18). La continentalité se traduit également dans les valeurs mensuelles moyennes d'humidité relative qui sont de 89 % sur la côte ouest et de 76 % à Longyearbyen (M.-F. André, 1993). L'effet de continentalité résulte d'un assèchement des masses d'air issues de la haute mer lors de leur passage dans les parties montagneuses (effet de foehn). Enfin, l'effet de continentalité est manifeste au niveau thermique. Les températures sont plus chaudes en été dans le centre de l'île avec une moyenne de juillet de 5,8°C à Longyearbyen, contre 4,7°C pour Ny-Ålesund, et plus froides en hiver avec - 16,3°C contre -15,2°C en février (période 1961-1990, Official Statistics of Norway).

La carte des lignes d'équilibre glaciaire sur le Svalbard met également en évidence l'effet de la continentalité (fig. 19). La limite s'élève à 300 mètres sur la côte occidentale, et atteint plus de 700 mètres dans le secteur central, le plus sec de l'île. Vers l'est, cette limite s'abaisse à moins de 200 mètres, puisqu'on y retrouve l'effet d'une mer plus froide qu'à l'ouest. Les variations spatiales de la ligne d'équilibre des glaciers constituent donc un autre indicateur de la partition climatique de l'île.

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

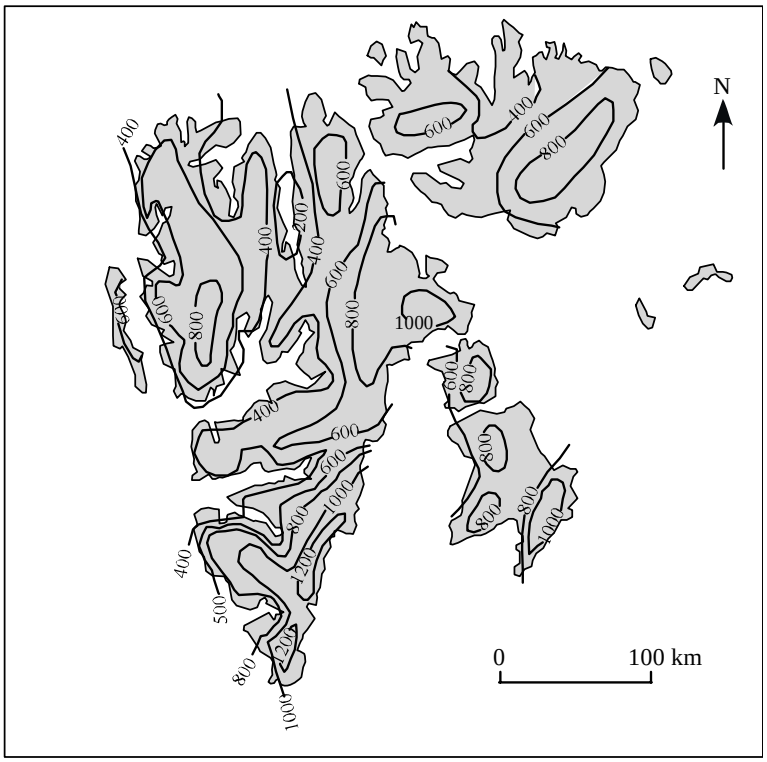


Fig. 18 – Répartition des précipitations au Svalbard en mm par an *(d'après J.O. Hagen* et al.*, 1993)*

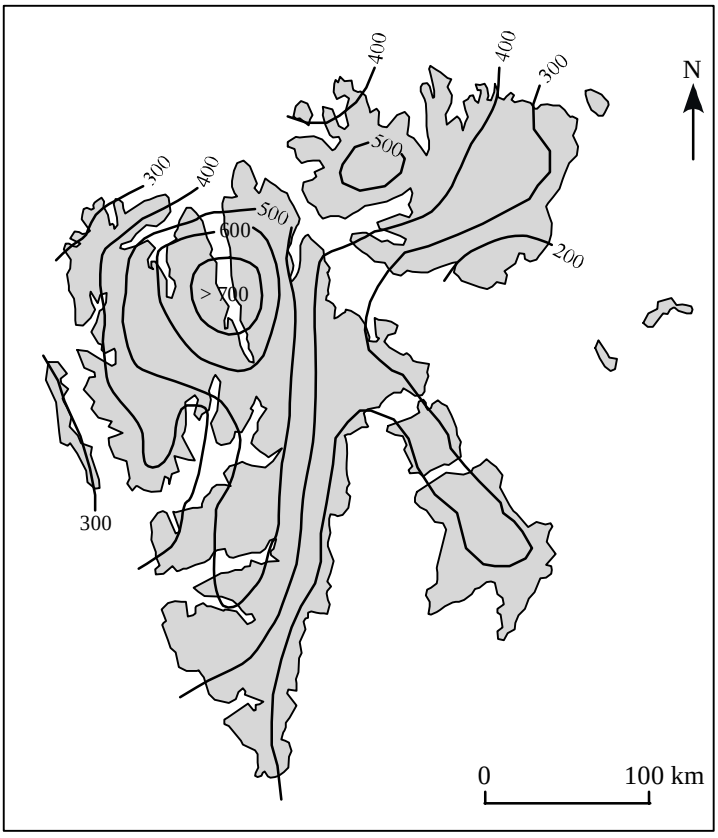


Fig. 19 – Répartition des lignes d'équilibre glaciaire au Svalbard en mètres *(d'après J.O. Hagen* et al.*, 2003).* *La ligne d'équilibre rejoint les points du glacier où le bilan glaciaire est nul, c'est-à-dire où l'accumulation est égale à l'ablation annuelle.*

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

1.4.2. Zonage bioclimatique au Spitsberg

La végétation en s'ajustant aux données du climat, se structure en plusieurs régions ou « zones » biogéographiques cartographiées par A. Elvebakk (1997, fig. 20).

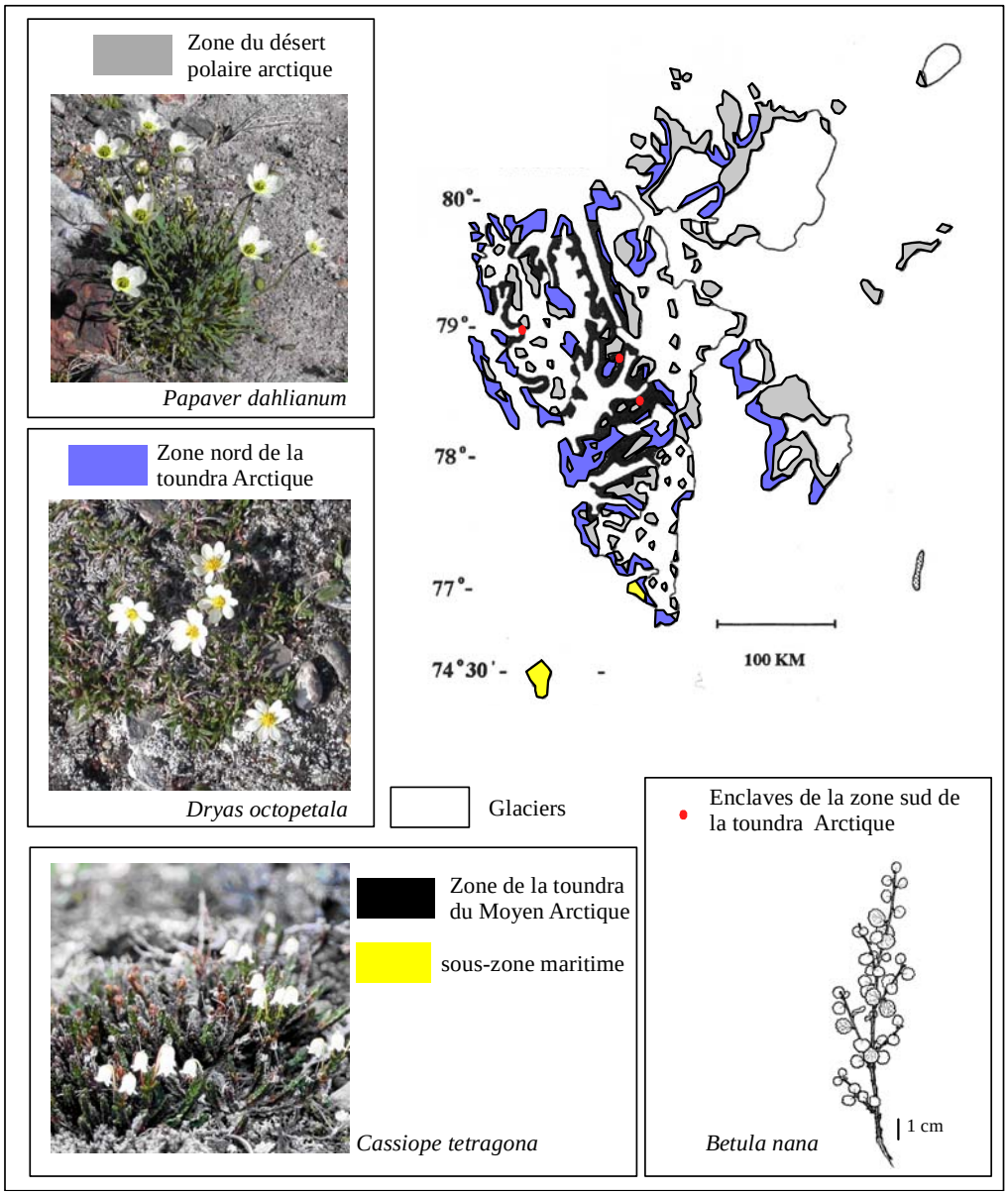


Fig. 20 – Carte des zones bioclimatiques du Svalbard *(d'après A. Elvebakk, 1997). En légende sont présentées les espèces caractéristiques de la formation végétale de chacune des zones. Prises de vue dans la région du Kongsfjord, juillet 2002 (dessin N. Polunin, 1959).*

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

- La zone du désert polaire arctique

La température moyenne de juillet, inférieure ou égale à 3°C, détermine une végétation peu couvrante et fragmentée, avec un taux qui reste en dessous de 5 % pour les plantes vasculaires. Les lichens et les bryophytes[1] peuvent exceptionnellement couvrir 20 % du sol. En terme phytosociologique, l'association caractérisée par *Papaver dahlianum* est la plus fréquente (fig. 20). Le désert polaire se concentre dans les secteurs nord et est du Svalbard, et au Spitsberg dans les secteurs d'altitude et les nunataks émergeant des glaciers.

- La zone nord de la toundra arctique

La température moyenne de juillet y est comprise entre 3 et 5°C. Les espèces caractéristiques sont *Salix polaris, Dryas octopetala* et *Saxifraga oppositifolia* associées aux cryptogames[2]. Sur les sites stables, la couverture végétale est comprise entre 50 et 100 %. Une couverture lichénique dominée par *Cetraria delisei,* est souvent présente mais avec un développement fragmenté dans les zones où les rennes sont présents comme nous l'avons déjà indiqué pour la presqu'île de Brøgger. A. Elvebakk (1997) distingue les communautés végétales en fonction des influences géologiques. Ainsi les substrats acides, comme on peut en trouver sur les façades ouest de l'île, sont caractérisés par *Luzula arctica,* alors que dans le centre, les faciès rocheux calcaires dominent, et *Poa alpina* caractérise les communautés végétales. La zone nord de la toundra arctique est surtout présente sur les façades ouest du Spitsberg (fig. 20).

- La zone de toundra du Moyen Arctique

La température moyenne de juillet y est comprise entre 5 et 7°C, il s'agit des zones internes où la végétation tend à se diversifier sous l'effet de continentalité que nous avons décrit. Même si elles sont compensées par une humidité moindre, les

[1] Bryophyte : plante chlorophyllienne sans fleurs et à tige feuillée. Ce sont des plantes non vasculaires rassemblant en majeure partie les mousses.

[2] Cryptogame : nomenclature désignant l'ensemble des végétaux sans fleurs dont la dissémination est assurée par les spores (champignons, fougères).

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

températures plus chaudes favorisent une fonte des neiges plus rapide. La communauté caractéristique est dominée par *Cassiope tetragona* et le tapis végétal est continu. Ce type de végétation domine au centre du Spitsberg (fig. 20). Une sous-zone maritime est distinguée pour les secteurs plus fortement arrosés du sud du Spitsberg et de l'île aux Ours (Bjørn).

A. Elvebakk (1997) évoque l'existence d'une autre zone très fragmentée, la zone sud de la toundra arctique, où les températures moyennes de juillet sont comprises entre 7° et 9°C. Cette zone n'est présente qu'en trois endroits du Spitsberg et concentre des espèces vasculaires thermophiles comme *Kobresia simpliciuscula* à Pyramiden et *Betula nana* dans le voisinage de Longyearbyen et à Ossian Sars dans le Kongfjord. Ces trois sites constituent des enclaves très particulières à l'échelle du Spitsberg (fig. 20).

La flore vasculaire du Svalbard inclut 168 espèces dont 165 natives du Spitsberg (T. Engelskjøn et al.*, 2003). Sont également recensés 373 bryophytes, 606 lichens, 705 algues et plus de 1 100 cyanobactéries (A. Elvebakk, 1997). Mieux pourvu en espèces que les terres voisines, le Svalbard apparaît comme un carrefour floristique au sein de l'Arctique notamment parce que les contrastes climatiques régionaux permettent à des espèces d'affinités climatiques différentes de se côtoyer.*

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

2. Contexte morphoclimatique récent : les marges proglaciaires

Le Petit Âge Glaciaire est une période de refroidissement qui a provoqué une avancée des glaciers dans toutes les montagnes du monde et dans l'Arctique avec toutefois des écarts temporels (J.M. Grove, 2001). Au Spitsberg, cette période s'étend du XII^{e} au XIX^{e} siècle (B. Lefauconnier, 1987) où elle est qualifiée de stade de Treskelen (A. Héquette, 1986). Au sein de la période, deux épisodes plus froids se sont produits entre 1 180 et 1 500 et entre 1 700 et 1 900, avec un intermède plus chaud au XVII^{e} siècle (expansion baleinière ; J.M. Grove, 2001). Cette récurrence froide s'est accompagnée d'une avancée des glaciers arctiques, la plus forte depuis la fin de la dernière grande glaciation du Weichselien.

2.1. Retrait glaciaire contemporain

La fin du Petit Âge Glaciaire s'amorce vers 1880 au Spitsberg avec l'augmentation de la température moyenne annuelle. B. Lefauconnier (1990) date l'extension maximale des glaciers dans le Kongsfjord vers 1917-1920, lorsque se produit une brutale remontée des températures de 3,5°C pour les températures moyennes annuelles (B. Lefauconnier, 1990 ; fig. 21). Il convient toutefois de rester prudent sur l'existence d'une corrélation directe et immédiate entre réchauffement et recul glaciaire car les interactions dynamiques entre changements climatiques et fluctuations glaciaires sont complexes.

2.1.1. Le retrait glaciaire

Le réchauffement intervenu entre 1918 et 1938 est d'environ 4°C (fig. 21) et s'accompagne d'une baisse des précipitations neigeuses (G. Petit-Renaud, 1976). Cette modification des données climatiques s'accompagne d'un recul rapide et important de la majorité des glaciers. À partir de 1940, s'amorce une baisse des températures moyennes annuelles de l'ordre de 2°C par rapport aux années 1930 (fig. 21). Le recul généralisé des glaciers au Spitsberg a cessé et leur position est le plus souvent stationnaire. Le refroidissement s'accentue nettement de 1955 à 1970 (fig. 21) et s'accompagne d'un raccourcissement de l'été (J. Corbel, 1966 b) lié à une arrivée précoce et à une fin tardive de l'hiver (G. Petit-Renaud, 1976). Le refroidissement annuel résulte essentiellement d'un abaissement des températures hivernales jusqu'en 1971, mais n'enraye pas le recul glaciaire amorcé depuis 1912-1920.

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

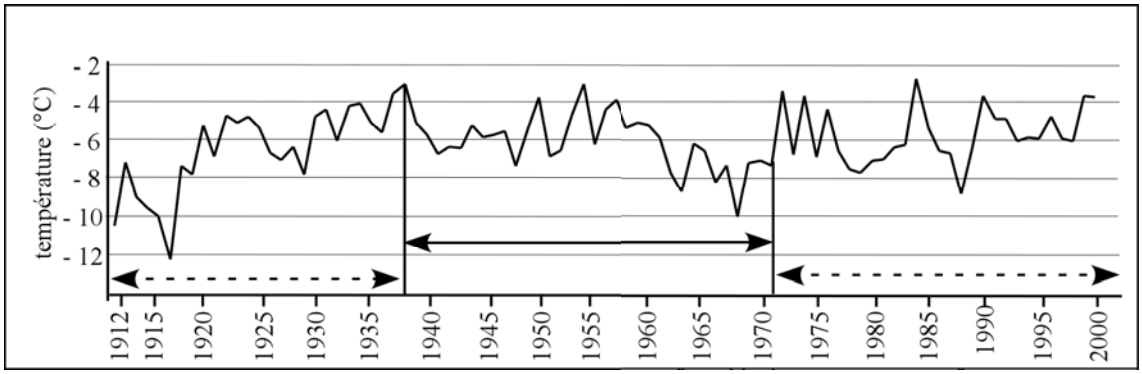


Fig. 21 – Températures moyennes annuelles à Ny-Ålesund de 1912 à 2000 *(E.J. Førland* et al.*, 1997 ; Official Statistics of Norway, 2003).* *Les flèches en pointillés indiquent les phases chaudes et en trait continu la période de refroidissement.*

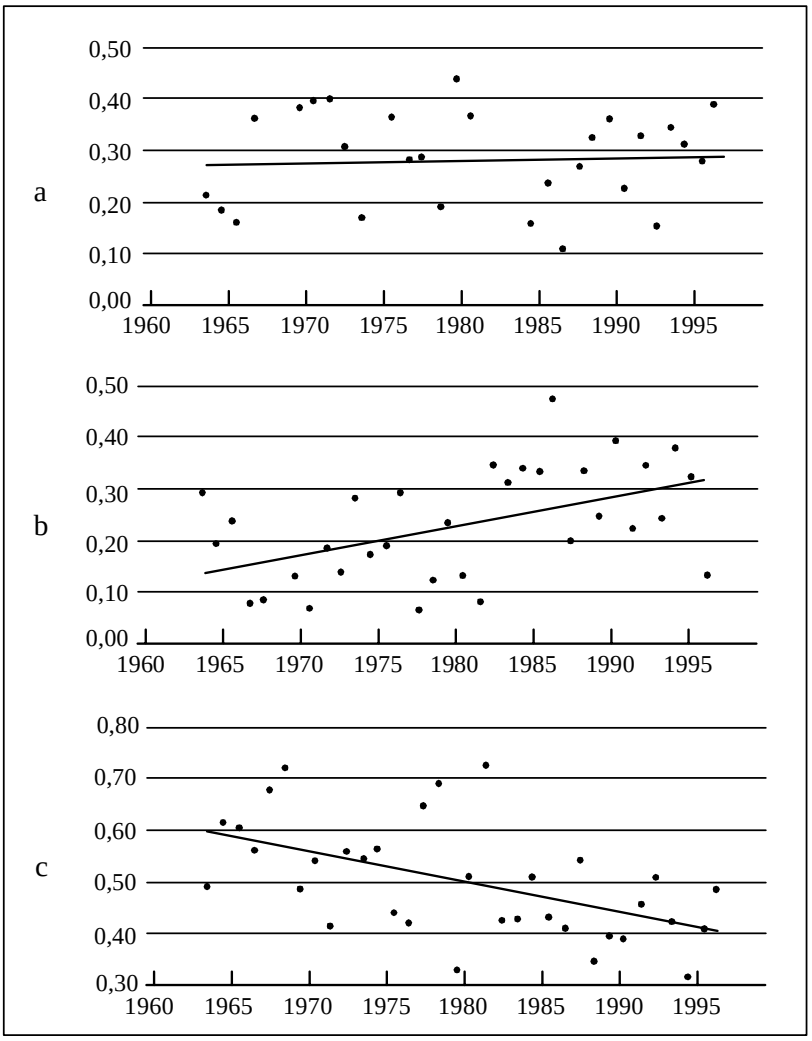


Fig. 22 – Fractions annuelles des précipitations liquides (a), mixtes (b) et solides (c) à Longyearbyen de 1964 à 1997 *(d'après E.J. Førland et I. Hanssen-Bauer, 2000).* *La droite indique la tendance.*

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

Vers 1972-1973, un nouveau changement s'amorce avec une forte remontée des températures annuelles (fig. 21). Le renversement de tendance est marqué par une saison d'ablation plus longue et un déficit de neige en septembre et octobre (B. Lefauconnier et J.O. Hagen, 1990). Le changement climatique se marque aussi dans la nature des précipitations qui se répartit comme suit à Longyearbyen durant la période 1975-1996 : 25 % sous forme de pluie, 44 % sous forme de neige et 31 % sous la forme d'une combinaison de pluie et de neige (fig. 22). La diminution des précipitations neigeuses au profit des précipitations mixtes est corrélée à l'augmentation annuelle des températures observée depuis le milieu des années 1960 (E.J. Førland et I. Hanssen-Bauer, 2000).

Le réchauffement climatique que connaît le Spitsberg depuis 1880 n'est pas uniforme. Cependant, la tendance au recul des glaciers est indiscutable et la contribution de la fonte issue des glaciers du Svalbard à l'élévation du niveau marin est de l'ordre de 0,01 mm/an (J.O. Hagen *et al.,* 2003). Les pertes glaciaires varient sur l'ensemble de l'archipel du Svalbard. Dans la partie sud, la surface englacée a diminué de 11,7 % de 1900 à 1976, dans le centre de 6 % de 1912 à 1966, dans la partie nord-ouest de 6,8 % de 1907 à 1976, et enfin pour la partie nord-est de 4,2 % de 1900 à 1976 (R. Brázdil, 1988).

2.1.2. Glaciers actuels

L'englacement actuel du Svalbard concerne 60 % des terres, soit 36 500 km² (Official Statistics of Norway, 2003). Le Spitsberg représente 60 % de la surface englacée de l'archipel, avec 22 000 km² de glaciers, dont la répartition spatiale contrastée est illustrée par la figure 23. On distingue une zone centrale déglacée, callée sur les grands fjords, qui est associée à l'effet de continentalité. Autour de cette zone centrale se détache au nord-est un secteur englacé caractérisé par des glaciers de calotte et de semi-couverture. Au sud de l'île, on retrouve également une zone englacée sous l'influence de courants marins froids qui ont tenu les glaciers à l'abri du réchauffement contemporain (fig. 23). Enfin au nord-ouest, un dernier ensemble glaciaire est distingué mais limité aux vallées qui canalisent l'écoulement glaciaire des émissaires de petites calottes et glaciers de plateaux de type *ice cap* et *fonna* (fig. 23).

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

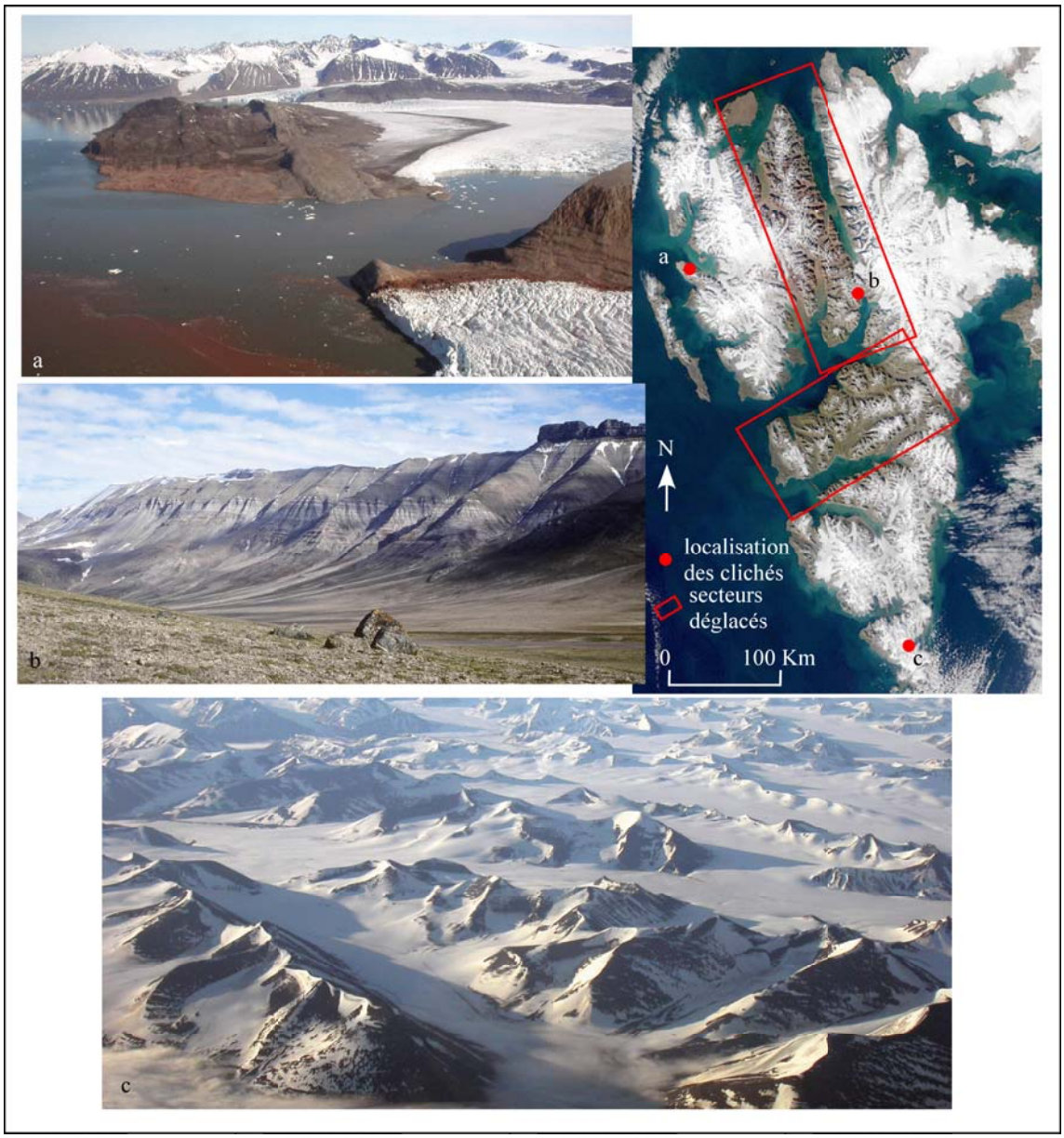


Fig. 23 – Englacement régional contrasté au Spitsberg. *(a) l'ouest se marque par un englacement limité aux vallées qui canalisent les émissaires de petites calottes et glaciers de plateaux (prise de vue d'avion du Kongsfjord en direction du nord, 7 juillet 2003) ; (b) le centre et les fjords intérieurs sont les secteurs les plus déglacés, caractérisés par de grandes vallées végétalisées (prise de vue depuis la vallée de l'Ebba vers l'est, 3 août 2003) ; (c) les secteurs nord, est et la pointe sud de l'île bénéficient d'un fort englacement (prise de vue lors d'un survol en avion du sud du Spitsberg vers l'est, 4 juillet 2004). Image Modis du satellite Terra, 27 août 2003 (n° 26173).*

Les glaciers sont de types variés. Les plus imposants sont les calottes et glaciers de plateau d'où émergent les crêtes rocheuses des nunataks (fig. 23 c). De nombreux de glaciers prennent la forme de langues glaciaires à front marin sujet au vêlage (fig. 23 a). Enfin, il existe de nombreux petits glaciers de cirque et courtes langues à front terrestre, notamment dans la région alpine de l'ouest du Spitsberg.

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

La majorité des glaciers du Spitsberg est de type subpolaire ou polythermique. Ce type de glacier se caractérise par une zone d'ablation où la glace est à une température tempérée alors que la base du glacier, au niveau du lit rocheux, est caractérisée par une glace froide (M.J. Hambrey et D. Huddart, 1995). Une des conséquences de la différence thermique est de conférer des vitesses de glissement distinctes, à chacun des courants de glace, ce qui joue un rôle dans la genèse de certaines formes morainiques dont nous observerons le détail plus loin. Une autre dynamique glaciaire qui caractérise les glaciers du Svalbard est le *surge*. Le *surge* est le mot anglais repris en français pour désigner une avancée brutale et rapide du front glaciaire, suivie d'une période durant laquelle les vitesses de déplacement sont faibles. Les estimations du pourcentage de glaciers affectés par des *surges* au Svalbard varient selon les auteurs, de 13 % à 35 % pour J.A. Dowdeswell *et al*. (1991), jusqu'à 90 % pour J.O. Hagen *et al.* (1993).

2.2. Les marges proglaciaires, un potentiel spatial pour la colonisation végétale

Le retrait des glaciers, depuis la fin du Petit Âge Glaciaire, a libéré d'importantes surfaces, les marges proglaciaires, caractérisées par une physionomie particulière qui contraste avec les secteurs relativement plans des anciens niveaux glacio-marins et des fonds de vallée anciennement colonisés par la végétation (photo 14). Les moraines sont très variées dans leur origine, leur mode de transport et de dépôt, et dans les remaniements qu'elles ont pu subir après le retrait du front glaciaire. Il existe un grand nombre de typologies pour classer les moraines. Pour notre part, nous cherchons à différencier les milieux morainiques en fonction des conditions qu'ils offrent à la reconquête végétale : c'est avant tout leur morphologie et leur stabilité ou instabilité qui importent pour la reconquête végétale.

2.2.1. Source, incorporation et transport des débris morainiques

Les débris que le glacier transporte sont d'origines multiples. Ils proviennent de chutes de pierres, éboulis, glissements de terrain, avalanches, *debris flows* surplombant le glacier (photo 15). Le matériel déposé peut rester à la surface de la glace et être ainsi transporté. La taille des débris subit alors peu de modifications, liées principalement aux processus de météorisation périglaciaire et chimique (N.F. Glasser et M.J. Hambrey, 2003).

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

Les débris peuvent être incorporés dans la masse selon deux modes :

- à partir de la surface en étant progressivement intégrés dans la zone d'accumulation.
- à partir du chevauchement : il s'agit alors d'un processus dynamique qui se produit dans les glaciers polythermiques à la limite entre la glace « froide » et la glace « tempérée » et permet l'entraînement des débris à l'intérieur du glacier (fig. 28).

Photo 14 – Contraste paysager entre secteurs morainiques et niveaux glacio-marins. *Les différences se marquent à travers une végétation quasi continue qui colonise les anciens niveaux glacio-marins (arrière-plan) et la marge proglaciaire, sans couvert végétal, dominée par la minéralité de la moraine (premier plan). Prise de vue depuis la marge du glacier Edith vers l'ouest, 9 juillet 2002.*

Photo 15 – Apport de débris à la surface du glacier Edith. *Le glissement de matériaux rocheux sur le versant supraglaciaire (en clair) alimente la moraine latérale. Prise de vue depuis la moraine latérale ouest du glacier Edith vers le nord-est, 17 juillet 2004.*

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

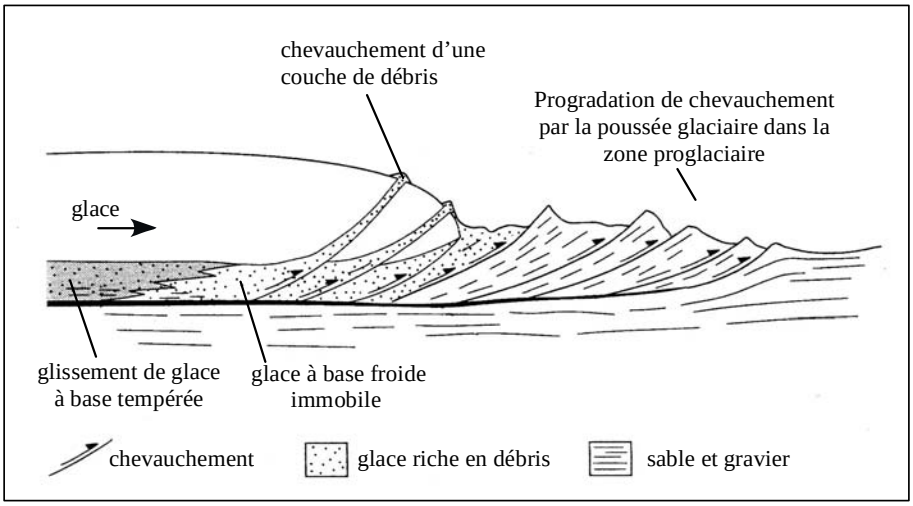


Fig. 24 – Modèle d'incorporation de débris et de formation de moraines par chevauchement intraglaciaire à la marge d'un glacier polythermique *(d'après M.J. Hambrey, 1994). La formation de moraines de chevauchement se fait au cours de l'avancée du glacier.*

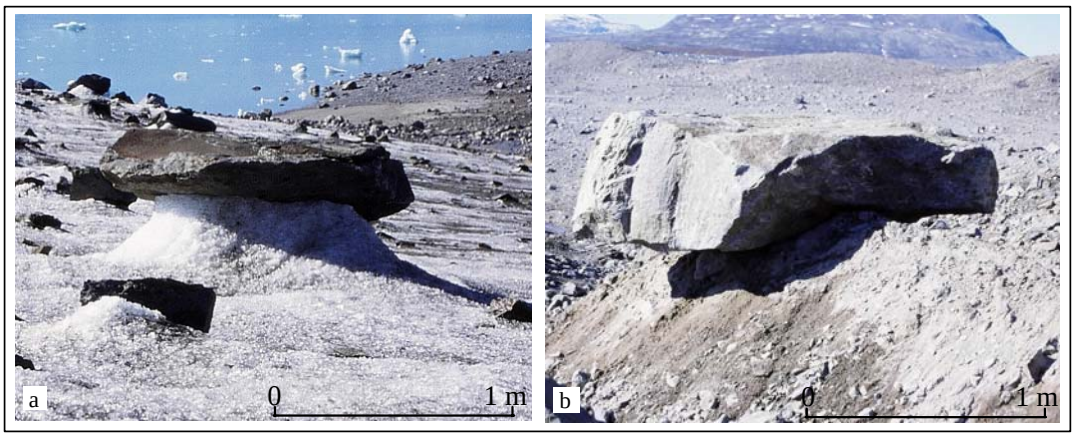
Les débris incorporés peuvent ainsi provenir de formations superficielles sur lesquelles le glacier avance, comme d'anciens niveaux de plage ou de moraines préexistantes. Un exemple est donné par le glacier Austre Lovén où des fragments de grès rouges dévoniens figurent parmi les dépôts morainiques. Ils appartiennent à une ancienne moraine du glacier à front marin Kongsveg qui, à l'époque de la dernière grande glaciation, au Weichselien, occupait l'ensemble du Kongsfjord. Les dépôts abandonnés par ce glacier ont été repris par le glacier Austre Lovén au cours de son avancée maximale à la fin du Petit Âge Glaciaire (M.-F. André, 1993).

Les débris qui sont transportés à l'intérieur de la glace subissent diverses transformations (abrasion, concassage) qui réduisent la taille des grains favorisant l'hétérogénéité granulométrique des débris depuis les argiles jusqu'aux blocs les plus larges.

Au fur et à mesure que le glacier s'amincit dans sa zone frontale, la couche supraglaciaire de débris devient plus épaisse car elle s'enrichit des débris libérés par la fonte. Cette couverture influence profondément les taux d'ablation de la glace. Dans un premier temps, la mince couche de débris joue le rôle de conducteur thermique favorisant la fonte de la glace. Dans un deuxième temps, lorsque l'épaisseur de la couche augmente, la conductivité du matériel diminue, ce qui protège le noyau de glace de la fonte. A. Szponar (1975) a observé des moraines à noyau de glace dans le sud du

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

Spitsberg, à Hornsund, et note qu'une épaisseur de débris de 1,10 mètre suffit pour limiter l'ablation de la glace. L'impact de la couverture morainique sur l'ablation est visible à la surface des glaciers où les fines, les sables et les granules sont souvent piégés dans un trou (cryoconites), alors que les galets et les blocs, en protégeant la glace, tendent à se percher sur les colonnes résiduelles de glace (fig. photo 16 a, b). Au front du glacier se constituent en surface des collines de débris, souvent de forme allongée, qualifiées de *dirty cones*. Lorsque la glace fond, il peut se former des accumulations aux structures originales et propres aux dépôts glaciaires : de petites roches peuvent en soutenir de plus grosses (photo 17).



Photos 16 a, b – Transport et dépôt de débris de tailles variées par le glacier Conway. *(a) le glacier transporte à sa surface un bloc qui protège la glace et forme un champignon de glace ou table ; (b) lorsque la glace du glacier a complètement fondu, le bloc se trouve perché sur des sédiments plus fins. Prise de vue depuis le glacier Conway, rive nord du Kongsfjord, juillet 2002.*

Photo 17 – Dépôt de débris superposés par le glacier Conway. *Une superposition de gros blocs sur des petits cailloux est une forme originale consécutive à la fonte du glacier. Prise de vue depuis la marge du glacier Conway, rive nord du Konsfjord, juillet 2002.*

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

2.2.2. Les limites des marges proglaciaires

La limite externe de la marge proglaciaire est celle qui marque l'extension maximale du glacier ; elle s'est mise en place sur une période relativement longue pendant laquelle le glacier a stagné avant l'amorce de son retrait. Le modelé qui en résulte prend la forme imposante de moraine terminale ou vallum morainique. Le vallum morainique, en épousant la forme de la langue du glacier, constitue une large ceinture arquée (M.J. Hambrey, 1994). La combinaison du temps de stagnation et de la quantité de débris transportés au front du glacier détermine la taille du vallum (J.L. Sollid et L. Sørbel, 1988). Le vallum conserve sur sa face externe, des versants vifs dont le modelé subsiste grâce à des noyaux de glace préservés sous la couche de sédiments. Le vallum est le plus souvent entaillé par le ruissellement ou partiellement détruit (photo 18).

Les moraines latérales sont des accumulations de débris qui se forment à la surface et sur les bords du glacier et sont alimentés à partir des versants (M.J. Hambrey, 1994). L'épaisse couche ainsi formée conserve, comme dans le cas du vallum, des noyaux de glace (D.I. Benn et D.J.A. Evans, 1998). Leur position est une marque de l'extension latérale maximale du glacier et de l'épaisseur de glace durant l'avancée du Petit Âge Glaciaire.

2.2.3. Les moraines de retrait

Les moraines déposées en arrière du vallum sont nommées moraines de retrait dans la mesure où elles s'inscrivent dans un mouvement général de recul, même si des réavancées mineures ont pu intervenir, signalées par quelques formes secondaires de poussée.

- Les complexes de collines et de lacs proglaciaires

N.F. Glasser et M.J. Hambrey (2003) utilisent le terme de « complexe morainique en creux et bosses » pour décrire les importants systèmes morainiques présents au front des glaciers en recul du Svalbard (photo 19). Plusieurs origines sont attribuées à ces formes dont la terminologie utilisée varie en conséquence.

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

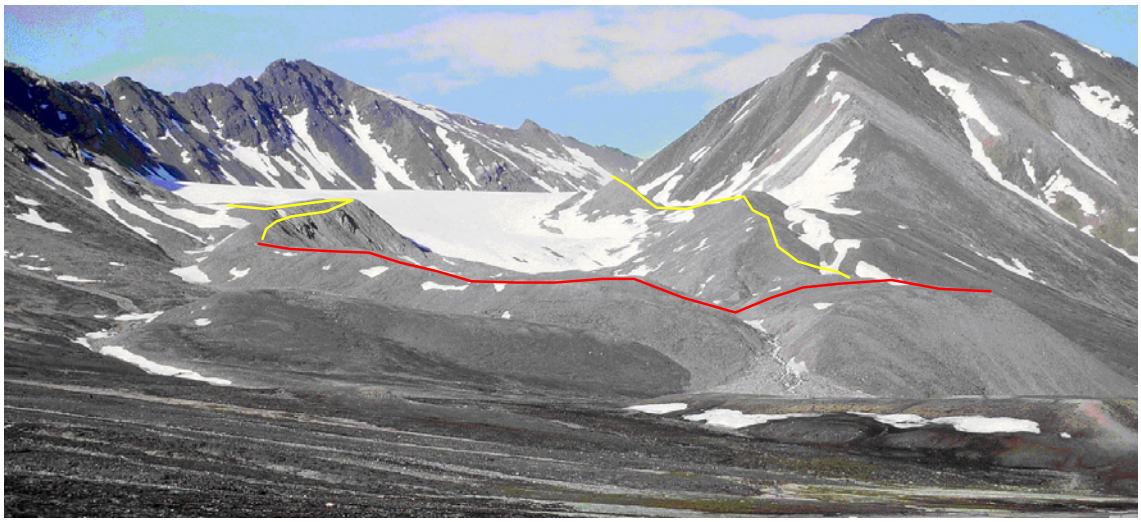


Photo 18 – Limites de la marge proglaciaire du glacier Steen. *La ligne rouge suit la crête du vallum et les lignes jaunes celle des moraines latérales, l'ensemble matérialisant les limites maximales d'extension du glacier au cours du Petit Âge Glaciaire. Le vallum est entaillé en son centre par les écoulements proglaciaires. Prise de vue depuis un niveau glacio-marin vers le nord-est, rive sud de la presqu'île de Brøgger, juillet 2002.*

Photo 19 – Complexe de collines morainiques de la marge du glacier Midre Lovén. *Prise de vue depuis la moraine latérale vers l'ouest, juillet 2002.*

Photo 20 - Concentration de la couche de débris au front du glacier Austre Lovén. *Les débris transportés à la surface du glacier et ceux transportés à l'intérieur se trouvent concentrés à mesure que le front glaciaire se réduit. La quantité de débris détermine l'épaisseur de la moraine. Prise de vue depuis la marge vers le sud-ouest, juillet 2001.*

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

Dans des ouvrages de synthèse, J. Menzies (2002) et D.I. Benn et D.J.A. Evans (1998) attribuent la forme en colline des modelés à la préservation de noyaux de glace sous la couche de matériel morainique qu'ils désignent par le terme anglais d'*hummocky moraine*. Comme nous l'avons observé précédemment, la couverture de débris accumulés à la surface du glacier retarde la fonte de la glace si bien que l'ablation à la marge du glacier est ralentie, voire bloquée (photo 20). Au fur et à mesure de la fonte du glacier et du maintien de la glace sous les débris, il se forme une dépression (fig. 25). Cette dernière est souvent utilisée par les écoulements de fonte.

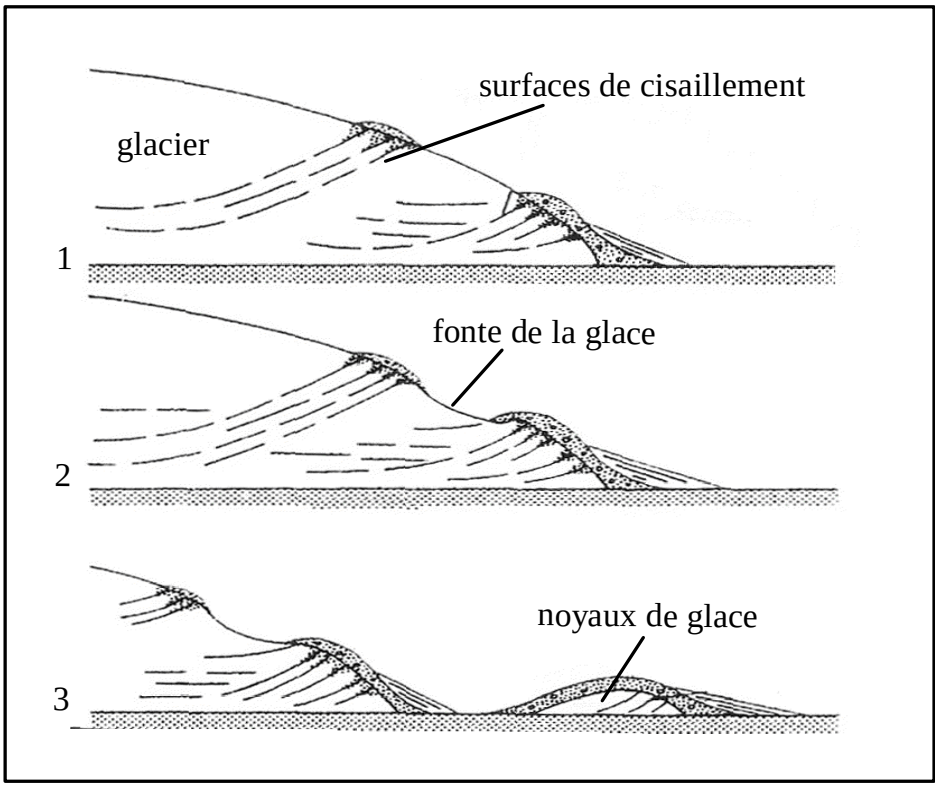


Fig. 25 - Schéma de la formation d'une* hummocky moraine *(d'après M.R. Bennett et N.F. Glasser, 1996)*. 1. Les débris morainiques de la base du glacier remontent à la surface le long de surfaces de cisaillement. 2. La couche de débris accumulés à la surface de la glace protège le glacier de l'ablation estivale alors que les secteurs de glace vive sont affectés par la fonte (photo 20). 3. Lorsque la glace vive a fondu, la glace protégée sous la couche de débris se trouve isolée du glacier. Il demeure alors une colline à noyau de glace.*

Il en résulte le maintien de collines morainiques à noyau de glace qui se trouvent isolées en avant du glacier à mesure du retrait. Avance rapide, stagnation et phases de long retrait favorisent le développement de ces moraines à noyaux de glace au Svalbard (B. Etzelmüller, 2000). L'existence de noyaux de glace confère un caractère éphémère aux moraines à l'échelle de l'Holocène. Dans un contexte de changement climatique, les noyaux de glace sont susceptibles d'être affectés par la thermo-érosion, rendent la stabilité des dépôts très précaire. Par ailleurs, l'eau ou les processus de mouvement de

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

masse tels que le fluage ou les éboulements peuvent découvrir le noyau de glace. Ces processus accélèrent la fonte du noyau de glace et même en milieu périglaciaire à pergélisol continu, les moraines à noyau de glace peuvent, dans le temps, s'amenuiser ou disparaître (B. Etzelmüller, 2000). La fonte différentielle des noyaux de glace produit des modelés qui sont décrits comme thermo-karstiques, les processus d'érosion relèvant de la thermo-érosion.

Le terme d'*hummocky moraine* tend à être utilisé pour un grand nombre de formes glaciaires. Cependant, D.I. Benn (1992) et M.R. Bennett *et al.* (1996) recommandent la prudence dans l'utilisation du terme d'*hummocky moraine* et sa définition doit être faite clairement dans le contexte dans lequel il est utilisé. En effet, le terme d'*hummocky moraine* implique l'existence d'un noyau de glace stagnant sous les dépôts. Or, des modelés en colline résultent aussi de genèses différentes. Les collines peuvent exister à la faveur du lit rocheux sur lequel une mince couche de débris recouvre le substrat (photo 21). D'autres auteurs, comme M.R. Bennett *et al.* (1996, 1997), D. Huddart et M.J. Hambrey (1994), M.J. Hambrey *et al.* (1999), attribuent les formes en collines à des chevauchements sous-glaciaires, liés à des poussées à l'intérieur de la glace par un courant de compression durant le Petit Âge Glaciaire. Ces modelés perdurent depuis leur mise en place, contrairement aux modelés liés à des noyaux de glace qui s'affaissent sous l'effet de la thermo-érosion.

Les moraines créent de véritables chaos topographiques où alternent collines et dépressions fermées circulaires à l'intérieur desquelles se logent des lacs. La taille des lacs varie de quelques mètres carrés à quelques dizaines de mètres carrés, pour une profondeur qui dépasse souvent le mètre. Les dépressions fonctionnent comme des pièges à neige en hiver tandis que la fonte nivale recharge chaque année les lacs (photo 22). Pour certains d'entre eux, la fonte de la glace morte assure une alimentation régulière (D. Mercier, 1998). D'autres lacs se développent directement au front du glacier, ce sont les lacs de contact glaciaire dont la photo 23 du front du glacier Ragnart fournit une belle illustration.

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

Photo 21 – Modelé morainique en collines lié à la forme du lit rocheux. *La fine couche de débris morainiques dévoile dans le secteur arrière du vallum l'affleurement calcaire qui le sous-tend. Prise de vue depuis la marge du glacier Austre Lovén vers le nord-ouest, juillet 2004.*

Photo 22 – Lacs proglaciaires dans la marge du glacier Midre Lovén. *Prise de vue à l'arrière du vallum vers l'est, juillet 2001.*

Photo 23 – Lac proglaciaire en contact avec le front du glacier Ragnart. *Le lac occupe les deux tiers de l'espace intramorainique. Prise de vue depuis Hultberget (700 m) vers le nord, baie de Pétunia, août 2003.*

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

Nous choisissons d'utiliser le terme de *complexe de collines morainiques* pour désigner les secteurs de la marge proglaciaire caractérisés par l'alternance de collines à l'intérieur desquelles se logent des lacs. Nous préciserons au cas par cas, pour chaque site morainique abordé au cours de notre étude, la présence ou non de glace sous les dépôts.

- Les modelés morainiques longitudinaux

Les moraines aux formes allongées se développent dans le sens de l'écoulement du glacier et correspondent le plus souvent à des moraines médianes ou latérales. La partie visible de la moraine médiane est l'expression de surface d'une cloison de débris constituée à l'intérieur du glacier et qui peut s'étendre jusqu'à la base du glacier (D.I. Benn et D.J.A. Evans, 1998). Les cloisons peuvent se former à la rencontre des courants glaciaires comme à l'intersection de glaciers de vallée où les moraines médianes sont l'expression directe de leur confluence. La plupart des moraines médianes sont rectilignes, mais elles se plissent sous l'effet de courants compressifs, comme l'illustre la photo 24, notamment lorsque la glace s'élargit latéralement comme pour un glacier de piémont ou lors d'épisodes de *surges*.

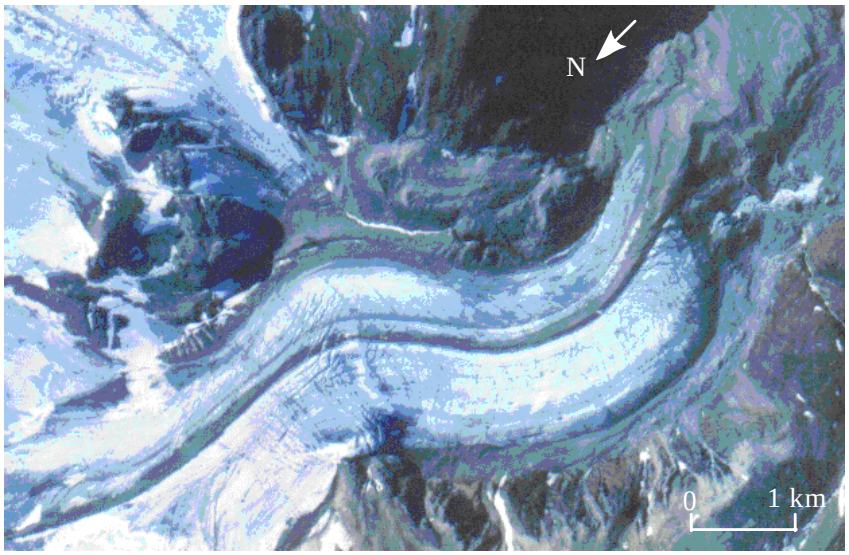


Photo 24 – Moraine médiane du glacier Ebba. *Photographie aérienne de 1990 du Norsk Polarinstitutt (n° S 90 1905).*

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

Les moraines de petite taille aux formes allongées sont les moraines flûtées (M.J. Hambrey, 1994). Elles sont souvent organisées en crêtes régulièrement espacées et étroites. Elles mesurent habituellement moins de 100 m de long et constituent des groupes de crêtes subparallèles (fig. 26). Une fois déposées, elles forment des crêtes de matériaux morainiques parallèles au sens d'écoulement du glacier, généralement de quelques dizaines de centimètres à quelques mètres de hauteur et largeur (D.I. Benn et D.J.A. Evans, 1998). Cependant, une fois déposées, les formes se maintiennent très peu de temps, étant souvent détruites par les écoulements.

- Les moraines de poussée glaciaire

Les moraines de poussée glaciaire annuelle se distinguent du vallum par leur caractère éphémère : elles sont le résultat de petites avancées hivernales qui se produisent même en phase de recul glaciaire ; elles poussent en avant une petite crête de débris morainiques et de matériaux fluvioglaciaires (M.J. Hambrey, 1994). L'espacement entre les moraines de poussée est fonction du retrait glaciaire estival.

2.2.4. Les dynamiques de remaniement intramorainique

Le recul du glacier s'accompagne de phénomènes de ruissellement qui relèvent de dynamiques paraglaciaires. Le terme a été introduit par J.M. Ryder (1971), puis défini par M. Church et J.M. Ryder (1972) comme englobant les processus non glaciaires qui sont directement conditionnés par la glaciation et la période au cours de laquelle les processus paraglaciaires sont actifs. La dynamique paraglaciaire de ruissellement est caractéristique des environnements récemment déglacés (C.K. Ballantyne et D.I. Benn, 1994).

De larges plaines intramorainiques sont aménagées par le ruissellement (fig. 26). La morphologie de la plaine d'épandage fluvioglaciaire dépend du volume de sédiments apportés par les écoulements, de la topographie de la zone de réception et de la distribution des sédiments dans la zone proglaciaire (J. Menzies, 2002). L'épandage fluvioglaciaire est caractérisé par des réseaux de chenaux anastomosés instables. E. Roussel (2005) a montré, à l'issue de l'étude de trois marges proglaciaires au Spitsberg (79°N), que le réseau fluvio-glaciaire se simplifiait dans le temps avec une

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

concentration des écoulements à l'intérieur des chenaux et une diminution du nombre de chenaux.

L'articulation des différents modelés présentés, qui caractérisent les sites proglaciaires du Spitsberg, peut être résumée par un schéma théorique qu'illustre la figure 26 présentant une marge proglaciaire-type. Les secteurs morainiques sont caractérisés par une grande richesse de modelés dont la diversité tient à leurs modalités de mise en place et aux remaniements qu'ils ont subis.

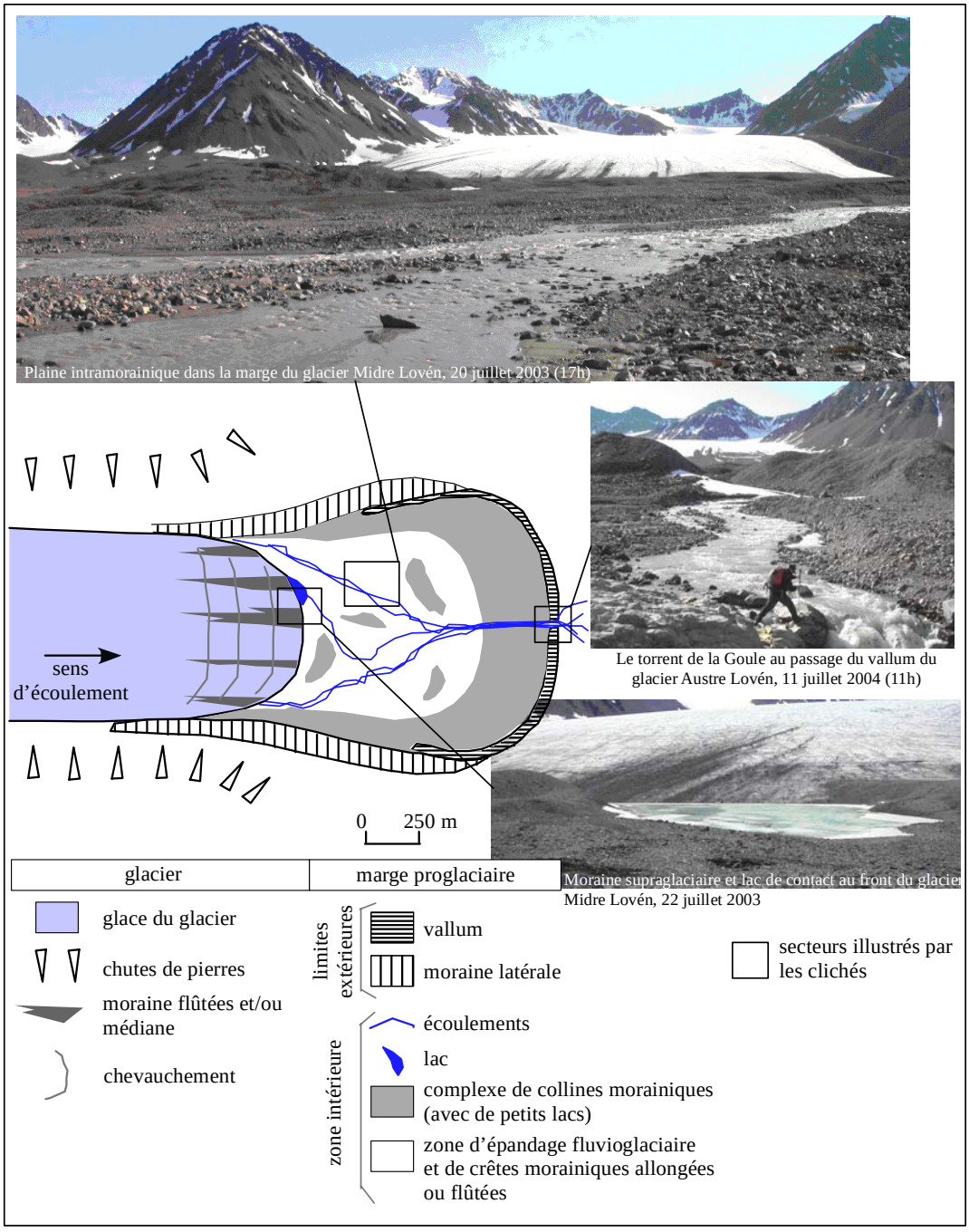


Fig. 26 – Modèle de système proglaciaire à la marge d'un glacier polythermique terrestre du Svalbard (d'après N.F. Glasser et M.J. Hambrey, 2003).

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

2.3. La colonisation végétale des marges proglaciaires

2.3.1. Processus de colonisation végétale

La colonisation végétale est définie par A. Da Lage et J.P. Métailié (2000) comme l'installation et le développement d'une population dans tout habitat favorable d'une aire qui en était, auparavant, dépourvue. Ce processus peut avoir lieu après la disparition d'une barrière qui bloquait la colonisation. L'implantation des végétaux passe par différents stades caractéristiques, en un lieu donné que J.A. Matthews (1992) décrit à travers six étapes majeures.

- **Migration** : ce terme définit la capacité de chaque espèce à se diffuser dans l'environnement. Ces colonisateurs pionniers sont dispersés par le vent ou les écoulements.

- **Implantation** : elle implique que la plante puisse s'établir puis accomplir son cycle de vie. En effet, un grand nombre de propagules[1] arrive sur les terrains nouvellement déglacés, mais toutes ne réussissent pas leur implantation si les conditions mésologiques du lieu ne répondent pas aux exigences de la plante.

- **Réaction** : il s'agit des modifications en retour de l'habitat après l'arrivée des plantes. Dès qu'une plante grandit, elle modifie son environnement. À ce titre, les espèces qui contribuent fortement à la transformation des milieux ont été désignées comme « édificatrices » (*builders*) par S.T. Pickett *et al.* (1987). Par ailleurs, la végétation fixe, stabilise et protège les surfaces sous-jacentes. Elle réduit le mouvement des particules lié au gel et dégel, contrecarre les déplacements mineurs de la solifluxion, et résiste à l'écoulement de surface retardant ainsi l'érosion. Les effets de la végétation sur le microclimat sont divers allant de la réduction de la vitesse superficielle du vent à la modification de la température, de l'humidité et de la photopériode[2].

- **Facilitation** : c'est le processus par lequel la réaction d'une espèce affecte de façon positive l'implantation et/ou la persistance d'une autre espèce au cours de

[1] Propagule : organe ou fragment qui, par multiplication végétative, peut donner naissance à un nouvel individu.
[2] Photopériode : durée journalière d'éclairement à laquelle sont soumis les organismes vivants.

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

la succession. La présence et l'abondance d'une espèce dans les stades avancés sont tributaires de la préparation mésologique due aux phases antérieures.

- **Compétition** : elle se réfère aux effets négatifs ou inhibiteurs de l'interaction entre espèces se partageant des ressources limitées. Elle est vue comme l'antithèse de la facilitation. La compétition peut concerner les nutriments, la lumière, l'humidité, ou toute autre ressource. Elle se produit dans tous les endroits où les plantes doivent cohabiter. La compétition se durcit au cours de la succession, ce qui ne veut pas dire qu'elle est absente dans les stades jeunes. Beaucoup d'espèces pionnières sont favorisées par la faible compétition qui règne en terrain ouvert, au début de la succession.

- **Stabilisation** : le terme s'applique à une communauté mature approchant son stade climacique[1] se perpétuant dans un état stable en équilibre avec les conditions environnementales offertes, globales ou locales.

2.3.2. Un objet de recherche dynamique

De manière à présenter succinctement l'état de l'art sur la question, nous prenons appui sur la figure 27 qui montre une carte des lieux où la colonisation végétale a fait l'objet de recherches dans le monde, tous ne sont pas décrits dans le commentaire qui suit.

- **Émergence d'un objet de recherche**

L'étude de la colonisation végétale des marges proglaciaires débute en 1923 avec W.S. Cooper (Baie des glaciers, Alaska), qui observe qu'après le retrait de la glace, la surface d'habitat stérile devient progressivement disponible pour la colonisation. Par la suite, W.H. Palmer et A.K. Miller (1961) mettent en évidence les stades de recul du glacier Rotmoos (Autriche) à partir d'une analyse botanique et définissent l'ordre d'apparition de quelques espèces caractéristiques. Depuis, les recherches tentent de mettre en relation l'âge des dépôts et la colonisation végétale. Les espèces sont, dès lors, utilisées comme marqueurs chronologiques de la durée de déglacement des surfaces. A. Stork (1963) a conduit une étude de ce type sur les espaces déglacés du glacier Kednekajse (Suède). Elle observe quatre étapes dans la colonisation végétale : du stade

[1] Climacique : relatif au climax soit type de végétation qui correspond à un état d'équilibre stable entre les différents éléments du complexe « climat-sol-flore-faune » résultant d'une évolution dynamique en un lieu et un temps donnés.

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

le plus jeune intervenant sur quelques années seulement après le retrait de la glace, caractérisé par des bryophytes et plantes à fleurs pionnières, jusqu'au stade le plus ancien, atteint sur les sites déglacés depuis 150 à 200 ans, marqué par une pelouse fermée comptant 40 espèces. M. Kuc (1964), qui a travaillé au Spitsberg, à Hornsund, distingue trois ceintures chronologiques à chacune desquelles elle associe un cortège floristique distinct.

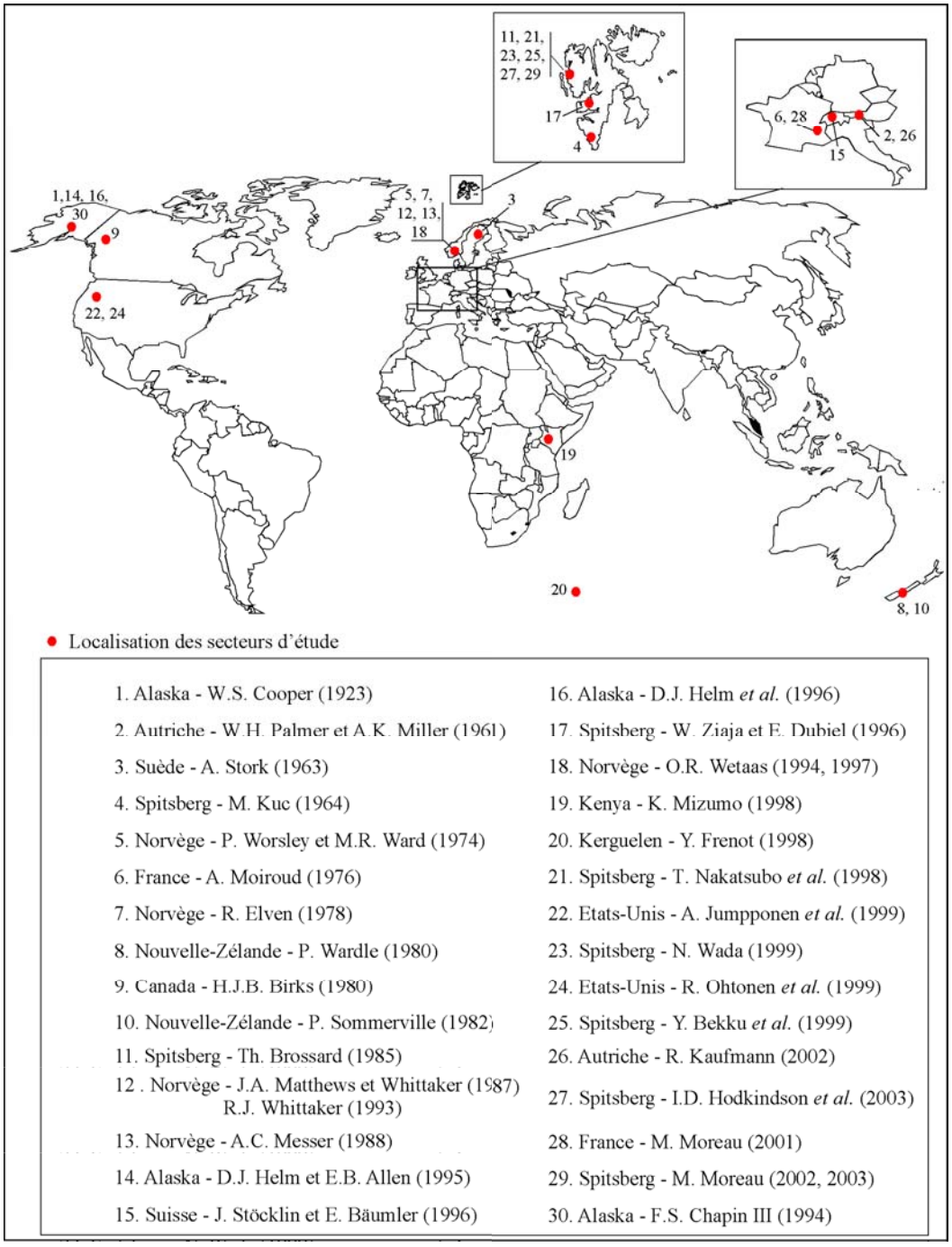


Fig. 27 – Localisation des sites d'étude de la colonisation végétale des marges proglaciaires dans le monde.

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

- **Impact des micro-environnements sur la colonisation végétale**

Plusieurs auteurs s'interrogent sur le rôle des facteurs mésologiques (climat, sol, humidité) dans la diversification des groupements floristiques au cours du processus. Ainsi, A. Moiroud (1976) constate que la diversité des niches écologiques au front du glacier Saint-Sorlin (Alpes de Savoie) se traduit par une grande variété des cortèges floristiques. De même, à propos des moraines du glacier Hardanjerjökulen (sud de la Norvège), R. Elven (1978) souligne l'importance du contexte environnemental dans la structure de la végétation (exposition, humidité, taille des éléments du substrat…). Enfin, l'importance de la morphodynamique est soulignée par H.J.B. Birks (1980) qui, dans le cadre de son étude sur la végétation des moraines du glacier Klutan (Canada, territoire du Yukon), définit des types de couverts végétaux en fonction de l'âge et de la stabilité de la moraine. H.J.B. Birks met notamment en évidence des séries régressives qui ne parviennent pas à dépasser le stade pionnier sous la contrainte d'un environnement défavorable.

Ces travaux démontrent l'importance des facteurs locaux, qui s'ajoutent au facteur temporel pour expliquer la diversité des groupements floristiques sur les marges déglacées.

- **Les espèces végétales recherchent-elles les mêmes topographies ?**

Th. Brossard (1985), dans le cadre de l'étude d'un secteur morainique du vallum du glacier Midre Lovén (Spitsberg), a procédé à deux séries de relevés, en 1978 et en 1981, et il a décrit les modalités de la colonisation végétale. Le développement du couvert végétal se déroule, dans un premier temps, sur les espaces les plus jeunes d'une manière assez homogène, puis au-delà d'un certain seuil, présente des évolutions divergentes. En particulier, apparaissent des distinctions selon les micro-milieux ; les paramètres en cause sont l'humidité, la sècheresse, la granulométrie, l'environnement biogéographique, la configuration et la position des sites. Th. Brossard montre qu'une multitude de facteurs entrent en jeu dans l'évolution du couvert végétal et que chaque espèce y répond différemment. De même, J.A. Matthews et R.J. Whittaker (1987) ont mené une recherche sur les variations spatiales et les interactions entre végétation et facteurs environnementaux sur la marge proglaciaire du glacier Storbreen (Norvège), ils ont mis en évidence une succession végétale par stades, selon l'étage altitudinal.

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

Ces recherches mettent en évidence l'importance des facteurs micro-environnementaux dans la mise en place des stades successifs de la colonisation végétale.

- **Quelles sont les modalités de l'installation des premières espèces ?**

R.J. Whittaker (1993), dans le cadre de l'analyse de la succession végétale sur la marge proglaciaire du Storbreen (Norvège), conclut à l'importance de la dispersion des graines. R.J. Whittaker parle notamment de *safe sites* favorisant l'installation des jeunes plants sur les terrains récemment déglacés. Ces sites présentent les conditions mésologiques requises pour la fixation et la germination de la graine ou de la propagule (humidité, protection au vent). C'est également ce que A. Jumpponen *et al.* (1999) concluent de leur étude au front du glacier Lyman, dans le Nord du massif des Cascades (USA). Les dépressions jouent comme des collecteurs de graines et maintiennent une plus grande humidité.

Pour I.D. Hodkinson *et al.* (2002), la succession est un processus probabiliste dans lequel le développement de communautés est contrôlé par la disponibilité de propagules et/ou graines et par la compétition entre les espèces. J. Stöcklin et E. Bäumler (1996) insistent sur cette disponibilité en graines et montrent que, sur la marge du glacier Morteratsch (Alpes suisses), le nombre de diaspores[1] capturées par m² passe de 125 à plus de 2 000 avec l'augmentation de l'âge du terrain. Par ailleurs, la disponibilité en eau est d'une importance cruciale pour la germination et l'établissement de la plante. Ainsi, 95 % des germinations constatées se produisent au début de l'été quand les sols sont encore humides. En conclusion, seules les plantes qui produisent beaucoup de graines sont capables de jouer le rôle de pionnières sur les terrains récemment déglacés. N. Wada (1999), dans le cadre d'une étude sur la reproduction du *Dryas octopetala* en presqu'île de Brøgger, a également souligné le rôle important joué par le mode de dispersion des spores et des graines dans la dynamique de végétalisation, avant d'aborder l'incidence des facteurs limitants.

[1] Diaspore : désigne tout fragment d'un végétal susceptible, après isolement du pied-mère, de reconstituer un individu entier (graine, propagule).

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

- **Évolution interactive du sol et du couvert végétal**

A.C. Messer (1988) a étudié la pédogenèse dans le massif Jostedalsbreen (Norvège). Il a observé le développement du sol sur 18 marges proglaciaires (pH, matière organique, capacité d'échange de cations et épaisseur du profil). Ses résultats quantifient la diminution du pH, l'augmentation de la matière organique et la capacité d'échange de cations au fur et à mesure que l'épaisseur du sol augmente. Cependant, la relation interactive entre évolution du couvert végétal et évolution du sol n'est abordée que plus tard. Plusieurs travaux montrent qu'il y a une progression concomitante de la biomasse souterraine et du couvert végétal subaérien. Aux Kerguelen, sur la marge du glacier Ampère, Y. Frenot et *al.* (1998) montrent que les espèces pionnières ont un système racinaire très superficiel tandis que celui des espèces des stades plus avancés est plus long et plus profond. Au Spitsberg, dans une zone déglacée des environs de Ny-Ålesund, T. Nakatsubo *et al.* (1998) observent également que la biomasse des parties souterraines des plantes vasculaires, négligeable dans les premiers stades, augmente ensuite. Les mêmes constats sont faits par R. Ohtonen *et al.* (1999) dans le massif des Cascades (USA), au front du glacier Lyman. Par ailleurs, ces auteurs relèvent qu'au cours de la succession, la domination initiale des bactéries cède la place à la domination des champignons. La biomasse microbienne a été étudiée sur la marge du glacier Austre Lovén, au Spitsberg, par Y. Bekku *et al.* (1999). Ils montrent que les micro-organismes jouent un rôle important dans la progression de la succession primaire, notamment dans la décomposition de la matière organique du sol. Enfin, R. Kaufmann *et al.* (2002) étudient le développement de la faune du sol au front du glacier Rotmoos, dans les Alpes autrichiennes. Sur les espaces déglacés depuis 50 ans, l'abondance de la biomasse microfaunienne et mésofaunienne augmente rapidement, pour se stabiliser ensuite. L'installation et la croissance des végétaux demande des nutriments essentiels, comme l'azote et le phosphore. Leur disponibilité augmente au fil du temps sur les espaces juvéniles au fur et à mesure que les interactions entre le monde vivant de la plante et le monde minéral du substrat se complexifient.

Depuis 50 ans, la reconquête végétale a fait l'objet de nombreux travaux dans les régions où les glaciers reculent. La figure 28 résume les principales avancées opérées par les chercheurs.

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

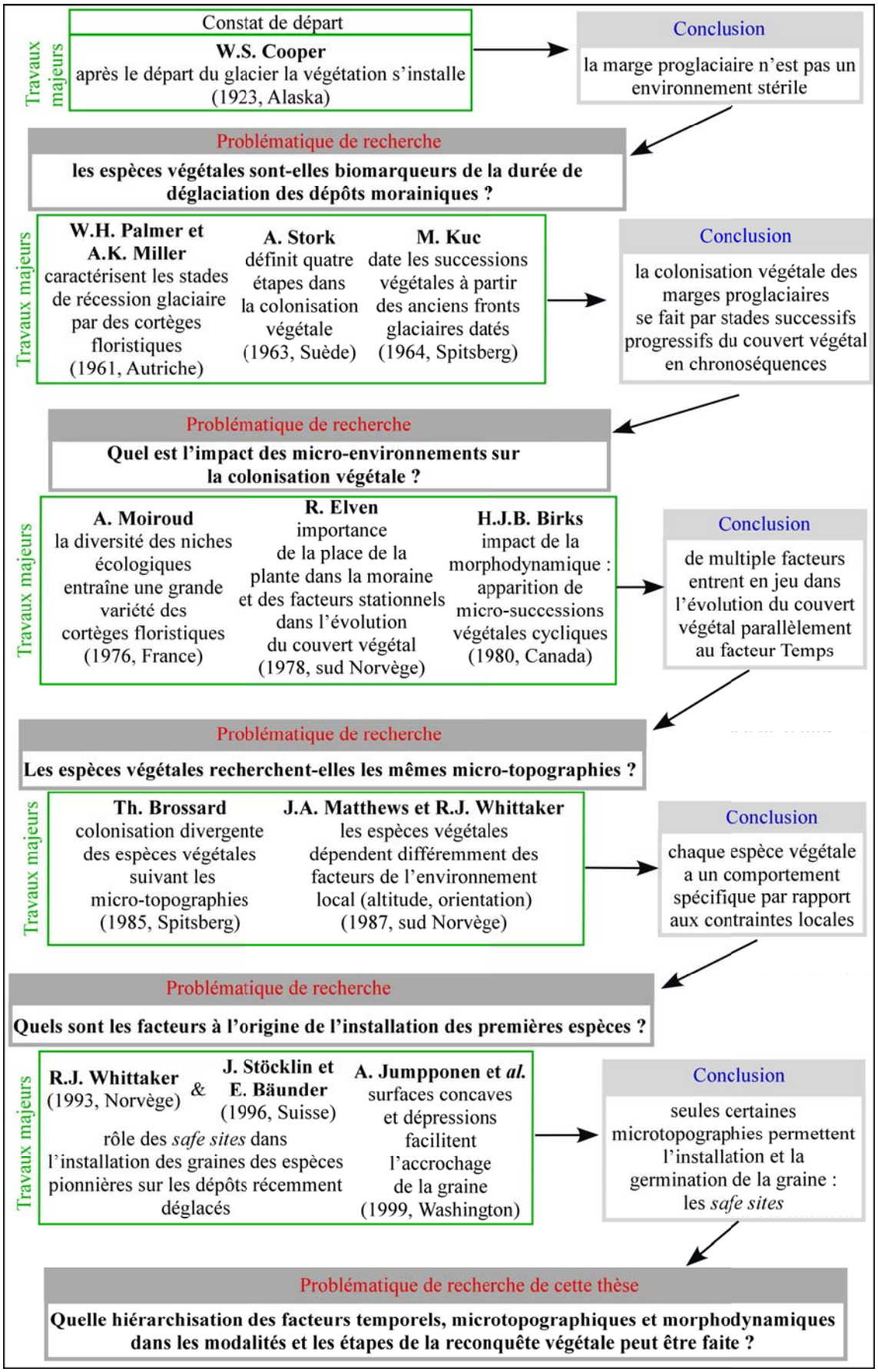


Fig. 28 – Principaux axes de recherches développés pour l'étude de la colonisation végétale sur les marges proglaciaires.

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

3. Terrains d'étude

Dans le cadre de cette thèse, deux régions du Spitsberg ont été choisies pour l'observation de la reconquête végétale : la presqu'île de Brøgger, sur la façade nord occidentale, et la baie de Pétunia dans le centre de l'île (fig. 29). La presqu'île de Brøgger est un choix qui s'imposait compte tenu de la facilité d'accès du lieu. Ny-Ålesund est reliée par aéroport à Longyearbyen, la capitale du Spitsberg, et la présence de la base française J. Corbel permet des séjours répétés et prolongés. Nous souhaitions pouvoir comparer les observations de terrain réalisées en presqu'île de Brøgger avec celles d'une région climatiquement et floristiquement différente. Dans un premier temps, notre choix s'était porté sur la région sud, plus froide, du Hornsund où une base scientifique polonaise rend le séjour possible. Cependant, au cours de l'été 2003, la base polonaise en réfection n'a pu nous accueillir. Grzegorz Rachlewicz, qui était notre contact polonais, nous proposa alors de séjourner en baie de Pétunia où lui-même organisait une mission de terrain. La baie de Pétunia située dans le cœur continental plus chaud du Spitsberg, caractérisée par la toundra du Moyen Arctique et qui plus est dans une zone où la flore est protégée, se révélait être un site particulièrement intéressant en raison du contraste climatique et floristique qu'elle présentait avec la région nord-occidentale du Kongsfjord.

3.1. Deux contextes régionaux pour l'observation de la reconquête végétale

Le Kongsfjord et la baie de Pétunia sont distants de moins de 100 km, mais présentent deux environnements bioclimatiques contrastés. La baie de Pétunia, branche la plus septentrionale du Billefjord, lui-même raccordé à l'Isfjord (fig. 29), pénètre dans la zone intérieure du Spitsberg où le climat est continental. La continentalité se marque par des températures d'été relativement chaudes, avec pour les températures de la saison végétative, de juin à août, 4,9°C pour Longyearbyen (série 1961-1990 ; T. Engelskjøn *et al.*, 2003) et 3,5°C pour Ny-Ålesund (série 1969-2000, Official Statistics of Norway, 2003) et par un déficit hydrique, Longyearbyen totalisant 52 mm (D. Mercier, 1998), alors que le Kongsfjord, à Ny-Ålesund, en reçoit, 80 mm.

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

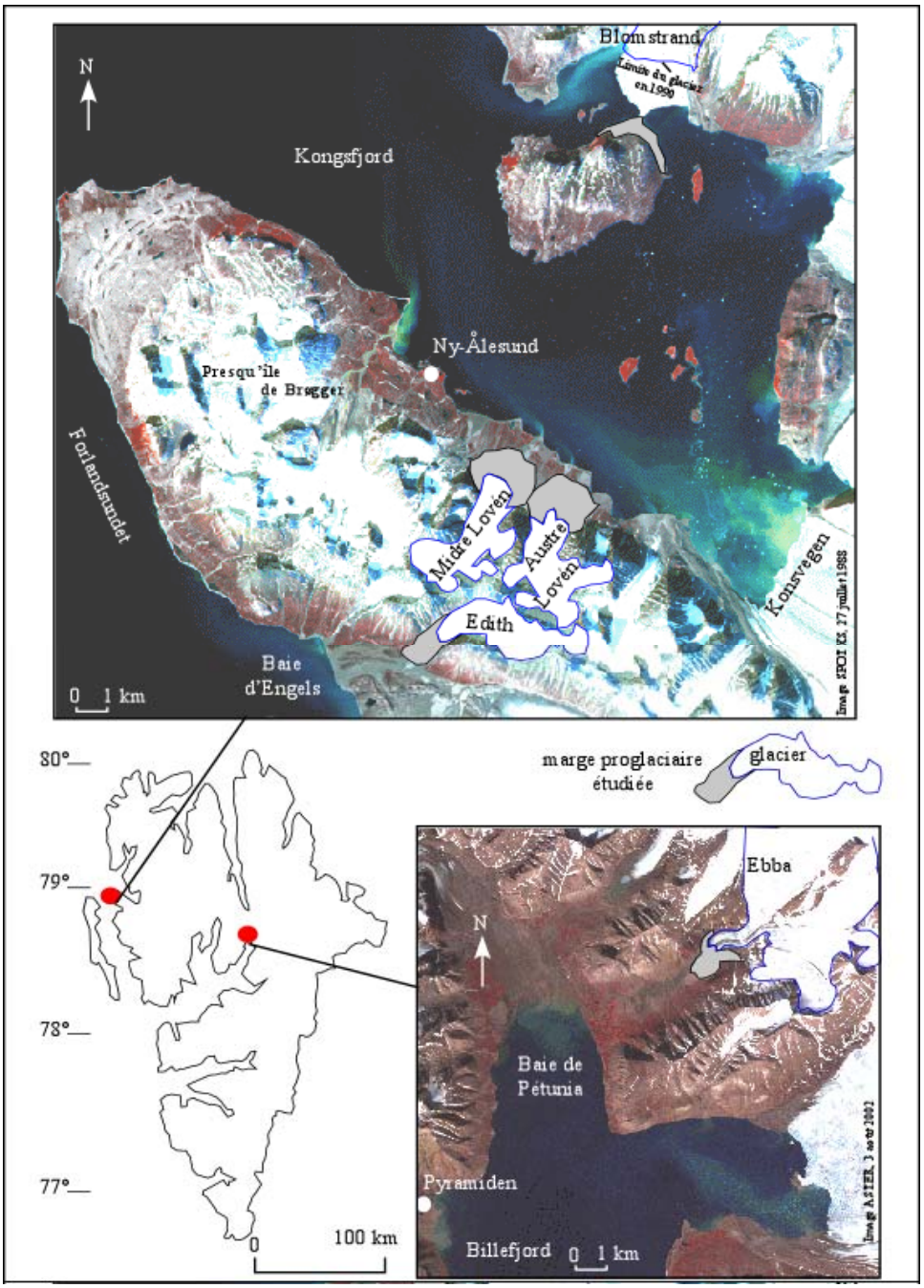


Fig. 29 – Localisation des marges proglaciaires étudiées au Spitsberg.

Le climat de chaque région a une incidence nette sur la végétation, la presqu'île de Brøgger appartient majoritairement à la zone nord de la toundra arctique alors que la baie de Pétunia, comme nous l'évoquions en introduction, est située dans la zone de la toundra du Moyen Arctique. Par ailleurs, depuis 1973, la région de la baie de Pétunia est classée par le gouvernement norvégien comme réserve botanique, ce qui implique des restrictions de séjour et d'exploitation. Signalons la proximité de la ville russe de Pyramiden dont les mines de charbon ne fonctionnent plus (photo 25). Aussi le paysage

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

conserve-t-il les stigmates de l'activité minière faisant contrepoint aux protections environnementales que nous venons d'évoquer. Cela étant, l'impact anthropique n'affecte que marginalement les secteurs déglacés. L'incidence des rennes sur la végétation est autrement plus sensible.

Le bâti géologique des deux régions est constitué pour l'essentiel par les assises métamorphiques de l'Hecla Hoek. Cependant, des différences entre les deux sites existent, avec l'abondance des roches sédimentaires dans le cas de la baie de Pétunia, alors qu'au Kongsfjord le bâti est majoritairement composé de roches métamorphiques (micaschistes, gneiss et quartzites).

Photo 25 – Traces de véhicules dans la baie de Pétunia. *Bien que cette baie soit classée réserve botanique, l'ancienne activité minière de la ville russe de Pyramiden, située à quelques kilomètres, a affecté ce secteur protégé. Prise de vue depuis la rive est de la baie, vers l'ouest, août 2003.*

3.2. Les marges proglaciaires

Nos sites d'observation ont été choisis en fonction de certains critères. En premier lieu, l'espace déglacé entre le front glaciaire actuel et le vallum morainique devait être relativement développé pour faciliter le repérage chronologique des séquences végétales. Le site ne devait pas se trouver au-dessus de 200 m, pour neutraliser l'effet de l'altitude. Enfin, les dépôts morainiques devaient être faiblement remaniés, ce qui n'est pas toujours le cas comme nous l'avons vu pour la marge du glacier Ragnart, où les

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

deux tiers de l'espace sont occupés par un lac, empêchant toute reconquête végétale. En conséquence, dans la baie de Pétunia, la marge proglaciaire du glacier Ebba a été retenue, après examen des photographies aériennes et parce que nous pouvions disposer d'une hutte, à proximité, qui a facilité notre séjour sur place, en août 2003. Dans la région du Kongsfjord, quatre sites ont été étudiés : les glaciers Edith, Blomstrand, Midre et Austre Lovén durant les missions de terrain de juillet 2001, 2002, 2003 et 2004.

3.2.1. Marges proglaciaires des glaciers de vallée

Parmi les cinq sites, trois sont liés à des glaciers de vallée à front terrestre, caractérisés par une glace polythermique ; il s'agit des glaciers Midre et Austre Lovén (fig. 30 a et b) en rive nord de la presqu'île de Brøgger et du glacier Edith en rive sud (fig. 30 c).

La presqu'île est encadrée par le Kongsfjord, au nord, le Forlandsundet, au sud (fig. 29). Une échine montagneuse d'orientation nord-ouest sud-est forme l'armature de la presqu'île. Au sud, où se situe le glacier l'Edith, le mésoclimat[1] est relativement plus chaud qu'au nord, où se trouvent les deux glaciers Lovén (fig. 30). Le recul et la taille des glaciers trahissent ce contraste climatique (D. Joly, 1994). Il en est de même pour la végétation plus riche en espèces thermophiles au sud (Th. Brossard *et al.*, 2002). La configuration topographique accroît encore les aptitudes favorisées au sud en raison de la pente des versants et de leur disposition générale en amphithéâtre bien abrité (Th. Brossard *et al.*, 2002).

Au nord, les deux glaciers Lovén se présentent comme des sites jumeaux symétriquement opposés à celui du glacier Edith avec lequel ils partagent les sommets et les arêtes rocheuses qui délimitent leurs cirques glaciaires (photo 26, fig. 31). Comme l'illustre la figure 31, les appareils glaciaires reposent sur une assise rocheuse identique et sont situés à des altitudes comparables, comprises entre 50 et 600-650 mètres pour les glaciers Lovén et entre 160 et 650 mètres pour le glacier Edith, ce dernier ayant connu un recul plus important. La surface du glacier Edith est moindre avec 4,3 km² contre 5,95 km² pour le glacier Midre Lovén et 6,2 km² pour le glacier Austre Lovén (J.O. Hagen *et al.*, 1993). Le glacier Edith occupe une vallée étroite, sans déborder sur

[1] Mésoclimat : au sens n°1, l'échelle du mésoclimat se situe entre celle du climat local et celle du climat stationnel ; le préfixe méso- signifie, ici, moyen.

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

le piémont, si bien que sa marge proglaciaire est moins développée en largeur et en superficie (1,1 km²) que celles des glaciers Lovén (1,9 km² pour le glacier Midre Lovén et 2,2 km² pour le glacier Austre Lovén).

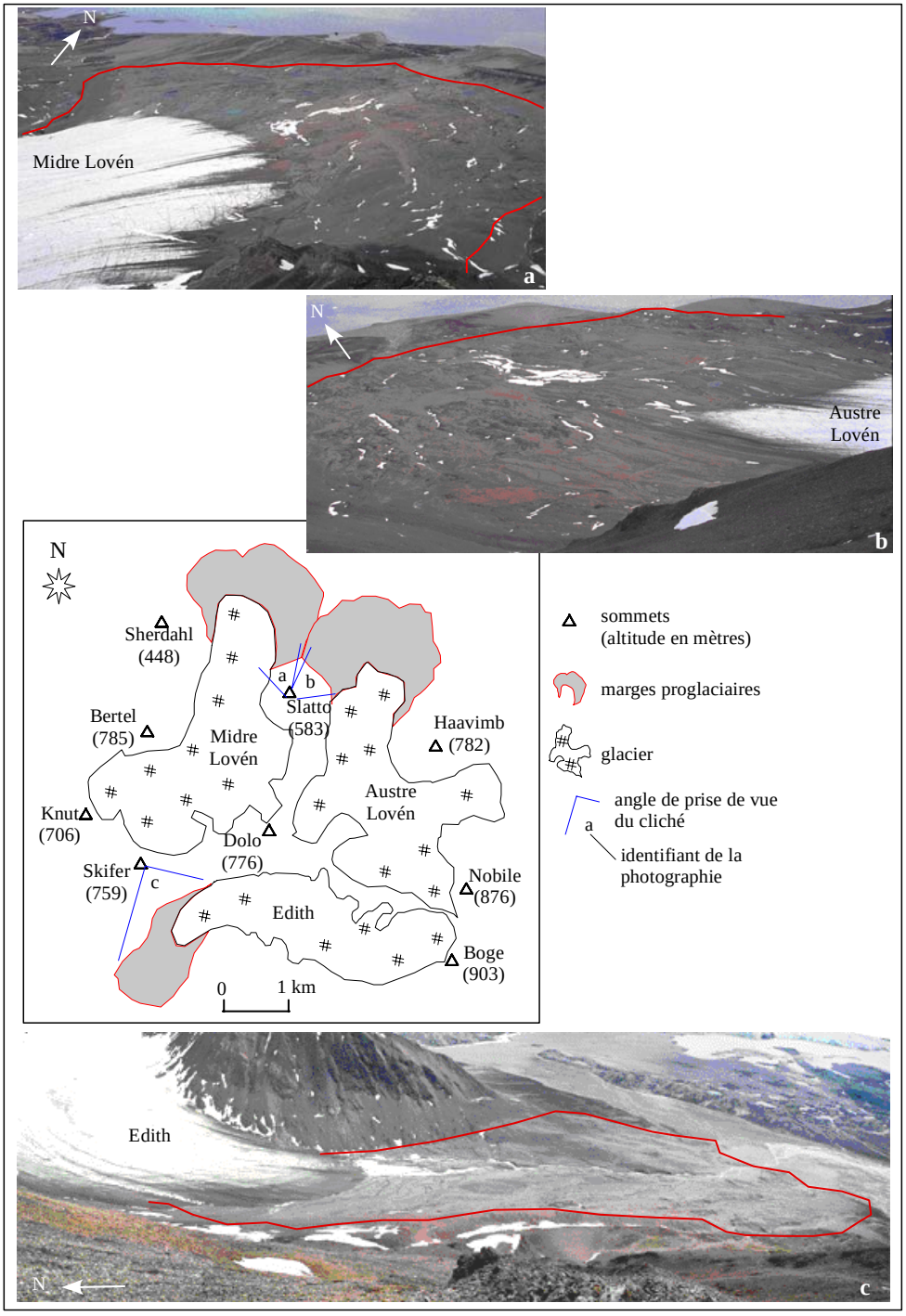


Fig. 30 - Marges proglaciaires des glaciers de vallée en presqu'île de Brøgger. *(a, b) prises de vues depuis le Slåtto, juillet 2001 ; (c) prise de vue depuis le Skifer vers le sud-est juillet 2004 (D. Laffly).*

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

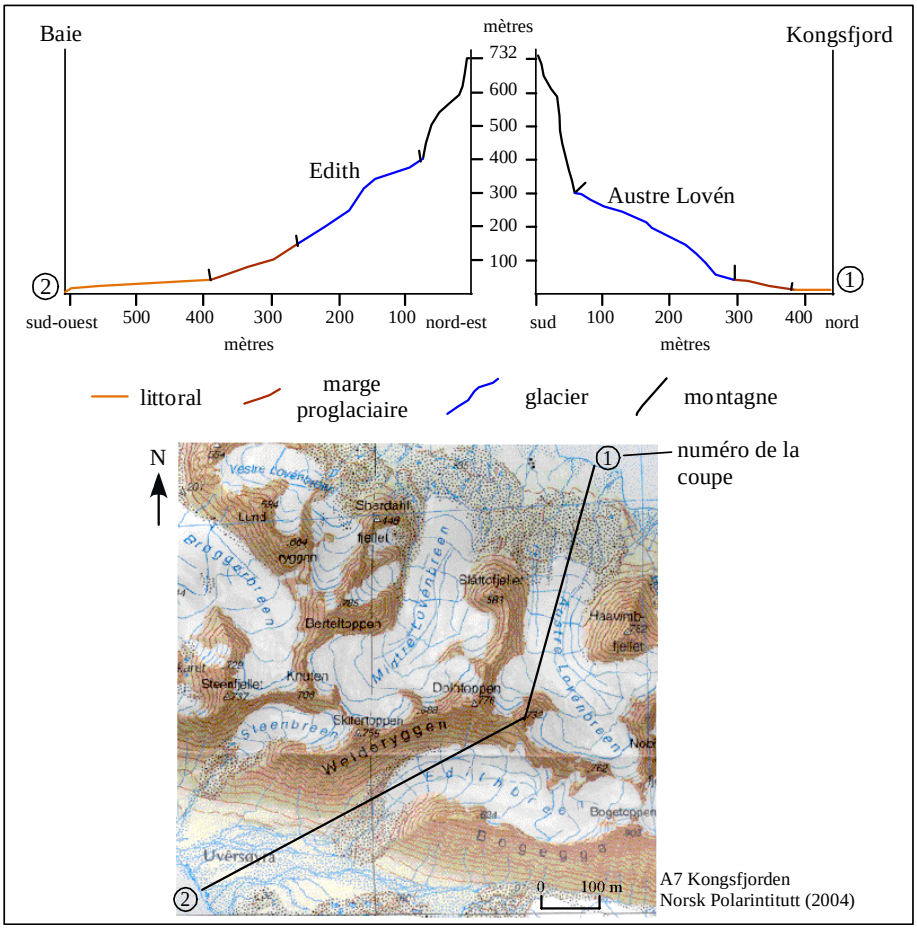


Fig. 31 - Coupe topographique des versants nord et sud de la presqu'île de Brøgger au niveau des glaciers Austre Lovén et Edith.

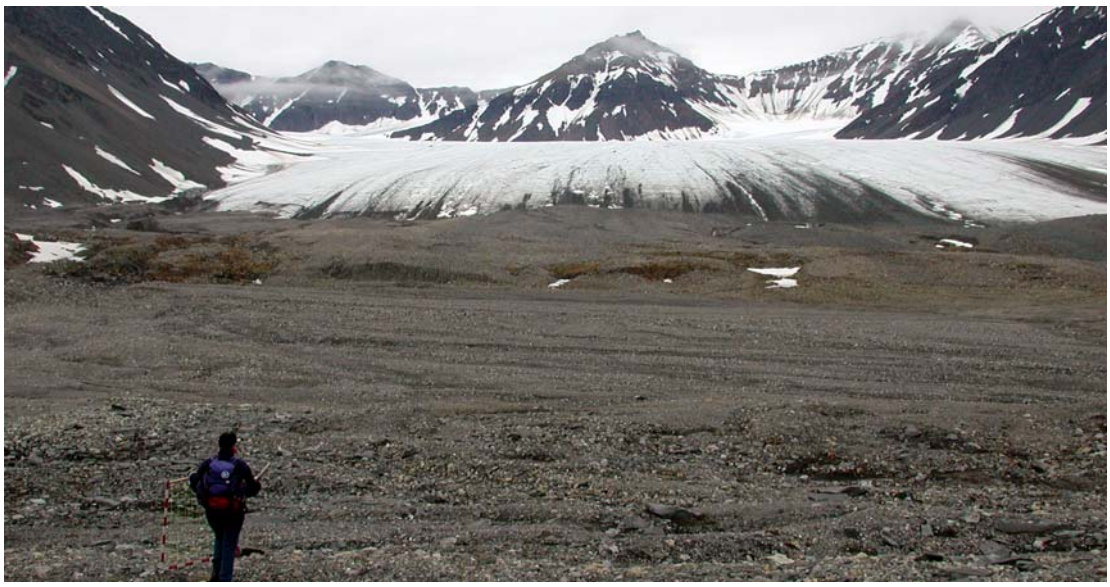


Photo 26 - Le front du glacier Austre Lovén et sa marge proglaciaire. *Les sommets qui ferment le bassin, à l'arrière-plan, séparent le glacier Austre Lovén du glacier Edith situé sur la rive sud de la presqu'île. Prise de vue depuis la marge proglaciaire vers le sud, 17 juillet 2001 (D. Laffly).*

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

3.2.2. Marges proglaciaires des glaciers émissaires de glacier de plateaux

Certains glaciers de vallée se distinguent des précédents parce qu'ils n'ont pas de bassin versant propre, délimité par un ou plusieurs cirques, mais sont reliés à des glaciers de plateaux de type *fonna* (fig. 32). Ce sont les glaciers Ebba, en baie de Pétunia, émissaire du glacier de plateau Lomonosov qui couvre 600 km² (E. Isaksson *et al.*, 2001 ; fig. 32) et Blomstrand, en rive nord du Kongsfjord, qui est un émissaire du glacier de plateau Isachsen couvrant 505 km² (J.O. Hagen *et al.*, 1993).

Le glacier Ebba se loge dans le fond d'une large vallée déglacée (photo 27). À l'inverse, le glacier Blomstrand est à front marin et ce depuis 1995 ; comme le montre la carte de la figure 33, le glacier fait face à l'île Blomstrand, qu'il recouvrait en partie au Petit Âge Glaciaire jusqu'à 100 mètres d'altitude. Le recul du glacier s'est fait en direction du niveau de la mer, laissant aujourd'hui une marge proglaciaire qui s'étend sur un versant jusqu'au niveau de la mer, illustré par la photo de la figure 33. En 10 années, de 1995 à 2005, un bras de mer de 2 km a été libéré par le glacier, isolant la marge proglaciaire du front glaciaire et faisant de ce site un cas original (photo 28 et 29). En effet, la marge proglaciaire n'est plus sous l'influence du front glaciaire, c'est-à-dire à la fois des écoulements et des vents qui peuvent être induits par l'appareil glaciaire. L'île isole le site des rives du Kongsfjord et notamment des rennes.

Bien que nées du retrait d'imposantes masses glaciaires, les marges proglaciaires de ces émissaires de calottes sont moins développées en surface que celles des glaciers de vallée. Le tableau 1 synthétise l'ensemble des caractéristiques de chaque marge. La marge proglaciaire du glacier Ebba couvre 0,8 km², elle est plus de deux fois moindre que celle des glaciers Edith et Midre Lovén et près de trois fois moindre que celle du glacier Austre Lovén. Quant au glacier Blomstrand, seule la partie terminale de sa marge calée contre l'île du même nom, est observable, puisque le reste du dispositif est recoupé par un bras de mer.

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

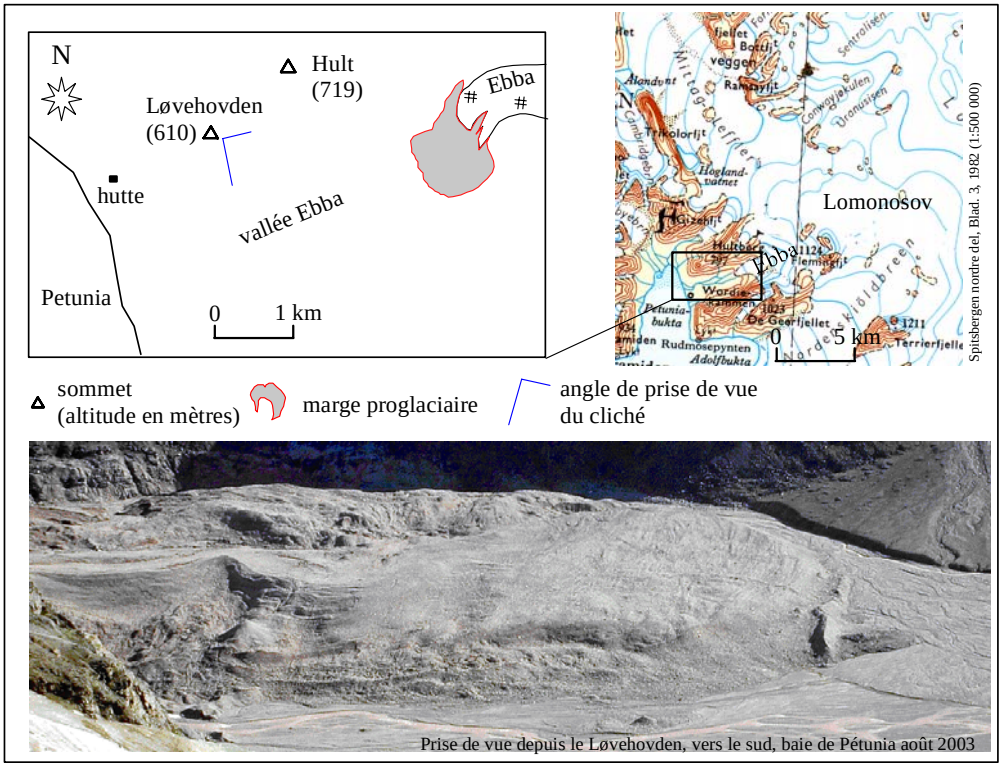


Fig. 32 – Marge proglaciaire du glacier Ebba émissaire du glacier de plateau Lomonosov.

Photo 27 - Le glacier Ebba logé dans le fond de la vallée Ebba*. La langue du glacier Ebba est un émissaire du glacier de calotte Lomonosov qui le surplombe à l'arrière des sommets. Prise de vue depuis l'entrée de la vallée vers l'ouest, 9 août 2003.*

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

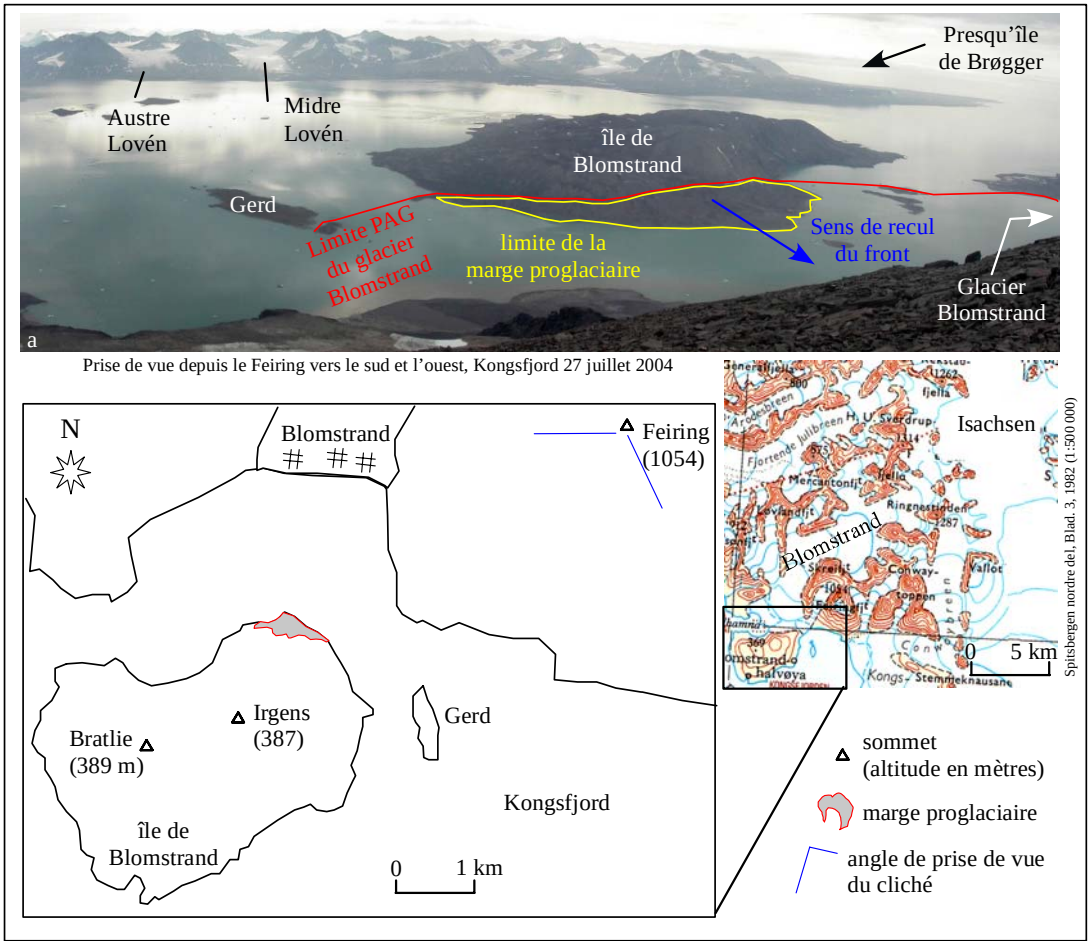


Fig. 33 – Marge proglaciaire du glacier Blomstrand, émissaire du glacier de plateau Isachsen.

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

Photo 28 - Le glacier Blomstrand relié à l'île du même nom par un pédoncule de glace. *Prise de vue depuis le haut de l'île vers le nord, été 1986 (C. Kempf, 1994).*

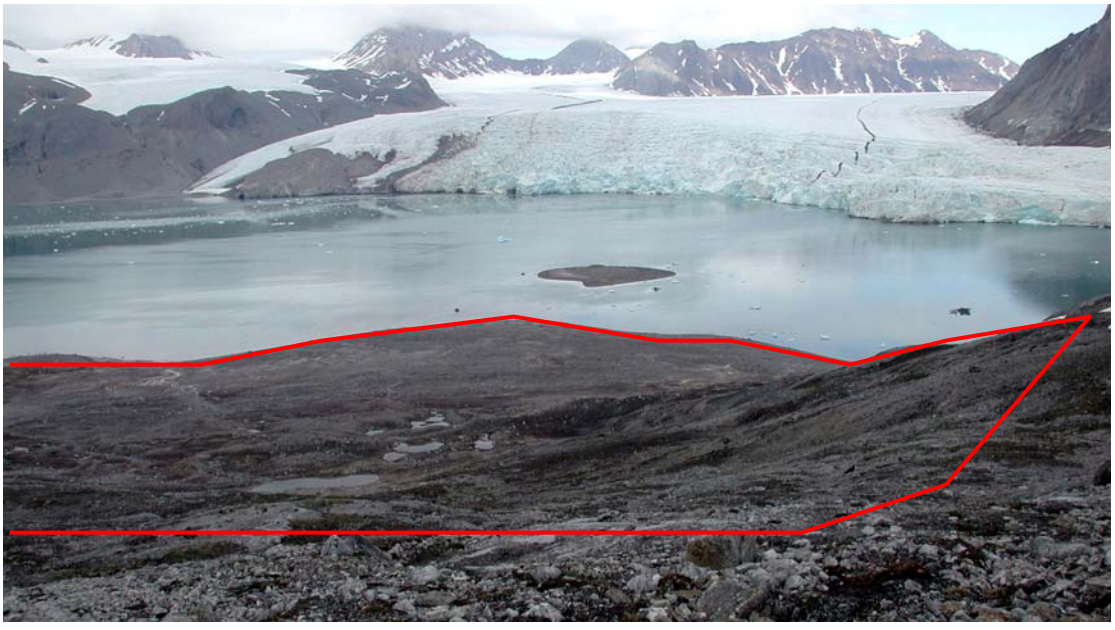


Photo 29 - La marge du glacier Blomstrand séparée du front par les eaux du fjord. *Au premier plan s'étend l'espace intramorainique qui s'arrête au contact de la mer, délimité par la ligne rouge. À l'arrière-plan, le front du glacier Blomstrand qui s'est détaché de l'île en 1995. Prise de vue vers le nord, 18 juillet 2002.*

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

Les cinq sites proglaciaires se présentent comme des cadres environnementaux divers qui se prêtent à la comparaison des reconquêtes végétales à différents niveaux d'échelles.

		glacier				marge			
type de glacier	site proglaciaire	Coordonnées latitude	Coordonnées longitude	altitude (m)	surface (km²)	orientation	altitude	surface (km²)	sens de recul du front
émissaire de plateau	Ebba	78°44	16°57	210 - 1 120	25	sud-ouest	25 - 210	0,79	
émissaire de plateau	Blomstrand	79°05	12°25	0 - 1 050	102	sud	0 - 100	inconnu	
glacier de vallée délimité à l'amont par un cirque	Midre Lovén	78°53	12°04	50 - 650	5,95	nord	25 - 50	1,97	
glacier de vallée délimité à l'amont par un cirque	Austre Lovén	78°53	12°09	50 - 600	6,20	nord	25 - 50	2,23	
glacier de vallée délimité à l'amont par un cirque	Edith	78°51	12°07	160 - 650	4,3	sud-ouest	40 - 160	1,12	0 1 km

Tableau 1 – Récapitulatif des caractéristiques des cinq glaciers et sites proglaciaires étudiés au Spitsberg.

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

Conclusion

Depuis l'Holocène, le réchauffement climatique a entraîné une tendance générale au retrait glaciaire. Les glaciers qui se jettent dans la mer créeent un type de littoral à falaise de glace aux caractères bien particuliers. Ceux qui ne l'atteignent pas, construisent sur leur front des moraines et des plaines d'épandage proglaciaire qui vont jusqu'à la mer. C'est pourquoi, directement ou indirectement, la zone littorale et pré-littorale doit ses caractères les plus originaux, notamment phytogéographiques, à la proximité des glaciers. En effet, l'espace disponible pour le développement végétal est subordonné aux variations de position des fronts glaciaires. À cet égard, le Spitsberg offre un bon terrain d'étude car le climat polaire océanique, relativement doux et humide pour la latitude, favorise une richesse floristique relative permettant d'observer le phénomène de reconquête dans ses nuances. En témoigne le grand nombre de travaux déjà conduits autour de cette thématique au Spitsberg, de telles recherches n'ayant pas été menées ailleurs aussi haut en latitude. En effet, lorsque les contraintes climatiques sont trop fortes, le développement végétal reste faible et peu différencié. C'est le cas aux Kerguelen, où Y. Frenot *et al.* (1998) ont observé une formation végétale composée seulement de sept espèces, pour un taux de recouvrement de 4,2 %. Les auteurs ont conclu que ce faible nombre d'espèces ne permettait pas de distinguer des séquences successives dans le déroulement du processus.

Au Spitsberg, la plupart des recherches ont été réalisées en presqu'île de Brøgger. Cependant, il reste à définir les séquences floristiques qui se mettent en place, les facteurs qui influencent la reconquête végétale, et les différents types de microsites morainiques qui peuvent constituer des contraintes ou des atouts pour la colonisation. À cette fin, nous avons retenus cinq sites localisés dans des contextes environnementaux différents. À l'échelle du Spitsberg, deux contextes mésoclimatiques sont différenciés opposant la marge du glacier Ebba située sous le climat continental propre au secteur central de l'île, aux marges de la région du Kongsfjord, marquées par un climat polaire océanique. À l'intérieur de la région du Kongsfjord, deux autres nuances mésoclimatiques se dessinent. La première est induite par les orientations opposées du glacier Edith et des glaciers Lovén. Au sud, les conditions climatiques ont favorisé le

développement d'une végétation thermophile tandis qu'au nord, les effets négatifs de l'exposition sur la végétation se trouvent renforcés par certains phénomènes locaux comme les vents catabatiques. La dernière particularité est propre à la marge du glacier Blomstrand. Situé à proximité des eaux du fjord, le site se trouve sous l'influence directe du littoral et notamment des embruns, sources d'humidité et de sel. Il conviendra de hiérarchiser le rôle respectif joué par les différents facteurs mésoclimatiques évoqués sur la reconquête végétale.

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

Chapitre 2

Méthodologie

1. Données exogènes : constitution d'une base d'informations géographiques

2. Collecte des données endogènes

3. Analyse des données

Photo 30 - Station de base pour le traitement différentiel du signal GPS. *Prise de vue à proximité de la base J. Corbel, juillet 2002.*

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

L'observation de la reconquête végétale nécessite de définir une méthode de terrain qui permette d'établir les relations existant entre la localisation des plantes et leur environnement. Notre approche se définit à travers la mobilisation de deux grands types de données dont la figure 34 résume le contenu et leur articulation.

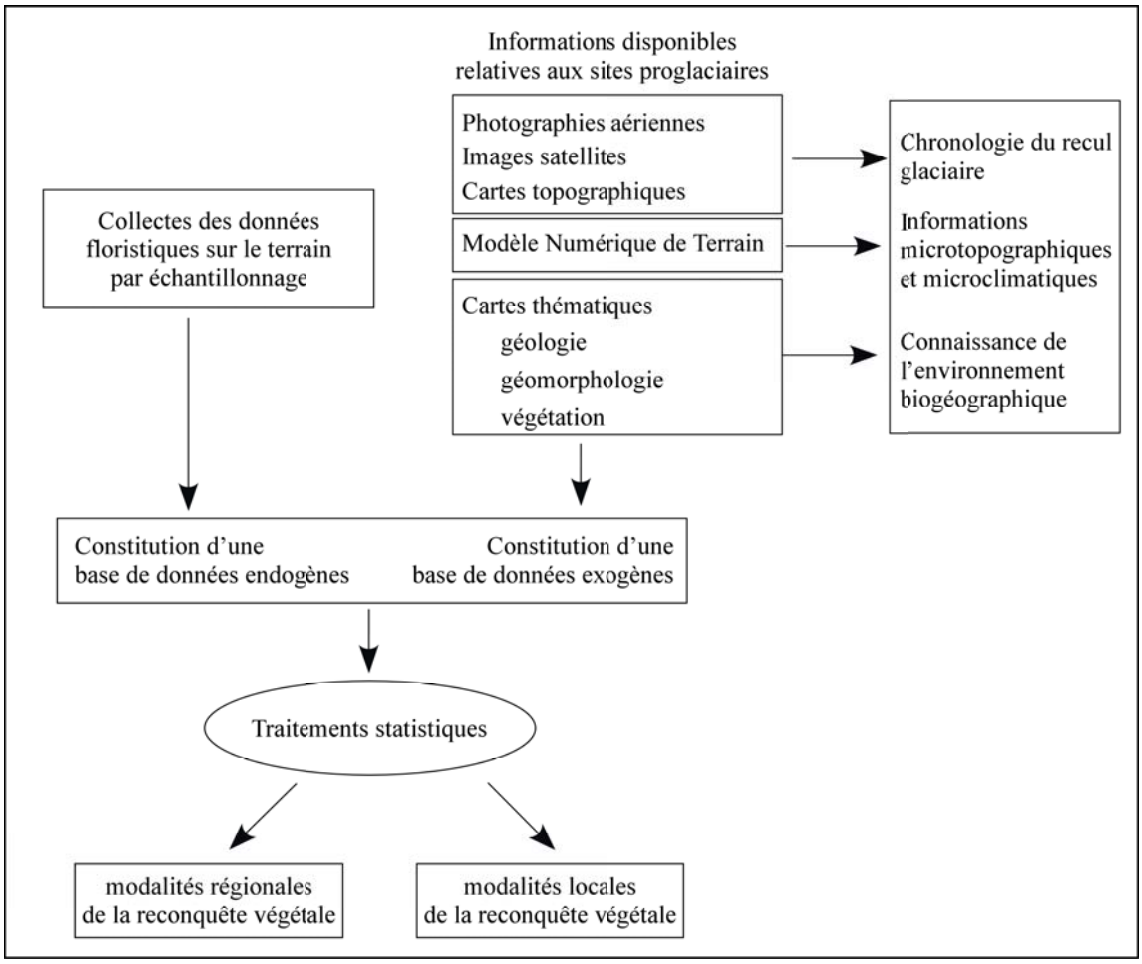


Fig. 34 - Schéma de la démarche méthodologique suivie pour l'observation des modalités régionales et locales de la reconquête végétale.

- **Les données dites endogènes**. Celles-ci se rapportent explicitement au phénomène étudié, ici la végétation, qu'elles visent à décrire et à renseigner spécifiquement. Dans notre cas, il s'agit surtout d'identifier certains taxa[1] végétaux (espèces ou associations) et de caractériser leur habitat par des protocoles d'observation appropriés. Il y a donc des choix à faire pour définir le

[1] Taxa (pluriel courant de taxon préféré à taxons) : appellation générale pour désigner toute unité systématique, de quelque rang qu'elle soit. Les plus usuels sont : le genre, le sous-genre, l'espèce, la sous-espèce, la variété.

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

niveau de précision de l'information à collecter par le relevé de terrain car la botanique est une science en soi et l'identification exhaustive des taxa est, évidemment, un exercice hors d'atteinte. Ensuite, pour opérer les recensements qui s'imposent, il conviendra de mettre en place des stratégies d'échantillonnage permettant, au sein des relevés, de mesurer des taux d'abondance et, à l'échelle des milieux observés, de prendre en compte leur diversité spatiale.

- **Les données exogènes**. Ces données servent à définir le contexte général des observations et se présentent sous forme numérique au sein de bases constituées. Ces informations peuvent provenir de sources multiples : images aériennes ou satellites, modèle numérique de terrain (MNT) et informations dérivées, tout autre fonds archivé sous la forme de couches dans un Système d'Information Géographique (géologie, occupation du sol, etc). Leur principale propriété est de couvrir l'espace d'une manière exhaustive. D'un point de vue statistique, elles sont utilisées, dans notre démarche, comme variables explicatives de la variation spatiale (fig. 34).

Des modèles appropriés de traitement mettant en relation les bases de données endogènes et exogènes seront requis pour permettre la généralisation spatiale de connaissances acquises ponctuellement à travers les enquêtes de terrain (fig. 34). Ces analyses devraient permettre, à l'échelle des cinq sites, de définir les modalités régionales de la reconquête, et à l'échelle d'un site, d'en définir les modalités locales.

1. Données exogènes : constitution d'une base d'informations géographiques

Pour comprendre la logique de mise en place du couvert végétal, nous avons tenté de rassembler toutes les formes de documents utiles tels que cartes, photographies et images. Les sources réunies nous ont permis de dater le recul glaciaire. La principale difficulté fut de reconstituer des séquences temporelles comparables entre les cinq sites choisis. À cette fin, nous avons essayé de retrouver la position des fronts glaciaires à des dates relativement proches. Ces données qui, dans le protocole que nous envisageons, ont le statut de données exogènes, vont aussi nous servir à caractériser l'environnement des moraines dans la continuité de l'espace qu'elles occupent. Tous ces documents,

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

cités dans le texte, font l'objet d'un récapitulatif (tableau 2, p. 122) et seront également listés à la fin de l'ouvrage.

1.1. Les documents généraux : cartes et images

Dans le Kongsfjord, une cartographie du recul a été réalisée (fig. 35) pour les glaciers à front marin par J.O. Hagen *et al.* (1993). Cette carte reste très succincte en ce qui concerne le recul des glaciers à front terrestre. Seules les positions de 1987 sont localisées. La chronologie du recul pour les sites qui nous intéressent était donc à construire.

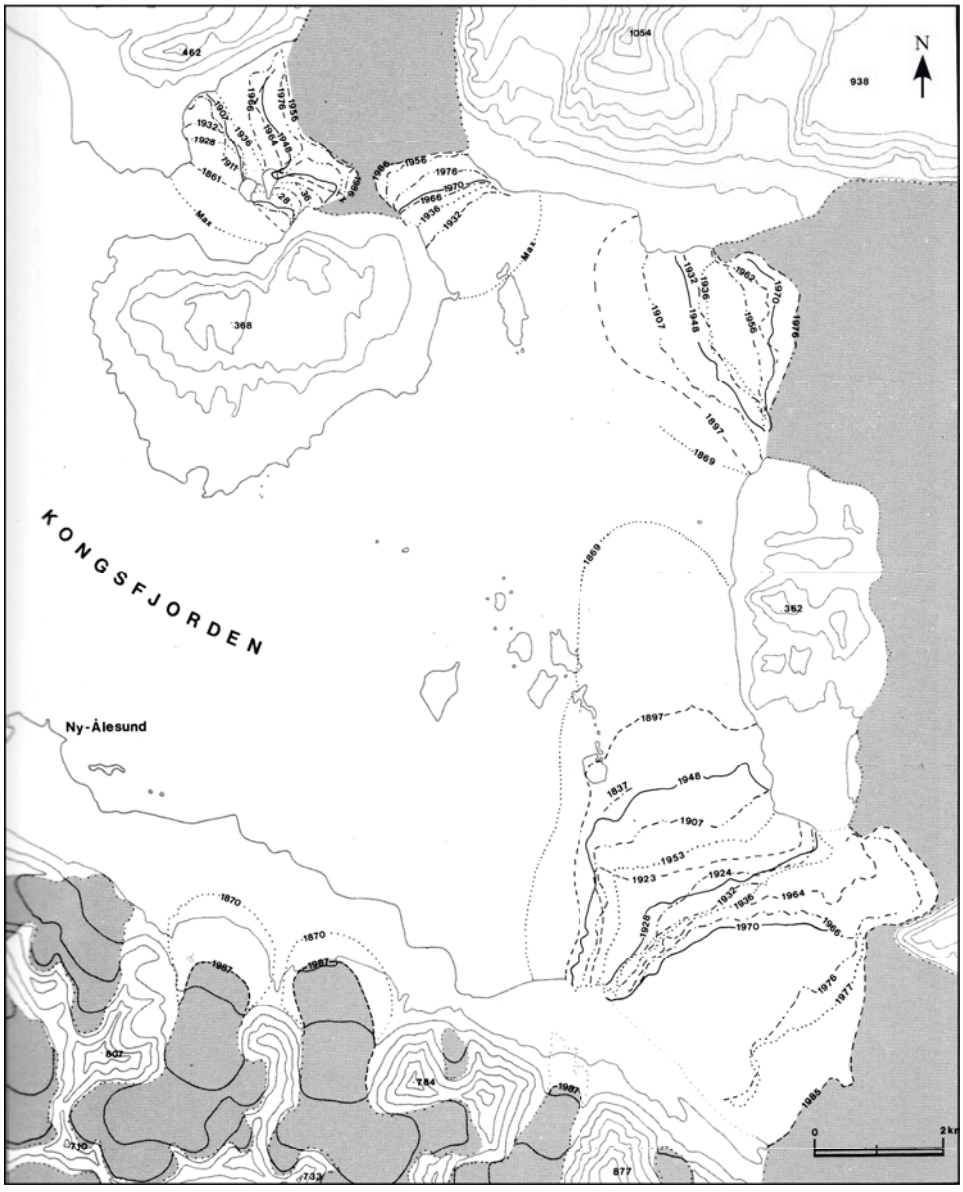


Fig. 35 - Carte du recul des fronts glaciaires du Kongsfjord *(J.O. Hagen* et al., *1993).*

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

1.1.1. Les cartes topographiques

Les plus anciennes cartes du Spitsberg (G. Isachsen, 1907) ont été dressées au cours d'une expédition conduite par G. Isachsen sous la direction du Prince de Monaco (fig. 36 a). La couverture cartographique au 1/200 000 existe pour la côte nord-ouest du Spitsberg qui inclut la presqu'île de Brøgger et la zone nord du Kongsfjord. La carte positionne les glaciers Edith, Blomstrand, Austre et Midre Lovén en 1906 avant le début du retrait glaciaire qui est avéré à partir de 1918 selon B. Lefauconnier (1987). Cette carte n'est pas d'une précision suffisante pour positionner avec exactitude les anciens fronts glaciaires. Toutefois, la carte de G. Isachsen offre un témoignage de la situation d'englacement au début du XX^{e} siècle, particulièrement intéressant quand les dépôts morainiques marquant l'extension maximale des glaciers ont disparu. C'est le cas du site du glacier Edith où l'arc terminal du Petit Âge Glaciaire a été repris par les écoulements issus d'un glacier voisin. Nous ne disposons malheureusement pas d'une telle carte pour le glacier Ebba, en baie de Pétunia.

Les cartes topographiques qui succèdent à celle de G. Isachsen ont été dressées par le Norsk Polarinstitutt au 1/100 000. La plus ancienne à notre disposition, pour la presqu'île de Brøgger, date de 1961 (A7 Kongsfjorden ; fig. 36 b). Elle couvre l'ensemble de la péninsule, le Kongsfjord et l'île de Blomstrand. Établie sur la base des photographies aériennes de 1936 et 1956, la carte témoigne du recul glaciaire dans la mesure où la grande majorité des glaciers à front terrestre sont bordés d'accumulations morainiques. Une fois encore, l'échelle de ce fonds cartographique ne permet pas de retenir la limite précise des fronts cartographiés.

Les cartes suivantes datent des années 1980. La région du Kongsfjord est désormais cartographiée sur deux feuilles : la partie nord de la baie, incluant l'île de Blomstrand (A6 Krossfjord) et au sud, la presqu'île de Brøgger (A7 Kongsfjord). L'édition de la carte couvrant l'île de Blomstrand date de 1987, mais a été réalisée à partir des photographies aériennes de 1966. La carte de la presqu'île de Brøgger, éditée en 1990, a été réalisée à partir des photographies aériennes prises en 1936, 1956 et 1966 ; au recto de la carte est publiée une image satellite Landsat (1989). Ces cartes présentent peu de modifications par rapport à celle de 1961. Si l'on prend l'exemple du glacier Austre Lovén présenté sur la figure 36 et que l'on compare sa position sur les cartes de 1961

(b) et de 1990 (c), le recul du glacier n'est pas sensible car le recul glaciaire des années 1980 n'a pas été pris en compte, mais uniquement celui de 1966. Il y a donc un décalage important entre ce qui est cartographié et la réalité du terrain.

La carte topographique de la baie de Pétunia, couvrant la marge du glacier Ebba (C7 Dicksonfjorden), éditée en 1988, a été dressée à partir des photographies aériennes de 1960, 1961, 1966 et 1969. Bien que d'édition récente, la carte présente la situation des années 60 et, comme pour le Kongsfjord, ne permet pas de dater précisément la position des fronts.

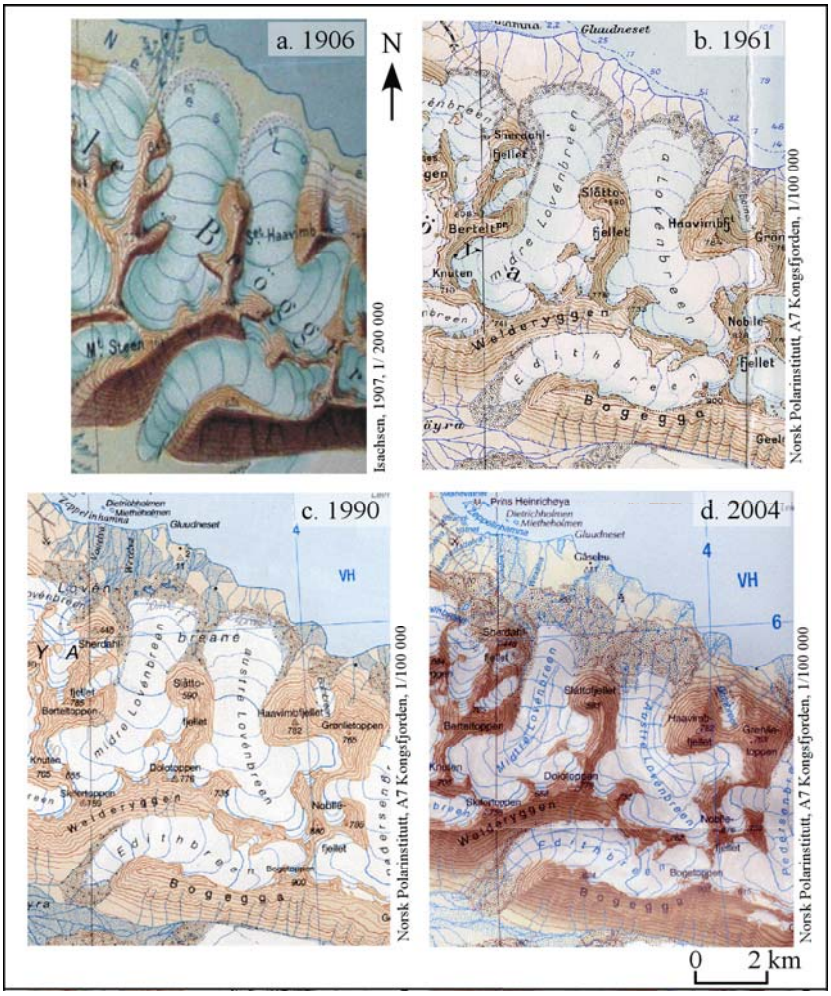


Fig. 36 – Cartes topographiques de la presqu'île de Brøgger du Norsk Polarinstitutt.

La dernière carte topographique de la presqu'île de Brøgger (A7 Kongsfjorden) a été éditée en 2004 (fig. 36 d). Elle a été dressée à partir des photographies aériennes de 1990 et 1995. La position des glaciers à front marin a été déterminée à partir des images

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

Landsat 5 du 16 août 1998. Néanmoins, nous ne pouvons l'utiliser pour positionner les fronts glaciaires car l'échelle, au 1/100 000, n'est pas suffisamment précise[1] pour répondre aux besoins de notre étude telle que nous l'envisageons, malgré l'intérêt documentaire que ces images présentent. La collecte de cartes disponibles ne convient donc pas pour positionner les anciens fronts glaciaires.

1.1.2. Les photographies aériennes : principal support pour la cartographie du recul glaciaire

- **Photographies au sol et aériennes obliques (noir et blanc)**

Les plus anciens clichés photographiques des glaciers furent pris du sol au cours de la mission G. Isachsen que nous évoquions précédemment. Les prises de vue montrent des fronts glaciaires encore très avancés comme l'illustre la photo 31 sur laquelle on distingue le front glaciaire qui surplombe les accumulations morainiques.

Photo 31 – Cliché de 1907 du glacier Vestre Lovén (G. Isachsen et A. Hoel, 1913).

Les premières photographies aériennes (obliques) datent de 1936. Elles sont de qualité inégale et seules celles qui couvrent les glaciers Lovén, en presqu'île de Brøgger, et le glacier Ebba, en baie de Pétunia, ont pu être exploitées (fig. 37). Nous ne disposons pas de clichés de 1936 pour les glaciers Blomstrand et Edith. Les photographies en vue oblique ne sont pas assez précises pour servir au positionnement des fronts car même si une orthorectification est toujours possible, les restitutions à plat obtenues n'auraient qu'une valeur indicative. À ce titre, elles attestent du recul, déjà en cours, des fronts

[1] Un fond topographique au 1/10 000 a été dressé pour la presqu'île de Brøgger, antérieur à 1990, mais nous n'avons pas eu accès à ces documents.

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

glaciaires qui sont en retrait de l'arc morainique externe. Ainsi, sur le glacier Ebba en 1936 (fig. 37 a), on constate que l'accumulation de dépôts commence à prendre de l'ampleur.

La mission de 1956 livre également des photographies en vue oblique aérienne mais nous ne disposons que d'un seul cliché en presqu'île de Brøgger pour le glacier Edith (fig. 37 c). C'est pourquoi nous avons préféré utiliser la collection de photographies verticales de 1960.

- **Photographies aériennes verticales noir et blanc**

Plusieurs campagnes de photographies noir et blanc en vue verticale, ont été effectuées entre 1948 et 1988, chacune avec un plan de vol différent. En conséquence, toutes les zones n'ont pas été couvertes en même temps, à chaque fois.

La première mission de 1948 concerne les secteurs occidentaux du Spitsberg dont la côte nord de la presqu'île de Brøgger et les sites des glaciers Lovén (fig. 37 b). Il faudra attendre 1960 et 1961 pour disposer de nouveaux clichés de ce secteur. De même, la marge du glacier Ebba, en baie de Pétunia, n'est photographiée qu'à partir de 1961 (1/40 000 ; fig. 37 d).

La mission de 1966 couvre l'ensemble du Spitsberg au 1/50 000. Nous disposons de clichés dans le Kongsfjord pour les sites proglaciaires des glaciers Blomstrand et Lovén (fig. 37 e). La marge du glacier Ebba, en baie de Pétunia, est également couverte, mais comme la date est très proche de la précédente de 1961, son intérêt est limité pour caler notre chronoséquence.

En 1969, la presqu'île de Brøgger a fait l'objet d'une nouvelle campagne de prises de vues verticales au 1/50 000. Seule, la photographie couvrant la marge de l'Edith est acquise pour pallier le manque de clichés de la mission précédente. Trois autres missions aériennes se succèdent en 1970 au 1/17 000 (fig. 37 f), en 1971 au 1/20 000, et en 1977 au 1/50 000. En raison de leurs dates très rapprochées, nous n'en avons pas fait une exploitation systématique.

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

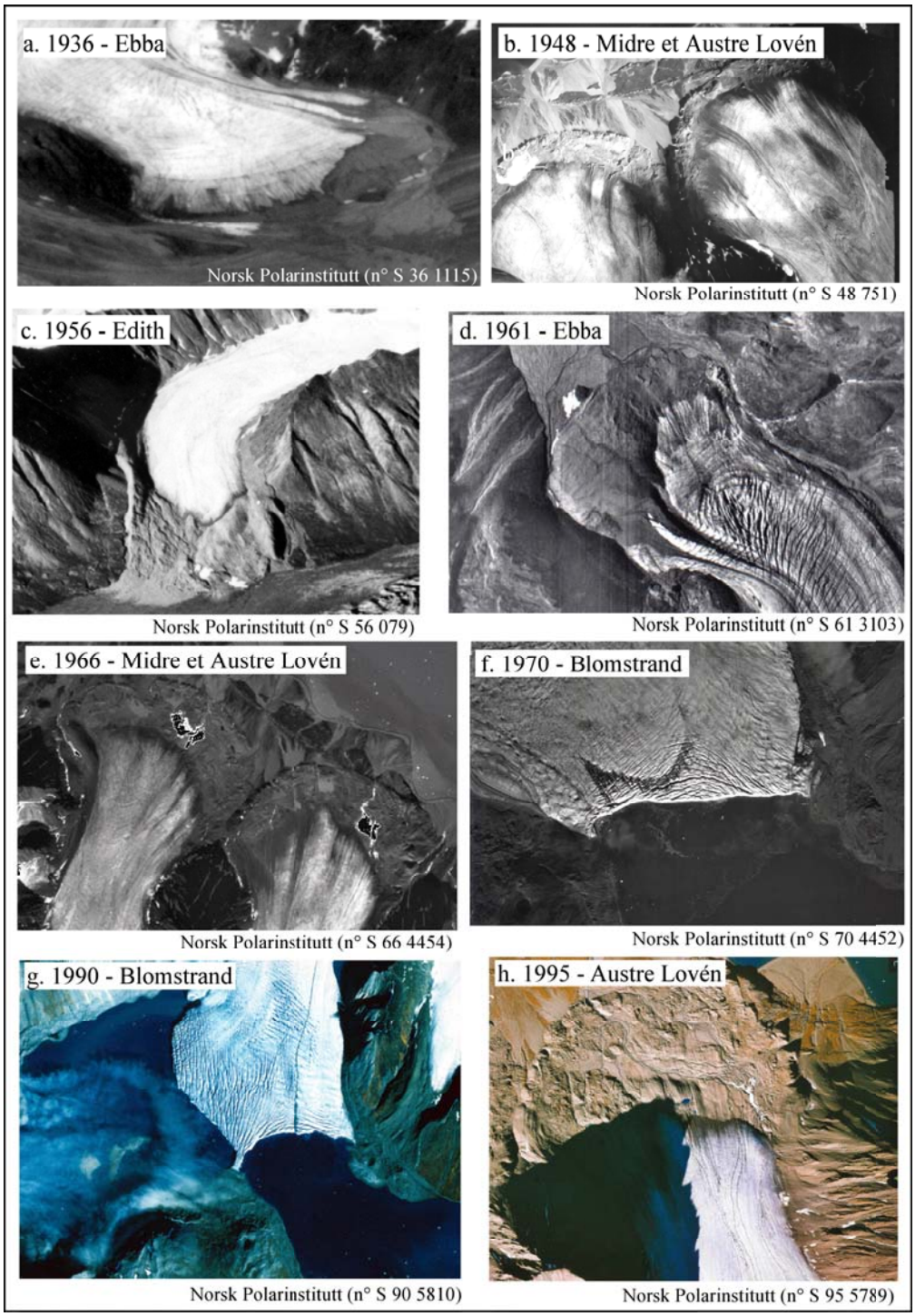


Fig. 37 – Extraits des photographies aériennes du Norsk Polarinstitutt.

- **Photographies aériennes verticales infrarouges**

Avec les dernières missions aériennes du Norsk Polarinstitutt, des photographies couleur et infrarouge en vue verticale ont été réalisées. La première série au 1/50 000 date de 1990. Le cliché du glacier Edith est inutilisable en raison d'une couverture nuageuse trop importante. La photographie du glacier Blomstrand illustre le problème

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

du temps couvert rendant l'image partiellement inexploitable (fig. 37 g). La photographie du glacier Austre Lovén fait apparaître une autre difficulté, celle due aux ombres projetées (fig. 37 h). En 1993 et en 1995, deux autres séries infrarouge ont été réalisées au 1/50 000, mais on ne les a pas exploitées en raison du temps très court qui les sépare de 1990, date pour laquelle nous disposions déjà de la couverture.

Au total, après analyse critique des photographies disponibles, nous nous sommes référée à deux dates de prises de vues, 1960 et 1990, pour couvrir nos cinq sites sauf dans le cas du glacier Edith où nous avons utilisé une image satellite de 1990, pour pallier l'absence de photographie aérienne de cette époque.

1.1.3. Les images satellites

Nous disposons de deux images satellites couvrant les marges proglaciaires étudiées. La région du Kongsfjord est couverte par une image SPOT XS du 27 juillet 1988 (fig. 38) et celle de la baie de Pétunia par une image ASTER du 3 août 2002.

Classiquement, les données spectrales des images satellites (ou celles des photographies aériennes infrarouge) sont exploitées pour la cartographie de l'occupation du sol et notamment de la végétation (D.A. Stow *et al.*, 1994 ; S. Spjelkavik, 1995 ; L. Nilsen *et al.*, 1999 ; CAVM Team, 2003 ; K.J. Ranson, 2004). Comme le montre la figure 38, sur les espaces stables, les zones couvertes par la végétation sont particulièrement visibles et aisées à délimiter. En revanche, la végétation n'est pas observable aussi directement dans les marges proglaciaires en raison d'une biomasse trop faible pour avoir une incidence mesurable par la radiométrie.

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

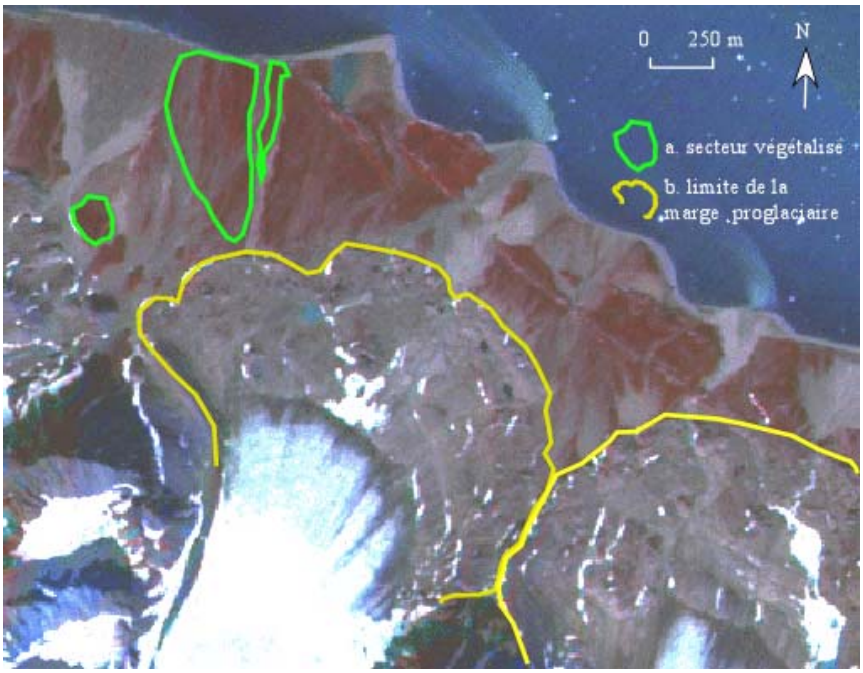


Fig. 38 – Limites de l'utilisation de l'image SPOT comme support cartographique dans les secteurs récemment déglacés *(d'après l'image SPOT XS du 27 juillet 1988). Sur les anciens niveaux glacio-marins, la végétation apparaît clairement sur l'image satellite (a). Dans la marge proglaciaire, il n'y a aucun secteur végétalisé qui se démarque. Or il existe bien une couverture végétale, mais elle est trop clairsemée pour être mesurée.*

Grâce aux documents rassemblés, nous avons pu cartographier les fronts et dater certaines phases de retrait équivalentes pour les différents glaciers (fig. 39). Les photographies aériennes (verticales) choisies ont été orthorectifiées pour permettre des comparaisons sur des bases solides.

1.2. Les données thématiques

Sur les marges proglaciaires, la reconquête végétale est tributaire des contraintes géomorphologiques, géologiques et microtopographiques propres à chacune des cinq marges proglaciaires. Des sources d'informations variées sont disponibles pour chacun de ces secteurs. Voyons la contribution que celles-ci apportent à notre étude.

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

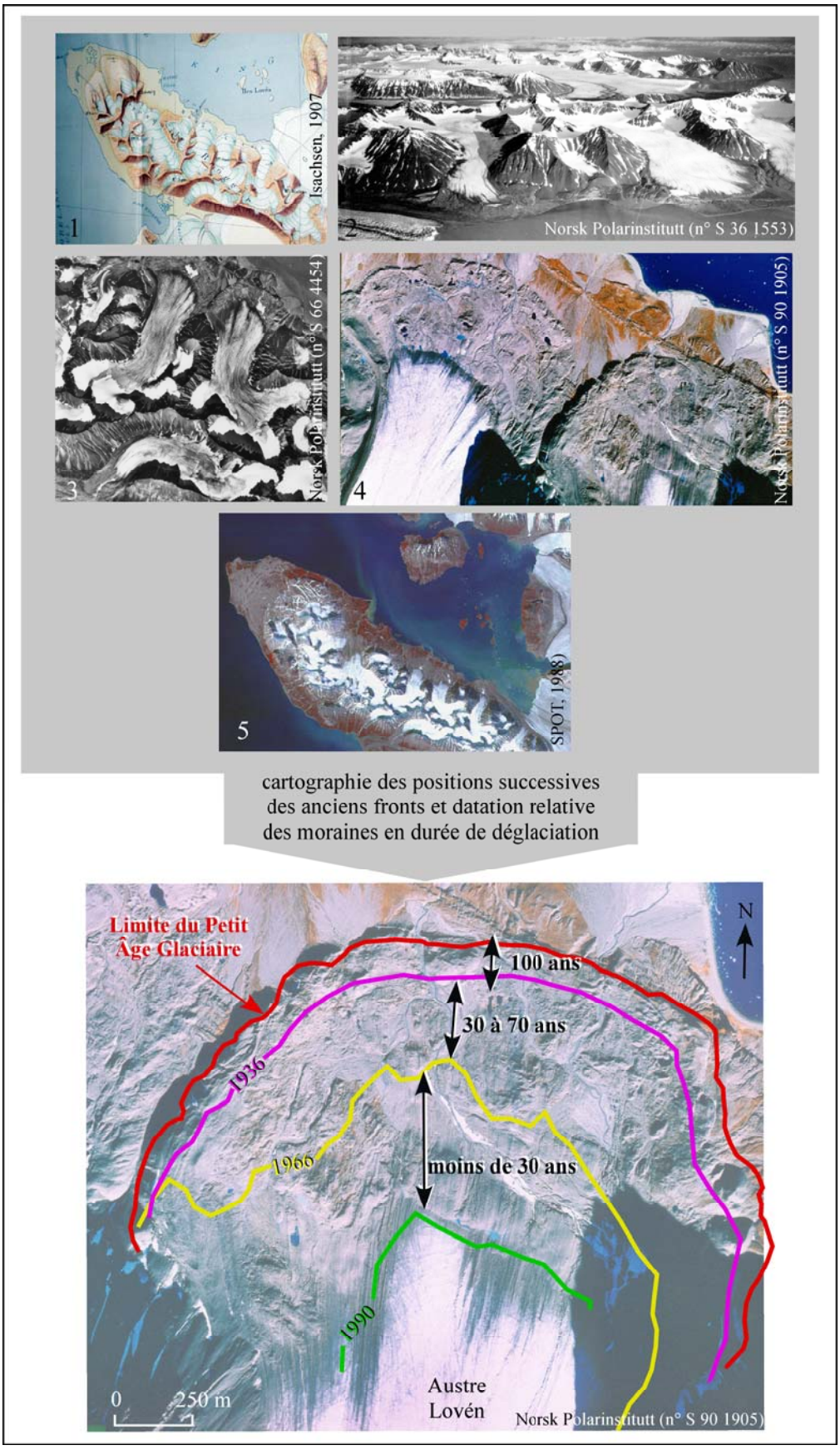


Fig. 39 - Données exogènes utilisées pour reconstituer la chronologie du recul glaciaire et la datation relative des dépôts morainiques.

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

1.2.1. Cartes géomorphologiques

Les cartes géomorphologiques dont nous disposons couvrent la presqu'île de Brøgger. Il n'existe pas de tels documents pour la baie de Pétunia. La première carte géomorphologique, dite de reconnaissance (fig. 40 a), a été réalisée en 1966 par F. Joly (1970). Elle couvre l'ensemble de la presqu'île de Brøgger au 1/50 000. Le fond de carte est un agrandissement du fond topographique au 1/100 000 (A7 Kongsfjorden) de 1961. Les principaux modelés issus de l'activité périglaciaire et glaciaire sont représentés. La carte couvre les marges des glaciers Lovén et Edith, cependant le recul glaciaire en 1961 n'a laissé à découvert que peu de moraine. Aussi, les détails géomorphologiques des secteurs déglacés sont peu renseignés.

J. Tolgensbakk et J.L. Sollid (1987) ont réalisé un ensemble de cartes géomorphologiques au 1/10 000 couvrant l'ensemble de la presqu'île de Brøgger. Mais nous ne disposons que de la carte de la pointe de la presqu'île (Kvadehuk).

Th. Brossard (1991) a présenté une carte géomorphologique au 1/2 000 du secteur aval des glaciers Austre et Midre Lovén datant de 1977 (fig. 40 b). Elle a été réalisée à partir d'une photographie aérienne de 1977. Le document détaille les reliefs liés à la structure géologique, les modelés induits par l'activité périglaciaire et glaciaire et ceux liés à l'hydrologie. La carte donne une image de la complexité des formes rencontrées à l'intérieur des secteurs déglacés. Il s'agit d'un espace dynamique où les dépôts sont remaniés par le ruissellement. Depuis 1977, l'espace proglaciaire s'est considérablement agrandi et la carte n'offre qu'une vision partielle de ce que sont les marges proglaciaires actuelles.

Au total, les cartes géomorphologiques disponibles ont surtout un intérêt documentaire qui peut servir à préciser le cadre de notre étude. Leur format et leur précision ne permettent pas de les intégrer dans le dispositif méthodologique que nous envisageons.

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

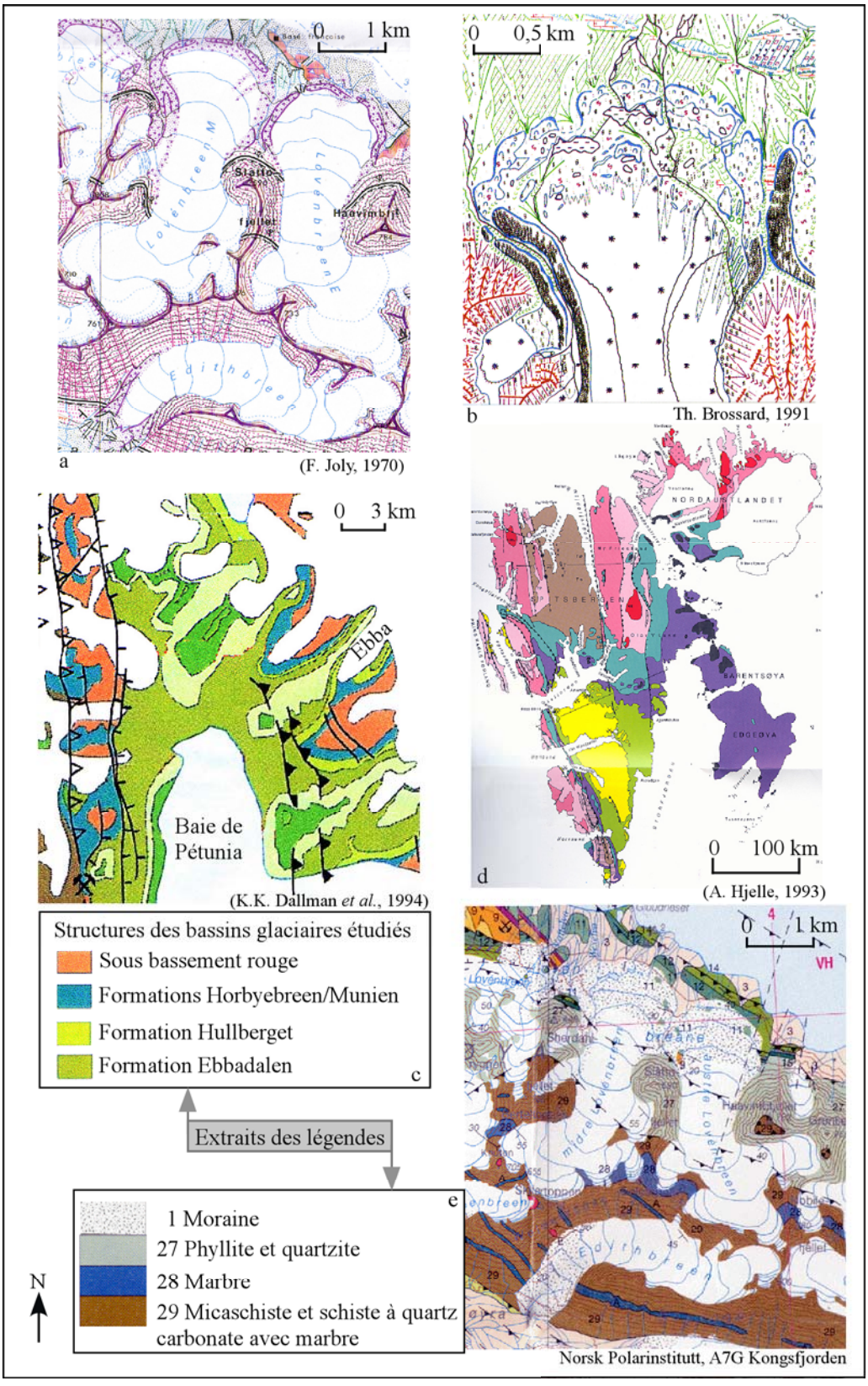


Fig. 40 – Extraits des cartes géomorphologiques (a, b) et géologiques (c, d, e) du Svalbard. *(a) carte géomorphologique de la presqu'île de Brøgger (1/50 000) ; (b) carte géomorphologique des secteurs aval des glaciers Lovén ; (c) extrait de la carte géologique préliminaire de la baie de Pétunia (1/250 000) ; (d) carte géologique générale du Svalbard (1/2 000 000) ; (e) carte géologique détaillée de la presqu'île de Brøgger de1999 (1/100 000).*

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

1.2.2. Cartes géologiques

La carte géologique générale du Svalbard (1/2 000 000) élaborée par A. Hjelle (1993) caractérise les grands ensembles structuraux des différents secteurs de l'archipel (fig. 40 d). Elle pose le cadre général dans lequel s'intègrent les sites proglaciaires étudiés. Les informations fournies sont insuffisantes pour appréhender dans le détail les formations géologiques qui constituent les bassins versants des glaciers.

Des cartes géologiques plus détaillées existent. Pour la baie de Pétunia, nous disposons d'une version préliminaire (K.K. Dallman *et al.*, 1994) au 1/250 000 (C7G Dicksonfjorden ; fig. 40 c), qui localise les principales formations géologiques composant le cadre structural de la baie, incluant les bassins glaciaires.

L. Barbaroux (1970) avait dressé une carte géologique pour la presqu'île de Brøgger mettant en place les grands ensembles structuraux. Pour le Kongsfjord, une carte géologique de 1999 (fig. 40 e), au 1/100 000, détaille la partie nord du fjord incluant le site proglaciaire du glacier Blomstrand et l'ensemble de la presqu'île de Brøgger (A. Hjelle *et al.*, 1999). Les formations superficielles, dont les moraines, sont cartographiées, mais sans précisions sur le substrat rocheux et sur la composition pétrographique du matériel morainique. Ce type d'informations impossibles à cartographier au 1/100 000 fera l'objet d'observations complémentaires *in situ*.

1.2.3. Modèles Numériques de Terrain

Un modèle numérique de terrain (MNT) a été élaboré par le Norsk Polarinstitutt pour l'ensemble de la presqu'île de Brøgger à partir des couples stéréoscopiques de 1990 avec une résolution de 20 × 20 mètres et une précision en altitude estimée entre 3 et 5 mètres (fig. 41 a). Une fois encore, l'échelle et la précision de cette source de données seront utiles pour fournir des indications contextuelles mais insuffisantes pour asseoir notre protocole d'analyse des marges proglaciaires.

D'autres MNT plus précis existent pour les marges des glaciers Midre et Austre Lovén avec une résolution spatiale de deux mètres (L. Nilsen *et al.*, 1996 ; Th. Brossard *et al.*, 1998). Ils ont été dressés à partir de mesures réalisées sur le terrain. La densité des données collectées pour l'Austre Lovén est supérieure à celle du Midre Lovén, d'où une

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

meilleure précision dans la représentation des détails du relief chaotique de la moraine visible sur la figure 41 (b) où les courbes de niveau sont plus nombreuses pour la marge de l'Austre Lovén que pour celle du Midre Lovén.

La précision de ces deux MNT est sans comparaison avec celles des autres documents que nous venons de décrire (cartes topographiques et géomorphologiques, photographies aériennes, images satellites). Nous avons pu disposer de ce type de source et surtout des informations complémentaires qu'il permet de constituer sur les configurations topographiques et le climat des micro-milieux.

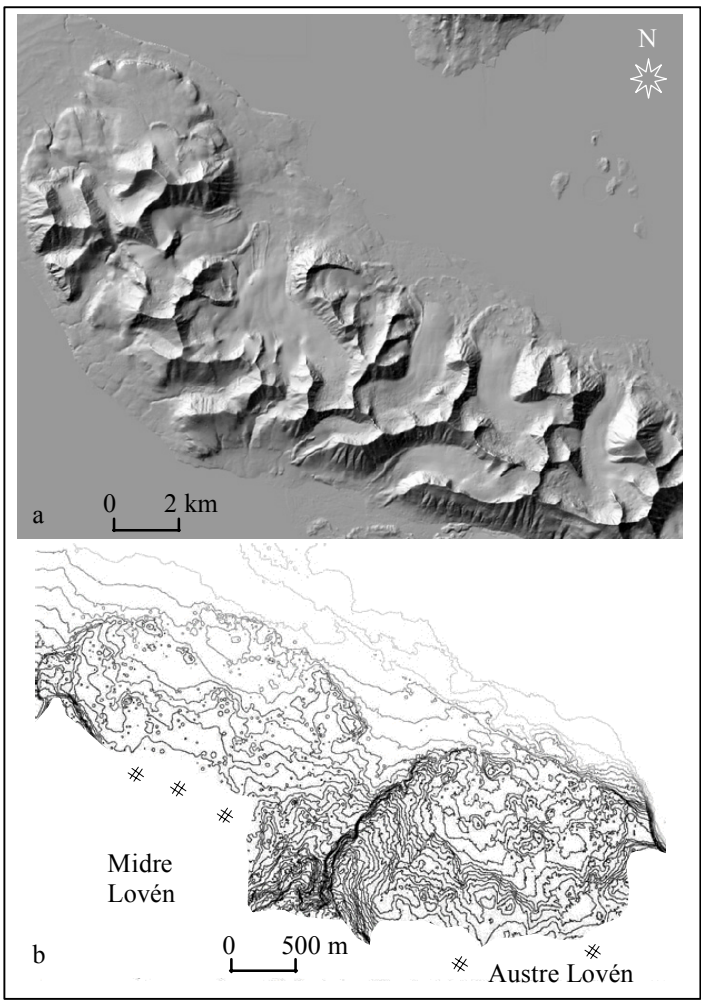


Fig. 41 – Modèles Numériques de Terrain à différents niveaux de résolution. *(a). MNT du Norsk Polarinstitutt réalisé à partir des photographies aériennes de 1990, avec une résolution de 20×20 mètres ;(b) MNT des marges des glaciers Lovén, celui du glacier Midre est dressé à partir de 4 310 points et celui de l'Austre à partir de 40 000 points.*

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

1.2.4. Données topoclimatiques dérivées du MNT

Les cartes thématiques dérivées du MNT se divisent en deux groupes : celles issues directement des informations topographiques et celles couplant les informations topographiques avec des données climatologiques (fig. 42). Toutes ces cartes ont été réalisées en collaboration avec Th. Brossard et D. Joly, du laboratoire ThéMA de Besançon, et D. Laffly, du laboratoire SET de Pau. On retrouve les références utiles pour compléter ce qui suit dans R. Fury et D. Joly, 2003 ; D. Joly *et al.,* 1999 ; Th. Brossard *et al.*, 2002.

Les informations topographiques comme l'altitude, la pente, l'orientation, les modelés sont directement tirées du MNT. Elles sont présentées sous forme de couches numériques dont la figure 42 présente les résultats cartographiques.

Concernant le climat, un réseau de 50 capteurs thermiques (data loggers HOBO[1]) a été mis en place en 1999 sur les marges des glaciers Lovén et leur piémont (fig. 42). Les températures ont été mesurées « sous abri » à 20 cm au-dessus du sol, toutes les six minutes, du 11 juillet au 8 août 1999. Une méthode d'interpolation de températures à échelle fine a restitué les 240 enregistrements thermiques quotidiens à résolution spatiale de deux mètres. Parallèlement, deux stations météorologiques standard (CR2M) mesurent la température et la vitesse du vent à deux mètres de hauteur. À partir des données collectées ont été calculés et cartographiés, sur le support spatial du MNT, les vents et les températures (températures minimales, maximales et moyennes). Le rayonnement global est obtenu à partir d'un modèle de radiation solaire directe et diffuse incluant les éphémérides (au solstice d'été) et l'altitude (fig. 42).

1.3. Cartes de la végétation

Comme nous le soulignons dans le chapitre 1, la flore du Svalbard est connue et l'inventaire de la végétation a été conduit dans le cadre de plusieurs travaux (O.I. Rønning, 1996 ; R. Elven et A. Elvebakk, 1996) et a donné lieu à différentes couvertures cartographiques (O.I. Rønning, 1996 ; A. Elvebakk, 1997 ; CAVM, 2003).

[1] HOBO H8 ProTemp/external logger 64kb de mémoire avec un capteur externe.

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

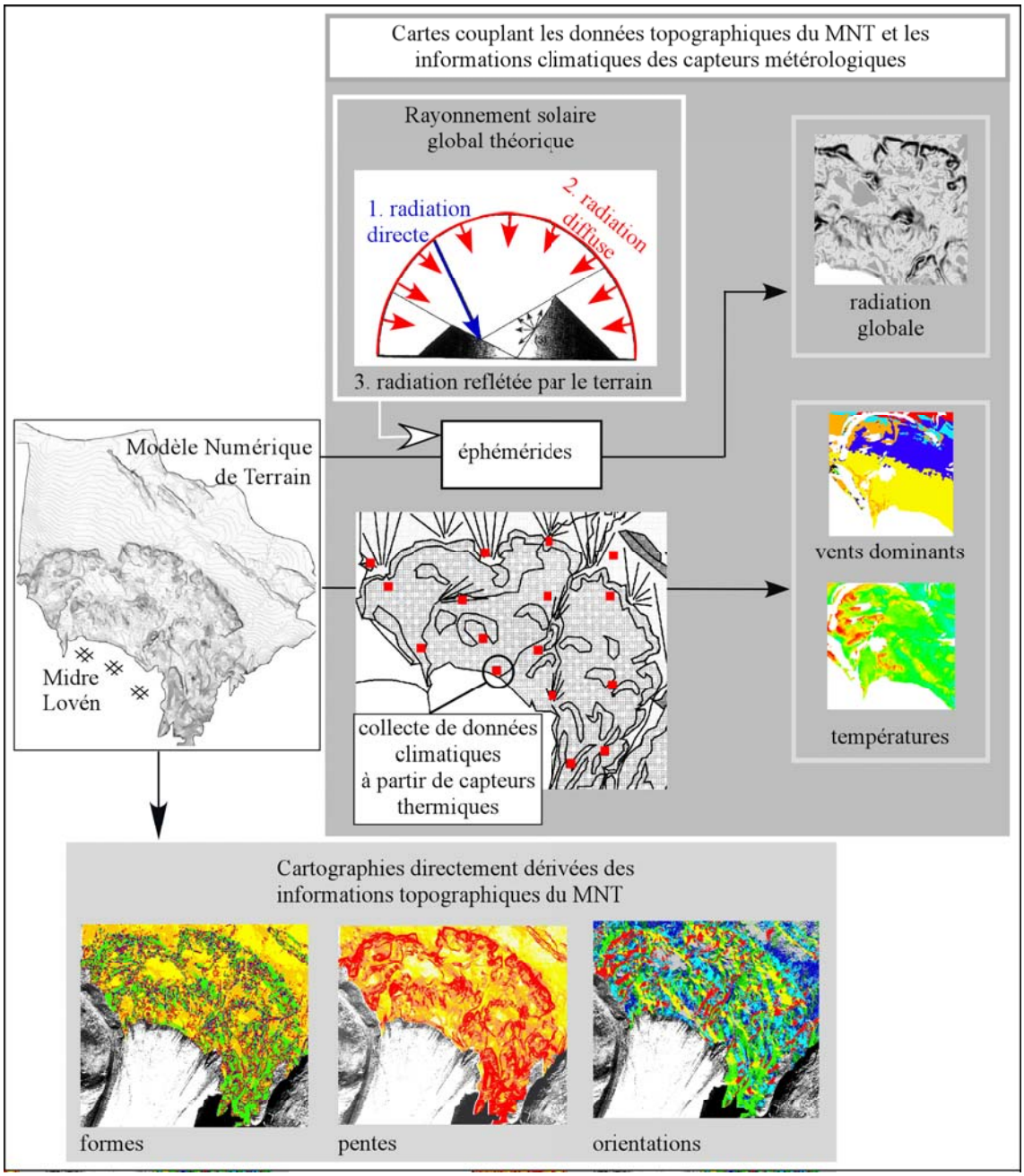


Fig. 42 – Types de cartes thématiques dérivées des données du MNT pour la marge du glacier Midre Lovén. *Deux catégories de cartes sont tirées des informations fournies par le MNT : les cartes de modelés, pentes et orientations ; les cartes couplant données topographiques et climatiques (vents, températures).*

1.3.1. Cartographie générale de la végétation du Svalbard

O.I. Rønning (1996) a publié une carte générale de la végétation du Svalbard au 1/1 000 000 (fig. 43), qui accompagne l'ouvrage publié la même année. O.I. Rønning distingue la végétation de la région du Moyen Arctique de celle du Haut Arctique, chaque région étant elle-même divisée en deux sous-zones. Les quatre « zones » de végétation ainsi définies sont désignées en fonction de l'espèce végétale qui est la plus

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

représentée parmi les groupements floristiques. Pour la région du Moyen Arctique, O.I. Rønning reconnaît une zone à *Cassiope tetragona*, concentrée dans l'intérieur des fjords, et une zone à *Dryas octopetala* localisée principalement sur les façades ouest. Dans la région du Haut Arctique, qui concerne les îles de l'est de l'archipel, O.I. Rønning distingue une zone à *Salix polaris* et une autre à *Papaver dahlianum.*

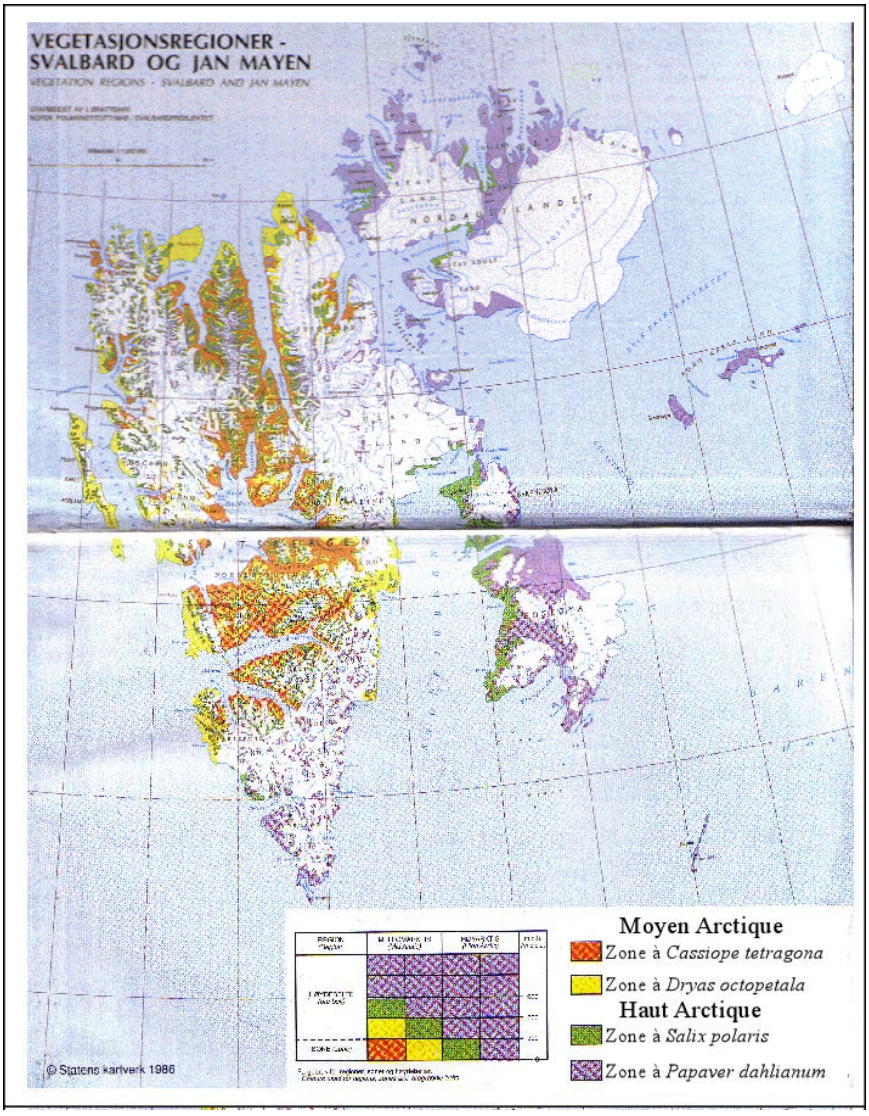


Fig. 43 – Carte de la végétation du Svalbard et de Jan Mayen (1/1 000 000 ; O.I. Rønning, 1996).

Dans la lignée des travaux de O.I. Rønning, A. Elvebakk (1997) a proposé une carte générale de la végétation, à la même échelle, divisée en zones dites bioclimatiques dont le contenu a été détaillé dans le chapitre 1. L'auteur insiste sur le lien entre la végétation et les conditions climatiques régionales. On y retrouve les découpages précisés plus

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

haut, mais les zones sont dénommées selon la physionomie de la formation végétale et non en fonction de l'espèce végétale dominante.

La représentation la plus récente de la végétation du Svalbard est extraite de la carte de la végétation circumpolaire arctique au 1/7 500 000 (CAVM, 2003) que nous avons présentée dans l'introduction générale. La végétation est ici découpée en zones bioclimatiques à l'intérieur desquelles sont différenciées des unités végétales. Les nuances sont contrôlées par les températures et les conditions édaphiques (humidité ou sécheresse). Au total, sept ensembles végétaux sont définis au Svalbard : secteur dénudé à cryptogames, secteur de nunataks (sans végétation), toundra à cryptogames, toundra à herbes et graminées, toundra herbeuse à arbrisseaux prostrés, toundra à arbrisseaux prostrés et semi-prostrés, zone humide à mousses et *Carex*.

Pour chacune des cartes générales de la végétation, les conditions environnementales sont introduites en vue de la différenciation des unités paysagères : d'abord les températures puis les conditions édaphiques qui contrôlent la répartition du couvert végétal. Les cartes générales rendent compte de la localisation des ensembles floristiques dans l'archipel et des conditions environnementales régionales dans lesquelles se trouvent les sites proglaciaires. Néanmoins, ces supports ne sont pas assez précis dans le cadre d'une approche locale de la végétation intramorainique.

1.3.2. Cartes détaillées de la végétation

Nous ne disposons d'une carte détaillée de la végétation que pour la presqu'île de Brøgger. Elle a été réalisée par I. Brattbakk (1981) au 1/10 000. De façon relativement précise, elle indique l'emplacement des groupements et leur étendue sur les anciens niveaux de plages (fig. 44 a). La carte est un document appréciable pour la connaissance des plantes composant la toundra et la localisation des zones végétalisées. Cependant, la légende ne développe pas le détail des espèces qui sont regroupées dans les associations végétales cartographiées. La carte est peu précise pour les secteurs morainiques où seul un groupement végétal est mentionné. Aucune nuance floristique n'est apportée pour distinguer les formations végétales et leur composition floristique en fonction de l'âge des dépôts. Pourtant, la durée de déglaciation entraîne de telles distinctions (M. Moreau, 2003 b). Par ailleurs, il n'y a pas de séparation à l'intérieur de l'espace morainique entre les secteurs stables et ceux affectés par le ruissellement, alors que cette nuance est cartographiée sur les anciens niveaux de plage. Le développement végétal n'est pourtant

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

pas le même entre les zones remaniées, où le couvert végétal est détruit, et celles restées en place depuis le départ du glacier (M. Moreau *et al.*, 2004).

Th. Brossard (1991) propose une carte au 1/50 000 des complexes paysagers dans la zone aval des glaciers Lovén. Elle couvre les secteurs de sandurs et les anciens niveaux de plage mais pas les espaces morainiques. Elle est très détaillée et met en évidence les relations dynamiques entre les types de modelés, les morphodynamiques et la nature du couvert végétal (fig. 44 b).

La carte de S. Spjelkavik (1995) utilise les données floristiques cartographiées par I. Brattbakk (1981) et une image satellite Landsat comme support spatial pour couvrir l'ensemble de la presqu'île de Brøgger. La couverture finale est dressée au 1/100 000, mais elle n'inclut pas les secteurs déglacés et n'apporte rien de plus que la carte de I. Brattbakk. Les mêmes données sont spatialisées, seule la méthode de cartographie change.

L. Nilsen *et al.* (1996) proposent une carte des communautés de plantes pour le secteur en aval du glacier Midre Lovén, du front du glacier jusqu'aux eaux du fjord (fig. 44 c). Huit communautés ont été localisées à partir de relevés de terrain, d'informations dérivées du MNT et d'une photographie aérienne infrarouge. Un modèle empirique de probabilités a été utilisé pour généraliser l'information collectée ponctuellement sur l'ensemble des surfaces. Les limites de la méthode employée sont atteintes pour les secteurs morainiques où se trouvent spatialisées, au front du glacier, des communautés improbables : *Luzulion arcuatae* avec des taux de recouvrement de 70 % à 90 %. Compte tenu du caractère extrêmement juvénile des surfaces, l'extrapolation cartographique est incorrecte dans les secteurs déglacés car elle applique les caractéristiques de milieux anciens aux environnements juvéniles. Les auteurs soulignent ce problème en conclusion : *when adding the additional information from the DEM the model does not performe satisfactorily for areas containing unstable and scattered vegetation such as recently deglaciated moraines. This problem can be solved by incorporing the time factor in the model.*

Sur les mêmes principes de cartographie, L. Nilsen *et al.* (1999) dressent une carte de la végétation de la presqu'île de Brøgger à partir de l'image SPOT de 1988. À l'aide d'une

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

classification et de modèles de probabilités, ils distinguent 19 communautés végétales y compris dans les espaces déglacés. Comme précédemment, il apparaît que l'information spatialisée dans les secteurs morainiques n'est pas en accord avec la réalité du terrain. Il est nécessaire d'introduire les paramètres temporels qui sous-tendent les successions végétales qui se mettent en place sur les dépôts récemment déglacés.

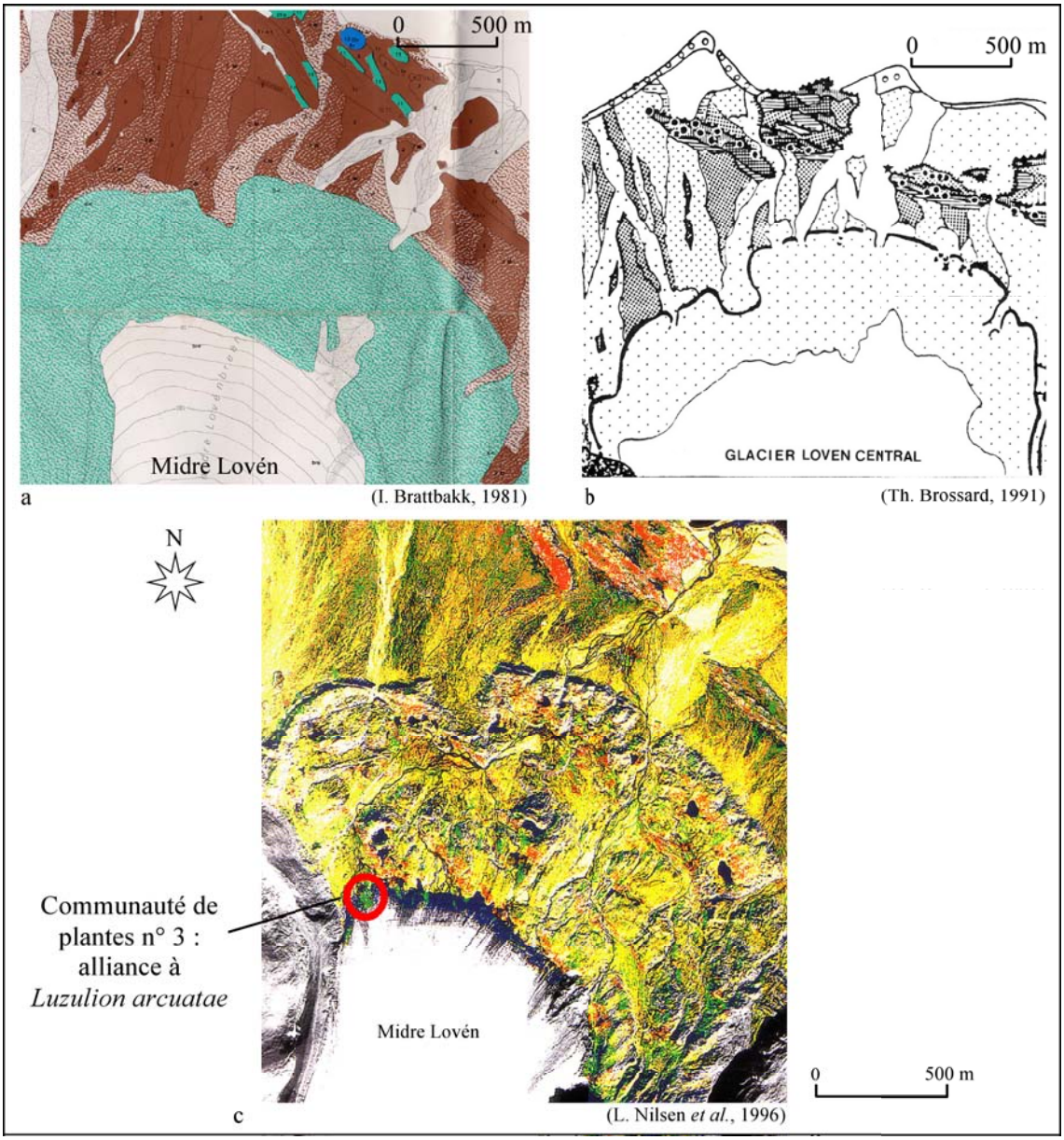


Fig. 44 – Extraits des cartes détaillées de la végétation couvrant les secteurs à l'aval du glacier Midre Lovén. *(a) carte Lovénoya (1/10 000) ; (b) carte des faciès paysagers (1/50 000). Ces deux cartes ne distinguent pas de structures paysagères dans l'espace morainique. (c) cartes des communautés de plantes probables.*

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

				Sites proglaciaires					Intérêt du document	
Données exogènes	Année	Echelle	Référence	Blomstrand	austre Lovén	midre Lovén	Edith	Ebba	indicatif	chronologie
Cartes topographiques	1907	1/200 000	nord-ouest Spitsberg	*	*	*	*		*	
	1961	1/100 000	A7 Kongsfjorden		*	*	*		*	
	1987	1/100 000	A6 Krossfjorden	*					*	
	1988	1/100 000	C7 Dicksonfjorden					*	*	
	1990	1/100 000	A7 Kongsfjorden		*	*	*		*	
	2004	1/100 000	A7 Kongsfjorden		*	*	*		*	
Photographies aériennes obliques	1936		S 36 1552 S 36 1115		*	*		*	*	
	1956		S 56 079				*			
Photographies aériennes verticales	1948									
	1961	1/40 000	S 61 3103					*		*
	1966	1/50 000	S 66 4452 S 66 4454	*	*	*				*
	1969	1/50 000	S 69 1400				*			*
	1970	1/17 000								
	1971	1/20 000								
	1977	1/50 000								
	1990	1/50 000	S 90 5810 / 5789 / 1905	*	*	*		*		*
	1993	1/50 000								
	1995	1/50 000								
Images satellites	1988		Spot XS (22 juillet 1988)				*			*
	2002		Aster (3 août 2002)					*	*	
Cartes géomorphologiques	1970	1/50 000	D. Joly		*	*	*		*	
	1987	1/10 000	J.Tolgensbakk et J.L.Sollid							
	1991	1/2 000	Th. Brossard		*	*			*	
	2000		Th. Brossard *et al.*			*			*	
Cartes géologiques	1993	1/2 000 000	A. Hjelle						*	
	1994	1/250 000	C7G Dicksonfjorden					*		
	1999	1/100 000	A7G Kongsfjorden	*	*	*	*			
MNT	1990	1/15 000	Norsk Polarinstitutt		*	*	*		*	
	1998		Th. Brossard *et al.*			*			*	
Cartes de la végétation générale	1996	1/1 000 000	O.I. Rønning		*	*	*	*	*	
	1997	1/2 500 000	A. Elvebakk		*	*	*	*	*	
	2003	1/7 500 000	CAVM		*	*	*	*	*	
Cartes de la végétation détaillée	1981	1/10 000	I. Brattbakk		*	*	*		*	
	1991	1/50 000	Th. Brossard		*	*			*	
	1995		S. Spjelkavik		*	*			*	
	1996		L. Nilsen *et al.*			*			*	
	1999		L. Nilsen *et al.*		*	*	*		*	

Tableau 2 – Synthèse des données exogènes disponibles consultées pour le Svalbard.

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

L'ensemble des cartes générales et détaillées de la végétation renseigne sur les formations végétales du Spitsberg. De manière assez précise, nous pouvons connaître la distribution régionale des espèces et les relations entre groupements et conditions environnementales à cette échelle. Néanmoins, aucun de ces travaux n'a abordé la cartographie du couvert végétal à l'intérieur de l'espace intramorainique. Il reste à identifier et à cartographier les groupements floristiques dans les sites proglaciaires nécessitant une collecte des données sur le terrain.

2. Collecte des données endogènes

Collectées sur le terrain, les données endogènes se rapportent au couvert végétal et aux caractéristiques mésologiques. Notre double objectif de recherche, à savoir l'établissement d'un calendrier de la reconquête végétale pour les cinq marges proglaciaires, et l'approche beaucoup plus fine de l'espace intramorainique du glacier Midre Lovén, nécessite la mise en place de deux protocoles spécifiques de collecte de l'information sur le terrain.

2.1. Les modalités régionales de la reconquête : protocole d'observation sur cinq sites

La nature physico-chimique du substrat peut induire une sélection des espèces en fonction, par exemple, de leur affinité calcicole[1] ou calcifuge[2] (*cf.* chap. 1). Il était donc indispensable d'accompagner les observations de la végétation de relevés pétrographiques *in situ*. Nous cherchions ainsi à évaluer si des différences lithologiques au sein des débris morainiques pouvaient être un facteur discriminant pour la végétation dans les stades pionniers.

[1] Calcicole : se dit d'un groupement localisé principalement ou uniquement sur substrat à forte teneur en calcium.
[2] Calcifuge : se dit d'un groupement qui ne supporte pas les substrats à forte teneur en calcium.

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

2.1.1. Nature pétrographique des marges proglaciaires

Nous avons choisi d'échantillonner différents secteurs de l'espace intramorainique, des plus jeunes aux plus anciens. L'échantillonnage était réalisé le long d'un transect pris dans l'axe du glacier (fig. 45). Le long du cheminement défini, des postes de relevés étaient répartis et espacés tous les 100 mètres. Seuls quatre sites sur cinq, proches de la base J. Corbel, ont été échantillonnés à savoir, les marges des glaciers Midre et Austre Lovén, Blomstrand, Edith.

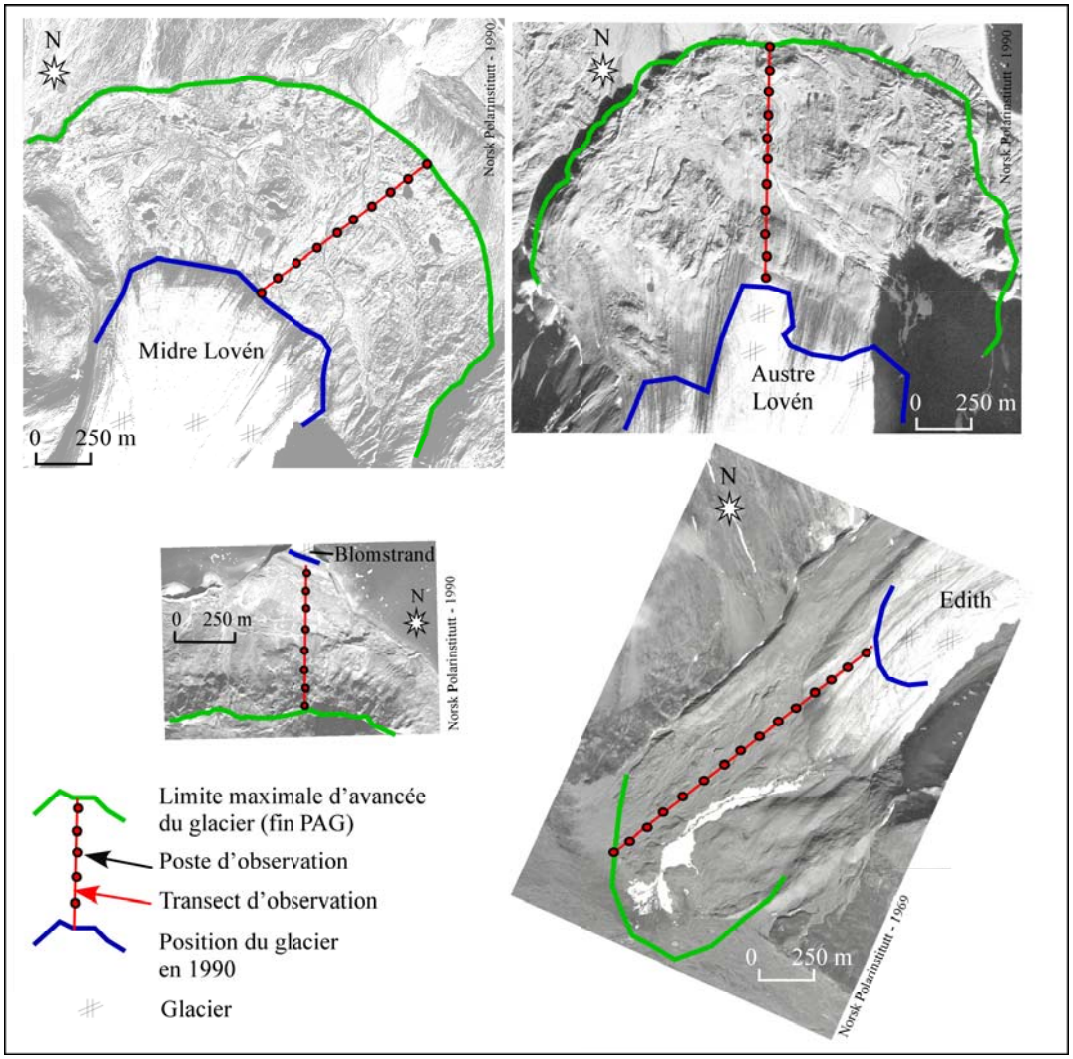


Fig. 45 - Distribution des postes de relevés pétrographiques à l'intérieur des marges proglaciaires.

À chaque poste de relevé, un échantillonnage de second ordre, toujours de type linéaire, a été réalisé. Il consistait à compter le long d'un axe de cinq mètres, matérialisé sur le terrain par une ficelle, les contacts avec les roches (fig. 46). Chaque élément ainsi repéré

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

a été identifié et comptabilisé. L'axe d'observation a été orienté empiriquement, au mieux de la configuration des lieux, pour obtenir l'information pétrographique souhaitée, ce qui impliquait par exemple d'éviter les secteurs composés de fines exclusivement. En moyenne, une centaine d'éléments rocheux a été ainsi recensée par relevé.

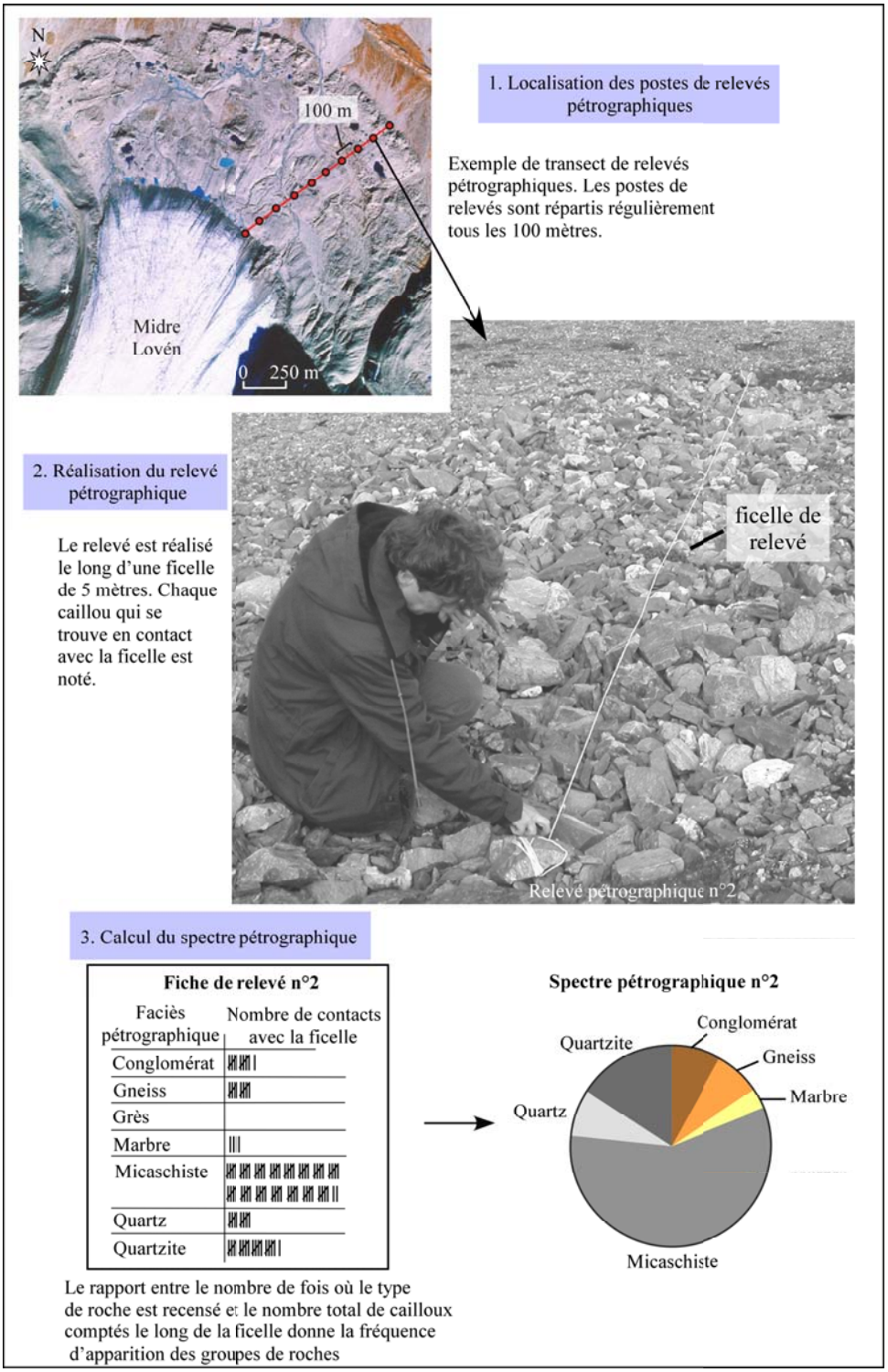


Fig. 46 – Méthode d'échantillonnage des faciès pétrographiques à l'intérieur de la marge du glacier Midre Lovén.

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

Le relevé linaire permet d'estimer la fréquence d'apparition de chacune des roches. Les résultats des relevés ont montré une grande homogénéité pétrographique des débris morainiques à l'intérieur de chaque site proglaciaire, souvent de nature acide liée à la domination des micaschistes, quartz et quartzites. À notre niveau d'observation et vu l'homogénéité du matériel morainique, nous avons considéré que lors des relevés de végétation, il n'était pas nécessaire de procéder parallèlement à un relevé pétrographique. Précisons que, faute de temps, nous n'avons pas pu faire un inventaire plus complet en prospectant plusieurs transects par glacier.

2.1.2. Collecte des données floristiques

Pour observer la végétation, il nous fallait en tout premier lieu définir un plan d'échantillonnage applicable aux cinq sites ; c'est la base d'un travail de terrain raisonné et il doit être cohérent avec les objectifs de recherche. M.-J. Fortin *et al.* (1989) soulignent que la méthode d'échantillonnage joue un rôle important dans la détection et la construction des configurations spatiales.

2.1.2.1. Types d'échantillonnage

Différents types de plan d'échantillonnage sont possibles et notre objectif n'est pas d'en faire l'inventaire. On peut toutefois les répartir en trois familles selon qu'ils sont aléatoires, stratifiés ou systématiques. La figure 47 regroupe et résume les principales caractéristiques de ces plans. Le choix du plan d'échantillonnage est effectué en fonction des objectifs de recherche, des contraintes spatiales du terrain et de temps imparti pour la prospection *in situ*.

- Le plan d'échantillonnage **aléatoire** consiste à prélever au hasard et de façon indépendante *n* unités d'une population de N éléments (fig. 47). Ainsi, chaque élément de la population statistique a la même probabilité *a priori* d'être pris en considération dans l'échantillon (A. Buttler, 1998). Les résultats de l'échantillonnage aléatoire induisent souvent, comme le soulignent A. Hirzet et A. Guisan (2002), de fortes disparités de concentration des unités. La figure 47 illustre le risque d'avoir des secteurs vides et d'autres plus couverts par les unités.

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

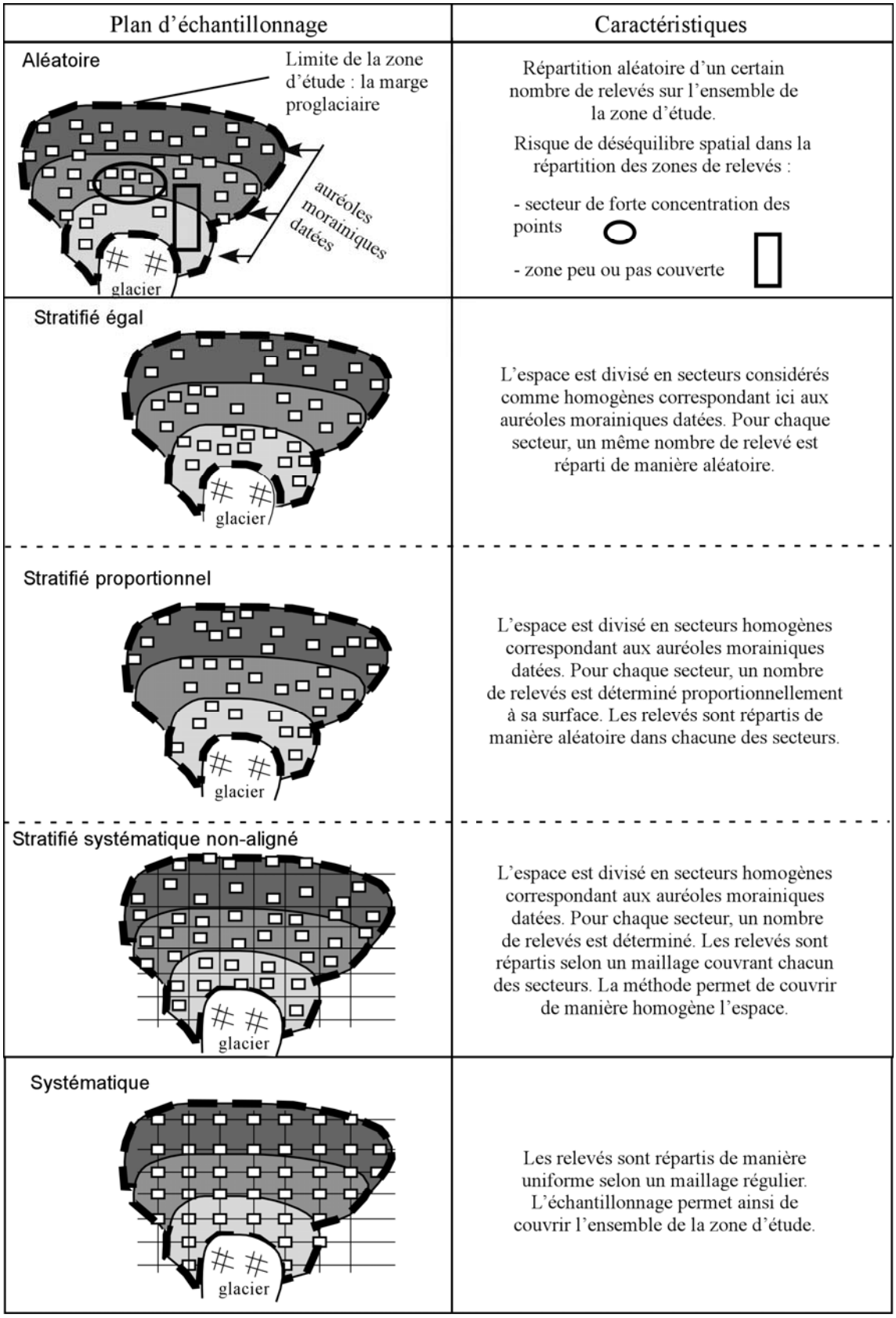


Fig. 47 – Schémas théoriques de plans d'échantillonnage appliqués à l'espace intramorainique.

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

Le tirage aléatoire, sans contrainte spatiale, peut donc induire des distorsions gênantes dans notre appréhension des marges proglaciaires. De plus, comme le soulignent M.-J. Fortin *et al.* (1989), l'inconvénient majeur de l'échantillonnage aléatoire est qu'il est souvent difficile de le mener sur le terrain parce que le positionnement des points définis *a priori* peut être délicat si l'on ne dispose pas de moyens de repérage appropriés. D'autre part, G. Long (1974) note que le couvert végétal est régi dans sa distribution pas des relations d'ordre entre des unités qui se jouxtent. Une localisation strictement au hasard peut rendre laborieux le repérage de ces relations d'ordre et, par conséquent, entraîner des complications dans l'interprétation des données. Ainsi, ce type d'échantillonnage convient quand la surface est considérée comme isotrope, cas de figure plutôt rare dans le domaine qui nous occupe.

- La méthode d'échantillonnage **stratifié** consiste à subdiviser une population hétérogène en sous-populations ou « strates » plus homogènes (A. Buttler, 1998). Dans un cadre biogéographique, nous préférons utiliser le terme de secteur à celui de strate. Un tirage aléatoire de stations est réalisé au sein de chaque secteur. Le nombre de points par secteur est soit **proportionnel** à la surface de chaque secteur, soit **égal** pour tous les secteurs (A. Hirzet et A. Guisan, 2002 ; fig. 47). Les secteurs doivent être définis dans leur limite en fonction d'une connaissance *a priori.* Dans notre cas, les secteurs seront définis en fonction d'un critère d'âge, ce qui reviendra à caler ceux-ci sur les différentes auréoles de déglaciation. La méthode convient aux objectifs de notre travail mais implique la définition préalable des secteurs. La connaissance empirique interfère ici avec la rigueur statistique. Pour avoir une couverture uniforme de l'espace par le plan d'échantillonnage et éviter les vides que peut générer une distribution aléatoire, M.-L. Keersmaecker (1987) propose le sondage stratifié dit **systématique non-aligné**. La méthode consiste, selon M.-L. Keersmaecker, *à placer un maillage sur la zone analysée dont seule l'origine de ce maillage est fixée par le tirage de deux nombres aléatoires. Les autres points sont localisés à l'intersection des mailles. Les propriétés de tirages aléatoires et indépendants ont disparu. Mais il arrive que les régularités de la zone coïncident avec l'orientation du maillage. Pour ne pas connaître ce désavantage, il faut se*

tourner vers le sondage systématique mais non-aligné sur le maillage. Comme l'illustre la figure 48 (b), la méthode consiste à quadriller le terrain avec un maillage dont le nombre de mailles correspond au nombre de points désirés dans l'échantillon (fig. 48 b). Des intervalles constants sont attribués entre chaque maille établie en fonction de la taille du terrain à couvrir et du nombre de relevés choisis. Un point est placé aléatoirement dans chacune des mailles[1].

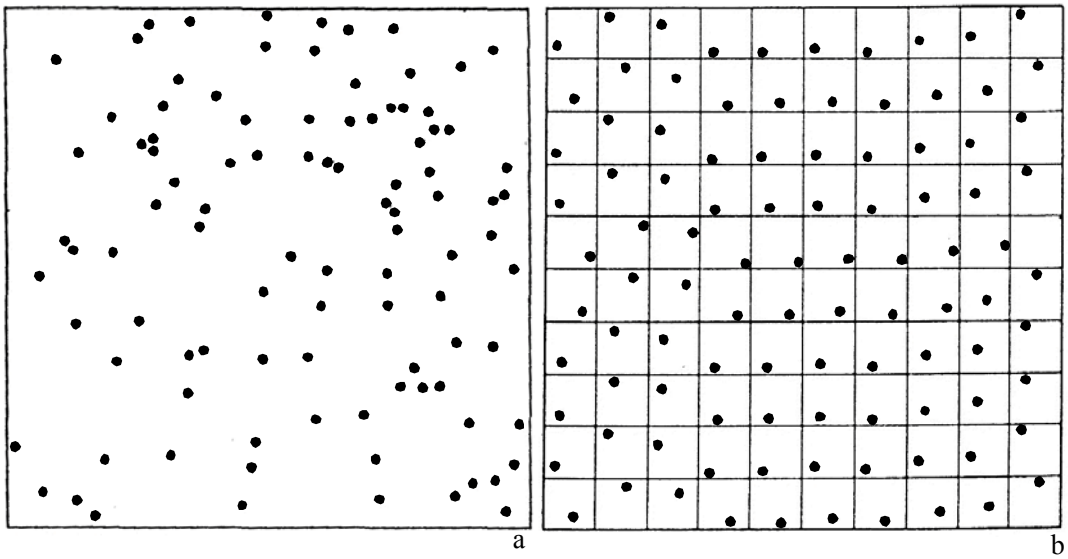


Fig. 48 - Comparaison de la distribution de 100 points selon les méthodes aléatoire simple (a) et systématique non-alignée (b) *(d'après M.-L. Keersmaecker, 1987).*

D. Laffly et D. Mercier (1999) ont testé la méthode de distribution systématique non-alignée en confrontant les différences de répartition spatiale des relevés, en fonction d'un tirage aléatoire simple et d'un tirage systématique non-aligné. Lorsque le nombre de relevés est relativement faible, les répartitions spatiales ne présentent pas de grandes différences, mais au fur et à mesure que le nombre de points augmente, les disparités se marquent. La répartition systématique non-alignée couvre mieux l'espace que la distribution aléatoire simple.

[1] Sur le territoire dont X_{min} et X_{max} représentent les coordonnées minimales et maximales dans la direction E-O et dont Y_{min} et Y_{max} les coordonnées minimales et maximales dans la direction N-S, est placé un maillage dont la dimension de la maille est liée à la formule suivante :

$$D = \sqrt{\frac{(X_{max} - X_{min})\ (Y_{max} - Y_{min})}{n}}$$

avec n = nombre de points dans l'échantillon.

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

- La méthode d'échantillonnage **systématique** consiste à définir un échantillon de *n* éléments à intervalles réguliers, le long d'un axe spatial ou temporel, à partir d'un premier point pris au hasard (A. Buttler, 1998). Comme l'illustre la figure 47, l'échantillonnage est réparti de manière uniforme sur le terrain selon un maillage. Seule, l'origine de ce maillage est fixée par le tirage de deux nombres aléatoires (M.-L. Keersmaecker, 1987). Les stations de relevés sont localisées à l'intersection des mailles et le terrain est couvert dans sa totalité. La méthode est relativement facile à mettre en pratique dans les marges proglaciaires. Par ailleurs, l'échantillonnage systématique est conduit sans contrainte spatiale et permet une meilleure couverture du terrain.

A. Hirzet et A. Guisan (2002) ont comparé les quatre méthodes d'échantillonnage (aléatoire, systématique, stratifié proportionnel, stratifié égal). Ils concluent que les échantillonnages systématique et stratifié égal sont les plus adaptés aux recherches de terrain. Nous avons opté pour l'échantillonnage systématique car il est plus facile à mettre en pratique qu'un tirage aléatoire et ne nécessite pas de connaissance préalable du terrain lors de la collecte de l'information sur le site.

2.1.2.2. Aménagement d'un plan d'échantillonnage systématique en semi-dirigé

Le plan d'échantillonnage systématique doit permettre de recenser les différents cortèges floristiques qui colonisent les moraines de chaque site. Nous avons choisi de tracer, à l'intérieur de chaque marge, un ensemble de transects qui recoupent les dépôts morainiques des plus anciens aux plus récemment déglacés dont la figure 49 regroupe les cartographies. Les transects spatiaux sont aussi temporels, puisque le cheminement s'effectue du vallum externe, datant du maximum glaciaire, jusqu'au front actuel ; quelques-uns des transects ont été prolongés à l'extérieur de la marge sur les secteurs couverts par la toundra (fig. 49). Cette formation végétale, plus ancienne que celle des moraines, pourra servir de point de comparaison avec la végétation pionnière morainique. La forme de la marge, arquée en demi-couronne, fait que les transects forment un dispositif de rayons qui divergent à partir du front glaciaire, très prononcé dans les cas de glaciers Lovén (fig. 49 c, d).

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

La localisation des transects a été choisie pour rendre possible la datation des dépôts supportant la végétation. Cela implique que les dépôts n'aient pas été remaniés ou l'aient été faiblement. Aussi avons-nous ajusté notre plan d'échantillonnage en fonction des secteurs détruits (en bleu sur la figure 49). Le réseau de transects est alors plus lâche dans les plaines proglaciaires et plus resserré sur les moraines stables. N.C. Kenkel *et al.* (1989) considèrent que les décisions d'échantillonnage doivent être dictées par les objectifs de l'étude plus que par les « principes généraux » recommandés. Nous faisons nôtre ce point de vue qui revient finalement à associer rigueur statistique et connaissance du terrain, celle-ci permettant surtout d'éviter d'inutiles détours pour asseoir des évidences.

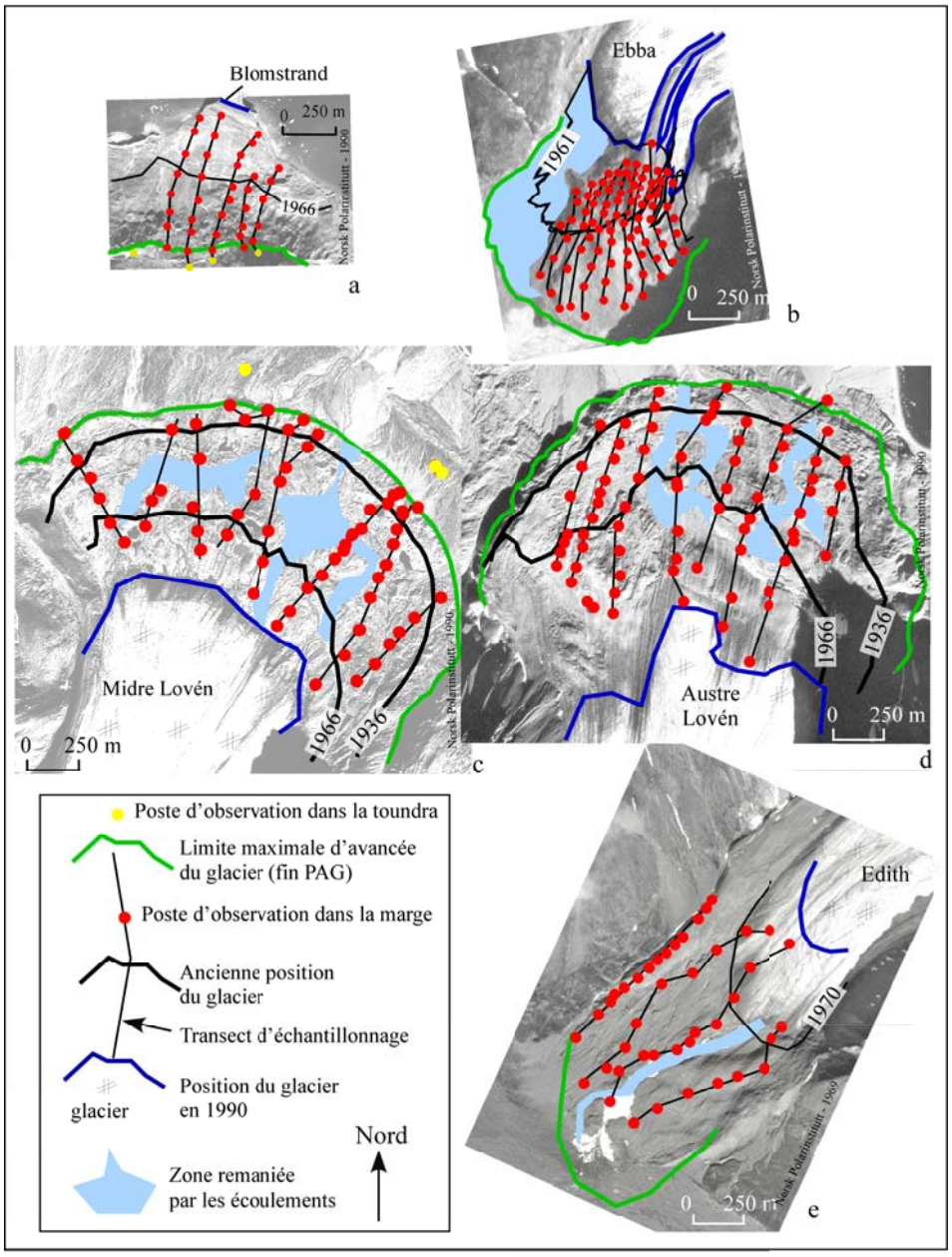


Fig. 49 – Schémas des plans d'échantillonnage suivis sur les marges proglaciaires.

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

Sur chaque site, nous avons commencé à installer le premier transect sur un bord de la marge ; puis, les transects suivants ont été répartis de manière plus ou moins régulière, selon les configurations locales. L'espacement entre les transects dépendait, d'une part, de la taille de la marge (plus celle-ci est étroite, plus les transects sont resserrés) et, d'autre part, de la répartition des dépôts stables. Ainsi, dans le cas du glacier Ebba (fig. 49 b), l'ensemble des transects était concentré dans la partie sud de la marge, la partie nord étant complètement remobilisée par les écoulements ; les transects y étaient relativement proches car ils couvraient une petite surface. À l'inverse, pour la marge du glacier Blomstrand (fig. 49 a), l'échantillonnage a été plus lâche car, en l'absence de ruissellement, l'ensemble de la marge était potentiellement à prendre en compte (cinq transects en tout).

Dans le cas des glaciers Lovén, les appareils morainiques sont beaucoup plus vastes (fig. 49 c et d), près de deux fois ceux du glacier Ebba et trois fois ceux du glacier Blomstrand. Le réseau de transects a pu être desserré. Pour chacun de ces deux sites, 8 transects ont été définis, d'une longueur moyenne de 750 mètres pour le glacier Midre Lovén, et de 1 000 mètres environ pour le glacier Austre Lovén. Du fait de la longueur et de l'étroitesse de la marge du glacier Edith, seuls quatre transects ont été tracés.

Le principe retenu d'un échantillonnage systématique semi-dirigé se traduit par une distance variable entre les stations et entre les transects. Dans le cas de la marge du glacier Ebba, du fait de sa taille modeste et de la faible colonisation par la végétation, les points d'observation étaient très resserrés et les relevés ont été réalisés relativement rapidement. Pour les marges peu remaniées des glaciers Blomstrand et Edith, le réseau était plus lâche et régulier tandis que l'importance des reprises sur les marges des glaciers Lovén a conduit à une modulation assez fine de leur plan d'échantillonnage. Au final, pour chaque transect, de 5 à 30 stations ont été positionnées et géoréférencées par GPS en vue de l'observation.

2.1.2.3. Quelle surface échantillonner ? La délimitation des aires minimales

Une fois déterminés les emplacements des stations, il a fallu définir leur taille et le protocole d'observation à suivre. Il fallait couvrir une surface suffisamment grande pour recenser les différentes espèces colonisant un secteur, mais pas trop étendue pour ne pas

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

allonger les temps d'observation et ne pas intégrer dans le même relevé des stations trop disparates. Définir la surface minimale d'observation est donc un enjeu crucial pour la poursuite du travail.

Pour y parvenir, nous avons utilisé la méthode dite de l'aire minimale pratiquée par les botanistes. R. Dajoz (2000) définit l'aire minimale comme *la plus petite surface nécessaire pour que toutes les espèces soient représentées*. Elle peut être déterminée en traçant une courbe qui représente l'accroissement du nombre d'espèces à mesure que l'on augmente la surface d'observation (fig. 50). Cette courbe a toujours la même forme (logarithmique), le nombre d'espèces croissant très vite au début, puis devenant à peu près constant. L'aire minimale est très variable selon les sites observés. Elle ne dépasse guère 2 m² dans le cas d'une pelouse dense de montagne, mais elle peut atteindre plusieurs km² dans le désert (R. Dajoz, 2000). L'aire minimale fixe une surface de référence à couvrir pour rendre compte de la composition floristique des formations végétales représentées dans le site d'étude.

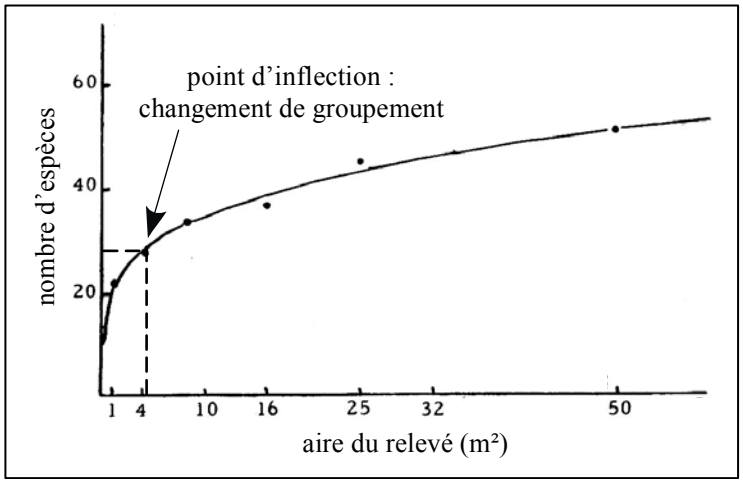


Fig. 50 - Exemple du calcul d'une aire minimale dans un groupement prairial de la région de Mödling en Basse-Autriche *(P. Ozenda, 1964). Le nombre d'espèces varie en fonction de l'aire du relevé. L'aire minimale est ici d'environ quatre mètres carrés.*

On peut difficilement parler de groupements dans la moraine car la végétation y est très éparse, mais l'aire minimale reste une référence pour caler notre protocole. C'est pourquoi nous avons calculé une aire minimale pour chacune des auréoles datées. Au sein de chaque marge, un transect du plan d'échantillonnage a été choisi pour faire ce travail (fig. 51. 1).

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

Nous avons opéré en prenant en chaque point des surfaces croissantes. La figure 51 détaille les principales étapes de la mise en œuvre de cette démarche sur le terrain. La plus petite surface, d'un mètre de côté, se localisait au point d'observation et marquait le début de l'échantillonnage (fig. 51.2). Les carrés suivants, dont le côté était doublé à chaque fois, s'enroulaient en spirale autour du premier carré dans le sens inverse des aiguilles d'une montre tout en restant au contact du dispositif. Une séquence de cinq carrés a été ainsi implantée avec les surfaces respectives suivantes : 4 m², 16 m², 64 m², 256 m², 1 024 m².

La courbe des résultats (fig. 51. 3) met en rapport en abscisses les surfaces échantillonnées et en ordonnées le nombre d'espèces relevées. L'opération était répétée trois fois, pour chacun des secteurs datés. Pour le glacier Austre Lovén (fig. 51. 3), nous avons constaté que le nombre d'espèces croît très vite au début puis se stabilise au-delà de 256 m² quel que soit l'emplacement dans la marge correspondant à 17 espèces pour l'aire minimale définie. Cette surface sera retenue pour conduire l'échantillonnage. Reste maintenant à définir le protocole d'observation au sein de chaque surface sachant que nous cherchons à connaître à la fois l'identité des espèces présentes et leur fréquence.

2.1.2.4. Le relevé botanique

Quatre types de méthodes pouvaient être envisagés :

- **Méthode empirique** : celle-ci consiste à parcourir au mieux l'espace défini en essayant d'effectuer le relevé exhaustif des espèces présentes tout en estimant leur abondance selon une norme que les botanistes ont essayé de rendre rigoureuse par un système d'indices physionomiques. Le défaut de cette méthode est qu'elle demande une longue pratique pour calibrer l'estimation et n'évite pas les approximations douteuses.

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

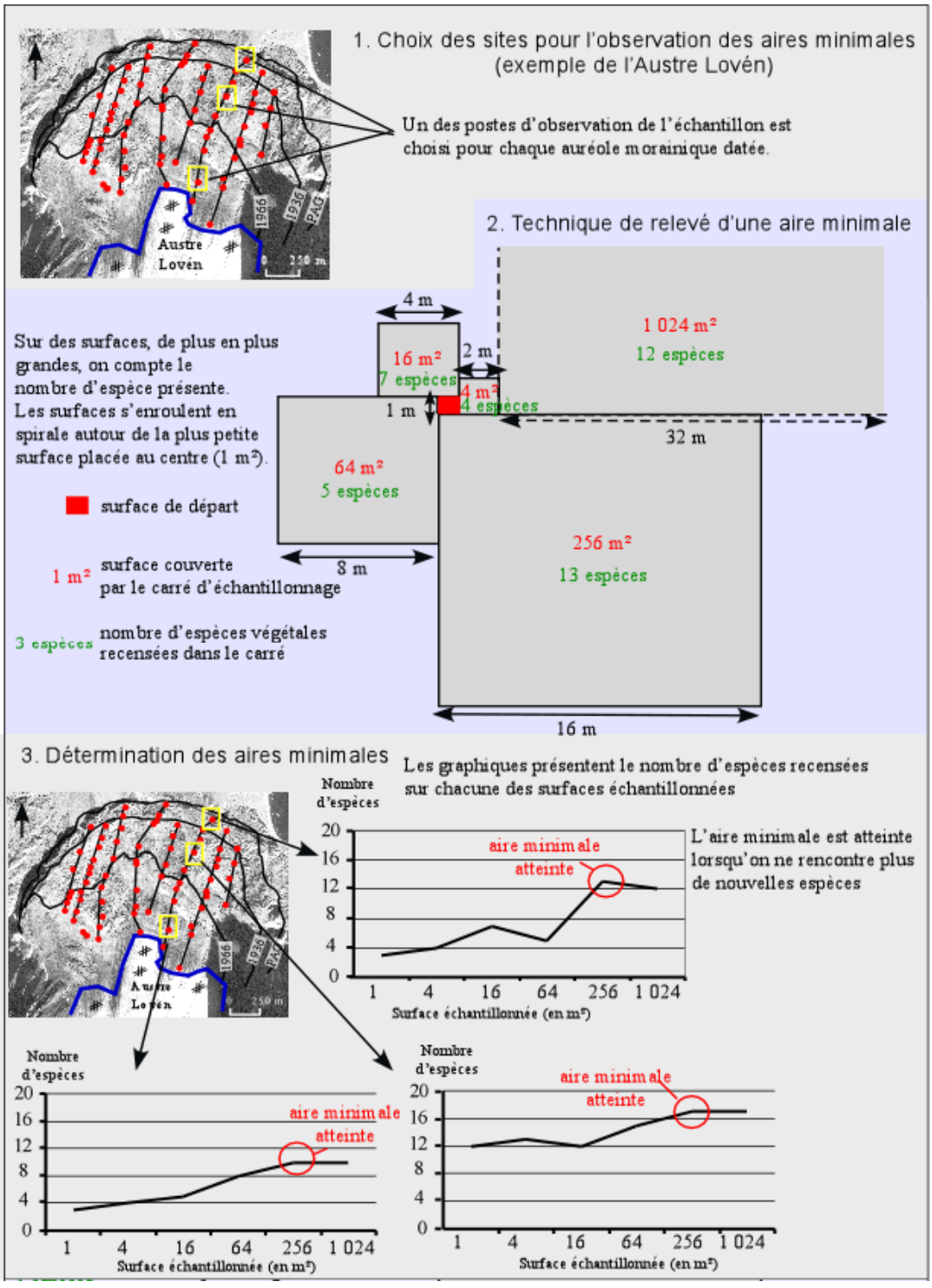


Fig. 51 - Détermination des aires minimales sur la marge du glacier Austre Lovén.

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

L'exercice devient encore plus délicat dans notre cas, compte tenu de l'étendue de l'aire minimale. J. Braun-Blanquet (1954) a procédé de la sorte pour estimer l'abondance des espèces en prairie alpine qu'il associe à la dominance, correspondant à la surface de recouvrement de l'espèce, codée en six niveaux[1]. Concrètement, par exemple, R.J. Whittaker (1991) l'applique dans le cas d'une étude sur la colonisation végétale de la marge du glacier Storbreen, dans le sud de la Norvège. Pour ce faire, il couvre une surface de 16 m² découpée en 16 carrés d'1 m². Chaque carré d'1 m² est lui-même divisé en 25 cellules de 40 cm². À l'intérieur de chacune des cellules, R.J. Whittaker procède à un dénombrement des espèces présentes. Un rapport entre le nombre de fois où l'espèce est relevée et le nombre total de carrés comptés lui permet d'estimer l'abondance de chaque espèce.

- **Méthode des points** : elle consiste à prendre une aiguille et à la pointer un grand nombre de fois sur le sol en relevant les espèces situées au point d'impact (A. Buttler, 1998). Pour chaque espèce, le nombre de « touchés », rapporté au nombre total d'impacts, donne une mesure de l'abondance. La méthode convient pour un tapis végétal continu, mais elle est inopérante dans des contextes peu végétalisés comme la moraine, où, comme l'illustre la figure 51, les contacts avec la végétation clairsemée sont difficiles à réaliser.

- **Méthode linéaire** : P. Daget et J. Poissonet (1969) en ont défini le contenu. Ils relèvent les implants de chaque espèce le long d'un axe matérialisé par une ficelle et selon un intervalle fixe. La fréquence de chaque espèce observée fournit une mesure de son abondance. Comme la méthode des points, la méthode linéaire est adaptée aux milieux végétalisés, mais inopérante en contexte pionnier (fig. 52).

[1] A. Buttler (1998) souligne l'intérêt du code d'abondance-dominance de J. Braun-Blanquet qui combine l'abondance (fréquence relative de l'espèce) et la dominance (recouvrement) en un code semi-quantitatif censé représenter une certaine réalité écologique. Ce code est devenu quasi universel :

r un ou quelques rares éléments ;
+ éléments peu ou très peu abondants, recouvrement inférieur à 1 % ;
1 éléments assez abondants, recouvrement inférieur à 5 % ;
2 éléments très abondants, recouvrement entre 5 et 25 % ;
3 recouvrement compris entre 25 et 50 %, abondance quelconque (l'espèce peut être peu ou très abondante) ;
4 recouvrement compris entre 50 et 75 %, abondance quelconque ;
5 recouvrement compris entre 75 et 100 %, abondance quelconque.

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

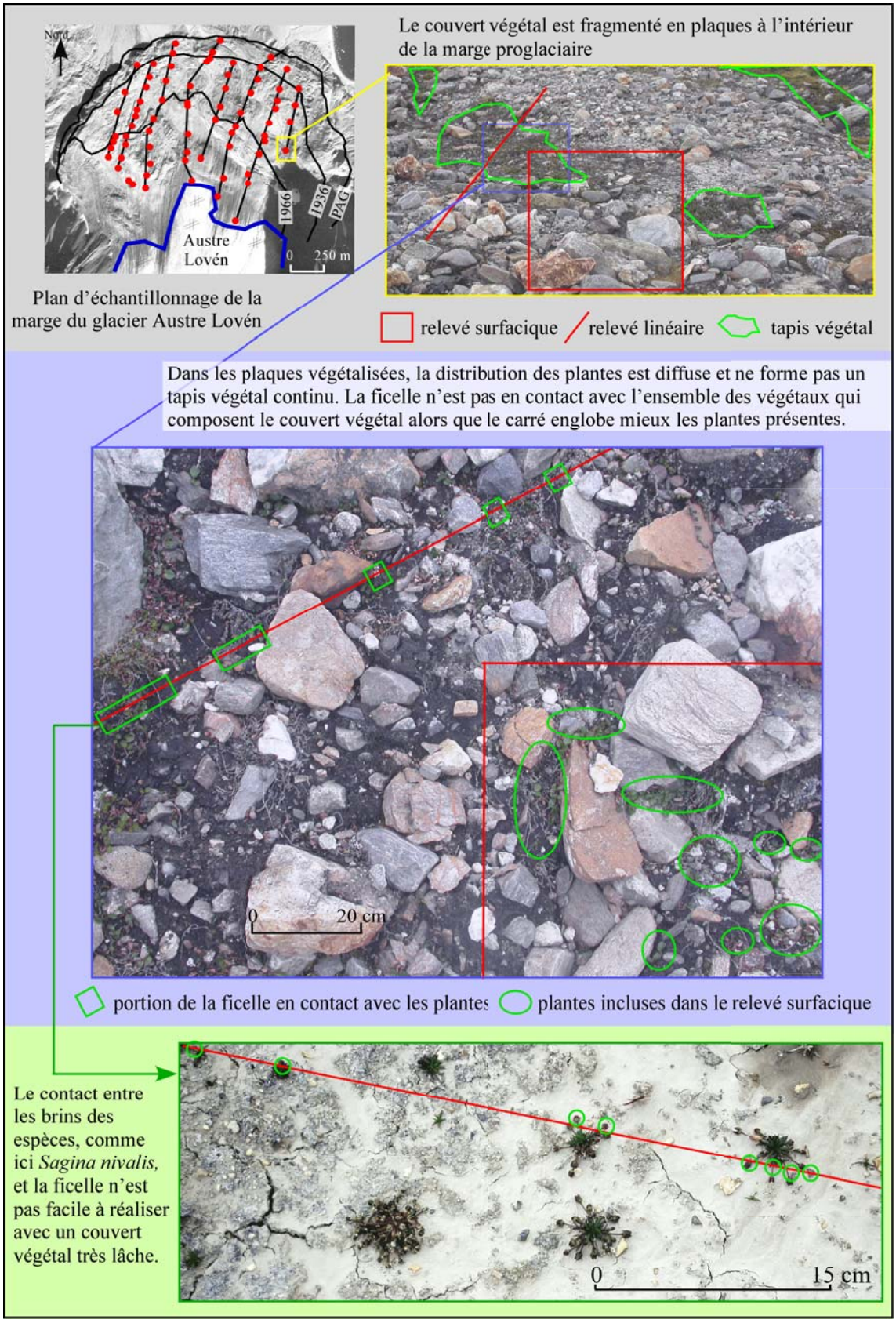


Fig. 52 – Exemples de relevés surfaciques et linéaires. *Prises de vue depuis la marge du glacier Austre Lovén, juillet 2003.*

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

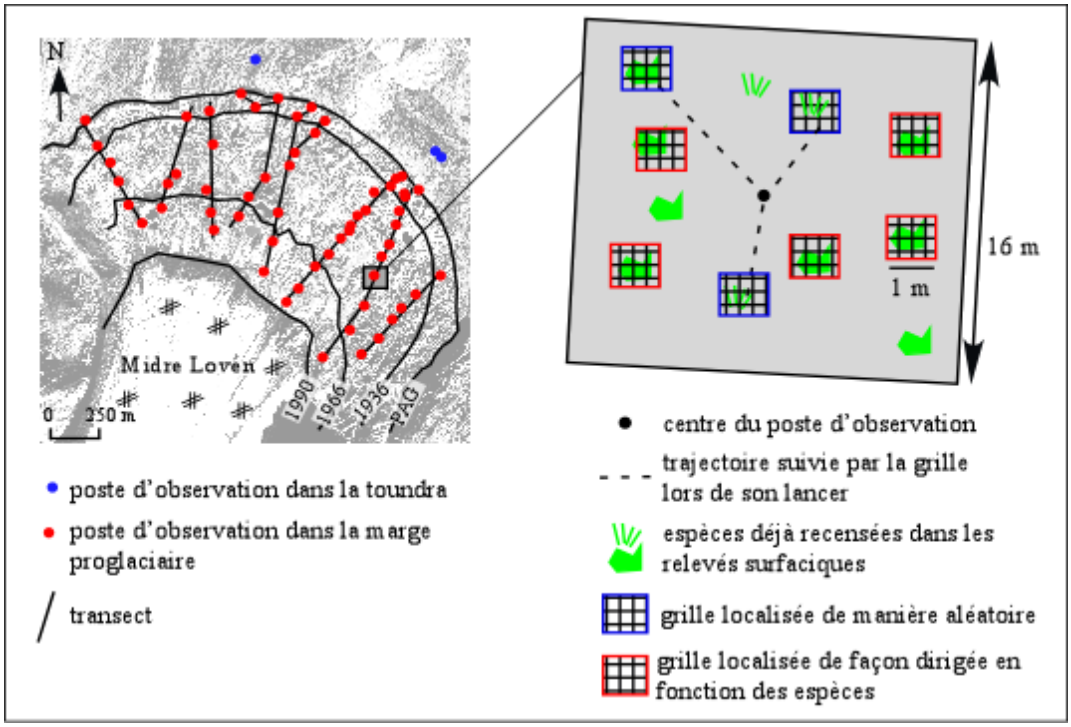


Fig. 53 – Répartition des relevés surfaciques (1×1 m) à l'intérieur d'un poste d'observation (16×16 m) sur la marge du glacier Midre Lovén.

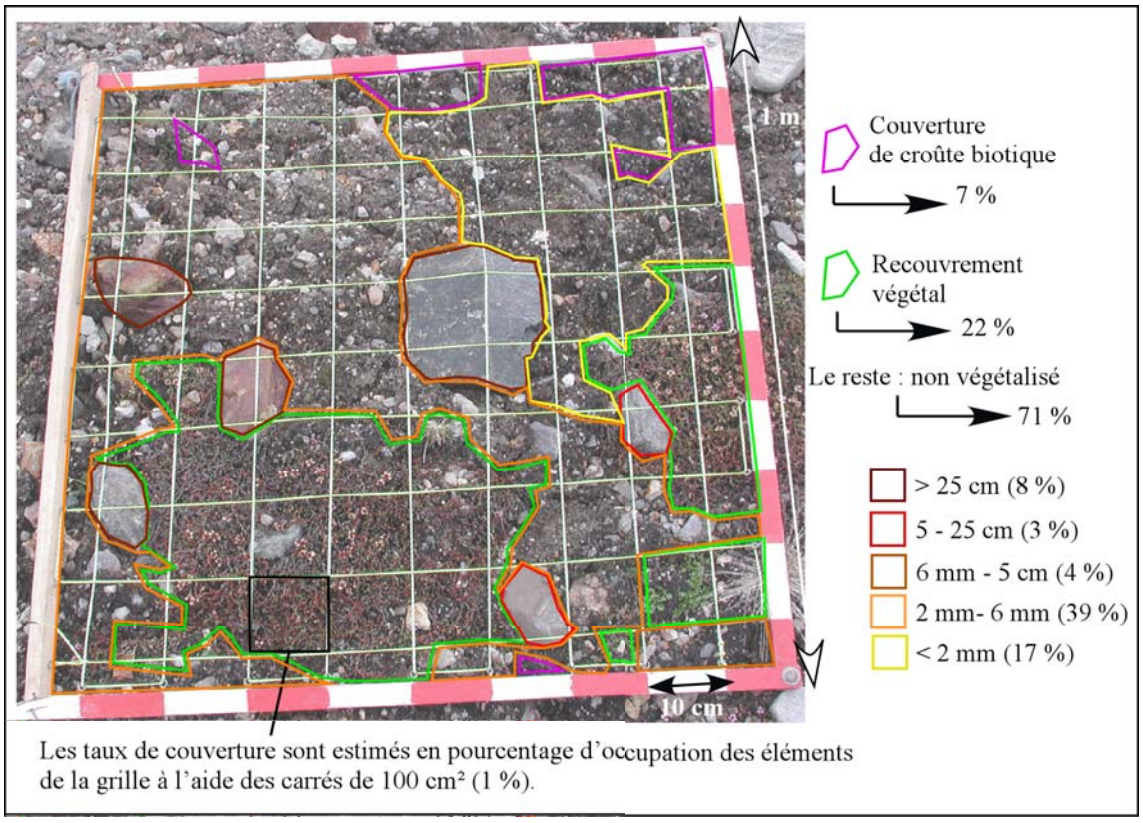


Fig. 54 – Méthode de réalisation d'un relevé surfacique. *Les relevés sont réalisés à partir d'une grille d'1 m² qui permet d'estimer les taux de recouvrement de la végétation, de la croûte biotique et des classes granulométriques. Les espèces qui composent le couvert végétal sont notées en présence et absence.*

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

- **Méthode bidimensionnelle** : elle est fondée sur l'utilisation d'un carré, permettant de couvrir une surface ici d'1 m², comme le montre la figure 52. Elle évite les inconvénients rencontrés avec les méthodes par points et lignes pour échantillonner une végétation clairsemée. La méthode s'applique en échantillonnage de second ordre, puisque celui-ci intervient sur des unités d'observation préalablement positionnées sur nos transects.

Pour couvrir l'aire minimale de 256 m², il était nécessaire d'arrêter un ultime plan d'échantillonnage afin de définir le nombre de points à retenir, d'arrêter la surface de chacun d'eux et de les positionner dans l'espace. L'exploration systématique d'une surface de 256 m² sans protocole est un problème. Des tests préalables ont été conduits qui nous ont amenée à opter pour un sous-échantillonnage de huit unités d'1 m². Le positionnement de chacune des huit grilles métriques s'est fait d'une manière empirique à l'issue d'une prospection dans l'aire minimale définissant chaque point. Ce travail nous a permis de faire l'inventaire des différents contextes inclus dans la zone et de repérer les espèces présentes. En fonction de ce zonage initial, nous avons positionné les grilles de manière à couvrir toutes les situations directement identifiables. Quand l'aire considérée était trop homogène pour que le positionnement des huit grilles soit possible à travers ce diagnostic empirique, nous sommes revenue à une procédure aléatoire pour laquelle, comme le montre la figure 53, nous procédions à un « lancer » de la grille depuis le centre de la zone de 256 m² dans diverses directions. Le relevé était réalisé à l'endroit où la grille était tombée. L'opération était répétée autant de fois qu'il était nécessaire pour totaliser huit grilles. La synthèse des huit relevés donne la fréquence relative des éléments recensés.

L'observation a été conduite pour chacun des huit carrés afin d'y relever les espèces présentes et d'estimer le taux de recouvrement végétal. La figure 54 aide à comprendre comment nous avons opéré sur le terrain. Les éléments détourés (végétation et granulométrie) simulent la partition qui est faite par le regard. Le carroyage décimétrique permet ensuite d'affecter une surface à chacun de ces éléments sur une base assurée.

Pour les taxa végétaux faisant l'objet de l'observation, il était nécessaire de trouver un compromis entre la précision des espèces identifiées et les contraintes logistiques liées au nombre de points à échantillonner (le temps disponible pour chaque relevé était

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

limité). En comparant les trois groupes de végétation bryophytique (mousses), vasculaire (plantes à fleur) et lichénique, au cours d'une étude réalisée au Spitsberg, L. Nilsen *et al.* (1999) ont conclu que le groupe des plantes vasculaires contribuait le plus à la distinction des communautés végétales entre elles. Aussi, nos observations ont pris en compte la totalité des espèces vasculaires rencontrées dans les marges proglaciaires. Exception été faite pour les espèces du genre *Draba*[1] dont la détermination est délicate et n'apporte pas de précisions discriminantes ; pour ce genre, 12 espèces sont représentées dans la flore du Svalbard (O.I. Rønning, 1996). Par ailleurs, notre démarche biogéographique n'est pas une étude phytosociologique. En conséquence, les espèces végétales sont prises en compte comme indicateur paysager et non comme caractéristiques d'association. Les plantes vasculaires correspondent à celles qui sont recensées par la flore de O.I. Rønning (1996) et par le catalogue de R. Elven et A. Elvebakk (1996). Elles sont désignées par leur nom scientifique.

Les mousses ont été relevées en tant que genre car la distinction des espèces sur le terrain est très difficile. Les lichens ont été recensés sous ce terme général sauf pour les *Cetraria delisei* et *nivalis* qui participent à la différenciation des faciès paysagers de la toundra. Ainsi I. Brattbakk (1986) décrit les formations à *Saxifraga oppositifolia* et *Cetraria delisei* comme communes dans les secteurs ouest du Spitsberg, au-dessous de 200 m d'altitude.

En plus du recouvrement végétal, a été considéré le recouvrement de la croûte biotique. La croûte biotique forme une pellicule de couleur noire ou grise (fig. 54), constituée d'un mélange indéterminé de cyanobactéries[2], de lichens cyanophiles et de quelques petites hépatiques[3] noires principalement du genre *Cephalozia* et *Cephaloziella* (L. Nilsen *et al.*, 1999). K.L. Bliss et K.M. Peterson (1992) soulignent que les cyanobactéries jouent un rôle central dans la fixation de l'azote et l'accumulation du carbone.

Parallèlement à l'échantillonnage de la végétation, ont été relevés des données granulométriques dont certains auteurs ont montré qu'elles influencent la végétation.

[1] Dans le texte, les espèces du genre *Draba* sont regroupées sous le terme de *Draba species.*
[2] Cyanobactéries : bactéries aussi appelées algues bleues.
[3] Hépatique : classe de plantes cryptogames, à reproduction sexuée, intermédiaires entre les lichens et les mousses.

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

Ainsi, Y. Frenot *et al.* (1998), qui ont étudié les relations entre la taille des particules et la colonisation végétale aux Kerguelen, ont montré que la granulométrie du substrat conditionne la répartition aérienne et souterraine des végétaux. Th. Brossard (1985), au Spitsberg, souligne que l'arrangement des éléments entre eux et la proportion des classes granulométriques influencent la répartition spatiale des plantes. Ainsi, les sites qui sont pourvus d'un pavage superficiel de blocaille sont peu favorables à l'installation de la végétation car l'enracinement végétal reste limité aux fines interstitielles. Cependant, B. Van Vliet-Lanoë (1988), toujours au Spitsberg, montre que la présence d'une grande quantité de fines dans le sol favorise le gel de l'eau à l'intérieur de la matrice et empêche l'enracinement des végétaux. A. Jumpponen *et al.* (1999) observent que les blocs de taille métrique peuvent aussi constituer des sites d'abri pour les plantes. La qualité du substrat a été définie à partir de l'observation des dépôts affleurants. Les éléments ont été regroupés en un nombre réduit de classes définies selon leur taille. La collecte uniforme des données s'en est trouvée facilitée en raison de sa simplicité de mise en œuvre. Les classes granulométriques devaient pouvoir être identifiées rapidement sur le terrain compte tenu du nombre de relevés à réaliser (1 550 pour les cinq sites proglaciaires). Nous avons opté pour la classification proposée par D.I. Benn et D.J.A. Evans (1998) dont le mode de comptage à l'œil nu était bien adapté ici.

Les cinq classes granulométriques retenues sont donc les suivantes : fraction fine inférieure à 2 mm ; graviers de 2 mm à 6 mm ; cailloux fins de 6 mm à 5 cm ; cailloux grossiers de 5 à 25 cm ; blocs supérieurs à 25 cm. Les tailles étaient estimées dans la plus grande longueur des débris et mesurées à l'aide de la grille carroyée d'unités de 10 ×10 cm (fig. 53).

Précisons que notre observation a été étendue, pour quelques points, aux milieux de toundra stable, extérieurs à la moraine et datés de 9 000 BP environ, de manière à disposer d'une référence parmi les communautés végétales matures. Nous y avons effectué quelques relevés selon la procédure d'échantillonnage utilisée pour les moraines, afin de pouvoir établir les comparaisons qui s'imposent. Ces relevés ont été réalisés dans le prolongement direct de certains transects du plan d'échantillonnage des moraines comme le montre la figure 52 dans le cas du glacier Midre Lovén.

Au total, 1 550 relevés ont été réalisés durant les missions de 2001 à 2004 (cinq mois au total). Le tableau 4 fournit leur répartition sur les cinq sites. L'échantillonnage n'a pas

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

été strictement le même pour tous les sites, car la procédure s'est affinée au fil du temps conduisant à quelques écarts qui ne remettent pas en cause l'intérêt et la validité des comparaisons.

Sites proglaciaires	**Superficie** (km²)	**Nombre de transects**	**Nombre de postes d'observation**	**Nombre de relevés**	**Surface couverte par les relevés** (m²)	**Pourcentage de moraine couverte par les relevés**
Blomstrand	inconnue	5	42	257	257	inconnu
Ebba	0,794	11	93	536	536	0,07 %
Austre Lovén	2,234	8	41	252	252	0,01 %
Midre Lovén	1,970	8	32	151	151	0,008 %
Edith	1,117	4	50	354	354	0,03 %
Total	**6,115**	**36**	**258**	**1 550**	**1 550**	**0,025 %**

Tableau 3 – Répartition des relevés réalisés sur l'ensemble des sites proglaciaires. *Comme nous l'évoquions dans le chapitre 1, nous n'avons pas pu calculer la superficie de la marge du glacier Blomstrand compte tenu de la disposition en versant du site.*

2.2. Les modalités locales de la reconquête : protocole d'observation sur les micromilieux du glacier Midre Lovén

Nous cherchons ici à établir les liens qui peuvent exister entre les caractéristiques de l'habitat et les cortèges floristiques rencontrés et ce, à une échelle fine. C'est pourquoi nous avons dû mettre en place un second protocole d'observation grâce auquel nous pourrons tirer le meilleur parti de l'information exogène disponible : image infrarouge à haute résolution et MNT à haute précision.

2.2.1. Plan d'échantillonnage

Pour procéder à notre deuxième étude, plus fine sur la marge du glacier Midre Lovén, où nous cherchions à mettre en évidence de manière plus précise les relations entre végétaux et milieux, il a fallu repenser notre protocole d'échantillonnage. À la différence de la méthode suivie précédemment, reposant sur la mise en place de transects, le plan d'échantillonnage adapté ici suit une démarche stratifiée qui permet de

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

moduler l'observation en fonction d'unités préalablement fixées. A. Guisan et N.E. Zimmermann (2000) avancent que si l'objectif est de cerner la richesse des espèces et la biodiversité des milieux ; la stratification doit respecter une représentation proportionnelle des habitats. En revanche, si l'objectif est une analyse quantitative entre la distribution des espèces et leurs descripteurs environnementaux, A. Guisan et N.E. Zimmermann soulignent la nécessité d'échantillonner un nombre égal de points par type d'habitat. Par conséquent, nous avons opté pour l'échantillonnage stratifié égal qui assurait une représentation identique pour chacun des micromilieux que nous avons définis préalablement et systématique non-aligné afin de couvrir l'ensemble de l'espace.

Selon que notre hypothèse d'un microhabitat conditionné par la topographie, nous avons utilisé ce critère pour stratifier l'échantillonnage. En effet, on comprend que les plaines intramorainiques, à faible pente et homogènes sur le plan topographique ne nécessitent pas un échantillonnage aussi serré que les fortes pentes qui occupent une zone réduite de l'espace, mais induisent une grande diversité d'habitats pour les plantes. C'est pourquoi nous avons distingué cinq contextes topographiques majeurs qui commandent l'essentiel des facteurs mésologiques pour procéder à l'échantillonnage stratifié. La figure 55 schématise et articule les relations entre les topographies et les conditions mésologiques qu'elles induisent pour la plante. C'est sur la base de ce schéma que nous avons défini les cinq topographies majeures.

- Les **dépressions** exercent une influence importante sur le couvert végétal lorsqu'elles deviennent des niches de survie (*safe site*). En effet, les creux fonctionnent comme des pièges où s'accumule la matière organique (G. Mueller *et al.*, 1999) qui permet la rétention de l'eau indispensable à la croissance végétale (I.D. Hodkinson *et al.*, 2002). Les dépressions favorisent également le maintien d'une couverture de neige qui, pour les espèces chionophiles, peut avoir des effets multiples (fig. 55). Elle réduit le taux de dessiccation, protège de l'abrasion du vent, isole des basses températures de l'hiver, modifie la lumière reçue, restreint la saison de croissance et augmente la disponibilité en eau de fonte (J.A. Schaefer et Messier, 1995 ; A. Elvebakk, 1997). Cependant, quand les dépressions deviennent des bas-fonds engorgés, la sursaturation en eau créent des milieux répulsifs (Th. Brossard, 1991) ; c'est notamment le cas des talwegs qui sont parcourus par les eaux de ruissellement.

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

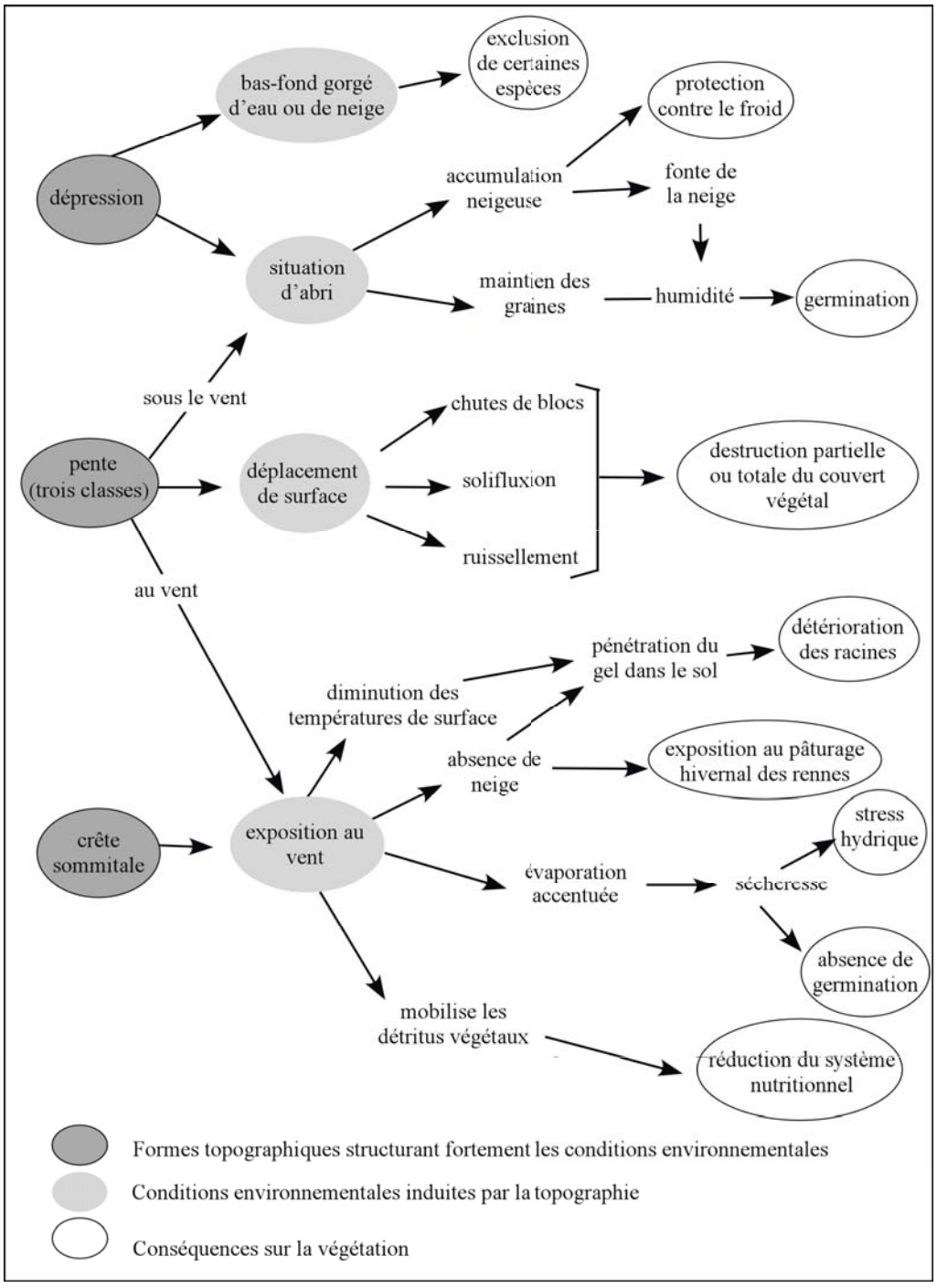


Fig. 55 – Schéma théorique du rôle joué par la topographie dans les conditions environnementales contrôlant la dynamique végétale.

- La **pente** contribue à la création de situations d'abri et d'exposition au vent qui conditionnent la distribution du manteau neigeux, le maintien d'une humidité ou au contraire l'assèchement des surfaces (fig. 55). L'exposition au vent empêche l'accumulation de matière organique et le maintien d'un manteau neigeux ce qui favorise la pénétration du gel dans le sol. À l'inverse, la pente sous le vent crée des situations d'abri, à l'image des dépressions, permettant le maintien des

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

graines, de la neige et d'une certaine humidité. L'ensemble de ces conditions est nécessaire à la germination. La pente joue également un rôle dans les valeurs d'énergie reçues au sol selon les inclinaisons et les orientations. Ce paramètre est d'autant plus important sous les latitudes polaires où il existe un déficit thermique qui inhibe le développement de la végétation. La pente est retenue pour être intégrée dans l'échantillonnage en **trois classes de pentes** : forte (> 10°), moyenne (2° à 10°) et faible (0 à 2°).

- Les **crêtes** et parties sommitales sont les secteurs les plus exposés au vent, facteur très contraignant pour la colonisation végétale parce qu'il empêche le maintien des graines ou des jeunes propagules. L'activité asséchante du vent est un facteur qui entrave l'installation de végétaux (J. Stöcklin et E. Bäumler, 1996). Par ailleurs, l'action prolongée et répétée du vent peut induire des dommages sur les végétaux, limitant leur croissance et leur multiplication végétative.

2.2.2. Mise en place du plan d'échantillonnage sur la marge proglaciaire à partir de GPS

Comme le souligne M.-L. Keersmaecker (1987) : *dans un plan d'échantillonnage, il y a une étape au cours de laquelle l'utilisateur doit prendre une décision concernant la taille de son échantillon. Cette décision est fondamentale. En effet, un trop grand échantillon implique un gaspillage de temps et de coût et un trop petit échantillon diminue la validité des résultats*. Pour notre part, au vu du temps dont nous disposions sur le terrain et des contraintes de déplacement et de seuils statistiques, nous avons réalisé 300 points d'observation positionnés selon l'échantillonnage stratifié systématique non-aligné dont la figure 56 montre la répartition spatiale. Ce nombre statistiquement significatif a permis d'inventorier correctement toutes les situations.

Les 300 sites étaient localisés sur le terrain à l'aide d'un GPS[1] avec une précision métrique en latitude et longitude. Les coordonnées géographiques de chacun des points étaient prédéfinies à partir du MNT et enregistrées directement dans le GPS. Les postes de relevé étaient ensuite retrouvés sur le terrain en utilisant le mode « navigation » du GPS.

[1] GPS Trimble, Geoexplorer 3, avec antenne de réception.

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

La définition d'un plan d'échantillonnage préalablement à la prospection de terrain permet un gain de temps considérable au moment de la collecte des données *in situ*. Par ailleurs, la précision du positionnement permet de croiser les données de terrain ainsi collectées avec les données numériques du SIG (Th. Brossard *et al.*, 1998).

2.2.3. Technique de relevés

L'objectif était de procéder à l'inventaire le plus complet des différentes configurations locales. Pour appréhender cette échelle, nous avons abandonné l'aire minimale, qui n'était plus adaptée à notre échelle d'observation. À cette fin, toujours après test préalable, la surface des relevés a été définie par rapport à la résolution du MNT qui a servi à élaborer l'image des micro-reliefs, soit une maille de deux mètres de résolution spatiale. Nous avons défini une surface de relevé de 4 m² afin d'avoir l'assurance de couvrir la microtopographie choisie par le tirage des points. Ce sont donc 1 200 m² de moraine qui ont été recensés, ce qui représente 0,06 % de la surface totale.

- **Relevé par comptage**

En adoptant une approche relativement fine de l'espace intramorainique, nous souhaitions relever les éléments du couvert végétal en conséquence. Nous cherchions notamment à intégrer l'abondance des espèces qui rend compte du niveau d'évolution du cortège floristique. Pour cela, nous avons adopté une technique de comptage à partir d'une surface, employée habituellement par les botanistes, que nous avons évoquée précédemment (empirique par comptage, R.J. Whittaker, 1991).

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

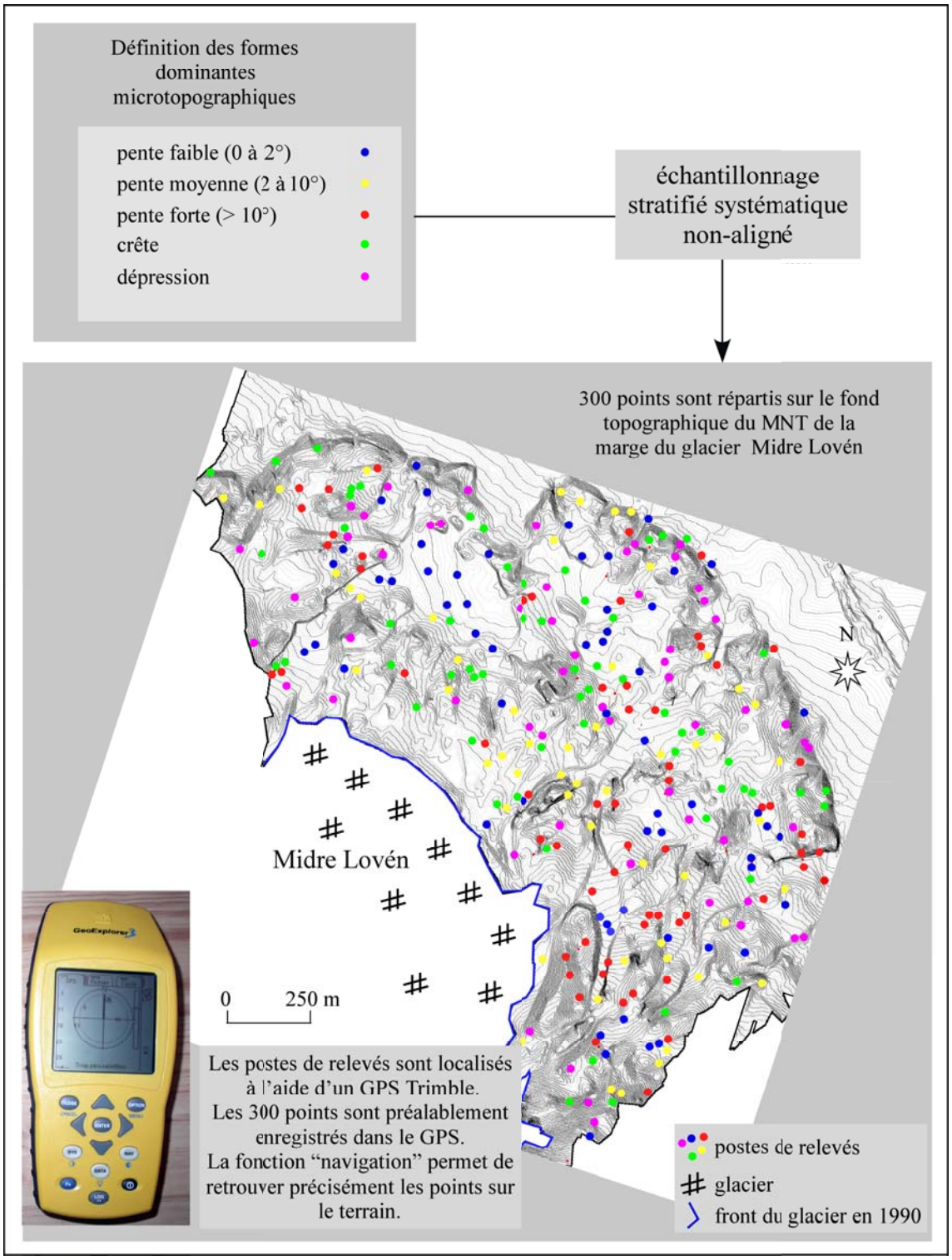


Fig. 56 – Plan d'échantillonnage stratifié systématique non-aligné mis en place dans la marge du glacier Midre Lovén. *Pour chacune des six formes topographiques dominantes, 50 postes d'observation sont positionnés par le plan d'échantillonnage et localisés sur le terrain à l'aide d'un GPS.*

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

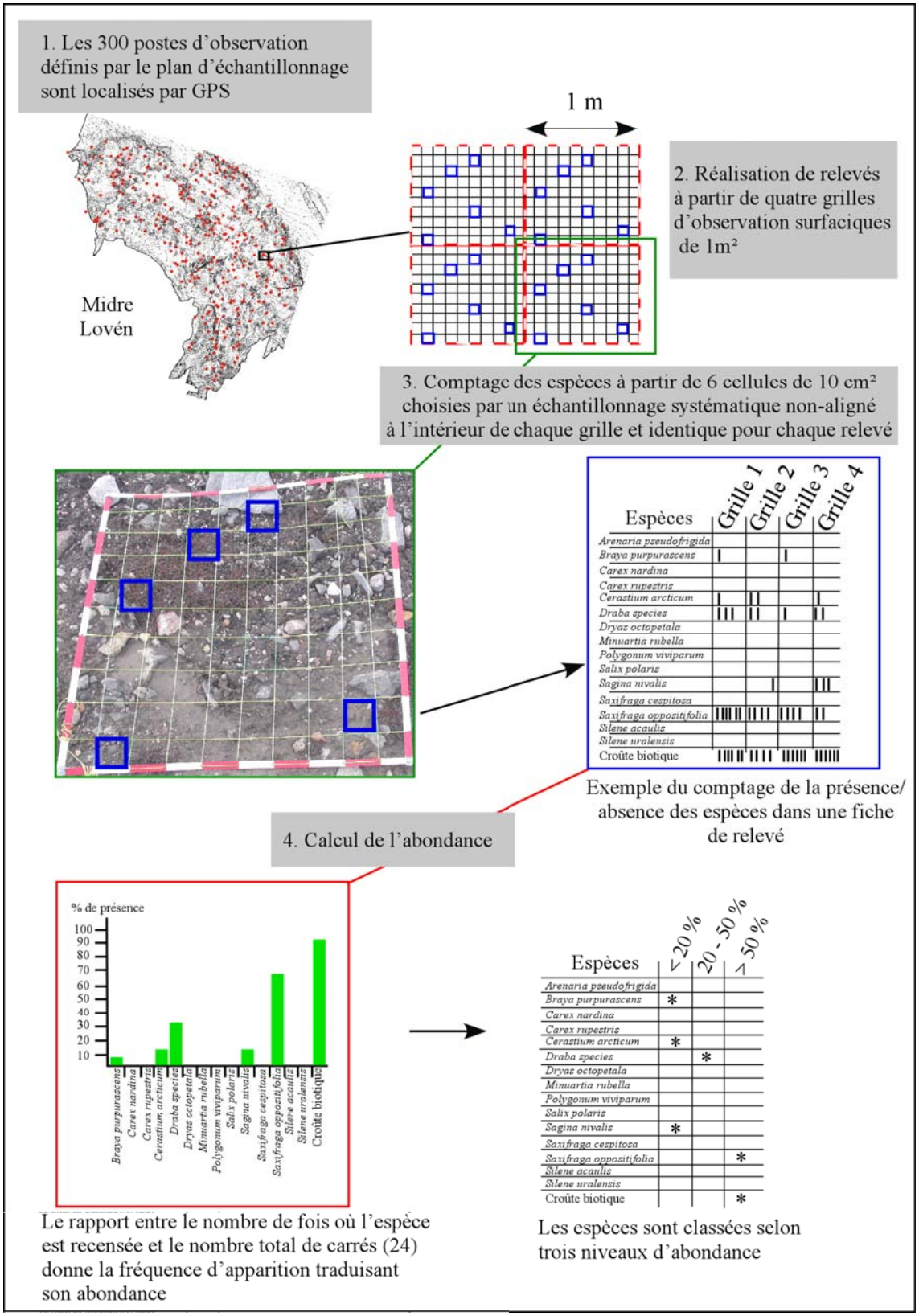


Fig. 57 – Technique de comptage des espèces pour estimer l'abondance dans les relevés de la marge du glacier Midre Lovén.

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

Nous avons utilisé la grille d'1 m² comme support de comptage, en répétant quatre fois l'observation pour couvrir les 4 m² de chaque poste (fig. 57), soit un total de 400 cellules de 100 cm². Il n'était pas envisageable de réaliser un comptage systématique des espèces pour chacun des 400 carrés et chacun des 300 postes de relevé (1 200 relevés élémentaires). Nous avons donc mis en place un nouvel échantillonnage à l'intérieur de chaque grille. À cette fin, nous avons réalisé un recensement témoin complet d'une surface de 1 m². Puis, nous avons relevé selon un plan d'échantillonnage stratifié non-aligné un nombre croissant de mailles élémentaires de manière à comparer les résultats avec ceux de l'ensemble de la surface (D. Laffly et D. Mercier, 1999). Il apparaît qu'à partir de 6 carrés de 100 cm², soit 24 unités pour 4 m², les résultats obtenus étaient suffisamment représentatifs. En moyenne, il y avait une différence de 14 points entre les résultats issus d'un comptage de 100 mailles par grille et ceux issus de 6 mailles (fig. 58). Par exemple, dans le cas des lichens, l'abondance est estimée à 76 % avec un comptage de 100 carrés contre 83 % avec le comptage de six carrés. Cependant, les différences restant les mêmes pour chaque espèce, les ordres de grandeur étaient conservés. Les six carrés choisis et positionnés dans la grille par tirage aléatoire ont été conservés pour chacune des grilles de relevé (fig. 58).

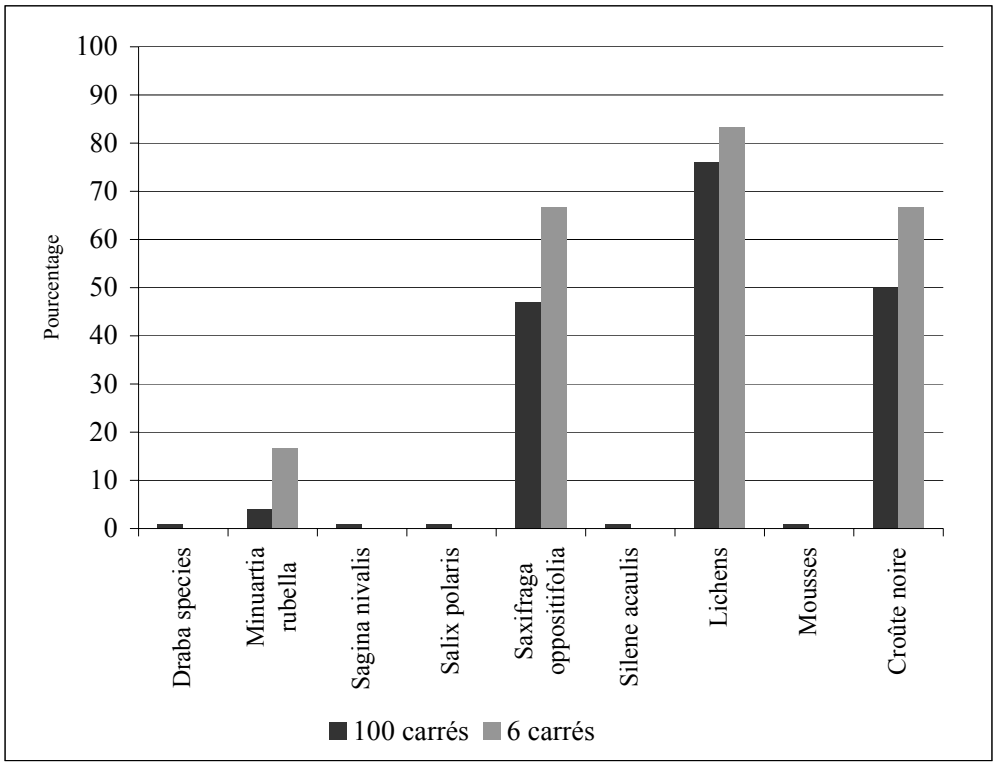


Fig. 58 - Relevés tests de végétation réalisés avec des comptages dans 100 carrés et dans six carrés. *En abscisses sont présentées les espèces recensées et en ordonnées leur pourcentage de présence par rapport à l'ensemble des carrés échantillonnés.*

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

À partir du comptage réalisé pour chacun des relevés, il était possible de définir l'abondance d'une espèce. L'abondance est définie par P. Ozenda (1964) comme *la proportion relative d'individus d'une espèce donnée,* soit le nombre d'occurrence de l'espèce sur le nombre total de comptages réalisés. Nous n'intégrons pas le taux de recouvrement de chaque espèce (dominance), car les espèces sont trop peu couvrantes pour que cette notion soit pertinente et prenne réellement un sens en milieu morainique.

Précisons que l'abondance correspond ici à la fréquence d'apparition d'une espèce et non au comptage du nombre de pieds de plantes de l'espèce présente. Par exemple, dans le cas de la figure 57, *Draba species* est comptée huit fois sur un total de 24 carrés, ce qui correspond à une présence de 33 %. Nous avons ensuite seuillé les résultats en trois niveaux d'abondance. Le premier correspond aux espèces présentes dans moins de 20 % des relevés ; le deuxième s'applique aux espèces présentes dans 20 à 50 % des relevés ; enfin, le troisième se rapporte aux espèces dont la présence est notée dans plus de 50 % des relevés. Ce codage servira pour préparer les tables qui seront soumises à l'analyse multivariée.

- **Information complémentaire de la fiche d'observation : données mésologiques**

Parallèlement à l'identification des composantes floristiques, nous avons relevé les caractéristiques morphodynamiques des secteurs échantillonnés. Le ruissellement accompagne le recul des glaciers et contribue à la destruction des dépôts morainiques. Les secteurs remobilisés voient leur couvert végétal détruit, la reconquête végétale est alors perturbée. Contrairement à l'échantillonnage mis en place pour les cinq marges où ce sont les secteurs non perturbés, depuis leur déglaciation, qui ont été échantillonnés, nous intégrons ici l'observation du ruissellement. La prospection à l'intérieur de la marge proglaciaire, à travers les 300 points échantillonnés, nous permettra de recenser l'action du ruissellement en chaque point et de quantifier son emprise spatiale.

Les écoulements présentent une extrême variabilité spatio-temporelle qui se traduit dans la dynamique fluvio-glaciaire heurtée, violente, totalement discontinue, des marges proglaciaires (M. Griselin, 1982, 1985). Selon cet auteur, tout point de la marge

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

proglaciaire peut se retrouver, lors des épisodes paroxysmiques, au cœur d'un chenal, emporté par les eaux ou arraché à une colline de moraine même stabilisée.

Au cours de nos relevés, nous avons pris en compte les manifestations hydrologiques à l'instant *t*, et avons distingué trois formes de ruissellement en fonction des conséquences qu'elles ont sur les dépôts : le ruissellement actif, le ruissellement intermittent, le ruissellement inactif.

- Le **ruissellement actif**, « continu » durant la saison hydrologique, lié aux précipitations liquides, à la fonte de la neige et de la glace de l'ensemble du bassin, concerne les écouements majeurs ; son activité empêche toute colonisation végétale (fig. 59 b) ; il est suffisamment puissant pour déstabiliser les moraines et détruire les modelés.
- Le **ruissellement local** est nourri par la fonte locale de la neige et de la glace interstitielle du pergélisol. De moindre importance que l'écoulement actif, le ruissellement local est intermittent et a un impact plus discret dans l'espace intramorainique (fig. 59 f). Cette forme d'écoulement n'est pas une entrave à la colonisation végétale.
- Le **ruissellement inactif** concerne les secteurs anciennement affectés par les écoulements (fig. 59 c) qui, du reste, pourraient redevenir actifs au moindre excès hydrologique. Ils sont identifiables sur le terrain au travers des traces qui demeurent, tel l'étalement des dépôts ou la présence d'anciens chenaux.

Une autre manifestation morphodynamique perturbe la colonisation végétale : **la solifluxion** (fig. 59 g). Elle correspond à un glissement, sur un versant, de matériaux fins sursaturés. L'eau peut provenir de la fonte de la glace interstitielle enfermée par les moraines. L'action de la solifluxion reste limitée à la mobilisation sur de très faibles distances des matériaux sollicités (D. Mercier, 1998). Les formes de déplacement par lent fluage sont facilement identifiées et la taille des loupes produites peut varier de moins d'un mètre à plus de 10 mètres. Il faut distinguer de la solifluxion *stricto sensu* qui est un phénomène lent, des glissements brutaux ou « foirages ». Ces phénomènes sont trop peu nombreux pour avoir un impact sensible à l'échelle de la moraine.

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

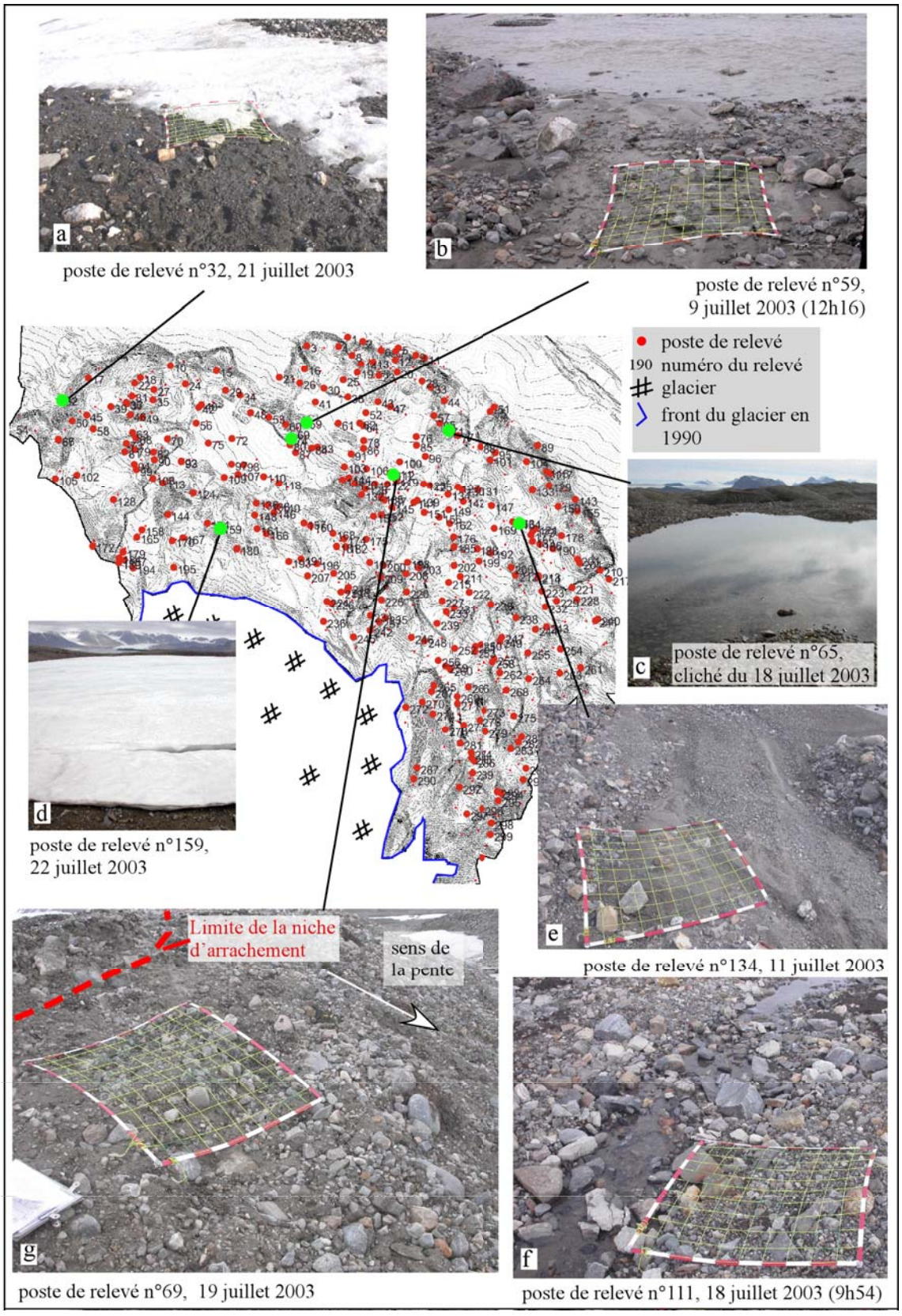


Fig. 59 – Exemples de secteurs du plan d'échantillonnage caractérisés par un contexte géomorphologique particulier sur la marge du glacier Midre Lovén. *(a) secteur où la neige fond tardivement ; (b) ruissellement actif ; (c) lac proglaciaire ; (d) marge glacée ; (e) ruissellement inactif ; (f) ruissellement local ; (g) solifluxion.*

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

Enfin, **l'activité périglaciaire** détermine un ensemble de microtopographies (cercles de pierres, polygones de toundra, ostioles…). M. Dabski (2005) a étudié les réseaux de cercles de pierres dans les moraines du Spitsberg et d'Islande et montré que de telles formes sont peu développées dans les environnements jeunes. Les formes en question sont situées sur les espaces les plus anciennement déglacés, depuis plus de 100 ans. Elles se sont certainement développées lors de la première moitié du XX^{e} siècle quand le front du glacier était proche, c'est donc un facteur qui ne sera pas abordé dans notre étude. Il n'en joue pas moins un rôle important, car le gel dans le sol peut empêcher l'installation de végétaux ou déchirer le couvert végétal établi (B. Van Vliet-Lanoë, 1988).

Certains **secteurs** de la marge sont **indisponibles** pour la végétation parce qu'ils sont occupés par les lacs, les marges glacées et les zones où la neige fond tardivement. Les lacs proglaciaires sont relativement nombreux et des relevés s'y trouvent localisés par l'échantillonnage (fig. 59 c). Les marges glacées (*icing*) sont des formations composées d'aiguilles de glace (*naled ice*) formées au printemps par des remontées d'eau sous-glaciaires et/ou profondes (fig. 59 d). M. Griselin et Ch. Marlin (Griselin, 1982 et 1985 ; Griselin *et al*, 1995) attribuent l'origine de ces formations annuellement récurrentes à des remontées d'eau à travers le permafrost fracturé ; ces eaux imbibent, par capillarité, le manteau neigeux hivernal : au contact de la neige et du front de gel extérieur, l'eau se transforme en glace structurée en colonnes. Enfin, les secteurs tardivement déneigés peuvent être assimilés à des « combes à neige » (fig. 59 a) ; quand le relevé est localisé dans un secteur encore enneigé, il est réalisé juste à sa marge si cela ne demande pas un décalage trop important.

L'observation du rôle joué par le facteur Temps sur la mise en place des cortèges floristiques de cinq marges proglaciaires et l'approche fine des micromilieux sur la marge du glacier Midre Lovén ont nécessité la mise en place de stratégies d'échantillonnage pour connaître les particularités du couvert végétal. Le long développement de chaque étape de collecte des données nécessite ici un rappel des trois techniques d'échantillonnage mises en place pour la collecte des données endogènes (méthode des transects pétrographiques incluse), rappel effectué dans le tableau 4.

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

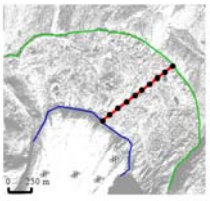
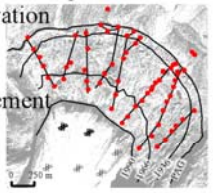
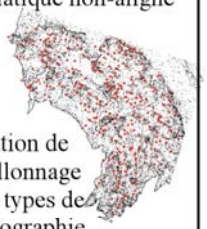
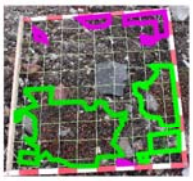
Terrains d'application	Blomstrand, Edith, Ebba, Austre et Midre Lovén		Midre Lovén
Thématiques Objectifs de recherche	Modalités régionales de la reconquête végétale ↓ relation entre les surfaces déglacées à différentes périodes et le couvert végétal Faut-il intégrer la pétrographie dans les relevés de végétation ? ↓		Modalités locales de la reconquête végétale ↓ relation entre des types de micromilieux et le couvert végétal
Contraintes de la méthode d'échantillonnage	- échantillonner plusieurs secteurs morainiques des espaces les plus anciens aux plus récents	- échantillonner uniquement les dépôts restés en place (non affectés par le ruissellement) ; - couvrir l'ensemble de la marge ; - être applicable à des sites de morphologie variée.	- échantillonner des types de microtopographies susceptibles d'avoir un rôle structurant sur le couvert végétal ; - couvrir l'ensemble de la marge.
Plan d'échantillonnage	Echantillonnage systématique le long d'un transect 	Echantillonnage systématique Cheminement en transect répartissant les postes d'observation plus ou moins régulièrement 	Echantillonnage stratifié systématique non-aligné  Stratification de l'échantillonnage selon six types de microtopographie
Surface échantillonnée par poste d'observation	0	Définie par la surface de l'aire minimale 256 m²	Définie par la résolution du MNT 4 m²
Taille du relevé	5 m	1 m²	1 m²
Nombre de relevés	1	8	4
Localisation des relevés à chaque poste	Tous les 100 m sur le transect	Dirigé et aléatoire	Positionnement par GPS
Méthode de relevé	Relevé linéaire Comptage le long d'une ficelle des faciès pétrographiques de chaque roche en contact avec la ficelle	Relevé surfacique  Estimation du taux de couvertures végétale, recensement des espèces et estimation des taux de recouvrement granulométrique	Comptage à partir d'une grille Comptage des espèces présentes dans 6 cellules de la grille tirées par un échantillonnage systématique non-aligné
Résultats obtenus par poste d'observation	Fréquence de chaque faciès pétrographique	Fréquence de chaque espèce et recouvrement végétal	Abondance de chaque espèce

Tableau 4 – Synthèse des techniques de relevés utilisées pour échantillonner les marges proglaciaires.

3. Analyse des données

Les données exogènes et endogènes sont réunies dans des tableaux de mesures individus/variables qui seront soumis au traitement statistique croisé. L'analyse des variables doit faire apparaître les structures qui sous-tendent l'organisation globale des paysages de la moraine. L'exploration de cette complexité, comme le souligne A. Buttler (1998), nécessite des méthodes appropriées pour décrire de façon simplifiée la variation des données ; nous avons recours aux méthodes d'analyses multivariées et notamment – du fait de la nature des variables – à l'Analyse Factorielle des Correspondances (AFC).

3.1. Tableaux de données

Une première matrice rassemble l'information collectée sur les cinq marges proglaciaires (fig. 60). Ce sont les données collectées *in situ* le long de transects soit 1 550 relevés comportant les variables suivantes :

- floristiques, notées en terme de présence/absence et fréquence de l'espèce ; taux de recouvrement ;
- granulométriques, définies selon les classes ;
- localisation géographique (GPS) en longitude, latitude et altitude ;

La table des données exogènes se limitait ici à l'âge des surfaces : moins de 20 ans ; de 20 à 70 ans et plus de 70 ans.

Une seconde matrice a été établie pour l'analyse détaillée de la marge du glacier Midre Lovén avec les variables suivantes (fig. 60) :

- âge des surfaces (déglacées depuis moins de 30 ans, de 30 à 100 ans et 100 ans) ;
- données microclimatiques :
    - température de surface ;
    - exposition au vent de surface dominant ;
    - rayonnement global ;
- type de ruissellement (sans, actif, intermittent et inactif) ;
- pente (0-2°, 2-10°, > 10°) ;
- localisation géographique (GPS) en longitude, latitude et altitude ;
- abondance des espèces végétales.

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

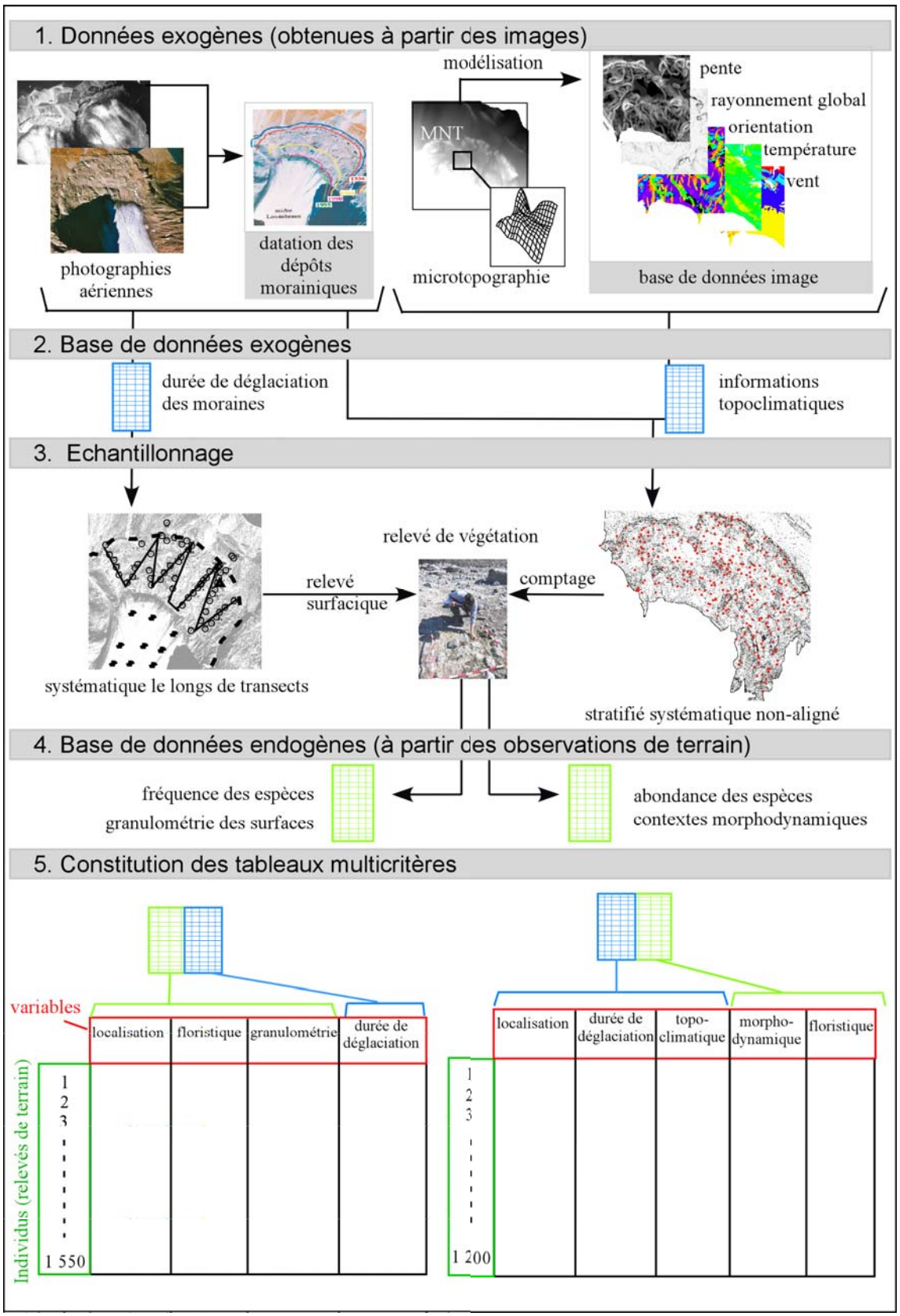


Fig. 60 – Constitution des tableaux de données. *Les deux matrices constituaient la base de données que nous allions soumettre à l'analyse statistique.*

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

3.2. Analyse statistique descriptive des tendances générales : les cortèges floristiques au fil du temps

Les relevés des cinq marges proglaciaires ont été analysés de manière systématique pour chaque site dans le but de faire ressortir les tendances et les rythmes qui jalonnent le processus de reconquête végétale indépendamment de leur variabilité locale. Plusieurs étapes de tris croisés ont été nécessaires à cet effet.

Nous avons tout d'abord cherché à mettre en évidence le niveau de maturation des cortèges floristiques en fonction de la durée de déglaciation des supports, facteur déterminant de la reconquête végétale. Pour chaque site, les individus étaient triés selon les trois phases de déglaciation identifiées (fig. 61). Les données ainsi synthétisées par génération de dépôts étaient représentées graphiquement sous forme d'histogrammes de fréquence d'apparition des différentes modalités. La comparaison des graphes a permis de visualiser la progression des cortèges floristiques dans le temps (fig. 61). Des courbes d'évolution de la fréquence d'apparition, espèce par espèce, ont permis d'affiner l'analyse des variations temporelles spécifiques.

L'analyse ainsi menée témoignait des modalités globales de la reconquête végétale et des rythmes spécifiques à chacune des cinq marges proglaciaires. Si le temps est le facteur prédominant dans les modalités de la reconquête végétale, il n'en demeure pas moins que d'autres facteurs jouent un rôle secondaire. La prise en compte de l'ensemble de ces éléments et la recherche des structures fortes de l'organisation des données demandait, par conséquent, une nouvelle phase d'analyse fondée sur les méthodes de statistique multivariée.

3.3. À la recherche des structures fortes : l'analyse exploratoire des données

L'objectif de notre recherche était de dégager des dimensions « cachées » qui structuraient l'organisation des données. Parmi l'ensemble des méthodes d'analyses multivariées qui répondaient à ce choix – régression multiple, Analyse factorielle en Composantes Principales (ACP), Analyse factorielle Discriminante (AD) … – nous avons choisi d'utiliser l'Analyse Factorielle des Correspondances (AFC) qui convenait le mieux à la nature des données que nous utilisions.

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

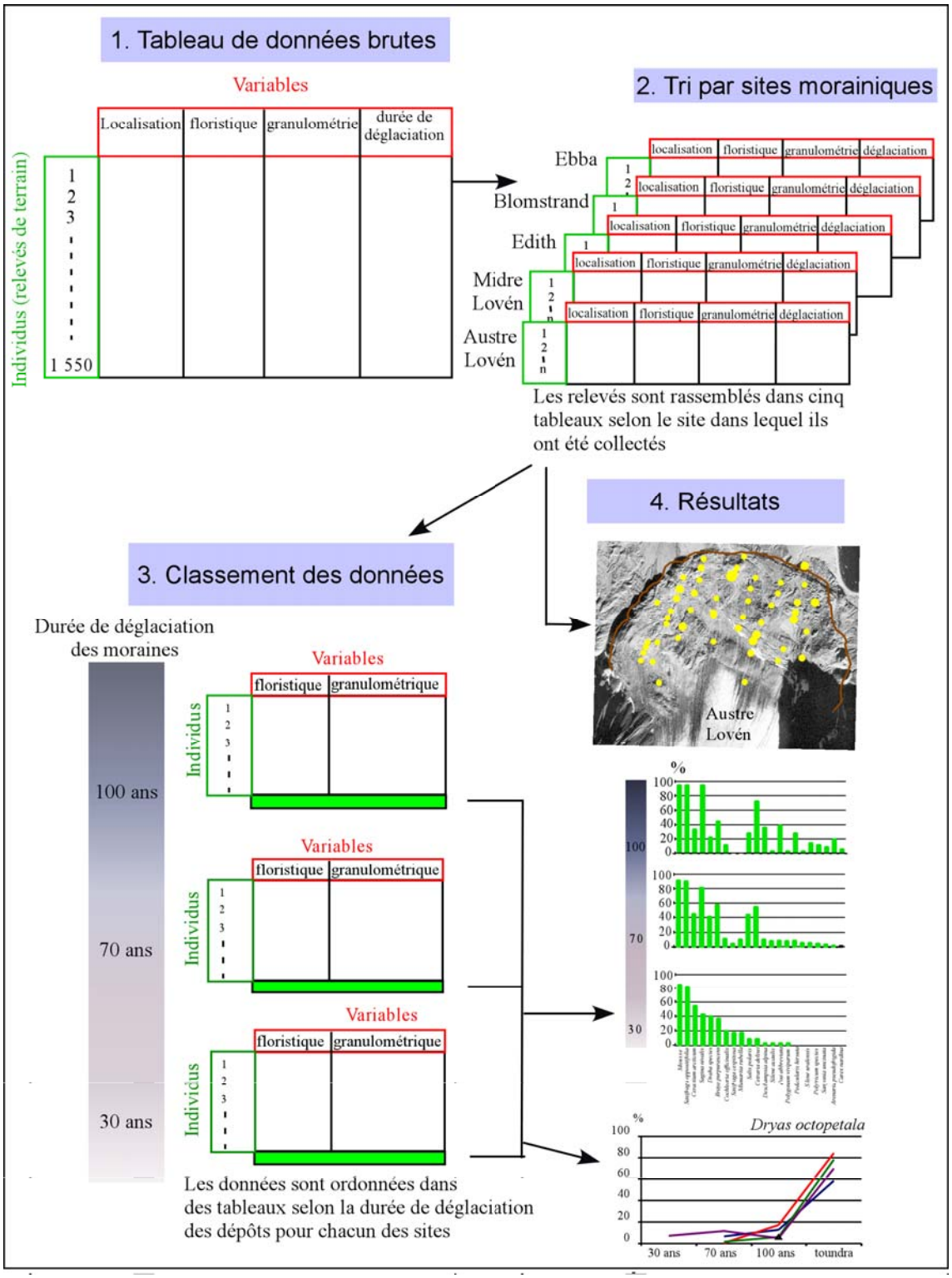


Fig. 61 – Démarche de tri et de classement des données.

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

Comme les matrices associaient des variables qualitatives, quantitatives de contingence et de mesures, toutes ont été codées sous forme discrète (0,1) pour les rendre homogènes en vue de l'analyse factorielle. Parmi les avantages offerts par l'AFC, nous soulignons particulièrement celui de l'équivalence distributionnelle qui permet de représenter dans un même espace mathématique, les variables et les individus. De ce fait, l'analyse des proximités des points dans le graphe factoriel est riche de sens : deux points individus sont proches s'ils offrent les mêmes caractéristiques quant aux variables ; deux points variables sont proches s'ils qualifient les mêmes individus ; un point individu est proche d'un point variable s'il est fortement lié à celui-ci… Nous avons couplé à l'analyse multivariée une méthode de Classification Ascendante Hiérarchique (CAH) qui, comme le précisent L. Sanders (1989), B. Escoffier et S. Pagés (1998), est complémentaire des AFC : les classes sont constituées selon une règle d'agrégation (pour une métrique donnée) ascendante.

Pour être efficaces, ces méthodes nécessitent une phase préparatoire des tables. Outre le codage indispensable à la cohésion de format des données, les variables doivent être préalablement choisies avec rigueur. En effet, toutes les méthodes factorielles ont pour but de dégager des structures que sous-tend l'indépendance factorielle des phénomènes décrits par les variables choisies. Il convient donc d'éliminer de l'analyse aussi bien les unités trop peu présentes pour que l'on puisse en saisir la signification que les unités trop présentes pour être discriminantes. Parmi les variables dont nous disposons, autres que l'âge des surfaces, qui sont susceptibles d'avoir un rôle dans les modalités de la reconquête végétale, on compte la granulométrie, la microclimatologie de surface et la microtopographie. L'étude fine du Midre Lovén nous permettra d'aborder cette question. En effet, sur ce secteur, nous avons appliqué une série d'analyse de régression et/ou de variance afin d'identifier les variables structurantes. Des histogrammes de fréquences d'apparition des espèces pour chacune des variables microtopographiques et microclimatiques compléteront notre dispositif de traitement.

Au terme de cette première phase, nous avons arrêté notre choix sur les variables à intégrer dans l'AFC : durée de déglaciation des surfaces (3 modalités), exposition aux vents (2 modalités), type de ruissellement (4 modalités) et pente (3 modalités).

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

- **Le codage disjonctif complet**

Le tableau initial est transformé en un tableau disjonctif complet ou tableau de codage binaire dans lequel chaque variable est convertie en une séquence de 0 ou 1 (fig. 67) selon une procédure propre à chaque type de variable :

- quantitative : les données sont discrétisées en *n* classes définies selon la forme de la distribution. Par exemple, l'abondance des espèces exprimée initialement en pourcentage de présence dans la grille de lecture, est décomposée en 4 modalités : absence ; 1 à ≤ 20 % ; 20 à 50 % ; plus de 50 % ;
- qualitative : nous avons retenu autant de modalités qu'il y avait de classes d'observation sachant que certaines fusions logiques de classes sont possibles. La discrétisation des variables quantitatives, comme le soulève L. Sanders (1989), *entraîne une perte d'informations, mais permet néanmoins d'homogénéiser les données quand celles-ci sont de nature différente*.

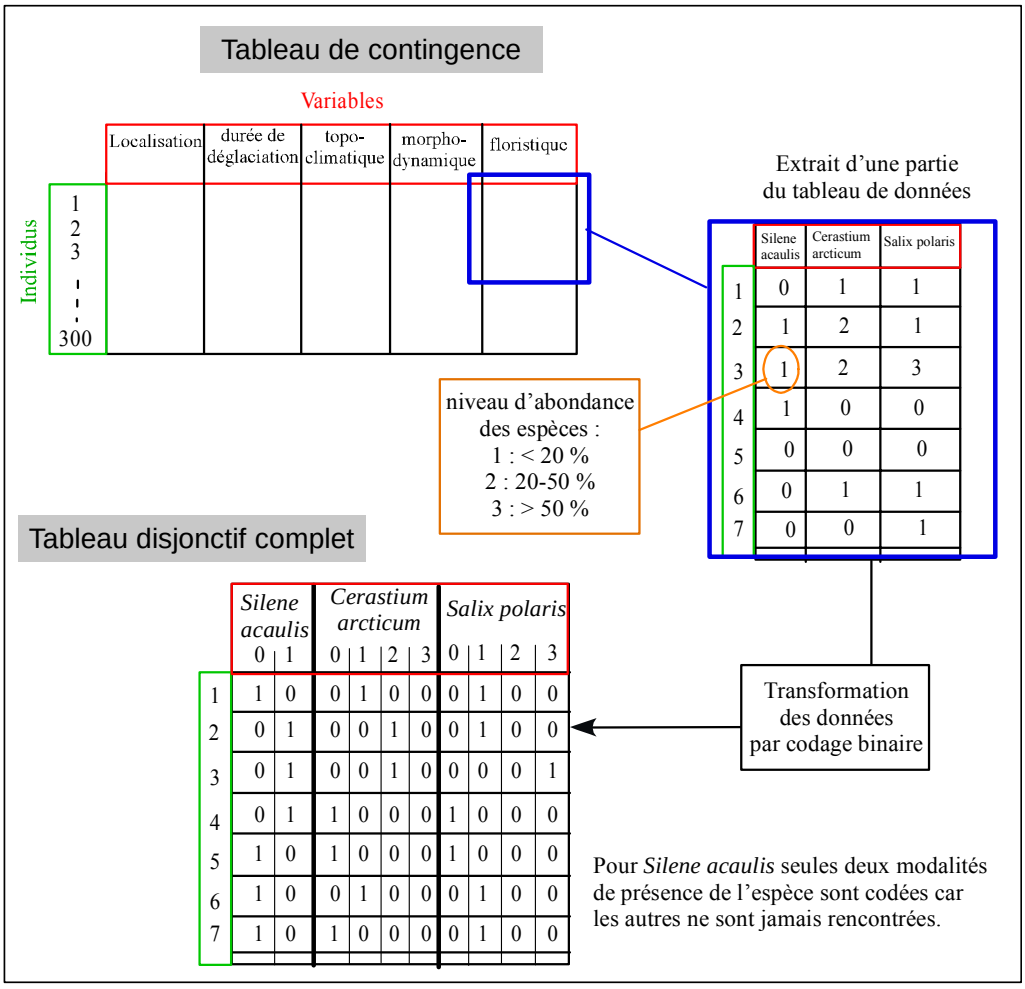


Fig. 62 – Méthode de codage booléen d'un tableau de contingence.

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

Une fois soumis à l'AFC, le tableau disjonctif complet donne lieu à l'élaboration d'un espace factoriel représenté sous forme graphique aidant à l'interprétation (fig. 63).

- **Synthèse graphique des résultats de l'AFC**

Dans l'espace factoriel résultant, individus et variables sont positionnés grâce à leurs coordonnées sur chacun des axes. Dans notre traitement, nous n'avons considéré que les trois premiers axes car, au-delà, l'interprétation devient délicate. La disposition des éléments aide à donner un sens thématique aux différents axes factoriels. La représentation géométrique, comme le souligne M. Jambu (1989), *fournit une image qui permet d'un seul coup d'œil de saisir rapidement l'ensemble des éléments et de mettre en évidence certains faits essentiels*.

- **CAH et typologie factorielle**

Une CAH consiste à regrouper de manière itérative les individus, en partant des plus proches pour finir par les plus éloignés. Le résultat d'une classification se présente sous la forme d'un arbre hiérarchique ou dendrogramme et d'une table des distances (fig. 63). Le nombre de classes est généralement arrêté au premier point d'inflexion de la courbe des distances d'agrégation. L'arbre de classification relie un individu à un autre ou à un sous-groupe d'individus issus eux-mêmes de regroupements. La base du dendrogramme est formée de petites classes ne comprenant que des individus très semblables, puis à partir de celles-ci, on construit des classes de moins en moins homogènes, jusqu'à intégrer l'ensemble de la population des éléments (M. Jambu, 1989). La lecture de l'arbre, ainsi que le soulignent B. Escofier et J. Pagès (1998), est intuitive et s'apparente à celle d'un arbre généalogique, comme l'illustre la figure 63 *: moins on est haut dans l'arbre et plus la « parenté » entre les individus regroupés est grande*. Une matrice des individus classés est obtenue suite au seuillage de l'arbre des distances (fig. 63). Elle est intégrée au tableau disjonctif complet dans le but de dresser des profils thématiques, variables par variables, pour les 13 classes retenues. L'analyse de chaque profil permettait de connaître les caractéristiques floristiques et environnementales de la typologie factorielle dont la figure 64 donne un exemple.

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

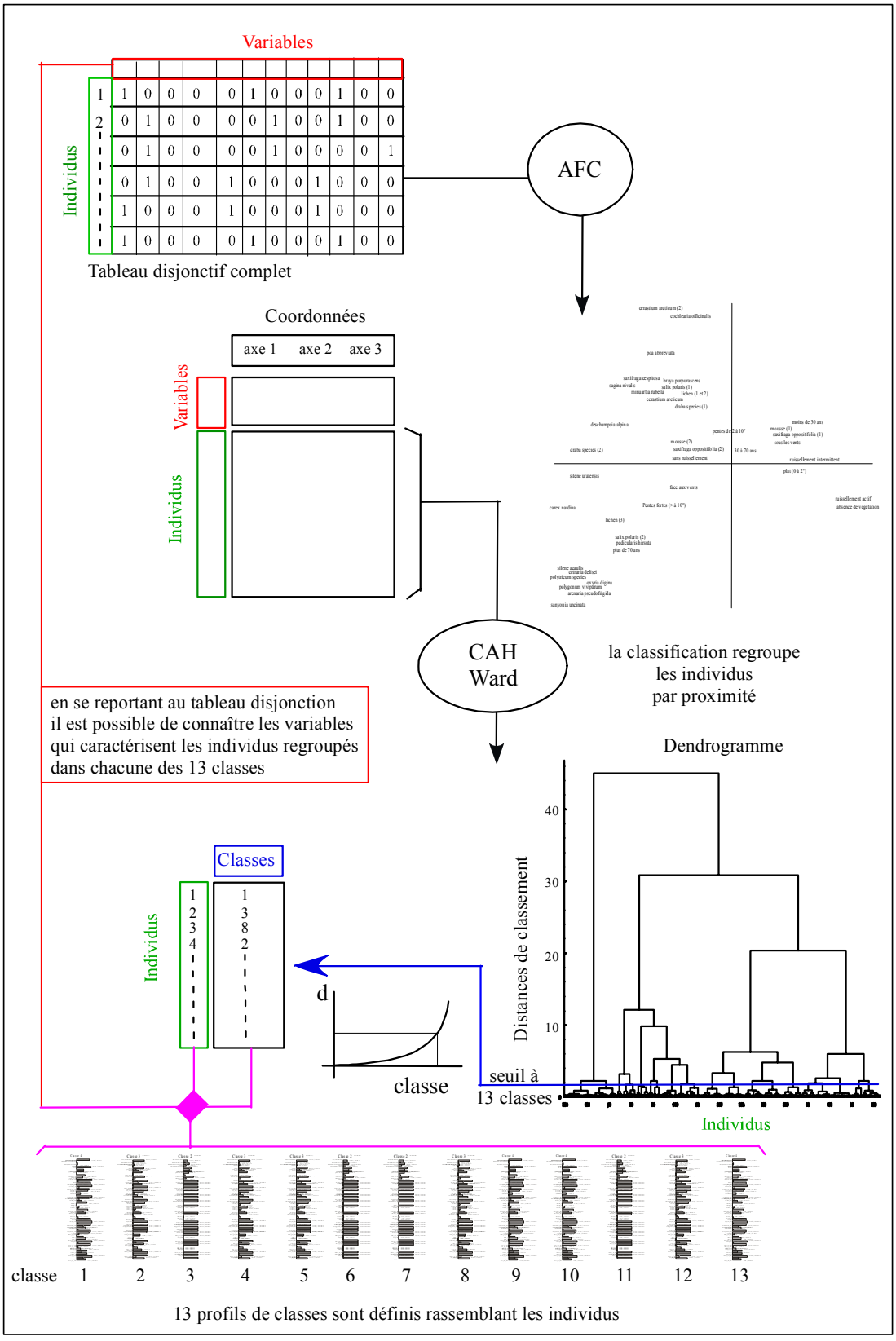


Fig. 63 – Méthodes d'analyses multivariées.

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

Pour chaque classe, nous connaissons le nombre d'individus qui la constituent et le nombre d'individus concernés par les différentes modalités des variables analysées. Par exemple, d'après la figure 64, pour la variable ruissellement, du profil de la classe 3, 29 individus prennent la modalité *sans ruissellement*, ce qui signifie que 78 % des individus, de la classe, possèdent la modalité *sans ruissellement*. C'est sur la base de ces profils que nous avons développé un modèle de probabilités conditionnelles de Bayes.

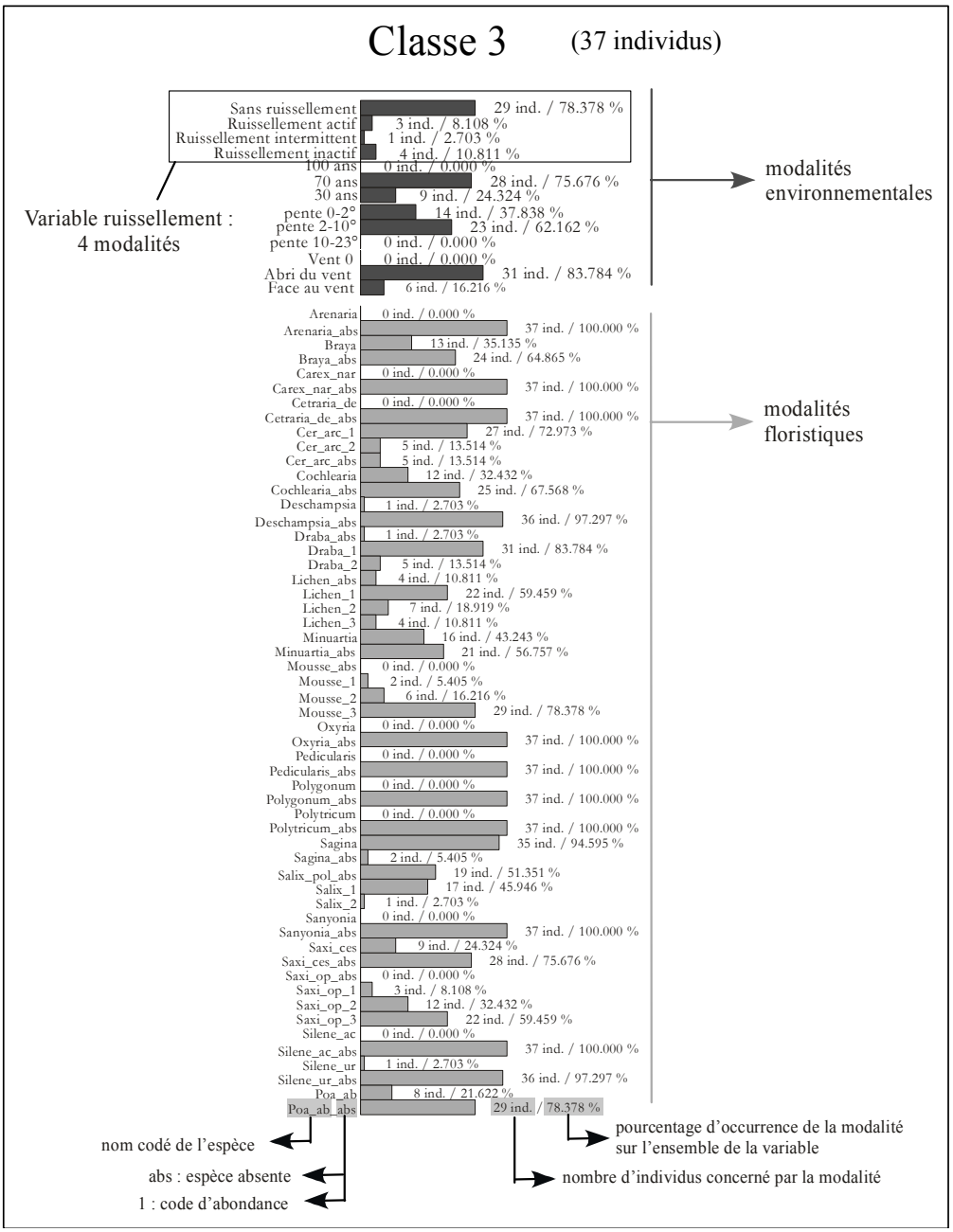


Fig. 64 – Exemple d'un profil de classe issu de la classification hiérarchique ascendante. *Le nom des espèces est reporté en abrégé dans le profil dont la liste complète est donnée en annexe.*

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

3.4. Modélisation probabiliste

Dans ce travail, nous reprenons une démarche qui a été initiée par Th. Brossard dans sa thèse (1991). D'autres développements, auxquels nous avons été dernièrement associée, ont permis de compléter ces travaux tant d'un point de vue formel qu'en terme d'application (M. Moreau *et al.*, [*in press*]). L'enquête que nous avons conduite en observant la végétation par l'échantillonnage, restitue une connaissance ponctuelle des distributions et des structures. Notre objectif est de pouvoir généraliser cette information de manière à porter un diagnostic. À cette fin, nous utilisons un modèle inductif de probabilités qui permet de croiser l'information endogène ponctuelle (données de végétations observées) et informations exogènes connues (image, MNT, cartes thématiques telles que pente, température…). Le théorème de Bayes des causes connues ou probabilités conditionnelles est parfaitement adapté à notre démarche. L'occurrence des différentes variables observée à l'intérieur des classes factorielles est considérée comme un modèle de distribution empirique (causes connues) qui sera utilisé pour dresser les tables de probabilités conditionnelles par la suite.

3.4.1. Théorème de Bayes

Thomas Bayes (1702-1760), pasteur et mathématicien anglais (B. Goldfarb et C. Pardoux, 2000), a développé un modèle de probabilités qui porte aujourd'hui son nom. Le théorème de Bayes sert à calculer des probabilités conditionnelles de variables aléatoires (1).

(1) $$P(Bi|A) = \frac{P(A \mid Bi).P(Bi)}{\sum_{j=1}^{n} P(A \mid Bj).P(Bj)} = \frac{P(A \mid Bi).P(Bi)}{P(A)}$$

où : P(Bi|A) : probabilité conditionnelle de l'événement Bi sachant que l'événement A est réalisé ;
P(Bi) : probabilité conditionnelle de l'événement Bi ;
P(A|Bi) : probabilité conditionnelle de l'événement A sachant que l'évènement Bi est réalisé ;
P(Bj) : probabilité conditionnelle de l'événement Bj ;
P(A|Bj) : probabilité conditionnelle de l'événement A sachant que l'événement Bi est réalisé ;
P(A) : probabilité conditionnelle que l'événement A survienne ;
n : nombre d'événements possibles.

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

D'après M.E. Borsuk *et al.* (2004), le réseau bayésien consiste en une structure graphique associée à une description probabiliste des variables d'un système. *La structure graphique représente les suppositions de cause à effet entre les variables du système. Ces suppositions permettent à la chaîne du complexe causal, reliant les actions aux conséquences (facteurs), d'être factorisée dans une séquence articulée de relations conditionnelles. Chacune des relations peut alors être indépendamment quantifiée en utilisant un sous-modèle approprié pour le type et l'échelle de l'information disponible.*

L. Nilsen *et al.* (1996, 1999) ont mis en pratique l'utilisation d'un tel modèle de probabilités empiriques, à partir d'informations dérivées du MNT, en presqu'île de Brøgger. Ils ont réalisé des cartes de probabilités montrant les distributions actuelles et potentielles de communautés de plantes, d'abord pour le secteur aval du glacier Midre Lovén (depuis le front du glacier jusqu'au littoral), puis pour l'ensemble de la presqu'île. Comme nous l'avons évoqué précédemment, leur démarche s'applique difficilement à l'espace intramorainique, puisqu'elle est fondée sur des résultats d'échantillonnage qui ont été conduits à la fois dans les secteurs déglacés et sur les anciens niveaux marins. Une cartographie probabiliste de l'espace morainique nécessite de tenir compte des niveaux de développement progressif du couvert végétal, eux-mêmes conditionnés par l'âge des surfaces. Cette condition demande une modélisation propre à la marge proglaciaire. C'est ce que nous nous proposons de faire pour la marge du glacier Midre Lovén.

3.4.2. Expérimentation probabiliste sur la marge du glacier Midre Lovén

Ont été calculées :

- les probabilités d'observer une modalité connaissant *a priori* les fréquences d'apparition des classes par modalité, comme dans le tableau 5 ;
- les probabilités d'appartenir aux différentes classes connaissant *a priori* les fréquences d'apparition des modalités par classe, comme dans le tableau 6.

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

classe	sans ruis.	ruis. actif	ruis. inetr.	ruis. inactif	âge 3	âge 2	âge 1	0° à 2°	2° à 10°	plus de 10°	vent NC	abri vent	face vent	Total
1	3.63	4.99	3.63	4.12		13.50	7.94	5.40	13.75			14.92	1.23	100
2	16.84	7.18	17.31	2.53	1.22	14.49	6.55	7.72	8.89	0.42	2.95	13.99	1.53	100
3	39.67	4.28	1.54	1.37		17.56	3.59	4.39	13.19			14.14	0.86	100
4	46.85			1.65		23.43		5.86	1.65			9.94	2.22	100
5	39.83		1.46	1.90	1.27	5.22	5.53	0.44	11.85	7.11	1.79	4.43	1.19	100
6	37.59	4.90		2.35	12.73	12.92		3.77	12.73	1.76	2.56	6.27	2.94	100
7	41.77			0.83	13.92	8.84			2.68	14.46	16.87		0.67	100
8	43.48		3.35		25.96			1.99	12.68	3.26	5.77		3.62	100
9	43.77			1.22	1.32	2.61	0.79	2.23	16.21		2.13	11.35	1.13	100
10	39.70			2.79	3.23	16.63	2.44		19.77	1.47	9.77	3.72	1.74	100
11	33.32	8.90		3.23		12.92	7.48	6.46	1.68			17.94		100
12	36.55	9.52		0.76		22.34		6.98	7.61			16.24		100
13	43.88				19.13	4.22			3.66	13.16	15.36		0.91	100

Tableau 5 - Probabilités conditionnelles d'une modalité connaissant les classes *(ruis. : ruissellement ; âge 3 : 100 ans de déglaciation ; âge 2 : 70 ans ; âge 1 : 30 ans ; inclinaison des surfaces : plat, 2° à 10° et plus de 10°C ; vent NC : pas d'informations sur les conditions de vent, abri vent : site à l'abri du vent, face vent : site exposé au vent).*

classe	sans ruis.	ruis. actif	ruis. inetr.	ruis. inactif	âge 3	âge 2	âge 1	0° à 2°	2° à 10°	plus de 10°	vent NC	abris vent	face vent
1	5.438	11.81	13.03	17.23	0	7.049	21.78	11.02	8.544	0	0	12.24	6.225
2	3.012	17.01	62.53	10.63	1.172	7.579	18.18	15.86	5.566	0.837	3.767	10.82	5.378
3	7.868	11.49	4.225	6.386	0	10.24	11.06	10	9.104	0	0	12.95	4.845
4	9.202	0	0	4.922	0	13.54	0	13.22	7.323	0	0	9.019	12.45
5	8.108	0	6.012	9.087	11.27	3.123	17.48	1.017	8.45	16.09	15.7	4.163	6.895
6	7.301	12.88	0	10.74	13.32	7.383	0	8.412	8.655	3.804	2.854	5.622	16.3
7	9.322	0	0	4.219	16.75	5.801	0	0	2.092	35.86	26.91	0	4.268
8	9.126	0	14.21	0	29.31	0	0	4.807	9.32	7.607	8.562	0	21.73
9	9.035	0	0	5.907	1.466	12.18	2.273	5.288	11.72	0	3.139	10.82	5.976
10	7.808	0	0	13.13	3.257	9.775	7.576	0	13.83	2.324	13.95	3.436	9.96
11	6.214	20.24	0	14.06	0	7.09	21.65	13.85	6.974	0	0	15.46	0
12	7.529	26.57	0	3.692	0	13.54	0	16.52	5.492	0	0	15.46	0
13	10.04	0	0	0	23.45	2.707	0	0	2.929	33.47	25.12	0	5.976
Total	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

Tableau 6 - Probabilités conditionnelles pondérées d'une classe connaissant les modalités *(ruis. : ruissellement ; âge 3 : 100 ans de déglaciation ; âge 2 : 70 ans ; âge 1 : 30 ans ; inclinaison des surfaces : plat, 2° à 10° et plus de 10°C ; vent NC : pas d'informations sur les conditions de vent, abri vent : site à l'abri du vent, face vent : site exposé au vent).*

Le profil des variables peut être pondéré par l'effectif des classes pour éliminer les contraintes liées à des masses trop disparates. Dès lors, comme le soulignent A. Guisan et N.E. Zimmermann (2000), le modèle bayésien peut être utilisé comme un opérateur cartographique pour restaurer la distribution spatiale des types de végétation ; c'est ce que nous mettons en pratique pour l'ensemble de la marge.

Plusieurs types de cartes peuvent être obtenus à partir des tables de probabilités conditionnelles. En particulier, une carte des classes ayant la plus forte probabilité d'apparition a été dressée pour la marge du Midre Lovén. Un des principes du théorème

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

de Bayes est que tous les événements ont une probabilité non nulle, donc pour un individu donné nous pouvons observer différentes distributions de probabilités : dans certains cas une classe domine, dans d'autres plusieurs classes offrent des niveaux comparables. Des cartes de probabilités d'appartenir à chacune des classes sont alors dressées. Ces dernières permettent de visualiser les secteurs pour lesquels l'affectation d'une classe à un pixel est plus ou moins significative.

Conclusion

Nous venons de voir comment, en fonction des niveaux d'échelles d'observation des marges, des surfaces à couvrir et du niveau de précision recherché dans l'information, nous avons dû développer différents plans d'échantillonnage, méthodes de collectes et traitements statistiques. En particulier, par rapport aux éléments floristiques, il s'avère que, pour l'étude conduite sur cinq sites, la fréquence des espèces est une donnée suffisante pour l'observation de la reconquête végétale. En effet, les différences entre les cortèges floristiques se marquent par la présence ou l'absence d'une espèce. En revanche, la fréquence est une donnée insuffisante pour une approche plus fine des milieux, sur un site, où seules quelques espèces colonisent la majorité des micromilieux. L'abondance est alors utilisée pour retranscrire les niveaux de développement du couvert végétal car les différences ne s'inscrivent pas dans les composantes des cortèges floristiques, mais dans les niveaux d'occupation au sein d'une même espèce. La localisation des espèces communes est alors justifiée avec les données d'abondance.

Les données collectées sur le terrain sont ensuite mises en relation avec l'information exogène disponible pour les sites, qui ne peut être connue d'après les observations de terrain. C'est le cas de la datation des surfaces et de l'information climatique et topographique dérivées du MNT pour la marge du Midre Lovén. Ces données exogènes s'intègrent, en complément de ce qui est observé *in situ,* comme variable explicative des répartitions spatiales des espèces et des niveaux de développement du couvert végétal. Enfin ces données, sous forme d'images, sont aussi des supports spatiaux pour cartographier les variations spatiales que ce soit ponctuellement ou de manière couvrante en utilisant un modèle de probabilités. Du fait de la diversité et de la

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

précision des données dont nous disposions, la marge proglaciaire du Midre Lovén est un terrain d'expérimentation privilégié pour développer un modèle d'inférence statistique.

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

Conclusion de la première partie

À l'échelle du Spitsberg et de l'histoire de la mise en place des principales structures paysagères, les marges proglaciaires sont des environnements pionniers. L'observation de la reconquête végétale, à l'intérieur des marges, est une ouverture sur la compréhension des modalités régionales et locales de l'implantation des composantes floristiques notamment parce qu'il est possible d'en reconstruire la chronologie. Les photographies aériennes sont un atout majeur pour dater les séquences morainiques. Elles permettent d'estimer les temps de mise en place des séquences floristiques et ce comme aucun autre environnement pionnier ne le permet et avec un pas de temps relativement court, depuis la fin du Petit Âge Glaciaire. Les autres environnements pionniers sont majoritairement les secteurs affectés par des morphodynamiques qui maintiennent la formation végétale à un niveau de développement floristique faible avec une couverture de quelques pourcents des surfaces. C'est le cas, par exemple, des versants affectés par les *debris flows*, les éboulis (M.-F. André, 1993) et les zones de sandurs (D. Mercier, 1997). Ce n'est que lorsque la dynamique s'arrête que le couvert végétal peut évoluer au-delà d'un stade strictement pionnier. Pour ces environnements pionniers, il est difficile de dater les étapes de mise en place du couvert végétal et ce pour plusieurs raisons. En premier lieu, il faut pouvoir estimer la période d'arrêt de la dynamique afin de dater la phase d'amorce de la colonisation végétale, tel que le changement de lit du cours d'eau, la stabilisation de l'éboulis, etc. Ensuite, il est souvent difficile de trouver plusieurs manifestations d'un même type de morphodynamique, stabilisé après des laps de temps différents, qui permettraient de reconstruire à travers différentes séquences temporelles la chronologie de mise en place des éléments floristiques. Les marges proglaciaires sont donc des espaces offrant les meilleures possibilités pour observer et comprendre les étapes de mise en place des paysages biogéographiques.

La méthodologie développée assure le lien entre les observations détaillées endogènes, réalisées *in situ,* et des données exogènes moins précises mais couvrant l'ensemble des surfaces considérées. L'opérationnalité de la démarche est avérée mais elle trouve ses limites dans la représentativité des informations utilisées qui peuvent introduire des

biais dans l'analyse. On l'a vu avec les photographies aériennes, utilisées pour dater l'âge des surfaces, où seules trois auréoles ont pu être interprétées. Leur délimitation ressort nettement dans la synthèse des résultats. Néanmoins, en tenant compte de ces limites, le lien entre les données endogènes et exogènes est assuré et permet de passer à une phase appliquée de l'analyse régionale et locale de la reconquête végétale.

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

Deuxième partie

Les modalités régionales de la reconquête végétale au Spitsberg

Dans l'odyssée pierreuse, au creux même de ce temps élémentaire et primitif, le minéral sauvage et brutal, rude et sec, trahit un passé : des résistances avérées, des usures manifestes, des dynamiques évidentes, des énergies trahies, des forces exacerbées. Dans ce monde apparemment immobile, stable et silencieux, la puissance parle, celle de la nature radicale et amorale, tellurique et primitive, inhumaine et majestueuse. Puissance de monstres ou de complices aveugles. Feu de gel et brisures du dégel, eau des brumes sombres et imprégnation des humidités génésiques, air sec et rare des souffles hyperboréens, puis vents coulis venus des enfers dantesques (M. Onfray, 2002).

Photo 32* - Salix polaris *aux couleurs de l'automne. *Ancien niveau glacio-marin de la baie de Pétunia, 20 août 2003.*

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

Introduction de la deuxième partie

La colonisation végétale des marges proglaciaires a déjà été observée au Spitsberg. Au sud de l'île, dans le Hornsund, M. Kuc (1964) a observé les évolutions floristiques sur la marge du glacier Treskelen. Dans le nord-ouest, en presqu'île de Brøgger, Th. Brossard (1985) a décrit les modalités d'installation des espèces sur un secteur externe du vallum du glacier Midre Lovén. Dans le centre du Spitsberg, à Isfjord, W. Ziaja et E. Dubiel (1996) ont suivi la colonisation des plantes vasculaires sur les moraines de glaciers de montagne. Dans un travail préliminaire à cette thèse, nous avons identifié les rythmes et les modalités de la colonisation végétale sur les marges des glaciers Midre et Austre Lovén (Moreau, 2001, 2003). Enfin, I.D. Hodkingson *et al.* (2003) ont également observé la colonisation des marges du glacier Midre Lovén en adoptant une démarche d'observation proche de celle que nous venons de détailler dans le chapitre consacré à la méthodologie, à savoir un plan d'échantillonnage le long de transects. Cependant, l'étude de I.D. Hodkingson *et al.* se résume à une prospection de long d'un unique transect ne permettant pas de couvrir l'ensemble de la marge proglaciaire.

La diversité méthodologique des études antérieures ne permet pas d'effectuer des comparaisons et de dégager des traits caractéristiques pour jalonner l'évolution paysagère des marges proglaciaires depuis la fin du Petit Âge Glaciaire au Spitsberg, en faisant la part de la tendance générale et des dérives locales. Nous souhaitons apporter des éléments de réponse quant aux rythmes et à la manière dont se fait la progression du couvert végétal en comparant ce processus sur cinq marges déglacées. Notre objectif est d'établir un calendrier de mise en place des composantes floristiques et d'identifier les paramètres qui différencient les temps de réponse de la végétation à l'échelle des cinq marges.

Les résultats présentés dans cette partie s'appuient sur les données collectées selon des cheminements en transects, qui rassemblent des relevés floristiques, pétrographiques et granulométriques (1 550 relevés, fig. 65 a). Dans un premier temps, les similitudes et les différences entre les marges proglaciaires seront présentées. Dans un deuxième temps, en nous appuyant sur la chronologie du recul glaciaire, nous procéderons à une

analyse des cortèges floristiques par secteur morainique daté (fig. 65 b). Dans un troisième temps, nous examinerons les modalités de la reconquête végétale à partir d'une analyse espèce par espèce, à l'intérieur des sites proglaciaires (fig. 65 c). Enfin, dans une quatrième étape, nous tenterons une synthèse par l'AFC en connectant l'ensemble des données floristiques des cinq sites et les variables environnementales (durées de déglaciation et granulométrie).

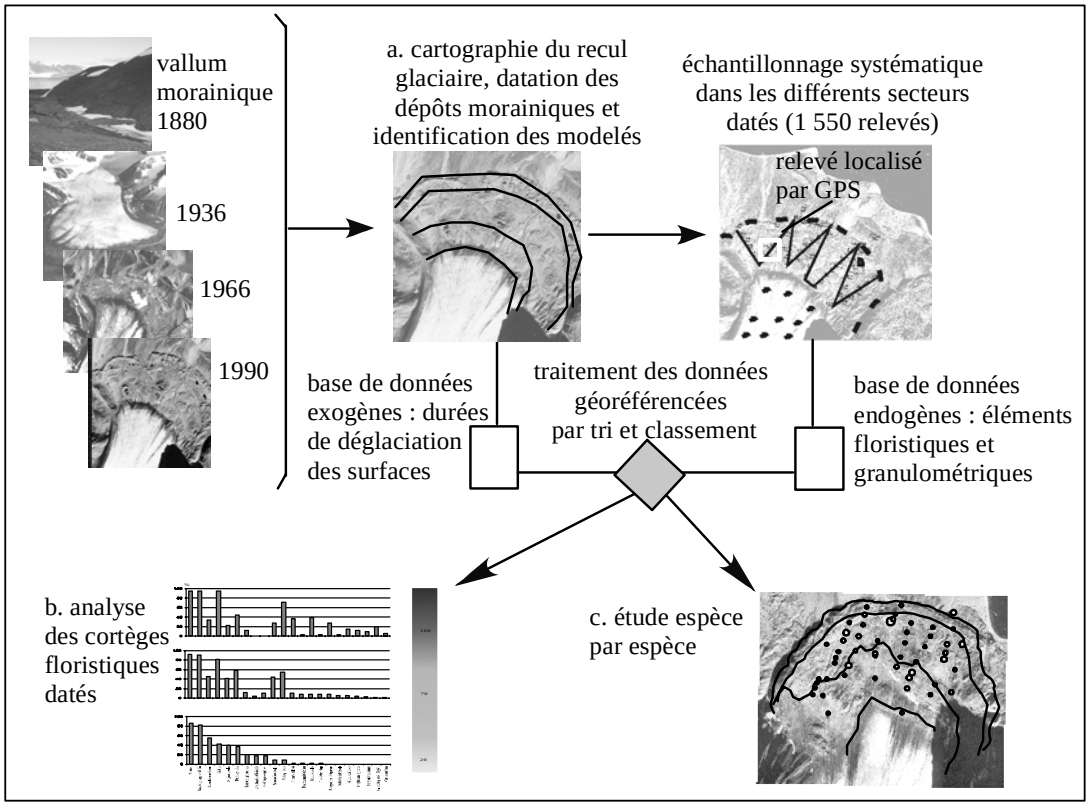


Fig. 65 - Rappel méthodologique de l'observation de la reconquête végétale au Spitsberg à l'échelle de cinq marges proglaciaires.

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

Chapitre 3

Le contexte des cinq marges proglaciaires étudiées

1. Datation des surfaces morainiques déglacées
2. Hétérogénéité des secteurs intramorainiques
3. Modelés morainiques

Photo 33 – Front du glacier Blomstrand, *prise de vue depuis le fjord vers le nord, juillet 2004.*

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

La végétation arctique est très sensible aux conditions locales de son environnement et notamment à la topographie. De la forte relation qui existe entre milieu et végétation, que nous avons exposée dans le chapitre 1, nous retiendrons la nécessité de bien connaître l'environnement dans lequel nous observons le couvert végétal afin de cerner les paramètres physiques susceptibles d'avoir un impact sur son implantation. Nous retiendrons également la variété des structures morainiques qui implique d'identifier points communs et différences entre les sites avant de comparer les cortèges floristiques de chacune des marges proglaciaires.

1. Datation des surfaces morainiques déglacées

Parmi les données exogènes rassemblées précédemment, les cartes du début du XX^{e} siècle et les photographies aériennes sont les témoins des positions successives des fronts glaciaires en recul. Elles permettent de cartographier les anciennes positions des glaciers et d'obtenir une datation relative en durée de déglaciation des dépôts morainiques. Notre objectif est de reconstituer des séquences morainiques d'âge équivalent entre les sites.

1.1. Fin du Petit Âge Glaciaire et amorce du recul des glaciers : les plus anciens dépôts morainiques

L'avancée glaciaire au cours du Petit Âge Glaciaire prend fin vers 1880 et se matérialise dans le paysage par d'imposants vallums qui subsistent encore aujourd'hui. L'absence de tout autre dépôt morainique, en aval de ces vallums, indique que l'avancée glaciaire maximale de l'Holocène a été atteinte durant le Petit Âge Glaciaire.

Dans le Kongsfjord[1], les dépôts qui composent les vallums actuels auraient commencé à se mettre en place dès 1880-1890, comme le montrent les clichés pris en 1892 par le suédois A. Hamberg (M.-F. André, 1993). Néanmoins, les fronts glaciaires n'amorcent leur recul qu'après 1918 (B. Lefauconnier, 1987) comme l'attestent les témoignages écrits, cartographiques et photographiques de cette époque (fig. 66).

[1] Pour des facilités de lecture, nous utilisons le terme de Kongsfjord pour englober les quatre sites proglaciaires situés sur la presqu'île de Brøgger (incluant le glacier Edith) et l'île de Blomstrand.

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

La carte du Kongsfjord établie par G. Isachsen en 1907, montre que les fronts glaciaires sont collés à de minces accumulations morainiques (fig. 66 a et b). Leur stagnation favorise l'accumulation de dépôts morainiques. Ainsi en 1912, G. Isachsen et A. Hoel (1913) écrivent à propos des glaciers Lovén : *les trois glaciers qui suivent, et qui de concert avec le névé le plus oriental portent le nom de névés Lovén, forment en leur front une série presque continue, leurs moraines frontales étant très rapprochées les unes des autres. Les névés Lovén se terminent par des fronts ayant 25 à 30 mètres de hauteur, et en partie verticale, en avant desquels il y a de puissantes moraines frontales, leur nom est donné par A. Hamberg en 1892. Il résulte de sa carte que ces glaciers étaient plus développés en 1892 qu'en 1861, mais moins développés qu'en 1907. Il semble donc qu'un progrès constant a eu lieu de 1861 à 1907. Le second névé (Lovén central) a avancé pendant ce temps d'environ 200 mètres*. Le vallum est donc toujours en construction en 1907 (fig. 66 b).

Il semble que les vallums se soient construits entre 1880, pour la face externe, et 1918, date à laquelle s'amorce le retrait glaciaire, ce qui explique l'imposante taille de certains vallums comme ceux des glaciers Lovén (fig. 67 a). Les glaciers Blomstrand et Ebba ont également un vallum bien conservé qui délimite l'extension maximale atteinte par le glacier en 1880 (fig. 67 b et c). En revanche, le vallum du glacier Edith n'existe plus, probablement détruit par les écoulements du glacier voisin, l'Ûvers (fig. 67 d). Il ne reste donc pas de traces de l'avancée maximale du glacier. Néanmoins, la position du glacier Edith de 1906-1907 a pu être retracée à partir de la carte de G. Isachsen qui montre que l'ancien front glaciaire allait au-delà de son cadre morainique actuel (fig. 67 b). Ce constat est confirmé par la photographie de 1907 (fig. 67 e). Les seuls dépôts du glacier Edith, datant de l'époque du Petit Âge Glaciaire, correspondent aux moraines latérales qui n'ont pas été remaniées depuis leur mise en place (photo 67 d). Elles dominent le site, à plus de 215 mètres d'altitude, témoignant de l'épaisseur du glacier à son maximum.

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

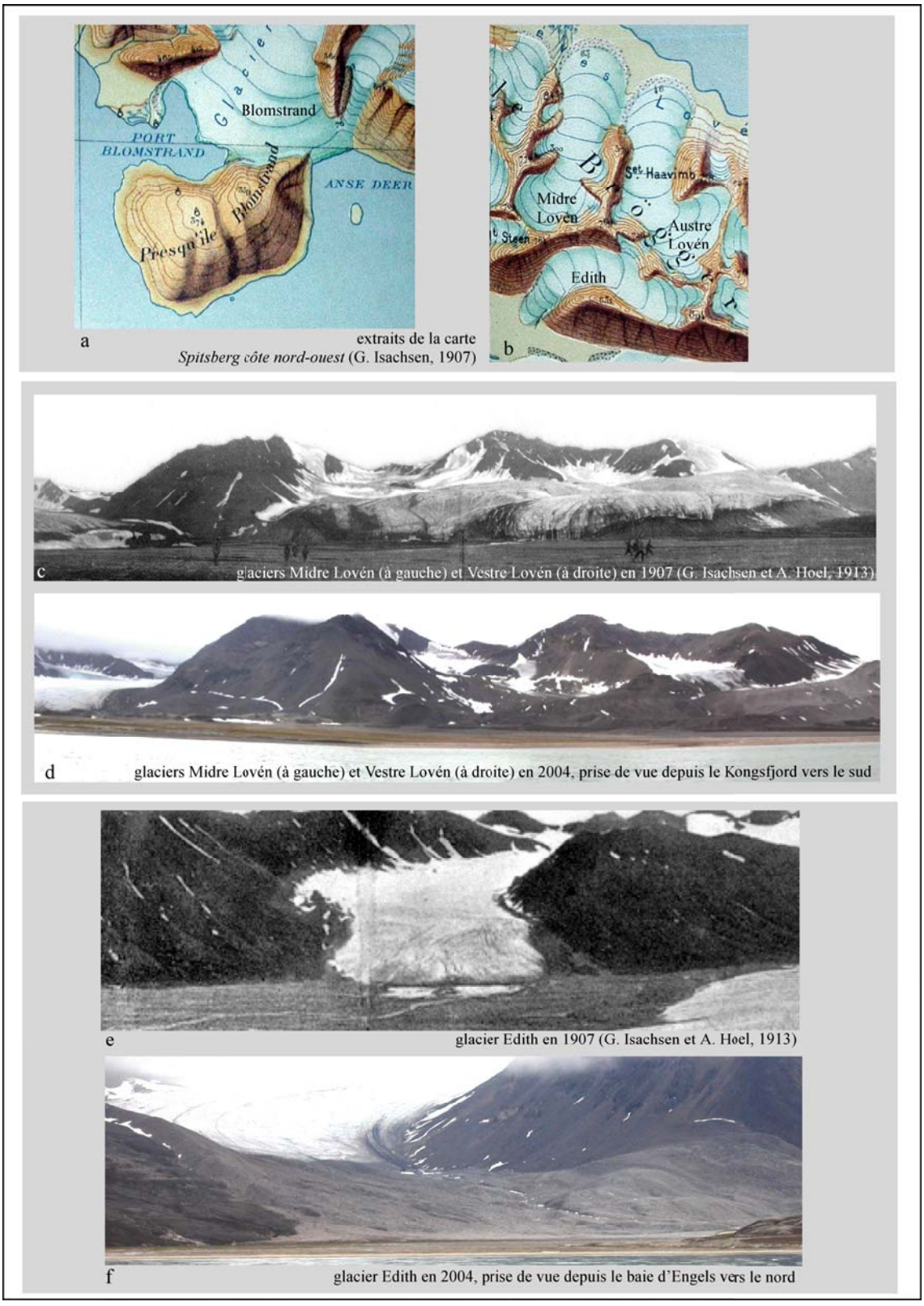


Fig. 66 – Documents de la mission au Spitsberg de G. Isachsen de 1906 et éléments de comparaison de 2004.

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

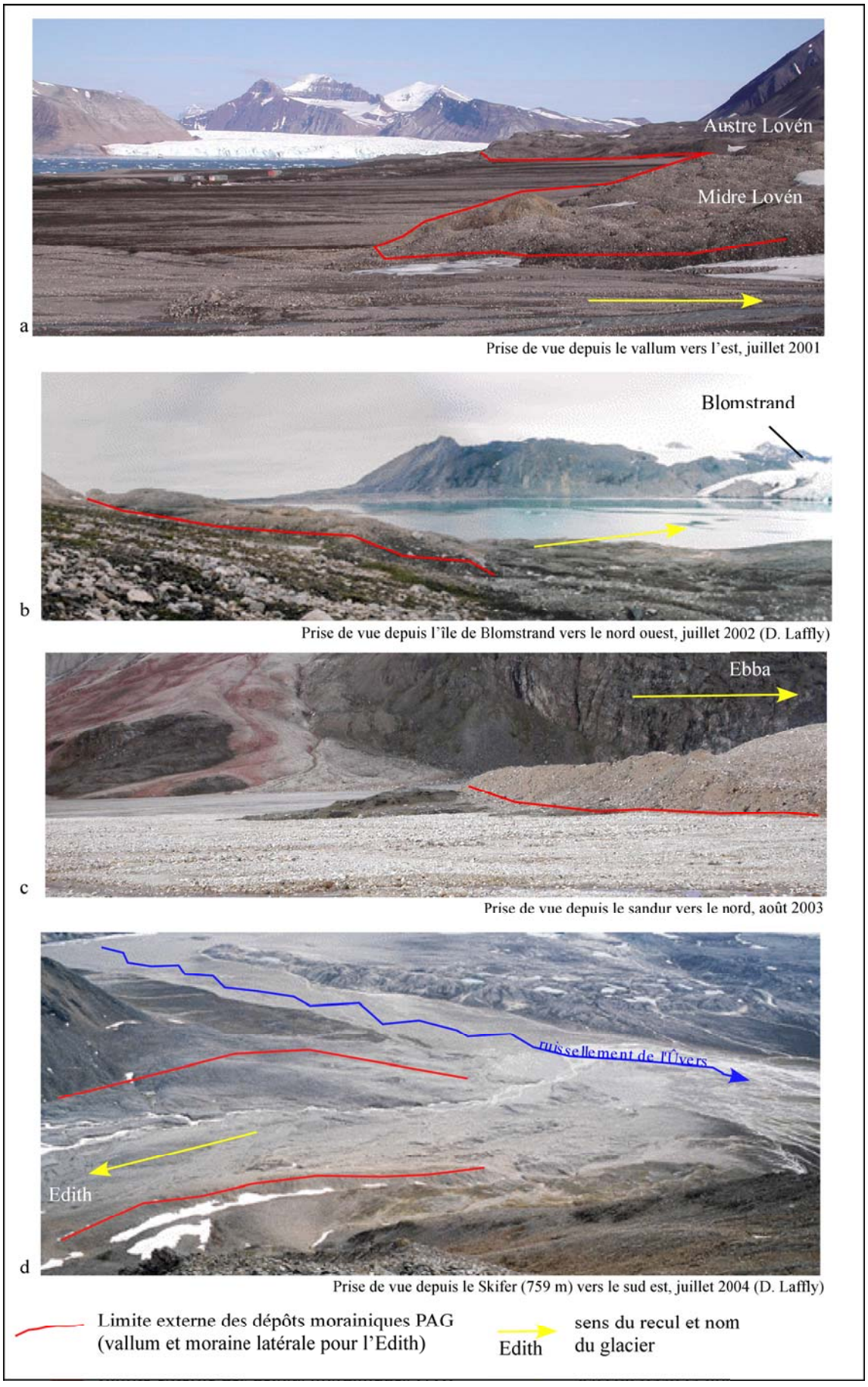
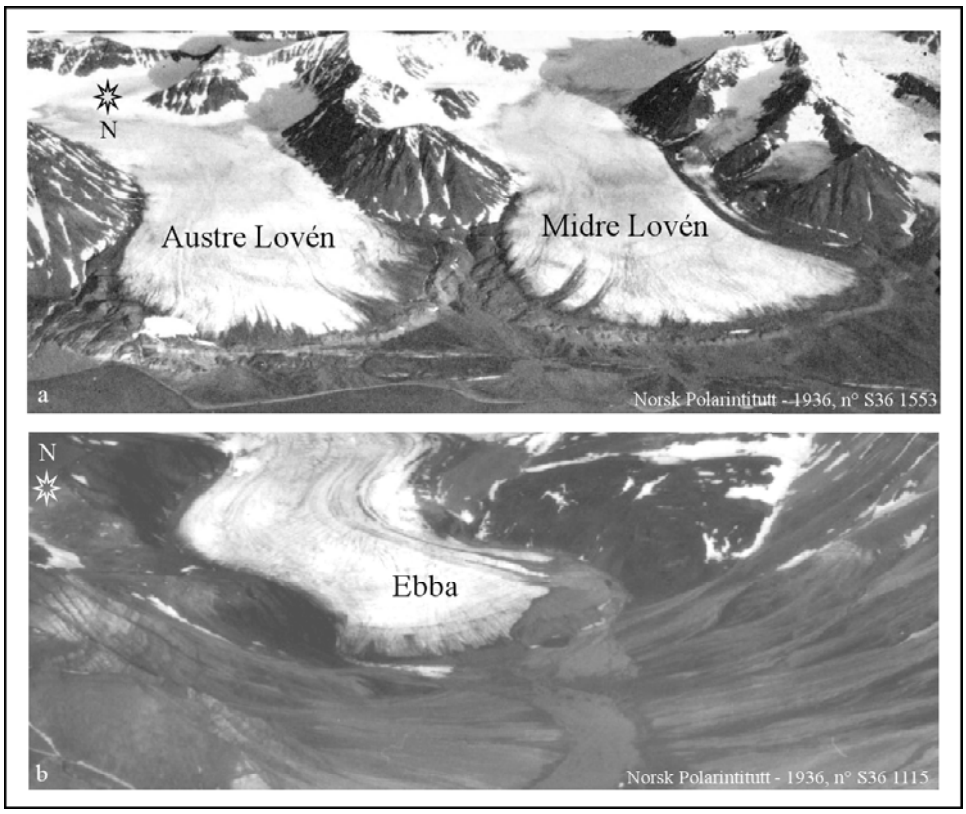


Fig. 67 – Limites d'extension maximale des cinq glaciers au cours du Petit Âge Glaciaire.

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

Nous considérons que les zones de vallum se sont dégagées dans la période 1880-1918 et constituent les plus anciens dépôts de notre chronologie. Pour les glaciers Lovén, nous savons que les vallums étaient complètement détachés des fronts glaciaires en 1936, à partir des photographies aériennes de cette époque (photo 34 a). Nous disposons également d'un cliché de 1936 pour le glacier Ebba qui témoigne de la déglaciation de la partie sud de la marge, mais la séparation entre vallum et front glaciaire est moins nette (photo 34 b). Aussi pour le glacier Ebba comme pour le glacier Blomstrand, nous datons la mise en place du vallum d'une période qui va de 1880 à 1918. Pour le glacier Edith, en l'absence de vallum frontal, nous savons que sa moraine latérale est datée du Petit Âge Glaciaire (fig. 67 d).

La durée d'élaboration de la zone comprise entre la face externe des vallums et leur retombée interne va donc de 65 à 125 ans d'âge.



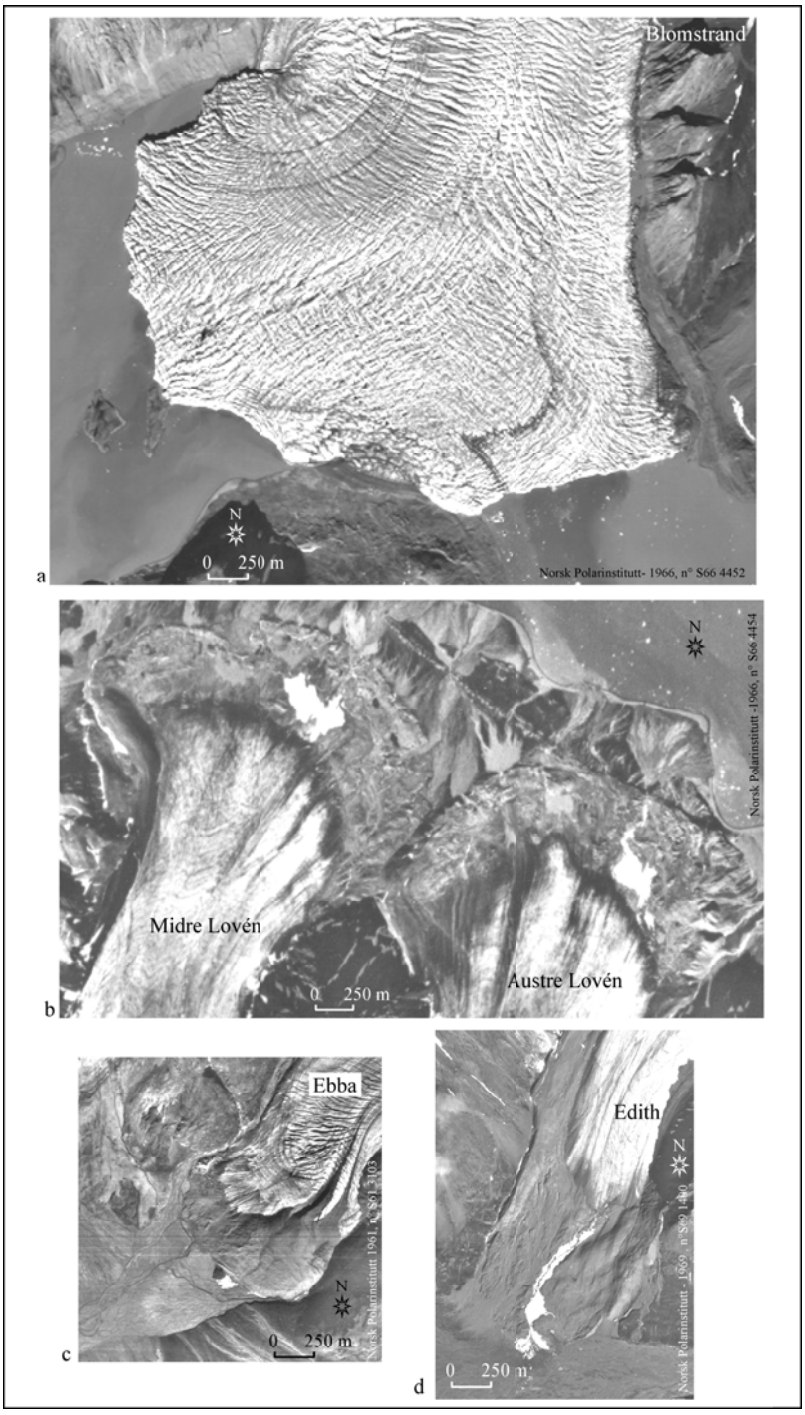
Photos 34 a, b – Photographies aériennes en vues obliques des glaciers Lovén (a) et Ebba (b) en 1936.

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

1.2. Le grand retrait glaciaire : 1918 à nos jours

La séquence suivante de dépôts morainiques datés s'inscrit dans une période qui court de 1918, avec la fin de la mise en place du vallum, aux années 60 avec une position des fronts que l'on peut, selon les sites, repérer avec les photographies aériennes de 1961, 1966 et 1969 (photos 35 a, b, c, d).



Photos 35 a, b, c, d – Photographies aériennes verticales des cinq glaciers dans les années 1960.

Depuis 1936, pour les glaciers Lovén, 1918 pour les autres sites, et jusque dans les années 1960-1970, de vastes espaces morainiques se sont dégagés. En 30 années, les glaciers Lovén ont reculé de 500 mètres ce qui représente, en distance, sur la base de leur recul cumulé dont la figure 68 donne les courbes, la moitié du retrait total et bien plus en surface. Le retrait du front du glacier Ebba se fait de manière dissymétrique entre la partie nord et sud avec 450 contre 350 mètres, comme nous l'avions déjà observé sur la photographie de 1936. Rapporté à sa taille, le glacier Edith a subi le plus important retrait qui s'établit à 1 000 mètres[1] (fig. 68). Quant au glacier Blomstrand, nous ne pouvons estimer son recul, faute des documents suffisants.

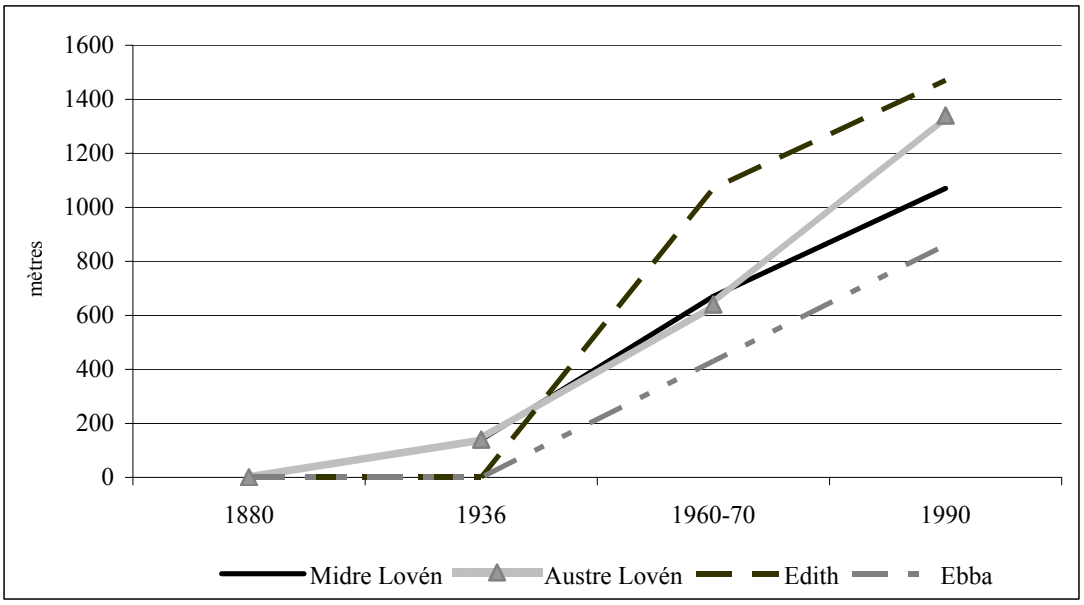


Fig. 68 – Reculs cumulés des glaciers depuis la fin du Petit Âge Glaciaire. *Les étapes successives des retraits sont estimées à partir des photographies aériennes. Nous n'avons pu calculer les distances pour le Blomstrand.*

Pour l'ensemble des glaciers, le recul constitue un mouvement général avec des paliers, mais sans reprise avérée, exception faite du glacier Blomstrand qui connaît un *surge* glaciaire en 1960 (J.O. Hagen *et al.,* 1993). Cette brutale avancée est encore visible dans le paysage, sous la forme d'une moraine de poussée (photo 36). La photographie du glacier Blomstrand de 1966 (photo 35 a) montre que sa masse imposante barrait le bras de mer de deux kilomètres de large pour atteindre l'île alors qu'aujourd'hui cet espace marin est complètement libéré.

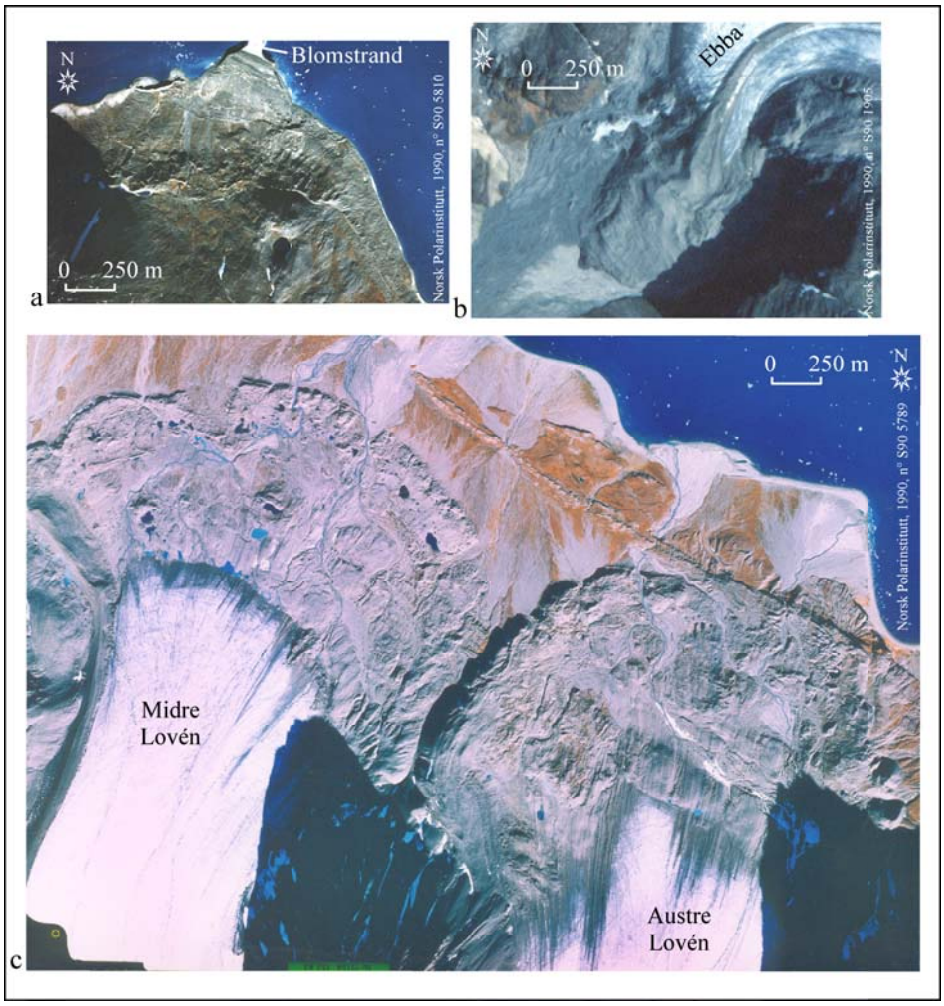
[1] La distance du retrait glaciaire de l'Edith est calculée à partir du front cartographié de 1906.

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

Photo 36 – Vue de profil de la moraine de* surge *du glacier Blomstrand de 1960. *La vue de profil montre la forme conique de la moraine, typique des dépôts qui ont été poussés par le front glaciaire. Prise de vue depuis la rive nord de l'île de Blomstrand vers l'ouest, juillet 2002.*

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

Depuis 1960, le glacier Blomstrand a libéré l'ensemble de sa marge proglaciaire. En 1990, comme le montre la photographie aérienne de l'époque, seul un pédoncule de glace reste accroché à une étroite bande littorale (photo 37 a). Le glacier Ebba a effectué un nouveau retrait de 430 mètres avec un réajustement du front, puisque la dissymétrie nord-sud constatée précédemment n'est plus visible (photo 37 b). Par ailleurs, entre 1961 et 1990, la partie nord de la marge proglaciaire du glacier Ebba a été reprise par un intense ruissellement qui fait, qu'aujourd'hui, il ne subsiste des accumulations morainiques déposées au cours des phases de retrait précédentes que quelques monticules résiduels. Les glaciers Lovén continuent leur retrait, accéléré pour le glacier Austre Lovén qui a connu un recul d'environ 700 mètres depuis 1966 et plus lent pour le glacier Midre Lovén avec un recul de 400 mètres environ (fig. 68). Le front du glacier Austre Lovén, dans la partie ouest, subit un retrait accéléré à la faveur d'un affleurement rocheux sur lequel la glace plus mince a fondu plus vite (photo 37 c). Enfin, le glacier Edith a reculé d'environ 400 mètres, c'est-à-dire moins qu'au cours de la période précédente.



Photos 37 a, b, c – Photographies aériennes des glaciers Blomstrand, Ebba et Lovén en 1990.

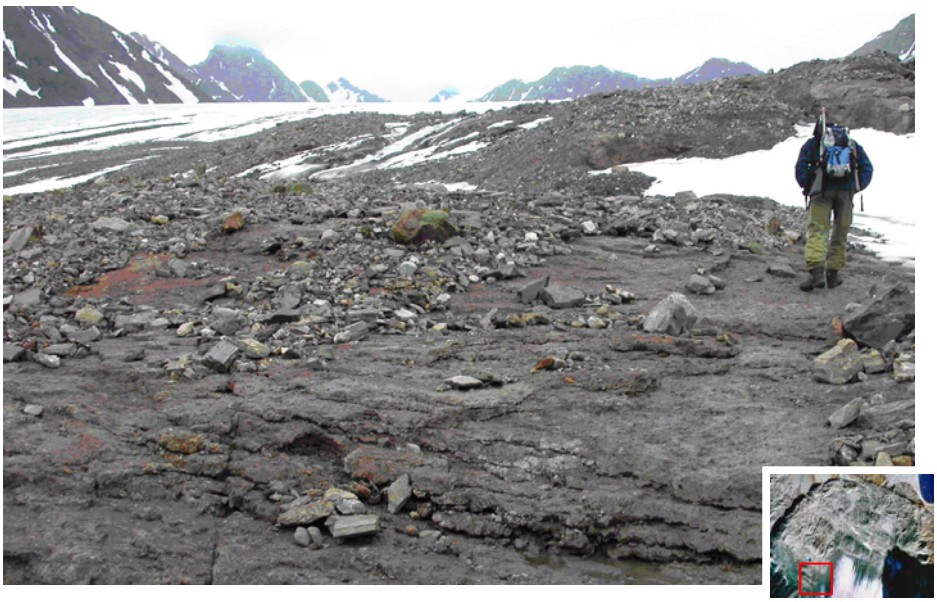


Photo 38 – Zone d'affleurement de la roche en place à la marge du glacier Austre Lovén. *L'affleurement induit une couche de glace fine qui fond plus rapidement que dans les secteurs où la roche n'affleure pas, entraînant un retrait plus rapide de la partie ouest du glacier. Prise de vue vers le sud-est, juillet 2004 et photographie aérienne de 1990 du Norsk Polarinstitutt (n° S 90 5789).*

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

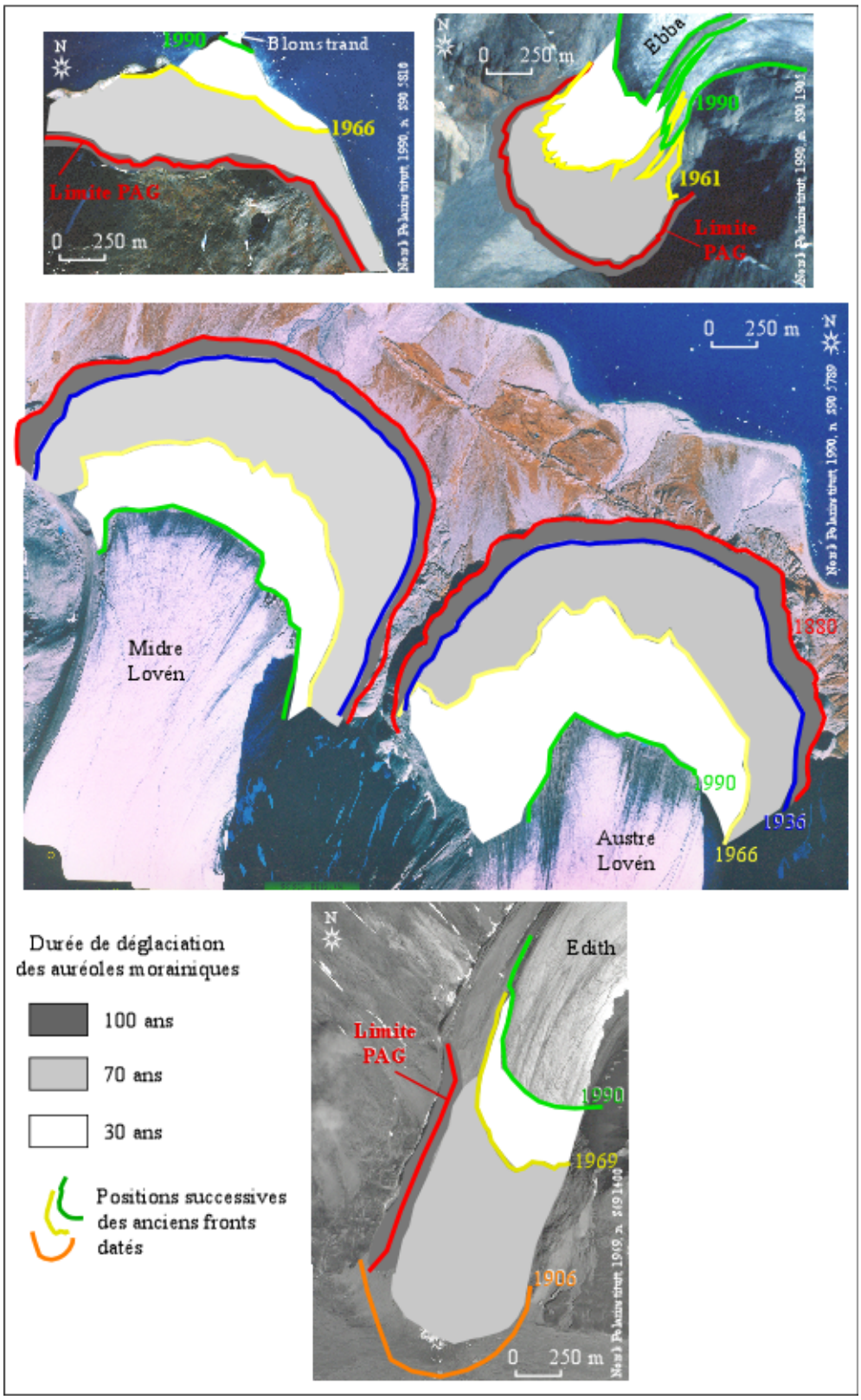


Fig. 69 – Auréoles morainiques datées des cinq marges proglaciaires.

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

Au total, pour chaque marge proglaciaire, trois pas de temps sont spatialement délimités en auréoles morainiques circonscrites par les anciennes positions des fronts glaciaires. Pour des facilités d'expression, nous avons choisi d'attribuer un âge moyen de déglaciation à chaque auréole morainique analogue sur les cinq sites, comme l'illustre la figure 69 : 100 ans, 70 ans et 30 ans.

2. Hétérogénéité des secteurs intramorainiques

Bien que le schéma chronologique du recul soit comparable d'un glacier à l'autre, les sites proglaciaires ont des systèmes morainiques différents en raison des configurations locales. Une première analyse des relevés pétrographiques et des observations géomorphologiques de terrain permet de caractériser chacune des cinq marges.

2.1. Composantes pétrographiques

Les caractéristiques pétrographiques des sites du Kongsfjord ont été établies à partir de relevés pétrographiques conduits sur les marges des glaciers Lovén, Edith et Blomstrand. Les relevés ont été réalisés avec l'aide de D. Sellier et M.-F. André. Ce travail a permis de compléter les informations apportées par la carte géologique[1]. En baie de Pétunia, nous n'avons pas réalisé de relevés pétrographiques. Les informations relatives à la géologie, que nous détaillons pour le site du glacier Ebba, nous ont été données par G. Rachlewicz.

2.1.1. Domination des roches sédimentaires dans la marge du glacier Ebba

Le glacier Ebba repose sur un lit rocheux constitué de roches carbonatées métamorphisées du Précambrien récent et de tillites de la partie inférieure de la formation de l'Hecla Hoek (P. Klysz *et al.*, 1988). Le bassin versant du glacier Ebba est composé de deux types de roches.

[1] Nous ne présentons pas la carte géologique que nous avons évoquée et illustrée par un extrait dans le chapitre 2, figure 40 (p. 113), en raison de son imprécision sur les formations superficielles.

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

- La partie supérieure du bassin versant est constituée par des nunataks qui émergent du glacier en amont et par des versants qui encadrent le glacier (photo 39). Ils sont constitués de roches sédimentaires du groupe Gipsdalen (Carbonifère moyen, Permien ancien) : calcaire, dolomie, argilite, conglomérat, gypse et grès. Les grès, de couleur rouge, livrent des fractions fines qui confèrent une teinte rougeâtre au site (photo 40).

- La partie aval du bassin versant, localisée autour de la langue glaciaire et de la marge proglaciaire, est constituée de roches métamorphiques du Protérozoïque moyen. Ce sont des gneiss, amphibolites, amphibolites à grenat et marbres, schistes à grenat et schistes (K.K. Dallman *et al.,* 1994). Un affleurement de schiste est visible à la marge du vallum (photo 39).

Les débris morainiques proviennent de la partie supérieure du bassin versant. Aussi présentent-ils un faciès sédimentaire, avec notamment des calcaires et des grès.

Photo 39 – La partie supérieure du bassin versant du glacier est constituée de roches sédimentaires. *Les roches sédimentaires font partie du groupe Gipsdalen dans lesquelles on trouve des calcaires, des grès et du gypse. La partie inférieure du bassin versant est constituée de roches métamorphiques du groupe Protézoïque moyen comprenant des schistes. Prise de vue depuis la vallée Ebba vers l'est, août 2003.*

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

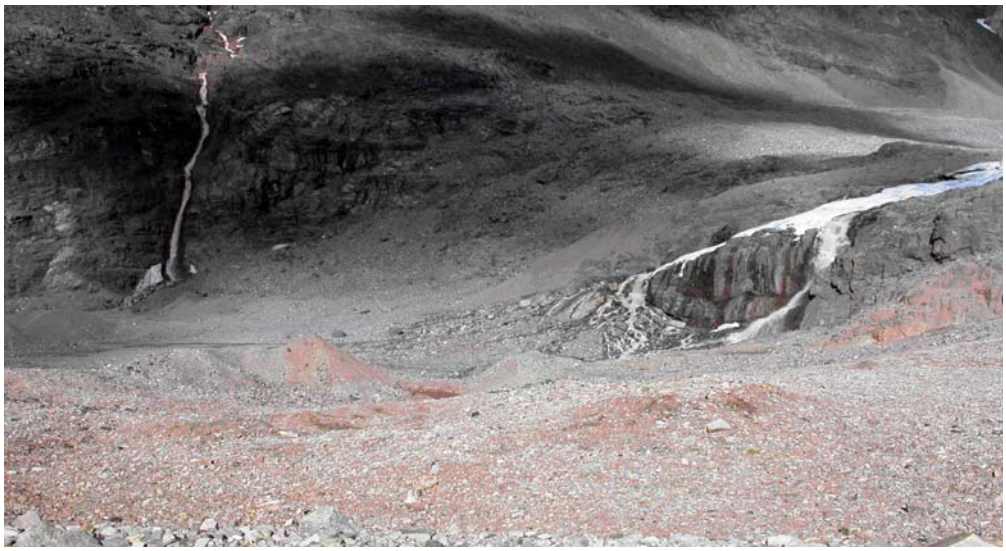
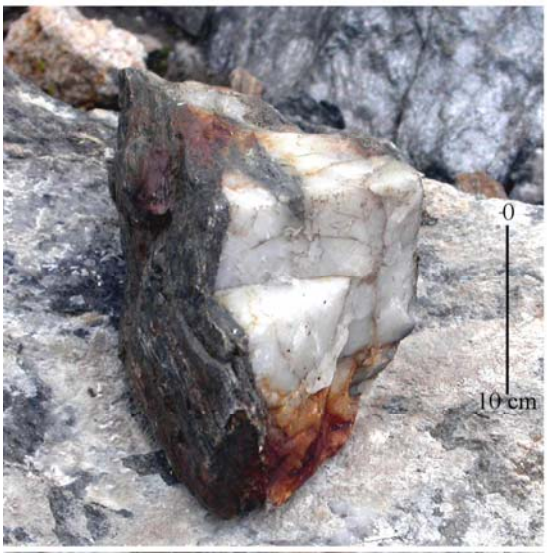


Photo 40 - Le site proglaciaire du glacier Ebba est dominé par les faciès sédimentaires. *Les grès rouges livrent une grande quantité de fines qui donnent une teinte rouge au site. Prise de vue vers le nord, août 2003.*

2.1.2. Domination des roches métamorphiques dans le Kongsfjord

Les marges des glaciers Edith, Midre et Austre Lovén sont situées dans le même ensemble de roches métamorphiques de l'Hecla Hoek (micaschistes, quartzites) et de grès rouges dévoniens (D. Mercier, 1998). Les spectres pétrographiques des sites, rassemblés dans le tableau 8, montrent la domination des micaschistes au sein des accumulations morainiques. Ils représentent environ 70 % des roches constitutives des dépôts sur les trois sites, et leur sont associés les quartz dits d'exsudation (photo 29).



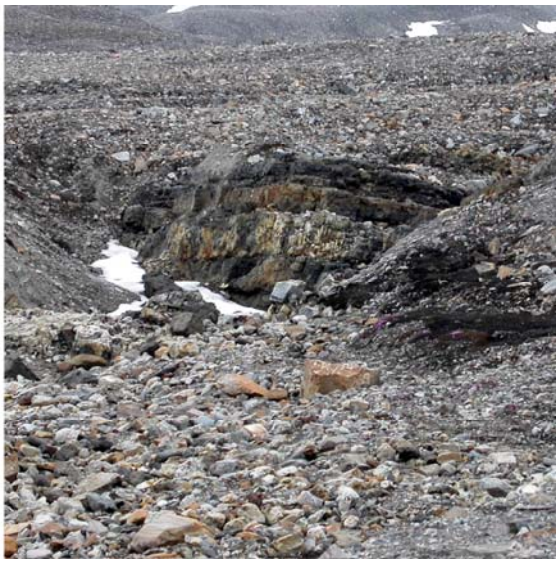


Photo 41 – Amygdale de quartz d'exsudation dans un bloc de micaschiste de la marge du glacier Austre Lovén*, cliché de gauche, juillet 2004.* ***Photo 42 - Barre calcaire à l'intérieur de la marge du glacier Austre Lovén.*** *Cliché de droite : l'affleurement calcaire alimente, au passage du glacier, la moraine en débris calcaires. On distingue des blocs plus clairs au premier plan qui correspondent à des débris soutirés à la barre, juillet 2002.*

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

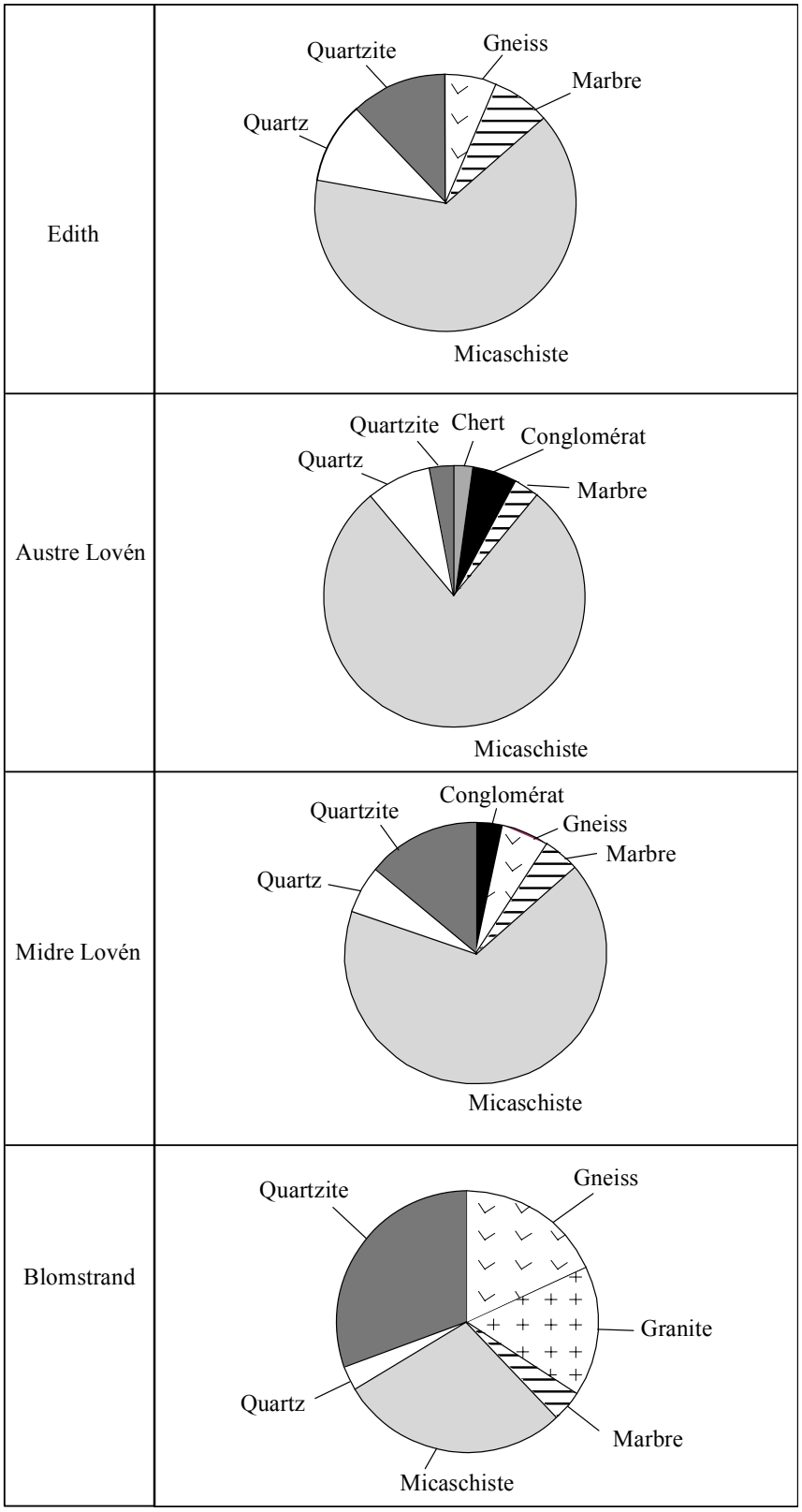


Fig. 70 - Spectres pétrographiques des sites proglaciaires du Kongsfjord*, réalisés à partir des relevés pétrographiques conduits le long d'un transect pour chaque marge proglaciaire.*

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

Les marbres sont également présents sur les trois sites et proviennent de l'affleurement permo-carbonifère, inégalement cristallisé, correspondant à des niveaux silicifiés à chert, sur lesquels reposent les marges proglaciaires (photo 42). Les calcaires ont un débit grossier et alimentent de manière ponctuelle les sites en matériel morainique. Les débris soutirés aux affleurements calcaires forment des traînées localisées en aval des barres calcaires, comme l'illustre la photo 42. Ils restent ponctuels et minoritaires, représentant moins de 10 % des dépôts sur les trois sites (fig. 70)

La marge proglaciaire du glacier Blomstrand repose sur les marbres précambriens de l'Hecla Hoek. Cependant, les marbres ressortent peu parmi les débris morainiques et ne représentent que 4 % des dépôts (fig. 70). Les débris morainiques du glacier Blomstrand sont beaucoup plus hétérogènes sur le plan pétrographique que ceux des glaciers Edith et Lovén, nettement dominés par les micaschistes. Bien que la marge proglaciaire du glacier Blomstrand repose sur les calcaires métamorphisés, les débris morainiques sont de nature siliceuse. Ils reflètent en cela la géologie du bassin versant comme l'indiquent les granites, qui constituent 16 % des dépôts, et les micaschistes qui ne sont pas rencontrés ailleurs sur l'île Blomstrand (fig. 70). Les micaschistes sont moins représentés que sur les marges des glaciers Lovén et Edith (28 %) et presque à part égale avec les quartzites (30 %). Les gneiss et granites sont plus abondants que sur les trois autres sites.

2.2. Caractéristiques granulométriques des moraines

Les relevés de végétation par transects sont accompagnés de relevés granulométriques de surface. Les classes retenues sont les suivantes : < 2 mm, 2-6 mm, 6 mm-5 cm, 5-25 cm et > 25 cm. La synthèse des relevés granulométriques permet de caractériser globalement chaque moraine. Les blocs erratiques, dont la taille est supérieure à un mètre, n'ont pas été intégrés dans les relevés malgré leur présence sur les sites proglaciaires (photo 31).

Les résultats sont présentés sous forme de graphiques, présentés sur la figure 80, qui permettent de comparer les sites entre eux. Chaque graphique présente le pourcentage de relevés, pour une classe granulométrique absente (0) et/ou couvrant : 0 à 10 %, 10 à 30 %, 30 à 50 % ou plus de 50 % du relevé échantillonné. L'analyse des graphiques

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

permet de classer les marges en trois groupes selon les pourcentages de recouvrement de chaque classe granulométrique.

- **Hétérogénéité granulométrique des moraines du glacier Edith**

La marge proglaciaire du glacier Edith est le seul site à rassembler significativement les cinq classes granulométriques, la classe des éléments supérieurs à 25 cm n'étant pas représentée dans les relevés des autres marges (fig. 71 e). Si l'on se reporte au pourcentage de recouvrement de chaque classe, les relevés montrent qu'aucune classe n'est dominante, chacune ne couvrant pas plus de 30 % de la surface du relevé. Les débris morainiques de la marge du glacier Edith sont plus hétérométriques que ceux des autres sites qui présentent une classe granulométrique dominante.

- **Homogénéité granulométrique des moraines des glaciers Austre et Midre Lovén**

Les dépôts du glacier Austre Lovén sont constitués à 50 % par les débris compris entre 6 mm-5 cm (fig. 71 c). Sur la marge du glacier Midre Lovén, les éléments de 5-25 cm sont présents dans 50 % des relevés avec un recouvrement compris entre 30 et 50 % (fig. 71 d).

Photo 43 - Bloc erratique de la marge du glacier Blomstrand. *La taille du bloc témoigne de la compétence élevée du glacier à l'époque du dépôt. Prise de vue depuis la marge proglaciaire, vers le nord, juillet 2004.*

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

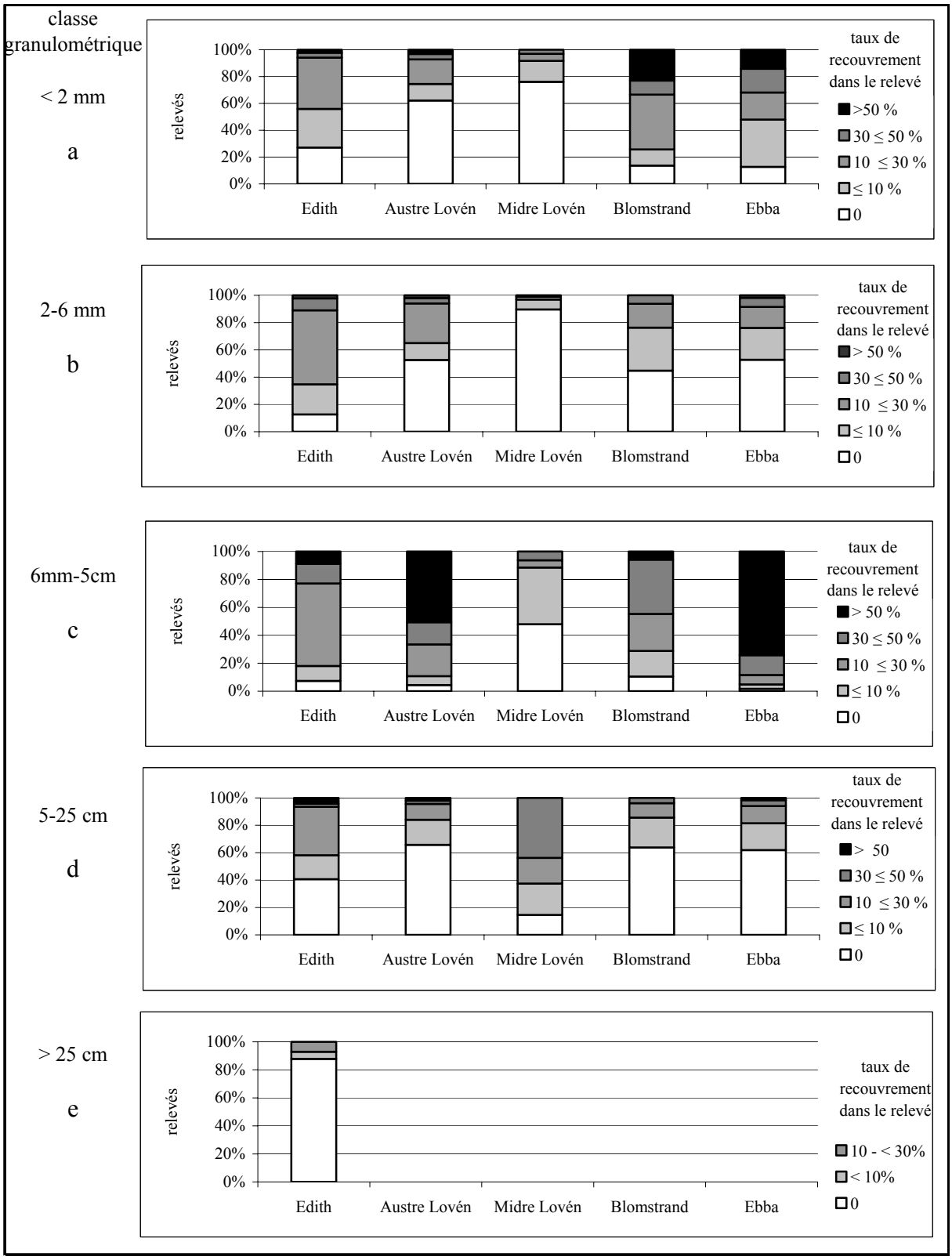


Fig. 71 - Pourcentage de recouvrement de chaque classe granulométrique sur les cinq marges proglaciaires *(d'après les 1 550 relevés réalisés selon l'échantillonnage en transect). Chaque graphique correspond à une classe granulométrique. Sur l'axe des abscisses est indiqué le site proglaciaire et en ordonnées le pourcentage de recouvrement de la classe granulométrique dans des relevés de 1 m². On lira, sur le graphique du haut, que les éléments < 2 mm sont absents dans 23 % des relevés et présents dans 77 % des relevés sur la marge du glacier Edith,. Les éléments < 2 mm couvrent en moyenne ≤ 10 % de la surface du relevé dans 35 % des relevés, entre10 ≤ 30 % de la surface dans 38 % des relevés, 30 ≤ 50 % dans 2 % des relevés et enfin plus de 50 % de la surface dans 2 % des relevés.*

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

Les éléments fins sont sous-représentés dans les marges des glaciers Lovén par rapport aux autres sites. À la lecture du graphique (fig. 71 a), leur présence est détectée dans moins de 40 % des relevés alors que les éléments fins sont présents dans plus de 50 % des relevés sur les marges des glaciers Blomstrand, Ebba et Edith. La granulométrie globalement plus grossière et mieux calibrée des glaciers Lovén est à mettre au compte de la nature pétrographique du bassin versant où les schistes délivrent des fragments aux formes mieux calibrées sous l'effet de la gélifraction.

- **Importance des fines dans les moraines des glaciers Ebba et Blomstrand**

Sur les marges des glaciers Ebba et Blomstrand, les éléments fins, < 2 mm, sont recensés dans plus de 80 % des relevés (fig. 71 a), avec une abondance respective de 30 % et de 20 %. Dans le cas du glacier Ebba, ces éléments fins sont livrés par les conglomérats et les grès. Dans le cas du glacier Blomstrand, ils proviennent des marbres tectonisés sur lesquels repose la marge.

Les différences pétrographiques se marquent à une échelle régionale entre le Kongsfjord et la baie de Pétunia. En revanche, des nuances dans la taille des débris morainiques sont évidentes entre les sites, traduisant l'histoire du transport des sédiments. Les glaciers Ebba et Blomstrand présentent la plus grande quantité de matériaux fins peut-être parce que les débris ont été transportés sur de plus grandes distances avant d'être déposés, ce qui favorise la réduction des particules. Sur les glaciers Lovén et Edith, le transport se fait sur de plus courtes distances, avant dépôt.

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

3. Modelés morainiques

La principale caractéristique qui différencie les moraines est la présence ou non de noyaux de glace sous les débris, qui va définir les types de modelés rencontrés.

3.1. Moraines à cœur de glace

Le terrain d'étude se situant dans la zone du pergélisol continu, les moraines conservent des noyaux de glace si l'épaisseur des dépôts est supérieure à la couche active de la région (B. Etzelmüller, 2000).

3.1.1. Moraines englacées du glacier Ebba

La présence de la glace sous les débris morainiques a été facilement décelée, dans le cas du glacier Ebba, car la glace affleure en divers secteurs de la marge proglaciaire (photo 44). Cependant, la glace ne se répartit pas de manière uniforme et la figure 72 montre que trois secteurs morainiques se succèdent depuis le centre de la marge vers l'extérieur : un secteur morainique central qui correspond à une moraine englacée (fig. 72 a), un secteur situé en périphérie du secteur morainique central, qui est constitué de collines morainiques à noyau de glace (fig. 72 b), et un secteur entièrement remanié par les écoulements (fig. 72 c).

- Le secteur central de la marge proglaciaire est une moraine entièrement « englacée » depuis les dépôts les plus anciens du vallum terminal jusqu'à la glace vive qui marque le front actuel du glacier (fig. 72 a). La partie centrale de ce secteur est composée d'une moraine médiane qui forme une couche de débris plus épaisse que dans le reste de la marge proglaciaire (un mètre). La hauteur moyenne de la moraine, dans ce secteur central, est comprise entre 20 et 25 mètres en raison de l'épaisseur de la glace, et non de la couche de débris qui, comme nous venons de le souligner, ne dépasse pas un mètre. La présence de la glace entraîne une dynamique de surface importante : glissement par foirage (photo 45), engorgement et thermo-érosion[1].

[1] Thermo-érosion : processus d'érosion thermique dû à la fonte de la glace contenue dans les dépôts, en milieu périglaciaire.

Photo 44 – Affleurement du glacier Ebba sous la couverture de débris morainiques. *De tels affleurements permettent d'observer la fine couverture de débris et l'épaisseur de la glace conservée sous la moraine. Prise de vue depuis la marge proglaciaire dans le secteur morainique central englacé (fig. 80 a), 7 août 2003.*

Photo 45 - Loupe de foirage liée à la fonte de la glace. *L'eau de fonte imbibe les fines du dépôt morainique, entraînant un glissement brutal de l'ensemble. La photographie témoigne de l'épaisseur de la couche de débris qui a été déplacée. Prise de vue de la niche d'arrachement, dans le secteur gauche de la marge du glacier Ebba vers le sud, 9 août 2003.*

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

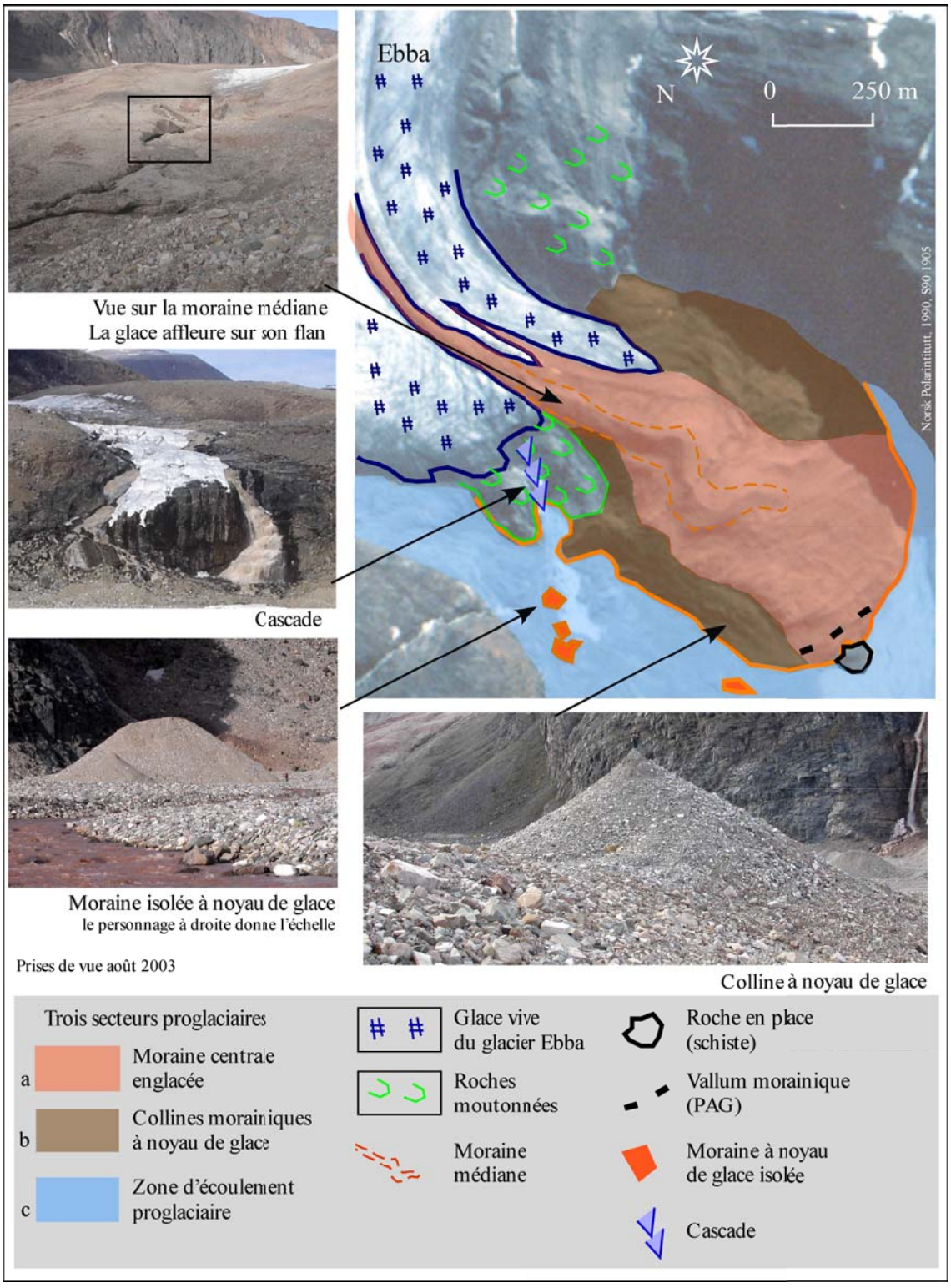


Fig. 72 – Croquis géomorphologique de la marge du glacier Ebba.

- Le second secteur intramorainique, qualifié de collines morainiques à noyau de glace, correspond à une zone morainique partiellement englacée. Ces modelés sont localisés dans les zones périphériques de la moraine centrale englacée que nous venons d'évoquer. La glace est protégée par une couche de débris plus fine que sous la moraine médiane. De ce fait, elle est plus affectée par la fonte si bien qu'elle

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

disparaît par endroits (fig. 72 b). Des collines à noyaux de glace alternent avec des secteurs en dépression à l'intérieur desquels se logent de petits lacs.

- Le troisième secteur correspond à une plaine intramorainique. Les dépôts morainiques ont été détruits par des écoulements proglaciaires importants dans la période 1960-1990. Ils se jettent en cascade du front du glacier dans la marge (fig. 72 c). Dans ce secteur, seules quelques moraines isolées à noyau de glace subsistent. Elles conservent une forme très vive et atteignent une hauteur de plusieurs mètres (fig. 72 c).

3.1.2. Moraines à noyaux de glace des glaciers Midre et Austre Lovén

Les marges proglaciaires des glaciers Midre et Austre Lovén sont moins englacées que celles du glacier Ebba. Elles se caractérisent par l'alternance de secteur de collines morainiques, préservées depuis le retrait du front glaciaire, et de secteurs remobilisés par les écoulements qui forment, par endroits, des plaines intramorainiques (fig. 73).

Les secteurs de moraines restées en place présentent des modelés en collines qui, comme dans le cas du glacier Ebba, sont attribués à la préservation de noyaux de glace. Les différences altitudinales entre les talwegs et les sommets de ces collines suggèrent une épaisseur de glace qui peut atteindre plusieurs dizaines de mètres. À l'intérieur des dépressions se logent des lacs (photo 46).

Le ruissellement, comme dans le cas du glacier Ebba, affecte d'importantes surfaces et entaille les secteurs de collines morainiques. Ainsi, la déstabilisation de la couche de débris par le ruissellement découvre la glace et participe à son ablation. En 1980, un tel phénomène a dévoilé un noyau de glace à l'intérieur du vallum de la marge proglaciaire du glacier Austre Lovén (photo 47). La glace mise au jour à l'époque s'est retrouvée en quelques jours masquée par les débris remobilisés et n'est donc plus visible sur le cliché pris en 2004 (photo 48).

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

Photo 46 – Complexe de collines morainiques dans lequel alternent bosses et creux, sur la marge du glacier Midre Lovén. *Au premier plan, à gauche, se distingue un lac et à l'arrière-plan droit une portion de plaine intramorainique. Prise de vue vers le nord-est, juillet 2002.*

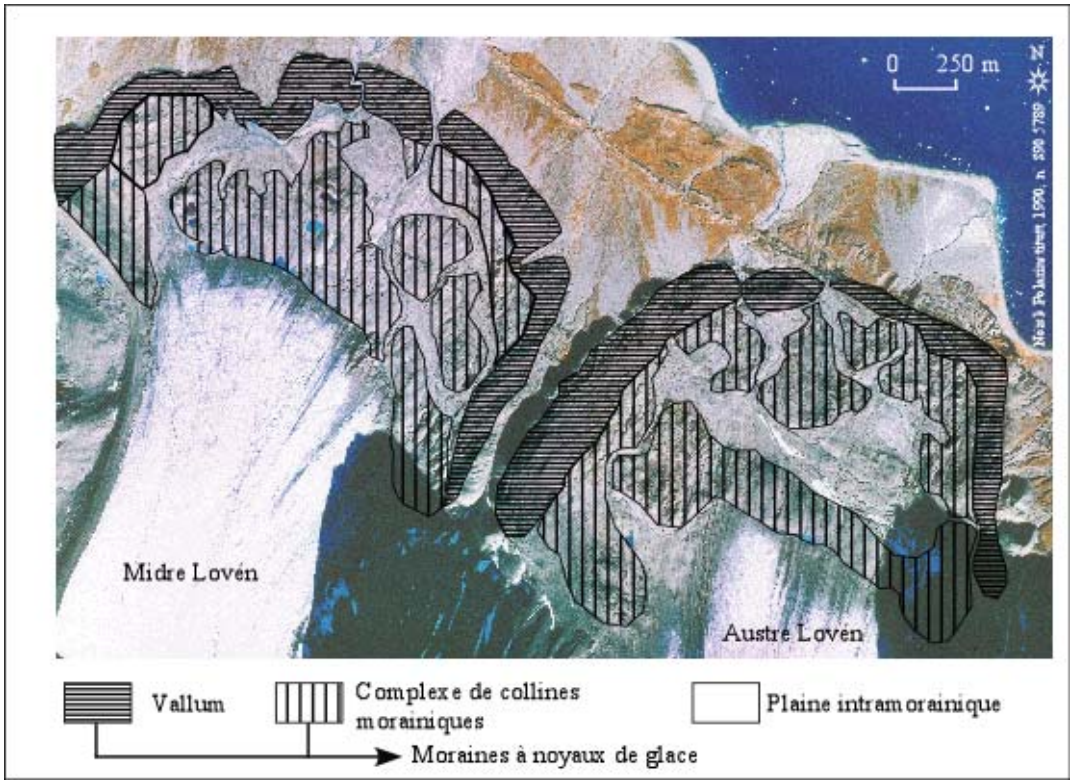
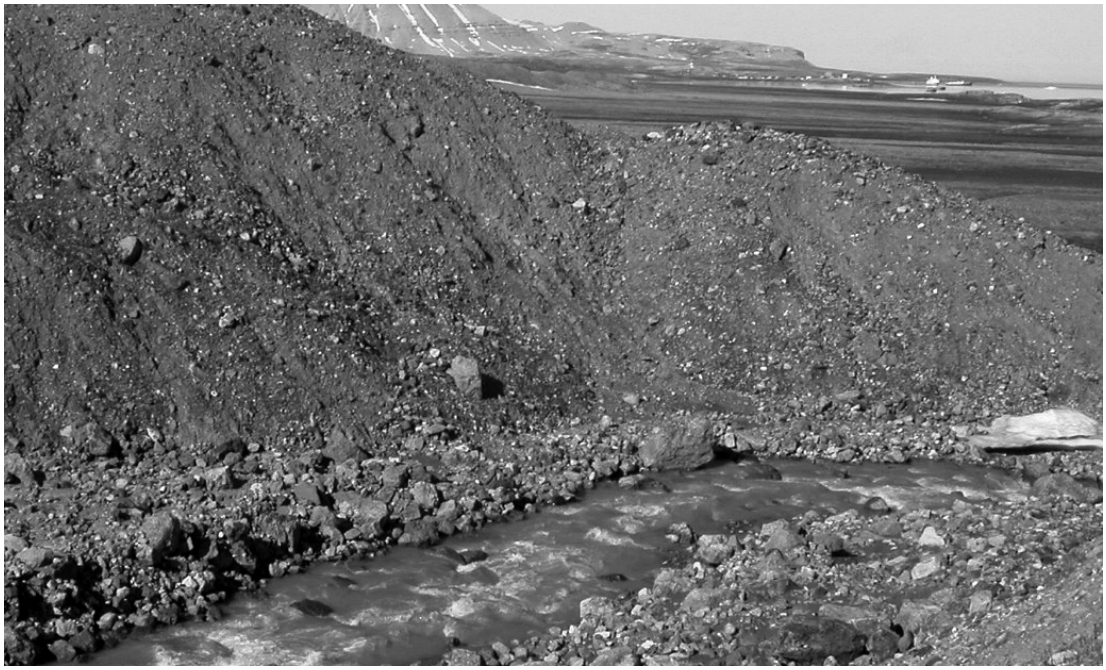


Fig. 73 – Complexes morainiques partiellement englacés des marges des glaciers Lovén.

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005



Photos 47 et 48 - Exemple de mise au jour d'un noyau de glace, provoquée par le ruissellement. *La photographie dans la partie supérieure montre un affleurement de glace à l'intérieur de l'arc morainique du glacier Austre Lovén, en 1980. La force du courant a déstabilisé une partie du vallum, qui s'est écroulé, dévoilant le noyau de glace. Sur la partie supérieure de cette section de glace, la mince couche de débris est visible. Cette dernière est épaisse d'environ un mètre et témoigne que la hauteur du vallum résulte du maintien de cette glace et non de la couche accumulée de débris morainiques. Prise de vue depuis le vallum du glacier Austre Lovén sur la rive droite de la Goule vers l'ouest, 15 août 1980 (M. Griselin, 1982). Le cliché dans la partie inférieure, pris le 11 juillet 2004, montre que les débris remobilisés masquent le noyau de glace.*

3.2. Moraines « déglacées »

Les moraines dépourvues de cœur de glace présentent moins de variations topographiques car elles ne connaissent pas la fonte différentielle qui induit des alternances de collines et de dépressions.

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

3.2.1. Moraines de chevauchement du glacier Edith

La marge du glacier Edith est constituée de deux secteurs morainiques (fig. 74). Un secteur central, correspondant à une étroite bande affectée par le ruissellement, se distingue du deuxième secteur constitué par le reste de la marge, composé des dépôts morainiques stabilisés depuis le retrait glaciaire.

Le ruissellement affecte peu l'espace intramorainique alors que la remobilisation des moraines, par le ruissellement, est importante sur les autres sites. Seul un chenal d'écoulement entaille les dépôts dans la partie centrale et sur une étroite bande, limitée à quelques mètres (fig. 74).

Le reste de la marge est une zone relativement plane, inclinée en direction du sud, sud-ouest (fig. 74). Aucun modelé ne suggère l'existence de glace sous les débris. C'est ce que défendent M.R. Bennett *et al.* (1997) qui attribuent la genèse des modelés morainiques du glacier Edith à un chevauchement intraglaciaire. Comme nous l'avons développé dans le chapitre 1, de telles moraines sont interprétées comme la résultante de poussées intraglaciaires liées à une compression durant le Petit Âge Glaciaire. L'absence de glace et de jeux de fonte différentielle font que les dépôts morainiques se présentent comme de grandes nappes de sédiments légèrement ondulées, sans différences topographiques marquées (fig. 74). Ces modelés conservent une certaine stabilité depuis leur mise en place.

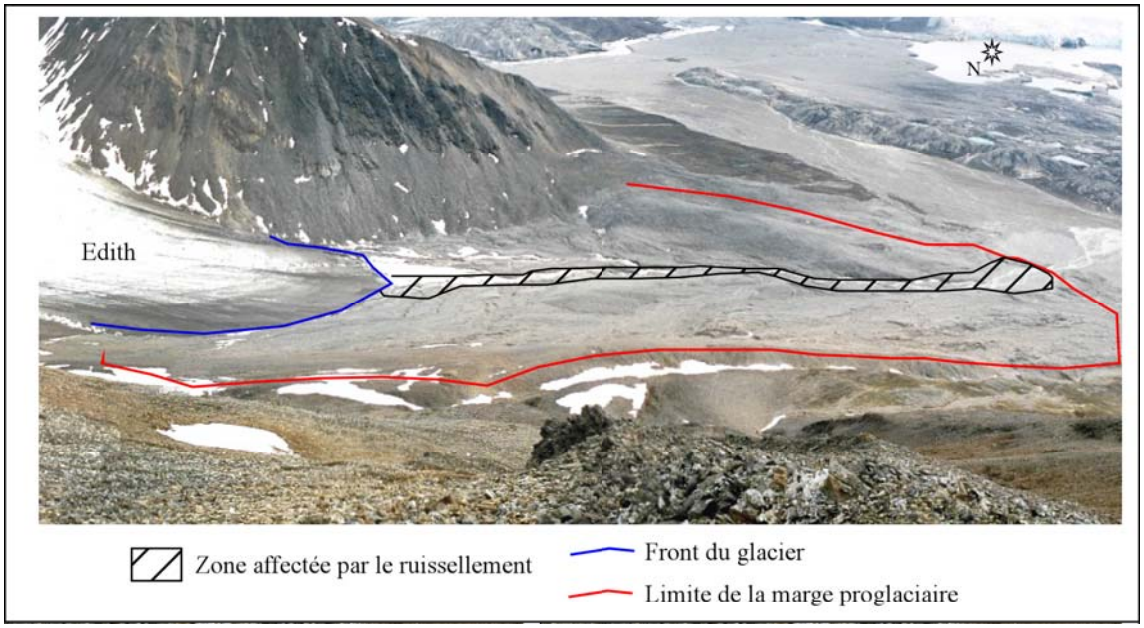


Fig. 74 – Faible emprise spatiale du ruissellement sur la marge du glacier Edith. *Prise de vue depuis le Skifer (759 m) vers l'est, juillet 2004 (D. Laffly).*

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

3.2.2. Moraines en position de versant du glacier Blomstrand

Comme dans le cas du glacier Edih, aucun modelé de la marge du glacier Blomstrand ne laisse supposer l'existence de moraines à noyau de glace. La marge présente un modelé homogène ne permettant pas de caractériser le site en différents secteurs (fig. 75).

Incliné vers le nord avec un dénivelé de cent mètres environ, le site s'étage sur 800 mètres de longueur (fig. 75). La disposition en dénivelé et le recul du front vers le fjord font de cette marge un cas particulier, puisque le ruissellement qui accompagne le recul n'a pas joué. En revanche, la pente générale du site favorise une dynamique de solifluxion alimentée par la disponibilité en matériaux fins évoquée précédemment. Les manifestations de cette morphodynamique sont nombreuses dans la marge proglaciaire (photo 49).

L'étude des cinq marges proglaciaires permet de distinguer deux types de complexe morainique :

- *les moraines à noyaux de glace, à topographies contrastées liées à la thermo-érosion, comme celles des glaciers Lovén et Ebba ;*
- *les moraines sans glace à topographies planes comme celles des glaciers Edith et Blomstrand.*

De ces différences, il découle une instabilité des moraines dans les cas des glaciers Lovén et Ebba, et une stabilité dans le cas des glaciers Edith et Blomstrand, bien que ce dernier soit localement affecté par la solifluxion.

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

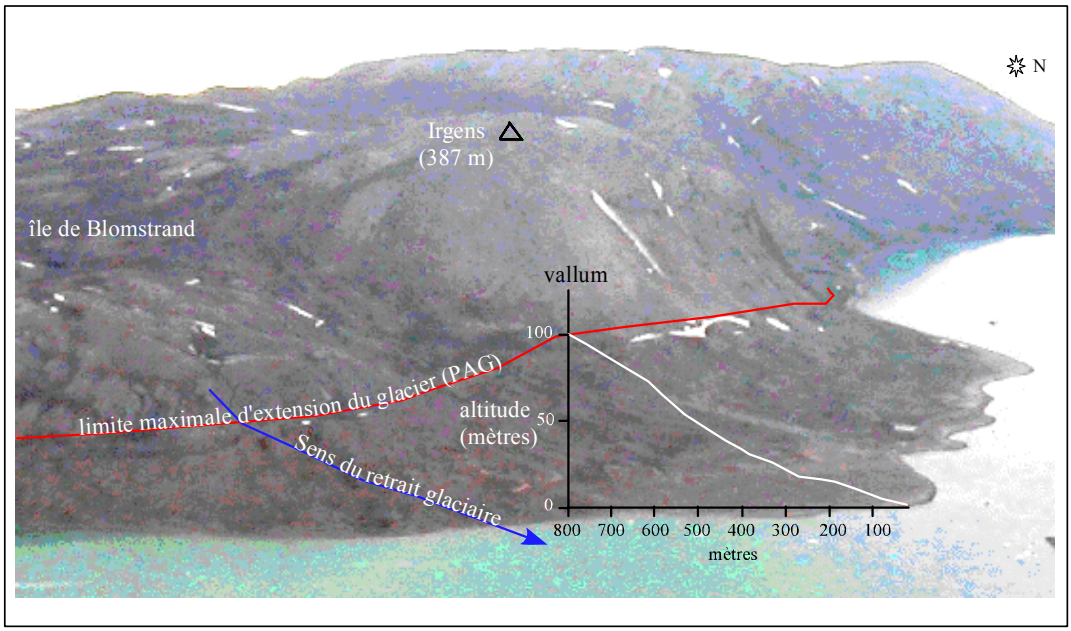


Fig. 75 – Disposition en versant de la marge du glacier Blomstrand. *Le front du glacier n'est pas visible sur le cliché retranché plus au nord. Prise de vue depuis le Feiring 1 054 m, juillet 2004.*

Photo 49 - Loupe de solifluxion sur la marge du glacier Blomstrand. *La disponibilité en fines, la pente et l'eau libérée de la couche active favorisent les déplacements de surface. Prise de vue depuis la marge proglaciaire sur le versant nord du vallum, 18 juillet 2002.*

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

Conclusion

Le retrait glaciaire s'amorce au Spitsberg entre 1880 et 1918. Le suivi diachronique des phases de recul des fronts glaciaires, à partir de photographies aériennes, rend compte de l'ampleur du phénomène. Les glaciers de vallée Lovén et Edith connaissent les plus importants reculs, avec un retrait supérieur à 1 000 m (tableau 7). Les glaciers, émissaires de glacier de plateau Blomstrand et Ebba, ont des retraits plus modestes, autour de 800 m, certainement parce que leurs imposantes masses de glace auxquelles ils appartiennent induisent des temps de réponse plus longs au déficit de précipitations neigeuses et à la hausse des températures. Ces différences se traduisent par des vitesses de recul plus rapides pour les glaciers de vallée à front terrestre, supérieures à 15 m/an (Lovén et Edith), contre 11 et 12 m/an pour ceux des glaciers Blomstrand et Ebba. L'ensemble des phases de retrait ont pu être datées dans des fourchettes de temps comparables entre les marges. Des similitudes et des différences sont dégagées entre les sites qui permettent d'effectuer un classement selon les particularités des modelés proglaciaires et du matériel morainique (tableau 7).

- **Modelés morainiques avec ou sans noyau de glace**

Les sites des glaciers Lovén et Ebba sont comparables dans leur niveau d'englacement des dépôts morainiques. La glace confère aux modelés, dans un contexte de changement climatique, un caractère éphémère à l'échelle de l'Holocène, ces noyaux de glace étant susceptibles d'être affectés par la thermo-érosion. Ces jeux de fonte différentielle créent un ensemble de modelés variés, instables et d'apparence chaotique. S'opposent les sites des glaciers Edith et Blomstrand caractérisés par des dépôts sans noyau de glace. L'ensemble de ces marges présente des physionomies générales plus homogènes et stables.

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

- **Spécificités du matériel morainique**

D'après le tableau 7, le matériel morainique est caractérisé par :

- une composition pétrographique dont les graphiques circulaires résument les faciès dominants pour chaque marge, opposant le site du Kongsfjord de nature siliceuse à celui du glacier Ebba de nature carbonatée.
- une composition granulométrique, qui différencie les sites des glaciers Ebba et Blomstrand, marqués par l'importance des éléments fins, des marges des glaciers Lovén et Edith marquées par les éléments granuleux et caillouteux.

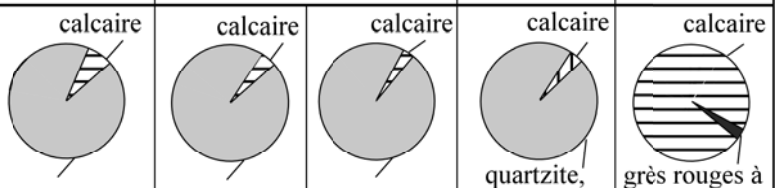
		Marges proglaciaires				
Caractéristiques environnementales		Edith	Midre Lovén	Austre Lovén	Blomstrand	Ebba
Recul glaciaire	période d'amorce du retrait	1880-1918	1880-1918	1880-1918	1880-1918	1880-1918
	distance de recul	1 470 m	1 070 m	1 340 m	800 m	860 m
	vitesse de retrait	20 m/an	15 m/an	19 m/an	11 m/an	12 m/an
Dépôts proglaciaires – modelé morainique	englacement	nul	partiel	partiel	nul	quasiment total
	modelé dominant de la marge	espace plan, légèrement incliné, stable	complexe de collines morainiques, instables, et plaines intramorainiques		espace plan en versant, instable	instable
Dépôts proglaciaires – propriétés du matériel morainique	faciès pétrographique dominant	 micaschiste, quartz	micaschiste, quartz	micaschiste, quartz	quartzite, micaschiste, gneiss	grès rouges à ciment carbonaté
	nature physico-chimique du site	siliceuse	siliceuse	siliceuse	siliceuse	carbonatée
	classe granulométrique dominante	6 mm à 5 cm	5 à 25 cm	6 mm à 5 cm	< 2 mm	< 2 mm

Tableau 7 - Synthèse des caractéristiques environnementales des différentes marges proglaciaires

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

Chapitre 4

Les rythmes et les modalités de la reconquête végétale des marges proglaciaires

1. Spécificités biogéographiques des marges proglaciaires

2. Rythmes de la reconquête végétale

3. Modalités spatio-temporelles de la reconquête végétale

4. Mise en perspective synthétique

Photo 50* - Saxifraga aizoïdes *à la marge du glacier Conway. *Prise de vue depuis la moraine vers l'est, 12 juillet 2002.*

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

Les marges proglaciaires se différencient par un certain nombre d'aspects environnementaux, dont nous souhaitons à présent identifier l'impact sur la reconquête végétale à l'intérieur des cinq sites. Malgré l'hétérogénéité des environnements morainiques, nous avons pu retracer une chronologie relativement similaire des reculs glaciaires et donc une datation comparable des secteurs déglacés en terme de durée de déglaciation. Les trois générations de dépôts (30, 70 et 100 ans) ont été utilisées pour dater les cortèges floristiques à l'intérieur des auréoles morainiques. C'est d'après leur étude que nous souhaitons définir le calendrier de la reconquête végétale et les modalités régionales de sa mise en place. Le chapitre méthodologie a montré que pour cette approche, les espèces végétales ont été identifiées sur le terrain à partir d'échantillonnages le long de transects, sur les cinq sites, totalisant 1 550 relevés. Les espèces végétales ont été recensées en terme de présence et d'absence, traduisant la fréquence relative de chaque espèce sur les moraines. Les résultats sont présentés sous forme de graphiques sur lesquels, afin d'en faciliter la lecture[1], les cortèges floristiques ont été scindés en deux groupes, le premier regroupant les espèces fréquentes et/ou communes aux cinq sites, le second rassemblant les espèces peu ou non présentes sur les cinq marges proglaciaires.

1. Spécificités biogéographiques des marges proglaciaires

Une première analyse de l'ensemble des données, collectées sur les cinq marges, offre une vue générale de la composition floristique des marges. La figure 76 présente ces résultats en les comparant avec la composition floristique de la toundra. Cette dernière est la formation végétale vers laquelle, à terme, devrait tendre celle des espaces morainiques. La toundra qui constitue la végétation des anciens niveaux glacio-marins stabilisés depuis pris de 10 000 ans, a été observée de manière très ponctuelle au voisinage des cinq marges proglaciaires. Il existe une disparité entre les données collectées dans les secteurs déglacés, issues de 1 550 relevés, et les informations relatives à la toundra, issues de 60 relevés[2]. Ce petit nombre de relevés ne permet pas d'appréhender toutes les nuances floristiques qui existent dans la toundra au sein de laquelle L. Nilsen *et al.* (1999) distinguent, sur la presqu'île de Brøgger, 19 communautés d'espèces. Les données collectées dans la toundra ont été complétées

[1] Dans un souci de clarté des graphiques, nous avons écrit les noms des espèces végétales en caractères droits contrairement à ce qui est fait dans le texte où ils sont indiqués en italique.
[2] Nous rappelons que les relevés réalisés dans la toundra sont situés au voisinage de chaque marge.

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

par les résultats de Th. Brossard (1991) qui a observé à grande échelle la végétation aux alentours des glaciers Lovén.

1.1. Les marges proglaciaires, réservoirs d'espèces pionnières

Trente-quatre espèces végétales sont dénombrées sur l'ensemble des marges, parmi lesquelles 32 espèces vasculaires et deux lichens du genre *Cetraria*. Elles représentent 19,5 % de la flore du Svalbard au sein de laquelle O.I. Rønning (1996) a recensé 164 espèces vasculaires. Dans la toundra, sur la presqu'île de Brøgger, Th. Brossard (1991) dénombre, aux abords des glaciers Lovén, 72 espèces végétales dont 41 plantes vasculaires représentant 25 % de la flore du Svalbard. Les marges proglaciaires ont une moindre diversité végétale que la toundra, ce qui est l'expression du caractère végétal pionnier des moraines.

En s'appuyant sur la figure 76, nous pouvons distinguer cinq groupes d'espèces selon leur fréquence d'apparition en milieu morainique et dans la toundra.

L'espèce qui domine le cortège floristique des moraines et de la toundra est *Saxifraga oppositifolia.* L'espèce a un comportement spécifique particulièrement remarquable qui justifie de la considérer séparément. *Saxifraga oppositifolia* est présente à plus de 60 % dans les moraines et dans la toundra, ce qui est une emprise spatiale supérieure à celle de toutes les autres espèces (photo 51). *Saxifraga oppositifolia* a une occupation immédiate de tout nouveau site. Elle est la plante pionnière ubiquiste par excellence du Spitsberg (A. Elvebakk, 1997). Cette adaptabilité est peut-être la conséquence de certaines variations génétiques et/ou écophysiologiques[1], comme le note A.K. Brysting *et al.* (1996) ; on peut noter que l'espèce présente deux écotypes[2] :

- un écotype prostré pour bénéficier de la protection neigeuse, rampant, avec une floraison tardive et propre aux habitats humides ;
- un écotype en forme de coussin qui le protège dans les espaces exposés au vent et sur les crêtes, avec une floraison plus précoce.

[1] Écophysiologique : variation physiologique que peut présenter une espèce végétale selon les influences du milieu dans lequel elle vit.
[2] Écotype : au sein d'une espèce, individu légèrement différencié dans ses caractéristiques physiologiques et morphologiques des individus considérés comme « normaux » pour l'espèce à laquelle il appartient.

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

L'espèce est présente dans un grand nombre d'habitats, depuis les milieux secs, exposés au vent, jusqu'aux milieux gorgés d'eau (A.K. Brysting *et al.*, 1996).

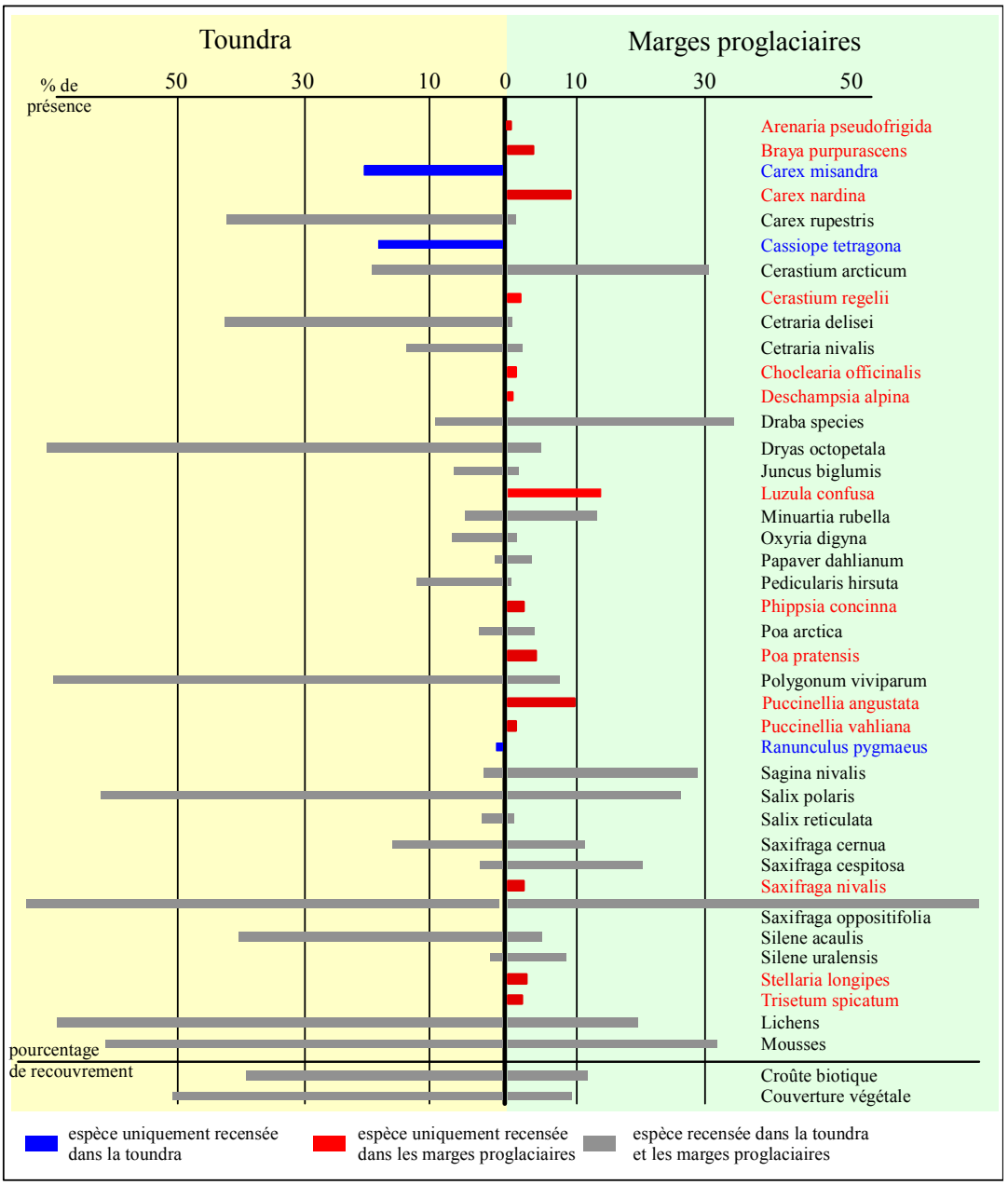


Fig. 76 - Fréquence des espèces végétales dans la toundra et à l'intérieur des cinq marges proglaciaires. *L'axe des abscisses représente le pourcentage de présence de chaque espèce dans la toundra (déterminé à partir de 60 relevés) et dans les marges proglaciaires (déterminés à partir de 1 550 relevés). Sur l'axe des ordonnées sont énumérées les espèces par ordre alphabétique et à l'extrémité les pourcentages de recouvrement du substrat par la croûte biotique et la couverture végétale.*

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

Photo 51* – Saxifraga oppositifolia *est l'espèce ubiquiste*[1] *du Spitsberg. *Prise de vue en presqu'île de Brøgger, 9 juillet 2004.*

- **Les espèces qui dominent le cortège floristique des moraines** sont *Cerastium arcticum, Draba species*[2]*, Sagina nivalis, Saxifraga cespitosa.* Ces espèces ont une présence d'environ 30 % dans les moraines quand les autres espèces ne dépassent pas 15 %. Ces espèces sont identifiées, aux côtés de *Saxifraga oppositifolia,* comme les pionnières par excellence du Spitsberg (R. Elven et A. Elvebakk, 1996 ; O.I. Rønning, 1996) ; ce sont en effet les premières espèces à s'installer dans les secteurs dépourvus de végétation. À l'inverse, ces espèces ont une faible présence dans la toundra. Ainsi, selon la figure 76, *Draba species* est présente à 34 % dans les secteurs déglacés contre 9 % dans la toundra, et *Sagina nivalis* passe d'un milieu à l'autre de 28 % à 5 %. La moindre fréquence des espèces pionnières dans la toundra peut être attribuée, entre autres, au développement de la compétition interspécifique. Celle-ci est, selon R. Dajoz (2000), *liée au côtoiement d'individus d'espèces différentes dans un même espace, et notamment dans des micro-environnements où des espèces rivalisent pour l'accès à des ressources limitées du milieu, telle l'eau ou l'espace*. Dans la toundra, l'accroissement du recouvrement végétal et de la diversité spécifique impulse une compétition entre les espèces à laquelle sont sensibles les plantes

[1] Ubiquiste : se dit d'une plante qui vit dans les milieux les plus divers au sein d'une région, en raison de sa forte plasticité écologique.

[2] *Draba species* regroupe plusieurs espèces représentées dans les espaces morainiques : *D. arctica, D. subcapitata, D. lactea, D. corymbosa, D. oxycarpa, D. adamsii*.

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

pionnières. En effet, le recouvrement végétal, dans la toundra, est en moyenne de 50 % (photo 52) alors que dans les moraines, les espèces sont réparties de manière éparse et sont à l'origine d'un recouvrement végétal inférieur à 10 % du substrat (photo 53).

Photo 52 – Recouvrement végétal quasi-continu de la toundra aux abords de la base française J. Corbel. *Prise de vue depuis le sandur vers l'est, juillet 2004.*

Photo 53 – Recouvrement végétal fragmenté sur la marge du glacier Midre Lovén. *Prise de vue à l'arrière du vallum vers le sud, juillet 2001 (D. Laffly).*

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

- **Les espèces végétales qui dominent dans la toundra** sont *Carex rupestris, Dryas octopetala, Polygonum viviparum, Salix polaris* et *Silene acaulis* avec des présences supérieures à 40 %, voire 60 % pour certaines comme *Dryas octopetala* (fig. 76). De même que les espèces dominantes des marges proglaciaires sont faiblement représentées dans la toundra, les espèces végétales qui caractérisent la toundra sont minoritaires dans les moraines. Ainsi, *Salix polaris* atteint 27 % de présence dans les moraines alors que l'espèce avoisine 60 % dans la toundra, et *Polygonum viviparum* passe de moins de 10 % à 70 %. Nous qualifions ces espèces d'édificatrices dans la mesure où elles appartiennent aux éléments constitutifs de la toundra et préfigurent le groupement végétal futur. Ces espèces sont les marqueurs de la formation végétale de la toundra.

- **Les espèces végétales propres aux milieux morainiques**, indiquées en rouge sur la figure 76, ne sont pas recensées dans la toundra. Ils s'agit notamment de *Arenaria pseudofrigida, Braya purpurascens, Cochlearia officinalis, Deschampsia alpina*, *Phippsia concinna, Poa pratensis, Saxifraga nivalis, Stellaria longipes, Trisetum spicatum.* Nous n'excluons cependant pas que ces espèces puissent être présentes dans des secteurs autres que les marges proglaciaires. Ainsi *Braya purpurascens* a été relevée par Th. Brossard (1991) dans des secteurs de toundra qu'il qualifie de dégradée. De même, nous n'avons pas échantillonné, dans la toundra, *Cochlearia officinalis* et *Deschampsia alpina,* alors que Th. Brossard les y relève, mais à la faveur de stations au caractère d'humidité marqué ; cela explique que ces espèces aient échappé à notre échantillonnage car leur présence est alors subordonnée à des conditions mésologiques particulières.

- **Les éléments floristiques propres à la toundra**, mentionnés en bleu sur la figure 76, ne colonisent pas les marges proglaciaires, ce sont *Cassiope tetragona* et *Ranunculus pygmaeus*.

La comparaison entre la composition floristique de la toundra et celle des marges proglaciaires montre que certaines espèces végétales colonisant les moraines ne se rencontrent plus dans la toundra, ou seulement, lorsque les conditions pionnières sont rassemblées, comme dans les zones de sandurs. Ainsi, les marges font figure d'espaces

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

refuges pour les espèces dont la présence est compromise dans la toundra. En ce sens, elles constituent une forme de réservoir de la diversité végétale pionnière.

1.2. Particularités floristiques de chaque marge proglaciaire

Les espèces végétales présentes sur chacune des marges sont détaillées, pour les espèces communes aux cinq sites, sur la figure 77 et, pour les espèces recensées uniquement sur certaines des cinq marges, sur la figure 78.

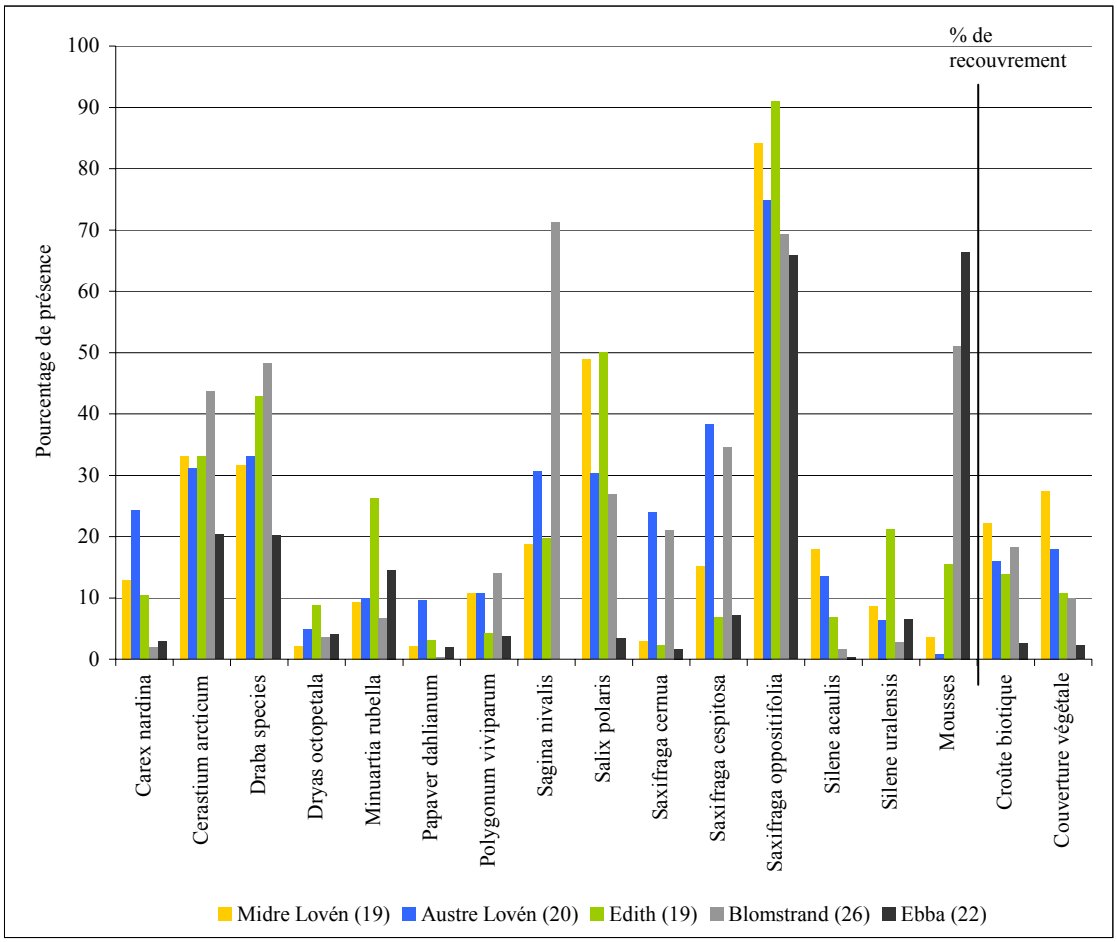


Fig. 77 – Pourcentage de présence des espèces végétales communes aux cinq marges proglaciaires. Sagina nivalis *n'est pas présente sur le site de l'Ebba, mais compte tenu de son fort pourcentage de présence sur les dépôts du glacier Blomstrand, nous l'associons à ce groupe. Sur l'axe des abscisses sont énumérées, par ordre alphabétique, les espèces végétales. Sur l'axe des ordonnées à droite sont précisés les pourcentages de recouvrement du substrat par la couverture végétale et la croûte biotique. Sur l'axe des ordonnées à gauche, sont reportés les pourcentages de présence des espèces, déterminés à partir des 1 550 relevés. Pour chaque site est précisé, entre parenthèses, le nombre total d'espèces végétales recensées.*

D'après la figure 77, comme nous l'avons déjà observé précédemment, *Saxifraga oppositifolia, Cerastium arcticum, Salix polaris, Sagina nivalis, Saxifraga cespitosa* et *Draba species* dominent les cortèges floristiques des moraines. Ces espèces sont

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

capables de coloniser des substrats de nature géologique différente (calcaires, siliceux voire nitrophiles), de s'implanter sur un large éventail granulométrique de substrats (cailloux, sable, argile), de s'accommoder de conditions édaphiques contrastées et ce pour des sols faiblement développés (S. G. Aiken *et al.*, 1999). La forte tolérance écologique de ces espèces leur permet de s'implanter dans des milieux différents et de ce fait nous les qualifions d'ubiquistes. Aux côtés des espèces vasculaires, les mousses[1] (fig. 77) et les lichens[2] (fig. 78) sont également fortement représentés.

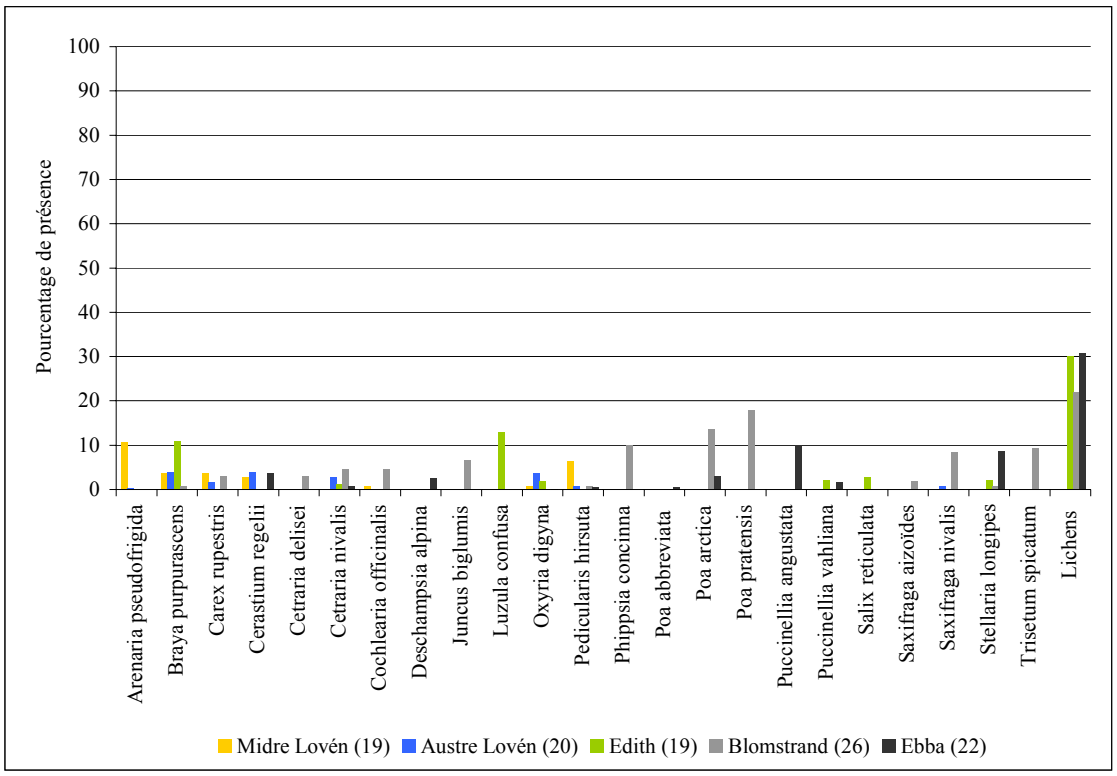


Fig. 78 - Espèces végétales recensées parmi les cinq sites proglaciaires. *Sur l'axe des abscisses sont énumérées, par ordre alphabétique, les espèces végétales. En ordonnées, sont reportés les pourcentages de présence des espèces, déterminés à partir des 1 550 relevés. Pour chaque site est précisé entre parenthèses le nombre total d'espèces végétales recensées sur chacune des marges proglaciaires.*

Associées à ce premier groupe d'espèces communes à l'ensemble des sites, d'autres espèces ont une localisation propre à certaines marges selon les conditions environnementales locales (fig. 78).

[1] Les mousses sont essentiellement dominées par les espèces du genre : *Timmia, Bryum, Drepanocladus, Encalypta, Orthothecium, Districhium, Philonotis* (L. Nilsen, 1997).

[2] Les lichens comptent *Collema tenax, Fulgensia bracteata, Polyblastia sendtneri, Mycobilimbia lobulata, Stereocaulon rivulorum, Lecidea ramulosa, Lecanora epibryon, Peltigera rufescens* (L. Nilsen, 1997).

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

1.2.1. Expression floristique de la proximité du fjord sur la marge du glacier Blomstrand

Le cortège floristique de la marge du glacier Blomstrand présente des originalités floristiques liées à quatre facteurs locaux : l'influence du fjord, l'abondance des éléments fins, l'activité de la solifluxion et la faible présence des rennes. L'influence du fjord est le paramètre environnemental qui a le plus de conséquences sur le couvert végétal. Les présences de *Trisetum spicatum, Poa pratensis, Poa arctica* et *Phippsia concinna,* uniquement rencontrées sur ce site, en sont les biomarqueurs, dont S.G Aiken *et al.* (1999) associent la présence de ces espèces à une situation littorale. La forte occupation de *Sagina nivalis,* qui atteint 70 % de présence, alors qu'elle ne dépasse pas 30 % ailleurs (fig. 77), en est également l'expression floristique car N. Polunin (1959) relève à son sujet, que l'espèce est davantage présente sur les secteurs littoraux. La proximité du fjord semble donc avoir un impact sur la composition du cortège floristique. Afin de compléter ces remarques, nous avons comparé le cas du glacier Blomstrand avec une étude réalisée sur un autre site morainique situé en bordure du fjord, celui du glacier Conway.

Le glacier à front marin Conway se situe dans le nord-est du Kongsfjord (fig. 79), à quelques kilomètres du glacier Blomstrand, dont le retrait laisse une moraine le long de la rive nord du fjord. Nous n'avons pas intégré ce terrain dans notre étude car les moraines sont récentes, peu de dépôts étant antérieurs à 1970 (fig. 79). La chronologie morainique n'est donc pas suffisamment étalée dans le temps pour être intégrée dans notre étude comparative. Cependant, 39 relevés ont été conduits, en 6 postes d'observation, suivant un transect longeant le littoral (fig. 79), à l'intérieur desquels la végétation a été échantillonnée de la même manière que pour les cinq autres marges proglaciaires.

La figure 80 compare les données floristiques du glacier Conway avec celles du Blomstrand. La comparaison met en évidence que les espèces que nous avons rattachées au littoral, dans le cas du glacier Blomstrand, colonisent également les dépôts du glacier Conway (*Phippsia concinna, Poa pratensis, Sagina nivalis, Trisetum spicatum),* avec des fréquences supérieures aux autres espèces. Par exemple, d'après la figure 80, *Trisetum spicatum,* dans le cas du glacier Conway, a 70 % de présence alors que *Cerastium arcticum,* espèce pionnière ubiquiste, a moins de 60 % de présence. L'analyse conjointe des observations réalisées sur les marges du glacier Conway et sur

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

les marges du glacier Blomstrand montre que la situation littorale influence la composition du cortège floristique en favorisant une diversité spécifique différente de celle rencontrée sur les sites à l'intérieur des terres.

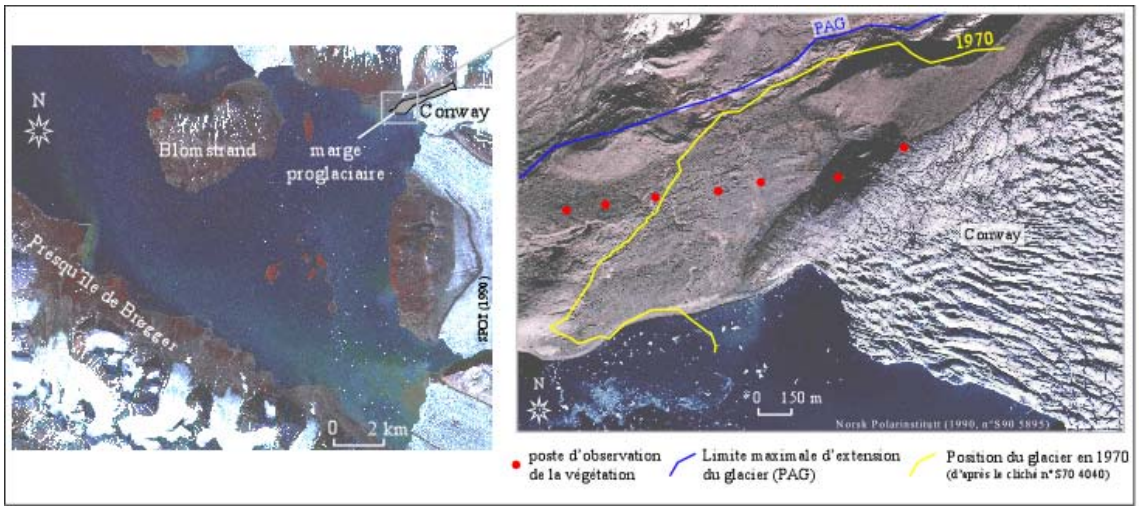


Fig. 79 - Cartes de localisation de la marge du glacier Conway et des postes d'observation de la végétation.

Photo 54 – Perchoir à oiseaux sur la marge du glacier Blomstrand. *Le recouvrement végétal est plus développé sur la butte, où les oiseaux font halte, que sur les surfaces voisines qui ne bénéficient pas de l'apport en déjections. Prise de vue depuis la marge proglaciaire vers le nord-ouest, 22 juillet 2002.*

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

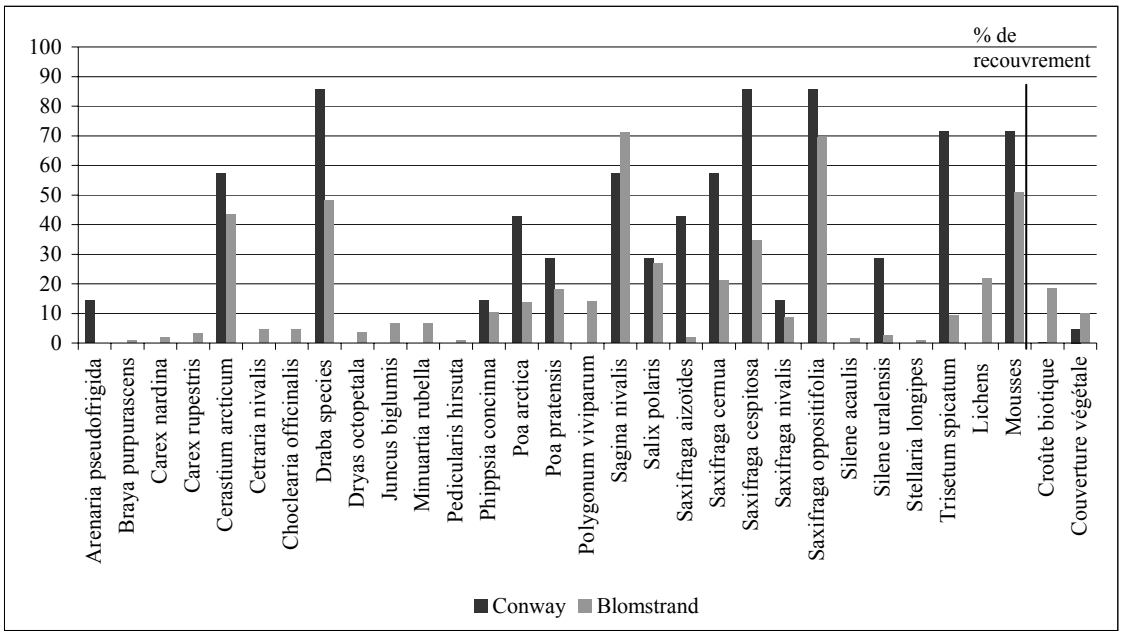


Fig. 80 – Cortèges floristiques recensés sur les dépôts des marges des glaciers Conway et Blomstrand. *Dans le cas du glacier Conway, les dépôts morainiques sont déglacés au maximum depuis 1970, ce qui explique l'absence de certaines espèces telles* Dryas octopetala, Minuartia rubella, Polygonum viviparum.

Il est délicat de définir ce qui, dans la proximité du fjord, influence le couvert végétal, les facteurs potentiellement concernés étant notamment la fréquentation des oiseaux, les embruns et les dépôts de sel associés. L'influence des oiseaux sur la colonisation végétale a déjà été mentionnée par M. Kuc (1964) qui a relevé, au cours de son étude sur les marges du glacier Treskelen[1], que les déjections de nombreux *Rissa tridactyla* (mouette tridactyle) permettent l'existence de plantes nitrophiles et facilitent l'occupation de moraines stériles par les plantes pionnières. Comme l'illustre la photo 54, l'apport local en guano peut pallier le déficit en matière organique des dépôts récemment déglacés et entraîner localement le développement d'un couvert végétal plus dense.

La forte fréquence de *Sagina nivalis*, que nous évoquions précédemment, est sans doute l'expression de la deuxième particularité du site : l'abondance des éléments granulométriques fins dont la forte capacité de rétention favorise le développement de stations humides dont *Sagina nivalis* est également le marqueur. La présence de *Juncus biglumis* et *Saxifraga aizoïdes,* uniquement rencontrés sur les dépôts du glacier

[1] Le glacier Treskelen est situé dans le fjord de Hornsund (sud du Spitsberg).

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

Blomstrand, et la plus forte fréquence de *Cochlearia officinalis* et *Poa arctica* que sur autres sites, sont également les biomarqueurs de cette granulométrie fine. La troisième originalité de la marge est la dynamique de solifluxion qui est entretenue par la pente générale du site associée aux éléments granulométriques fins. La présence de *Saxifraga nivalis* en est l'expression, l'espèce affectionnant de tels milieux morphodynamiques (N. Polunin, 1959). Enfin, la quatrième particularité est la faible présence du renne sur l'île où est implantée la marge, contrairement à la presqu'île de Brøgger, où se situent les marges des glaciers Lovén et Edith, dans laquelle le renne est plus fréquent. En témoigne la présence des lichens *Cetraria delisei* et *Cetraria nivalis* dont les rennes sont les prédateurs (fig. 78). *In fine,* la marge du glacier Blomstrand concentre la plus grande diversité spécifique avec 26 espèces contre 22 au maximum, pour les autres marges.

1.2.2. Contrainte de la glace sur le développement végétal sur la marge du glacier Ebba

La marge du glacier Ebba se singularise floristiquement en raison de deux particularités : le fort englacement des moraines et l'humidité des dépôts qu'il induit. La présence de la glace, à proximité de la couche superficielle des moraines et le froid qu'elle génère inhibent le développement végétal. Par conséquent, les espèces vasculaires ont de faibles pourcentages d'occupation par rapport aux autres sites. Par exemple, d'après la figure 77, dans le cas de *Cerastium arcticum,* l'espèce a 20 % de présence sur la marge du glacier Ebba alors qu'elle dépasse 30 % sur les sites. De même, le couvert végétal est peu étendu avec de très faibles taux de recouvrement alors que celui-ci dépasse 10 % sur les quatre autres sites.

La figure 81 présente les cartographies du nombre d'espèces présentes sur les cinq marges. Pour le site du glacier Ebba, a été démarquée en jaune la partie la plus englacée des moraines. Sur cette partie de la marge, aucune espèce n'a été recensée alors que sur les autres marges, seuls, quelques rares sites sont dépourvus de végétation et ce, même dans les zones récemment déglacées. Pour les secteurs de la marge du glacier Ebba où des espèces végétales sont présentes, moins de sept espèces sont totalisées en moyenne, alors que pour les autres marges proglaciaires il y a entre huit et treize espèces voire plus de 14 (fig. 81). Les cartographies du recouvrement végétal présentées dans la figure 82 renforcent ce constat. D'une manière générale, dans les postes d'observation de la marge du glacier Ebba, le recouvrement végétal est quasiment inexistant alors que sur les autres sites, il atteint plus de 10 % dans la majorité des postes (fig. 82). Les

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

secteurs de la marge du glacier Ebba, où quelques taches de végétation sont décelées, se situent dans les secteurs partiellement déglacés, sur le pourtour de la marge proglaciaire[1]. La zone où le recouvrement végétal est inexistant est localisée dans le secteur où la glace est entièrement conservée, sous la couche morainique (en jaune sur la figure 82). Il n'en demeure pas moins que le site proglaciaire du glacier Ebba concentre une certaine diversité floristique en totalisant 22 espèces végétales contre moins de 19 pour les marges des glaciers Edith, Midre et Austre Lovén. La faible densité spécifique et le faible recouvrement végétal local limitent certainement la compétition interspécifique et peuvent expliquer la plus grande diversité, notamment par rapport aux autres marges proglaciaires où le nombre d'espèces et le taux de recouvrement par poste sont plus importants.

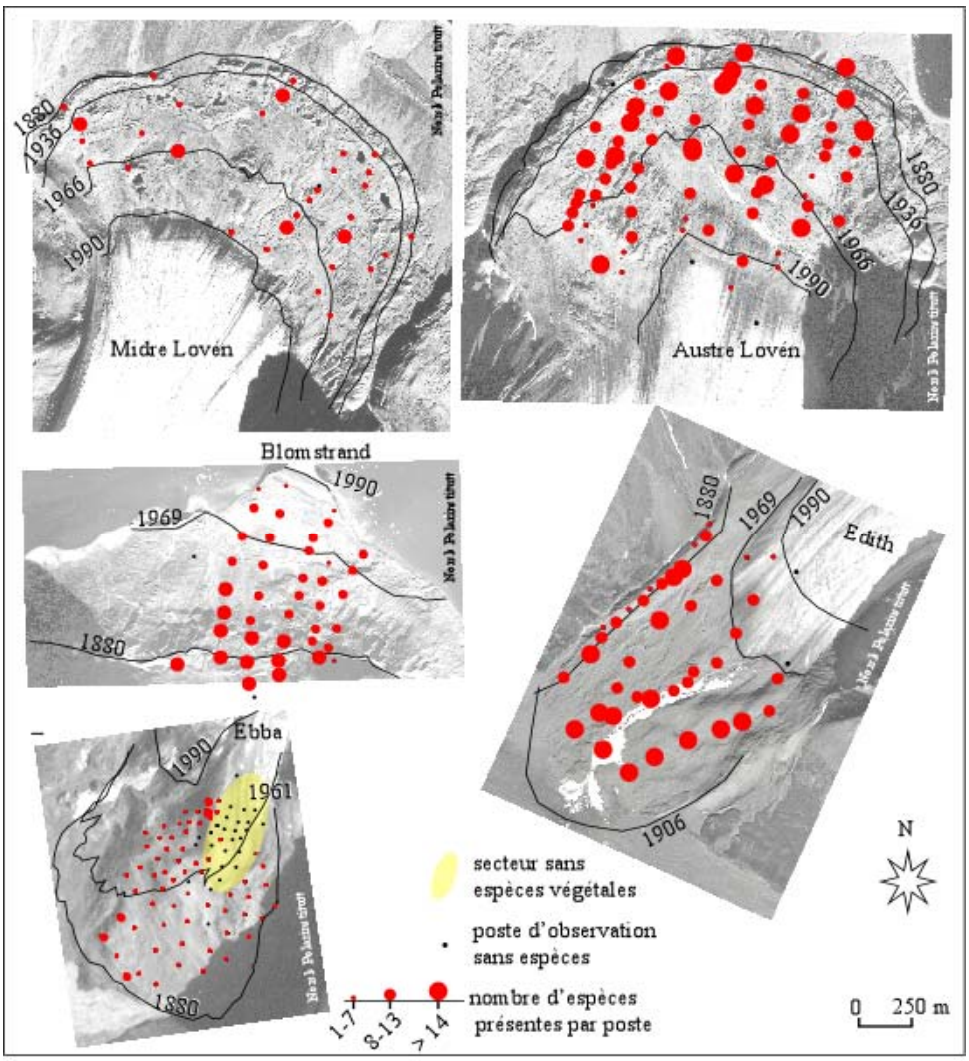


Fig. 81 – Nombre d'espèces végétales recensées par poste d'observation sur les cinq marges proglaciaires *(d'après 1 550 relevés).*

[1] Nous rappelons que l'ensemble de la partie ouest de la marge est remobilisée par les écoulements et n'a pas été intégrée dans l'échantillonnage.

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

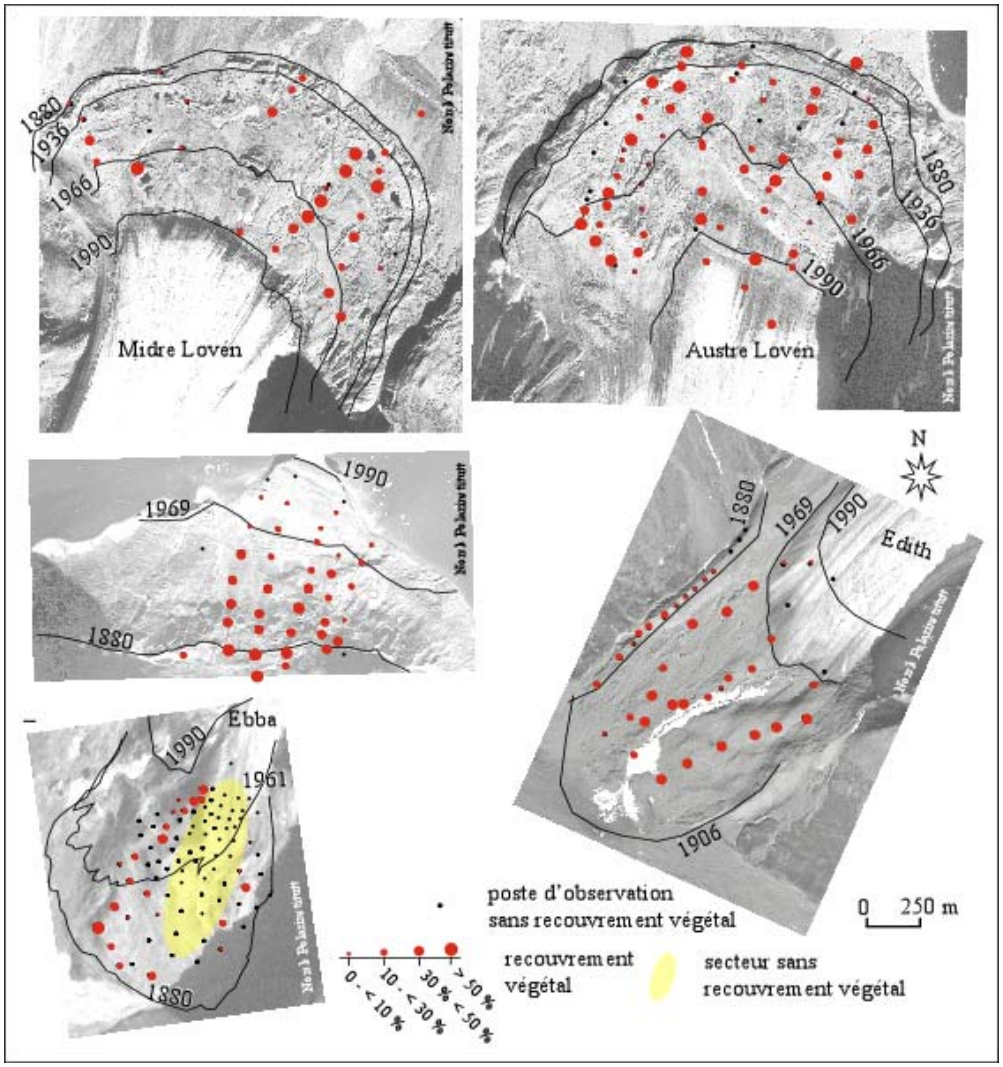


Fig. 82 – Pourcentage de recouvrement végétal pour chaque poste d'observation sur les cinq marges proglaciaires *(d'après 1 550 relevés).*

Le deuxième trait environnemental du site est l'humidité des dépôts due à la glace qui alimente en eau de fonte interstitielle les éléments granulométriques fins, qui favorisent la rétention de l'eau, comme dans le cas de la marge du glacier Blomstrand. Floristiquement, l'humidité des dépôts se traduit par la présence des espèces hygrophiles *Poa abbreviata, Poa arctica, Puccinellia angustata, Stellaria longipes* et *Deschampsia alpina* qui affectionnent les milieux engorgés.

1.2.3. Similarité spécifique sur les marges des glaciers Midre et Austre Lovén

Les marges des glaciers Lovén ne présentent pas d'originalité floristique comparables à celles que nous avons pu l'observer sur les des glaciers Blomstrand et Ebba. Les espèces ont des fréquences relativement comparables entre les deux sites. Par exemple,

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

d'après la figure 77, respectivement pour les marges des glaciers Midre et Austre Lovén, *Cerastium arcticum* a 32 % et 30 % de présence, *Draba species* a 32 % et 33 % de présence. Les moraines des glaciers Lovén partagent, également, avec celles du glacier Edith, quelques similitudes dans le développement végétal et ont notamment en commun des espèces telles *Braya purpurascens* et *Oxyria digyna* qui ne sont pas rencontrées sur les marges des glaciers Blomstrand et Ebba.

1.2.4. Spécificité xérophile de la marge du glacier Edith

Bien que les éléments floristiques de la marge du glacier Edith présentent de grandes similitudes avec les marges des glaciers Lovén, deux caractéristiques environnementales les différencient. Le glacier Edith a une tendance mésoclimatique plus chaude et des conditions mésologiques xériques[1] inscrites dans le cortège floristique. Le contexte mésoclimatique plus clément qu'au nord, où se logent les glaciers Lovén, explique la présence de *Salix reticulata* et *Luzula confusa,* qui sont connues comme préférant les pentes sèches ensoleillées et ne sont pas rencontrées sur les autres sites (O.I. Rønning, 1996). Ces conditions favorisent également une reconquête végétale plus importante de l'ensemble de la marge. La carte du nombre d'espèces par poste d'observation de la figure 81 montre que plus de huit espèces sont majoritairement rassemblées par poste sur la marge du glacier Edith.

D'après la figure 78, on note que *Cerastium regelii* et *Carex rupestris,* espèces colonisant davantage les habitats humides (S. Kojima et N. Wada, 1999), sont absentes de la marge du glacier Edith alors qu'elles sont rencontrées sur celles des glaciers Lovén. La marge du glacier Edith, du fait de l'absence de glace sous les débris et du faible ruissellement, présente des conditions mésologiques plus sèches que les marges des glaciers Lovén.

[1] Xérique : se dit d'un milieu caractérisé par la sécheresse.

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

Le cortège floristique des marges proglaciaires est dominé par des espèces pionnières et donne naissance à un paysage original par rapport aux secteurs de toundra. Loin d'être des milieux répulsifs, les marges proglaciaires concentrent une grande diversité spécifique, notamment parce qu'elles présentent des conditions environnementales contrastées auxquelles répondent les espèces végétales. Ainsi, les espèces se démarquent d'un site à l'autre (fig. 83), d'une part dans la variation de leur taux d'occupation et, d'autre part, selon leur présence ou absence. La marge du glacier Blomstrand concentre la plus importante diversité floristique à la faveur de la variété des contextes mésologiques qui s'oppose avec l'uniformité des marges des glaciers Lovén. Entre ces deux sites, s'intercalent les marges des glaciers Ebba et Edith au sein desquelles apparaissent quelques nuances floristiques. On peut s'interroger sur la manière dont ces différences peuvent s'exprimer dans la reconquête végétale.

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

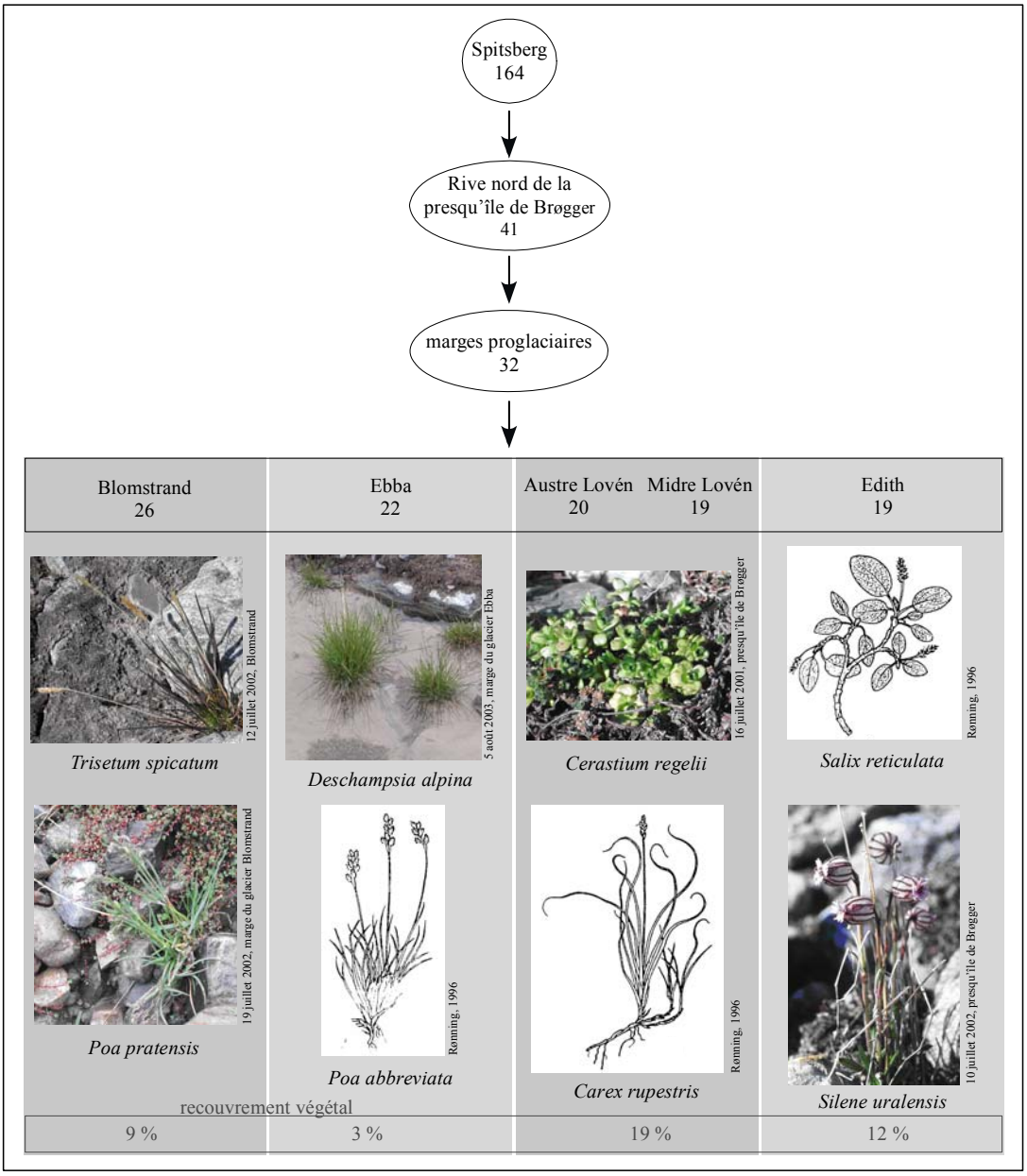


Fig. 83 – Schéma récapitulatif de la diversité spécifique recensée par secteur géographique. *Le chiffre indique le nombre d'espèces phanérogamiques qui ont été relevées.*

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

2. Les rythmes de la reconquête végétale

Après avoir analysé le cortège floristique de chaque marge prise dans sa globalité, nous procédons à une analyse plus fine de la végétation, en distinguant les cortèges floristiques pour chacune des trois auréoles morainiques datées (30 ans, 70 ans, 100 ans). Trois stades de développement floristique ont été identifiés à travers l'analyse desquels nous avons recherché les éléments communs d'évolution et les différences associées aux particularités de chaque site.

2.1. Stade initial de la reconquête végétale : les premières espèces colonisatrices

Le premier temps de la reconquête végétale est associé aux dépôts les plus récemment déglacés, circonscrits par une auréole morainique correspondant à 30 ans de déglaciation. Ces dépôts sont caractérisés par un substrat instable, souvent gorgé d'eau à proximité du front glaciaire, sans accumulation organique et directement sous l'influence des vents froids catabatiques, qui sont canalisés par la langue glaciaire et peuvent inhiber le développement de la plante (O.R. Vetaas, 1997) et sa reproduction (N. Wada, 1999).

2.1.1. Colonisateurs pionniers ubiquistes

Un premier groupe de neuf espèces communes aux cinq sites proglaciaires a été identifié. La figure 84 en donne les fréquences. Ce groupe est dominé par les saxifrages et particulièrement *Saxifraga oppositifolia* avec une fréquence comprise entre 30 et 90 %. Les mousses ont également une forte présence, supérieure à 30 %. Les bryophytes s'accommodent de l'environnement souvent gorgé d'eau à proximité du front du glacier (photo 55). Aux côtés de *Saxifraga oppositifolia* et des mousses, figurent *Draba species, Cerastium arcticum*, *Saxifraga cespitosa, Saxifraga cernua* dont nous avons précédemment relevé le caractère ubiquiste. Passé ce premier trait commun aux cinq sites, des différences se marquent en terme de fréquence et de présence des espèces, qui permettent de dégager des réponses floristiques propres à chaque marge.

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

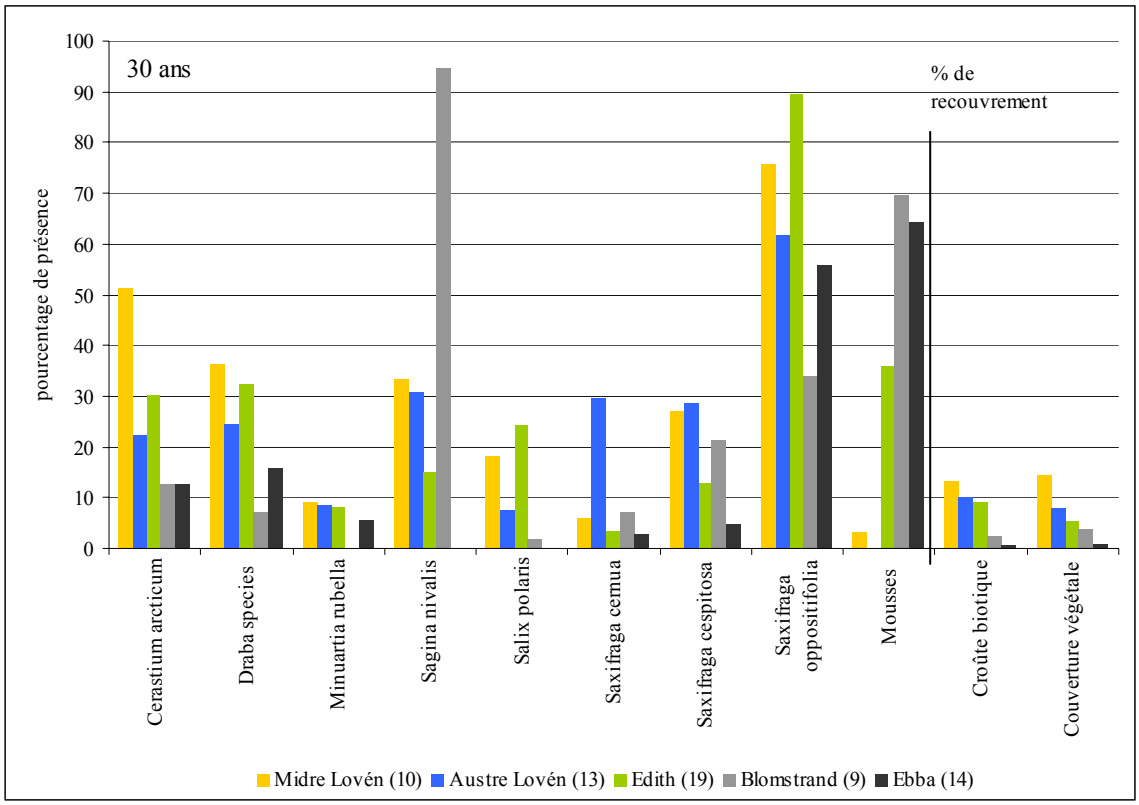


Fig. 84 - Espèces pionnières ubiquistes colonisant les dépôts déglacés depuis 30 ans *(d'après 1 550 relevés). Les mousses n'ont pas été relevées pour les marges proglaciaires des glaciers Lovén. Sur l'axe des abscisses sont énumérées, par ordre alphabétique, les espèces végétales. Sur l'axe des ordonnées, à droite, sont précisés les pourcentages de recouvrement du substrat par la couverture végétale et la croûte biotique. Sur l'axe des ordonnées, à gauche, sont reportés les pourcentages de présence des espèces. Entre parenthèses est précisé le nombre total d'espèces présentes pour chacune des marges proglaciaires dans les auréoles morainiques déglacées depuis 30 ans.*

Photo 55 – La mousse peut atteindre jusqu'à 30 % de recouvrement à proximité du front glaciaire alors que les espèces végétales vasculaires sont encore faiblement implantées. *Prise de vue depuis la marge du glacier Austre Lovén (arrière plan) vers le sud-est, 9 juillet 2004.*

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

2.1.2. Développement floristique plus rapide sur les marges des glaciers Lovén et Edith

À ce premier stade de la reconquête végétale, les marges des glaciers Edith, Austre et Midre Lovén ont les plus forts taux de présence spécifique. Par exemple, d'après la figure 84, *Cerastium arcticum* dépasse 20 % de présence sur les trois marges quand elle avoisine 10 % sur celles des glaciers Ebba et Blomstrand. Il en va de même pour *Draba species, Salix polaris, Saxifraga oppositifolia*. De plus, certaines espèces, telles les espèces édificatrices *Carex nardina, Polygonum viviparum* et *Silene acaulis,* colonisent les dépôts des glaciers Lovén et Edith alors qu'elles sont encore absentes des marges des glaciers Blomstrand et Ebba. Enfin, la croûte biotique et le recouvrement végétal atteignent 10 % sur les trois marges alors qu'ils sont très faibles sur les marges des glaciers Blomstrand et Ebba.

Au sein même de ces trois sites, on peut relever que le mésoclimat dont bénéficie la marge du glacier Edith, semble permettre une reconquête plus rapide. Ainsi, d'après la figure 85, on relève que les espèces édificatrices *Dryas octopetala, Luzula confusa* et *Salix reticulata* colonisent les dépôts du glacier Edith alors que sur les autres sites elles sont absentes des dépôts déglacés depuis 30 ans. Ces espèces témoignent d'une progression plus avancée du développement végétal. *Dryas octopetala* et *Salix reticulata* sont des lithophytes[1] dont l'appareil végétatif aérien, particulièrement compact, stabilise les particules fines (P. Somson, 1983). Ainsi les deux espèces contribuent à freiner la dynamique des formations superficielles et à stabiliser le substrat. Elles sont aussi fortes productrices de matière organique. Toutes ces particularités végétales concourent à faire de ces espèces des éléments favorisant la venue d'autres végétaux, que la rudesse des conditions initiales empêchait de s'implanter. Ces espèces ont donc un rôle important dans l'évolution du couvert végétal. Par ailleurs, les présences de *Salix reticulata* et *Luzula confusa* traduisent, dès ce premier stade, le caractère xérophile du site.

2.1.3. La marge du glacier Blomstrand : une reconquête sous l'influence du fjord

Les dépôts déglacés depuis 30 ans du glacier Blomstrand sont ceux qui sont les plus proches du fjord et cette proximité semble jouer un rôle négatif sur l'installation de

[1] Lithophyte : végétaux capables de croître en milieu rocheux ou rocailleux.

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

certaines espèces. En effet, ces dépôts concentrent les plus faibles pourcentages de présence parmi les espèces. Par exemple, d'après la figure 84, *Saxifraga oppositifolia* est présente dans 33 % des relevés quand elle dépasse 55 % pour les autres marges. *Draba species* a une présence inférieure à 10 % contre 15 % pour les autres sites. Seules *Sagina nivalis, Poa pratensis* et *Phippsia concinna* semblent bénéficier de la proximité du littoral. La première est présente à plus de 90 %, contre 30 % sur les autres sites, les deux autres apparaissent à plus de 30 % (fig. 85).

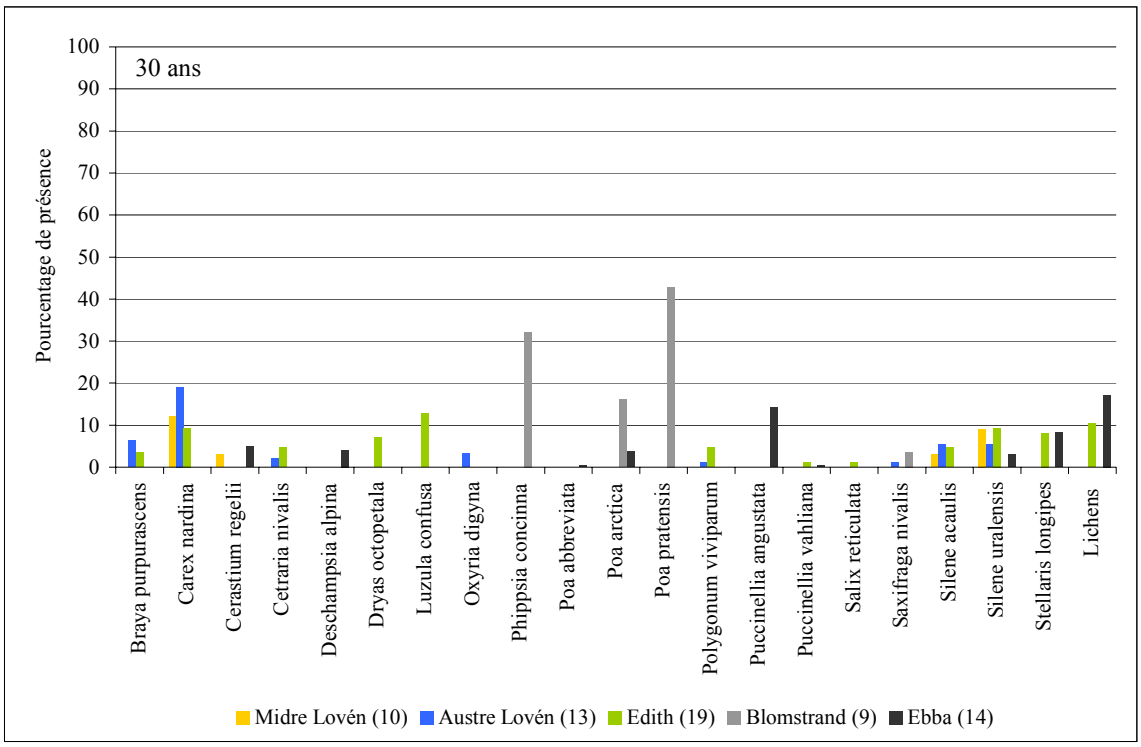


Fig. 85 – Espèces végétales recensées sur les dépôts déglacés depuis 30 ans parmi les cinq sites proglaciaires *(d'après 1 550 relevés). Sur l'axe des abscisses sont énumérées, par ordre alphabétique les espèces végétales. Sur l'axe des ordonnées, sont reportés les pourcentages de présence des espèces. Entre parenthèses est précisé le nombre total d'espèces recensées pour chacune des marges proglaciaires.*

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

2.1.4. La marge du glacier Ebba : une reconquête ralentie par la glace

Le froid généré par la glace subaffleurante du glacier Ebba inhibe fortement le développement végétal. En effet, comme le montre la figure 84, la marge proglaciaire est caractérisée par de faibles pourcentages de présence des espèces, par rapport aux marges des glaciers Lovén et Edith. Ainsi *Cerastium arcticum* a une présence de 12 % alors que sur les sites des glaciers Lovén et Edith, l'espèce dépasse 20 %. Par ailleurs, certaines espèces végétales comme *Salix polaris* ne colonisent pas encore les dépôts du glacier Ebba alors qu'elles sont relevées sur les autres sites. Le couvert végétal et la croûte biotique ont un développement médiocre, de 1 %, quand ils dépassent 5 % sur les autres marges (fig. 84). Malgré cette lente amorce de la reconquête, l'humidité du site, liée à la présence de la glace et des fines, favorise la diversité spécifique avec la présence de *Deschampsia alpina, Puccinellia angustata, Phippsia concinna, Poa arctica* qui ne sont pas recensées sur les marges des glaciers Lovén et Edith.

2.2. Deuxième stade de la reconquête végétale : le relais entre espèces pionnières et édificatrices

La deuxième étape de la reconquête végétale est datée de 70 ans en moyenne. De la même manière que précédemment, nous en détaillons l'étude à partir d'un graphique rassemblant les espèces communes aux cinq sites (fig. 86) et un second regroupant les espèces particulières à certains sites (fig. 87). La fréquence des espèces pour la période précédente de 30 ans est précisée à titre de comparaison dans les graphiques.

2.2.1. Occupation croissante des espèces pionnières et édificatrices

Les espèces ubiquistes pionnières, implantées depuis le stade précédent, voient leur présence progresser sur les dépôts déglacés depuis 70 ans sur l'ensemble des marges (fig. 86). C'est le cas de *Saxifraga oppositifolia, Minuartia rubella, Silene uralensis, Draba species, Cerastium arcticum.* La couverture végétale augmente et couvre en moyenne 20 % du substrat alors qu'elle avoisinait 10 % au stade précédent. L'avancée de la reconquête végétale se traduit par la progression des espèces édificatrices telles *Salix polaris, Silene acaulis* et *Polygonum viviparum.* Parallèlement à la progression de ces espèces, d'autres, comme *Braya purpurascens, Cerastium regelii, Puccinellia angustata, Phippsia concinna* et *Sagina nivalis,* diminuent.

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

Il s'opère également un enrichissement spécifique du couvert végétal avec l'arrivée d'espèces, signalées sur la figure 87 par des flèches, comme *Arenaria pseudofrigida* sur la marge du glacier Midre Lovén. À son propos, Th. Brossard (1991) relève que la dissémination d'*Arenaria pseudofrigida* aurait, au regard du processus de colonisation, un caractère particulier. Elle serait l'indice d'un passage des milieux pionniers stricts à un stade plus évolué. De même, *Oxyria digyna,* bien que recensée au stade précédent sur les dépôts du glacier Austre Lovén, s'ajoute au cortège floristique des marges des glaciers Edith et Midre Lovén. R.J. Whittaker (1993) définit *Oxyria digyna* comme un pionnier tardif à l'image de son arrivée ici au deuxième stade (photo 56). L'implantation de ces nouvelles espèces est tributaire d'une amélioration des conditions initiales, strictement minérales, vers une stabilisation des surfaces et un enrichissement en matière organique par les plantes pionnières.

***Photo 56 – Colonisateur végétal tardif :* Oxyria digyna.** *Prise de vue depuis la marge proglaciaire du glacier Austre Lovén, 9 juillet 2004.*

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

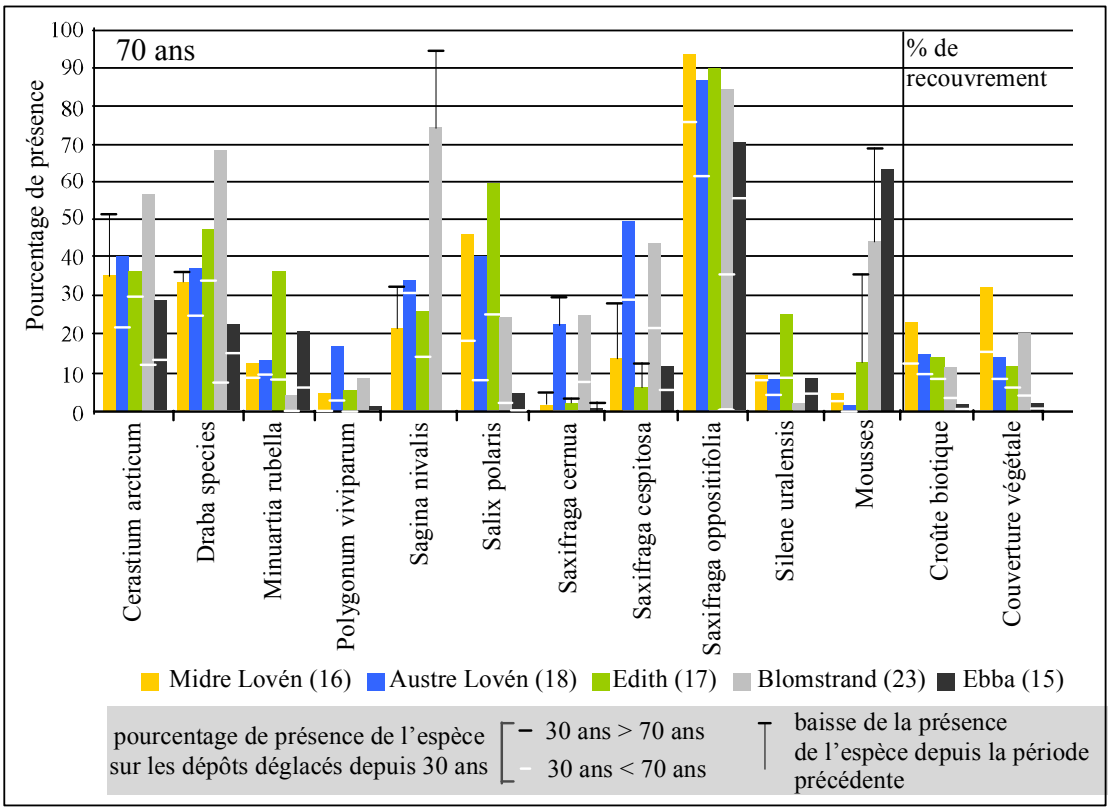
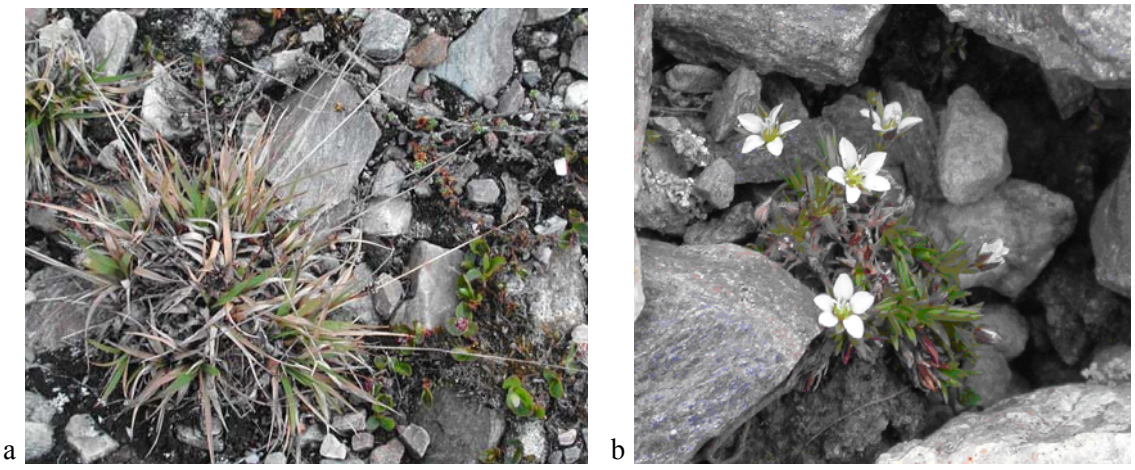


Fig. 86 – Espèces végétales recensées sur les dépôts déglacés depuis 70 ans *(d'après 1 550 relevés). Sur l'axe des abscisses sont énumérées par ordre alphabétique les espèces végétales. Sur l'axe des ordonnées à droite sont précisés les pourcentages de recouvrement du substrat par la couverture végétale et la croûte biotique. Sur l'axe des ordonnées, à gauche, sont reportés les pourcentages de présence des espèces. Pour chaque marge proglaciaire est précisé entre parenthèses, le nombre total d'espèces recensées.*

2.2.2. Affirmation d'une maturité végétale avancée sur les marges des glaciers Lovén et Edith

Comme nous venons de l'évoquer, la présence des espèces édificatrices progresse sur tous les sites. Cependant, l'évolution la plus importante se produit sur les marges des glaciers Lovén et Edith, traduisant une progression plus rapide de la reconquête végétale par rapport aux marges des glaciers Blomstrand et Ebba. Ainsi, d'après la figure 86, *Salix polaris* dépasse 40 % de présence, sur les trois sites, contre 25 % sur la marge du glacier Blomstrand et 5 % sur celle du glacier Ebba. Il en est de même pour *Silene acaulis, Carex nardina, Dryas octopetala* (fig. 87). Néanmoins, entre les glaciers Lovén et Edith, les différences spécifiques, déjà évoquées, demeurent marquées avec la progression des espèces xérophiles comme *Luzula confusa* (fig. 87 ; photo 57 a) et *Minuartia rubella* (fig. 87 ; photo 57 b), qui atteint 35 % de présence sur les dépôts du glacier Edith, alors que sur les marges des glaciers Lovén, elle est inférieure à 12 %.

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005



a b

***Photos 57 – Espèces végétales des milieux secs : (a)* Luzula confusa *et (b)* Minuartia rubella.** *Prises de vue sur la marge du glacier Edith (a) 12 juillet 2001, (b) 5 juillet 2002.*

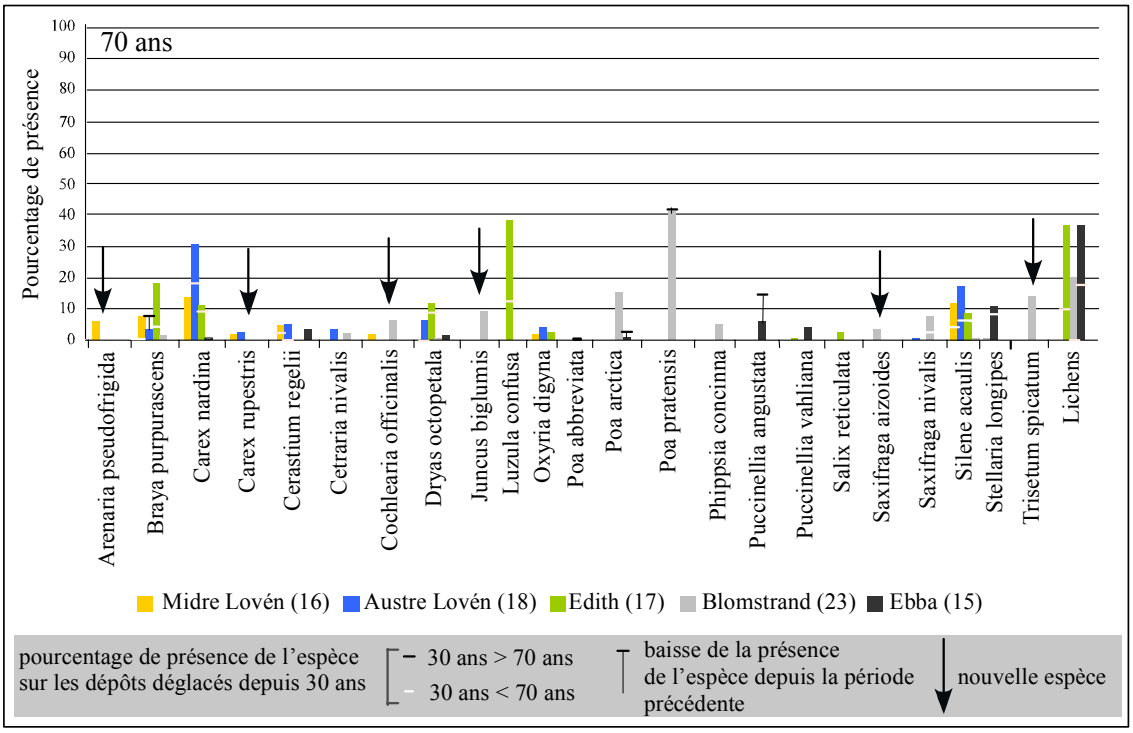


Fig. 87 – Espèces végétales recensées sur les dépôts déglacés depuis 70 ans parmi les cinq marges proglaciaires *(d'après 1 550 relevés). Sur l'axe des abscisses sont énumérées par ordre alphabétique les espèces végétales. Sur l'axe des ordonnées, sont indiqués les pourcentages de présence des espèces sur les dépôts déglacés depuis 70 ans. Entre parenthèses est précisé le nombre total d'espèces recensées par marge proglaciaire.*

2.2.3. Accélération de la reconquête sur la marge du glacier Blomstrand

L'auréole morainique datée de 70 ans de la marge du glacier Blomstrand se trouve plus éloignée du rivage que celle déglacée depuis 30 ans. Cette distance semble jouer en faveur du développement floristique qui se marque par une importante augmentation de

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

la présence des espèces entre les dépôts déglacés depuis 30 ans et ceux déglacés depuis 70 ans. Par exemple, d'après la figure 86, *Cerastium arcticum* passe de 10 % à 55 % de présence et *Draba species* de 8 % à 69 %. La progression est également remarquable dans le taux de recouvrement végétal qui avoisine 20 % et est supérieur à celui des marges des glaciers Austre Lovén et Edith. Enfin, l'évolution se caractérise par un enrichissement du cortège floristique avec l'arrivée de *Juncus biglumis, Cochlearia officinalis, Trisetum spicatum* et *Saxifraga aizoïdes* (fig. 87). Ces espèces, dont les affinités avec les secteurs humides et littoraux ont déjà été mentionnées, singularisent le cortège floristique. Au stade précédent, la proximité du fjord, moins de 100 m, semblait bloquer le développement végétal. Au-delà de ce secteur sous influence directe, avec l'éloignement, l'influence indirecte se traduit par une diversité spécifique. Le stade strictement pionnier est dépassé et une spécialisation des espèces végétales s'opère. *In fine*, le site présente une diversité spécifique de 23 espèces supérieure à celle des autres sites où 16 à 18 espèces sont comptabilisées pour les glaciers Edith et les Lovén et 15 pour le glacier Ebba.

2.2.4. La marge du glacier Ebba : la glace en cause dans le retard de la reconquête

La glace continue à inhiber la reconquête végétale sur la marge du glacier Ebba. La présence de certaines espèces évolue, mais les taux de présence spécifique restent inférieurs à ceux rencontrés sur les autres sites. Ainsi, d'après la figure 86, *Draba species* n'excède pas 25 % de présence contre 35 % sur les autres marges. De même, *Salix polaris* a moins de 5 % de présence contre plus de 25 % sur les autres sites. Les espèces édificatrices, comme *Silene acaulis, Carex nardina,* sont absentes de la marge alors qu'elles sont implantées sur les autres sites (fig. 87). La reconquête végétale conserve le retard remarqué au stade précédent.

2.3. Stade 3 : stabilisation de la reconquête végétale

Le troisième et dernier stade de la reconquête végétale correspond aux dépôts déglacés depuis 100 ans dont la figure 88 donne les espèces dominantes et la figure 89 celles particulières à certains sites. D'une manière générale, les espèces végétales ont une emprise spatiale qui évolue moins significativement entre les dépôts de la période précédente et ceux déglacés depuis 100 ans, que celle qui avait été notée entre les dépôts déglacés depuis 30 ans et ceux de 70 ans. En témoigne le recouvrement végétal

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

qui, comme le montre la figure 88, n'a pas évolué depuis la période précédente excepté pour le glacier Blomstrand, et reste inférieur à 30 %. L'évolution la plus significative se fait pour les espèces édificatrices qui, à ce stade, l'emportent sur les espèces pionnières. Ainsi, sur la marge du glacier Blomstrand, *Polygonum viviparum* passe de 8 % de présence, sur les dépôts déglacés depuis 70 ans, à 50 % sur les dépôts déglacés depuis 100 ans, dépassant ainsi la fréquence d'une espèce pionnière comme *Cerastium arcticum,* qui est de 35 % (fig. 88). Parallèlement, la présence de certaines espèces pionnières ubiquistes diminue. Par exemple, dans le cas de la marge du glacier Midre Lovén, entre le stade précédent et les dépôts déglacés depuis 100 ans, *Draba species* passe de 32 % à 22 % de présence et *Sagina nivalis,* de 20 % à quelques pour cent (fig. 88). Enfin, certaines espèces ont disparu du cortège floristique comme *Braya purpurascens*. Cette régression et/ou la disparition de certaines espèces peuvent être associées à la « maturité » du cortège floristique au sein duquel les espèces édificatrices prennent le dessus sur les pionnières.

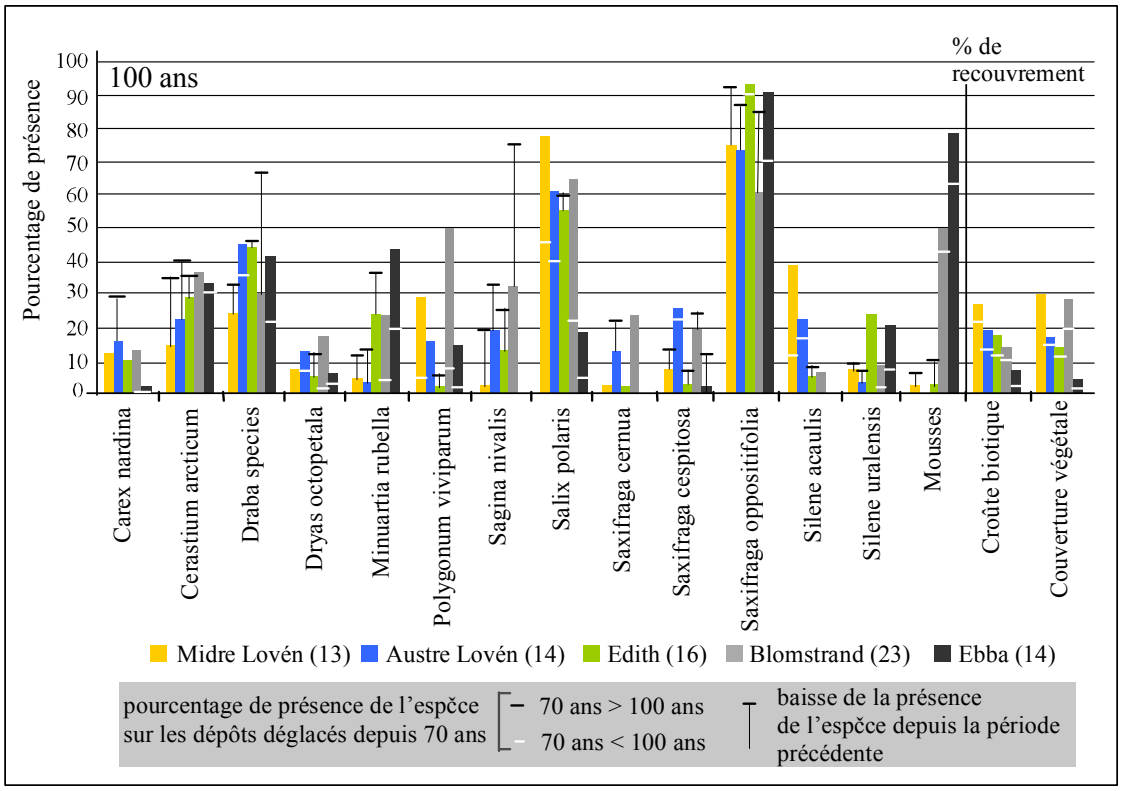


Fig. 88 – Espèces végétales recensées sur les dépôts déglacés depuis 100 ans *(d'après 1 550 relevés). En abscisses sont énumérées par ordre alphabétique les espèces végétales et sur l'axe des ordonnées à droite sont indiqués les taux de recouvrement du substrat par le couvert végétal et la croûte biotique. Sur l'axe des ordonnées à gauche est indiqué le pourcentage de présence de l'espèce sur les dépôts déglacés depuis 100 ans. Entre parenthèses est précisé le nombre total d'espèces recensées pour chacune des marges proglaciaires.*

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

Photo 58 – La présence de* Phippsia concinna *est associée au littoral sur la marge du glacier Blomstrand. *L'espèce disparaît des dépôts déglacés depuis 100 ans car l'éloignement des dépôts avec le littoral est trop important. Prise de vue depuis la marge du Blomstrand, 14 juillet 2002.*

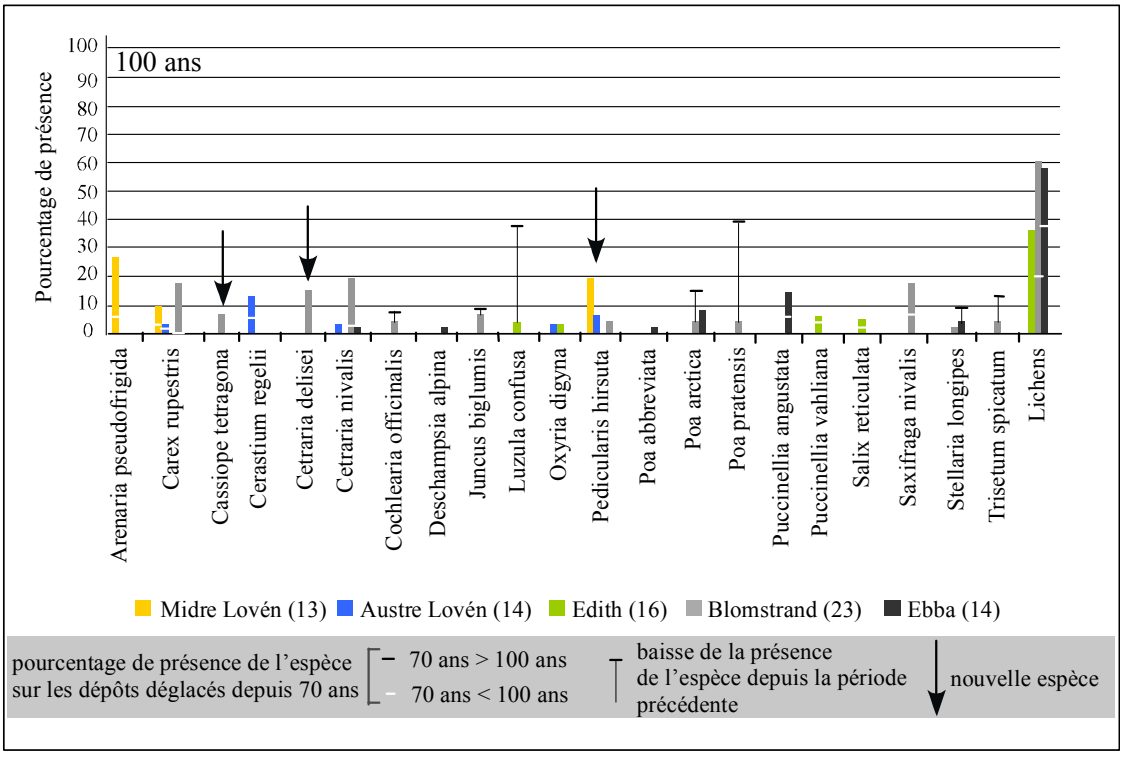


Fig. 89 – Espèces végétales recensées sur les dépôts déglacés depuis 100 ans parmi les cinq marges proglaciaires *(d'après 1 550 relevés). Sur l'axe des abscisses sont énumérées, par ordre alphabétique, les espèces végétales. Sur l'axe des ordonnées sont indiqués les pourcentages de présence des espèces sur les dépôts déglacés depuis 100 ans. Entre parenthèses est précisé le nombre total d'espèces recensées pour chaque marge proglaciaire*

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

Entre les sites, les différences spécifiques évoquées aux stades antérieurs se maintiennent. En revanche, les retards dans les rythmes de progression de la reconquête entre les glaciers Lovén et Edith, d'une part, et les glaciers Ebba et Blomstrand, d'autre part, sont encore remarquables à ce troisième stade.

- **Décalage dans les reconquêtes entre les marges des glaciers Edith–Lovén et Blomstrand-Ebba**

Alors que la dynamique de reconquête végétale, sur les marges des glaciers Edith et Lovén, est caractérisée par une progression des espèces édificatrices et une diminution des espèces pionnières ubiquistes, les espèces pionnières sont toujours en progression sur les marges des glaciers Ebba et Blomstrand. Ce décalage est la conséquence du retard accumulé, dans la reconquête végétale, sur les marges des glaciers Ebba et Blomstrand. Par exemple *Minuartia rubella,* dans le cas du glacier Blomstrand, passe de moins de 5 % à 22 % de présence, alors que dans le cas du glacier Edith, l'espèce passe de 38 % à 22 % de présence (fig. 88). De même, *Cerastium arcticum* a une présence croissante dans le cas des glaciers Blomstrand et Ebba alors qu'elle diminue sur les marges des glaciers Edith et Lovén.

Il semble qu'il y ait une dynamique de reconquête marquée par des comportements spécifiques, qui soit identique d'un site à l'autre et caractérisée par des pas de temps d'évolution comparables, avec des délais de mise en place nécessaires pour chaque stade de reconquête.

- **Faible développement floristique sur la marge du glacier Ebba**

Bien qu'il y ait une évolution dans la reconquête végétale, la marge du glacier Ebba conserve un développement floristique inférieur à celui des quatre autres sites. Cette faible évolution se traduit par un pourcentage de recouvrement végétal réduit, moins de 5 % alors qu'il dépasse 15 % sur les autres marges, et une faible emprise des espèces édificatrices comme *Dryas octopetala* et *Silene acaulis* (fig. 88).

- **Impact floristique de l'éloignement du fjord sur la marge du Blomstrand**

Les dépôts déglacés depuis 100 ans sont les plus éloignés des rives du fjord, plus de 800 m. Cet éloignement est peut-être un facteur explicatif dans la diminution de la présence de *Poa pratensis,* qui passe de 40 % à 5 % des dépôts de 70 ans à ceux de 100 ans, et de *Trisetum spicatum* qui diminue de 12 % à quelques pour cent, tandis que

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

Phippsia concinna disparaît (fig. 89 ; photo 58). En revanche, sur les moraines du glacier Blomstrand, la présence des espèces édificatrices progresse de manière très importante. Par exemple, d'après la figure 88, *Polygonum viviparum* passe de 10 % de présence sur les dépôts déglacés depuis 70 ans, à 50 %, sur ceux de 100 ans, et *Salix polaris* passe de 25 % à 65 %, atteignant ainsi la même fréquence que celle observée sur la marge du glacier Edith. Enfin, on relève l'installation de *Cassiope tetragona, Cetraria nivalis* et *Cetraria delisei,* sur la marge du glacier Blomstrand, espèces végétales caractéristiques de la toundra. La colonisation de ces espèces est liée à l'absence des rennes, ce qui n'est pas le cas pour les trois marges de la presqu'île de Brøgger où seule *Cetraria nivalis* y est relevée (fig. 89). L'influence du fjord a complètement disparu. Il semble que la distance soit ici suffisante pour qu'il n'affecte plus le développement végétal.

La comparaison de la reconquête végétale sur cinq marges proglaciaires montre que, dès le premier stade, la spécialisation spécifique s'inscrit dans les cortèges floristiques de chacune des marges. Au deuxième stade, cette spécialisation s'affirme, favorisant, sans doute, le développement de la compétition interspécifique et la diminution, voire la disparition de certaines espèces au troisième stade. À ce dernier stade, les différences dans la progression de la reconquête végétale, restent marquées, avec des espèces pionnières, dont l'occupation progresse toujours sur les marges des glaciers Blomstrand et Ebba, alors qu'elle diminue sur les marges des glaciers Lovén et Edith. Il apparaît clairement que, la proximité du littoral et la glace contenue dans les moraines, sont des handicaps au développement floristique, au moins dans les premiers temps de la reconquête végétale.

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

3. Modalités spatio-temporelles de la reconquête végétale

Dans le cheminement précédent, nous avons insisté, d'une part, sur le rôle du temps et son incidence sur la mise en place des cortèges floristiques au sein de chaque site et, d'autre part, sur les conséquences des particularités environnementales des marges sur les compositions des séquences floristiques. Nous analysons maintenant, pour affiner notre diagnostic, la manière dont les espèces communes se constituent en familles (ultra-pionnières, pionnières ubiquistes, édificatrices) au cours du processus sur les cinq sites.

3.1. Les espèces ultra-pionnières

Nous qualifions d'espèces ultra-pionnières, les espèces végétales qui ne sont pas recensées dans la toundra et dont la présence est uniquement liée à l'environnement pionnier. C'est le cas notamment de *Stellaria longipes, Braya purpurascens* et *Cerastium regelii.* Nous n'excluons pas que ces espèces ultra-pionnières puissent être rencontrées dans la toundra, mais certaines conditions sont requises pour leur présence. La figure 90 montre la fréquence de ces espèces en relation avec la durée de déglaciation des dépôts, pour les cinq sites, et dans la toundra. Les graphiques montrent que ces espèces ultra-pionnières colonisent rapidement les dépôts. On les rencontre sur les dépôts déglacés depuis 30 ans, mais avec une distribution éparse, leur présence restant inférieure à 10 % (fig. 90). Leur occupation ne s'accroît pas avec l'augmentation de la durée de déglaciation, elle peut même diminuer comme dans le cas de *Stellaria longipes*.

Cette occupation spatiale discontinue est illustrée par l'exemple des cartographies de présence de *Braya purpurascens* à l'intérieur des cinq sites (fig. 91).

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

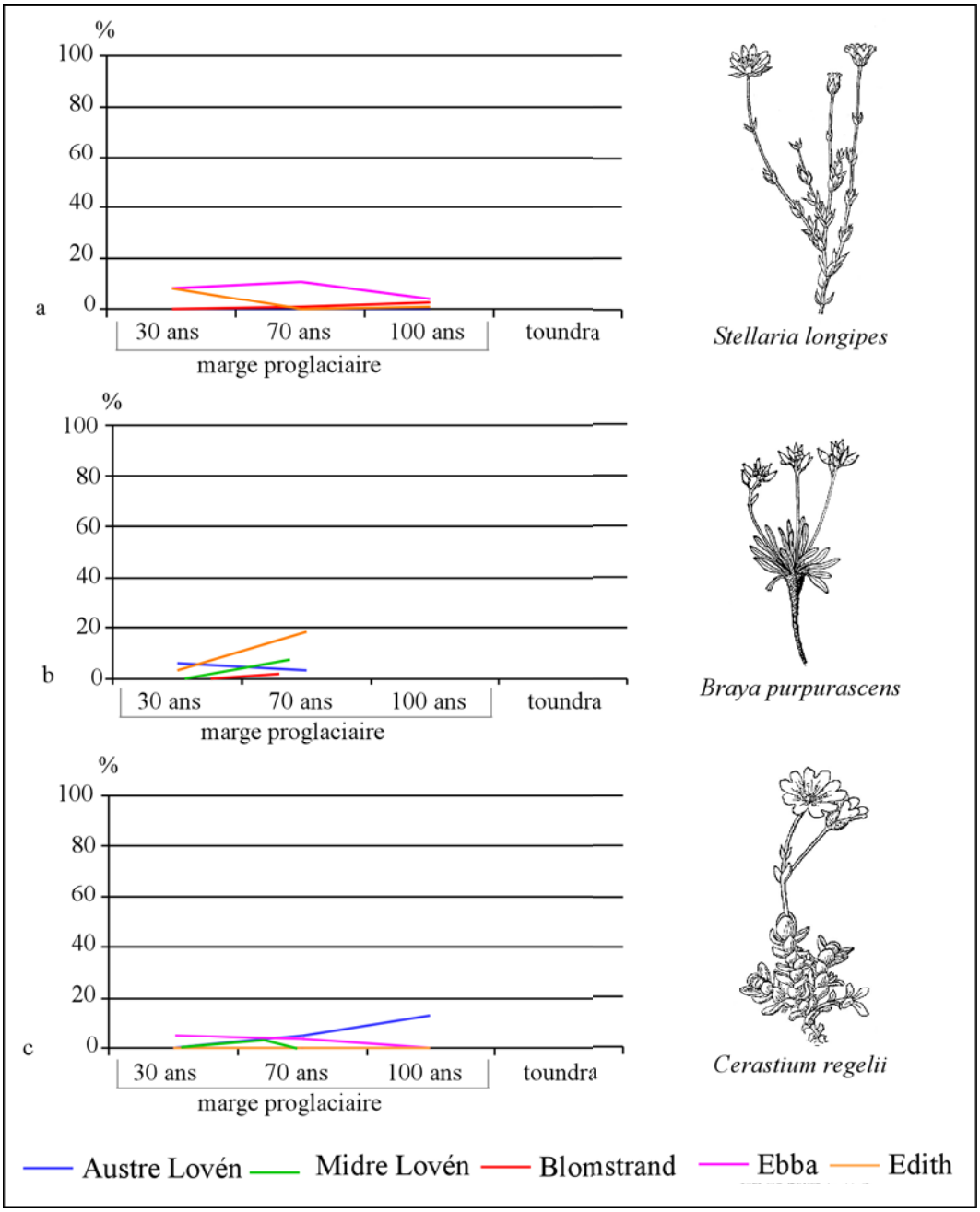


Fig. 90 – Évolution de la fréquence des espèces végétales ultra-pionnières en relation avec la durée de déglaciation des moraines et dans la toundra *(d'après 1 550 relevés et illustrations (a, d) d'après N. Polunin 1959, et (b, c) d'après O.I. Rønning 1996).*

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

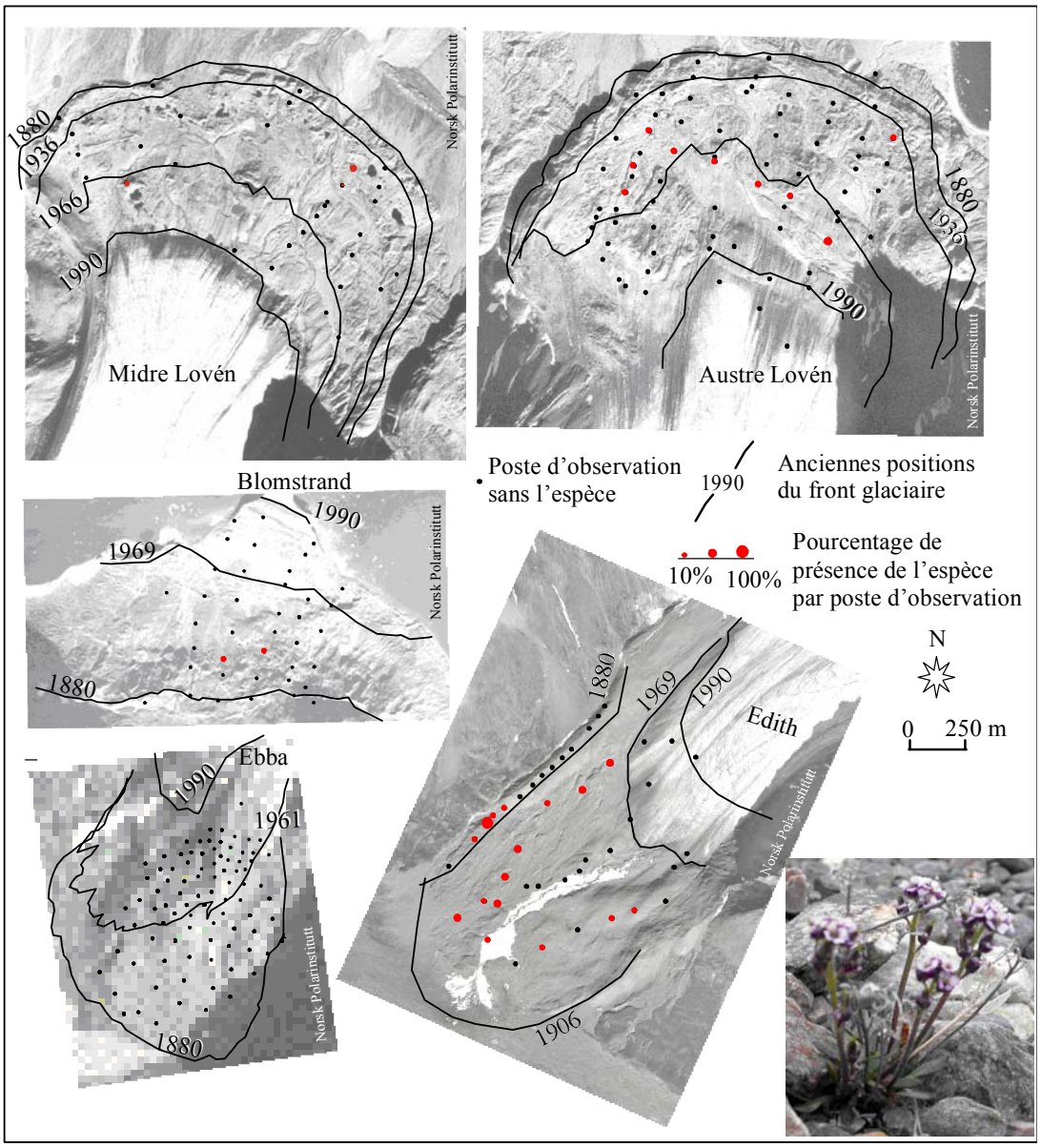


Fig. 91 – Répartition spatiale de* Braya purpurascens *sur les cinq marges proglaciaires *(d'après 1 550 relevés).*

À la lecture de la figure 91, *Braya purpurascens* montre, d'une part, une faible présence sur chacun des sites et, d'autre part, une localisation différenciée à l'intérieur de chacune des marges. En effet, *Braya purpurascens* ne colonise pas les dépôts du glacier Ebba et peu (moins de trois postes) ceux des glaciers Blomstrand et Midre Lovén. En revanche, *Braya purpurascens* a une présence plus forte sur les dépôts des glaciers Austre Lovén (9 postes) et Edith (16 postes). Ces différences de localisation intermarges traduisent un comportement spécifique discontinu dans le temps : à l'intérieur de chaque site, les espèces sont tantôt rencontrées à la faveur de secteurs récemment déglacés ou, à l'inverse, plus anciens. Par exemple, sur la marge du glacier Austre Lovén, *Braya purpurascens* est présente sur les dépôts déglacés depuis moins de 70 ans, l'espèce ne colonisant pas les dépôts antérieurs au front de 1936. À l'inverse, sur la

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

marge du glacier Edith, *Braya purpurascens* est rencontrée sur les plus anciennes moraines. Cette discontinuité spatio-temporelle montre que les espèces ultra-pionnières ont une colonisation davantage subordonnée aux conditions mésologiques qu'à une durée de déglaciation et à un niveau d'évolution dans la reconquête végétale.

3.2. Les espèces ubiquistes

Les espèces ubiquistes sont ainsi qualifiées pour la grande variété de milieux qu'elles peuvent coloniser, des secteurs pionniers jusqu'aux variantes matures de toundra en dehors de la moraine. Ainsi la figure 92 illustre la forte fréquence dans les secteurs déglacés de *Draba species, Cerastium arcticum, Saxifraga cespitosa* et *Saxifraga oppositifolia.*

Comme les espèces ultra-pionnières, les espèces ubiquistes colonisent rapidement les dépôts, mais avec une fréquence accentuée comparée à ces dernières. Par exemple, *Saxifraga oppositifolia* peut atteindre une fréquence supérieure à 20 %, dans le contexte le plus récent, alors que les espèces ultra-pionnières n'y dépassent pas 10 %. Leur présence croît sur les séquences de dépôts de 70 ans. Ainsi *Draba species*, sur la marge du glacier Blomstrand, atteint 65 % de présence, pour tomber à 30 % sur la séquence morainique de 100 ans et à 22 % dans la toundra (fig. 92). Il semble qu'il y ait un stade d'occupation optimale par les espèces ubiquistes limité à la séquence 70 ans car à l'auréole suivante, de 100 ans, leur fréquence décroît. Dans la toundra, les espèces pionnières ubiquistes se maintiennent de manière relictuelle, avec des pourcentages de présence inférieurs à 20 % dans la plupart des cas, excepté pour *Saxifraga oppositifolia* dont la présence est comprise entre 60 et 90 %.

Spatialement, les caractères ubiquistes de ces espèces pionnières s'expriment par une occupation forte et homogène de l'espace. Les exemples de cartographie de *Saxifraga oppositifolia,* pour les cinq sites morainiques, montrent une colonisation quasiment indépendante de la durée de déglaciation des dépôts (fig. 93). L'espèce occupe uniformément l'espace, à la fois à l'intérieur de chacune des auréoles morainiques et entre les différentes marges proglaciaires.

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

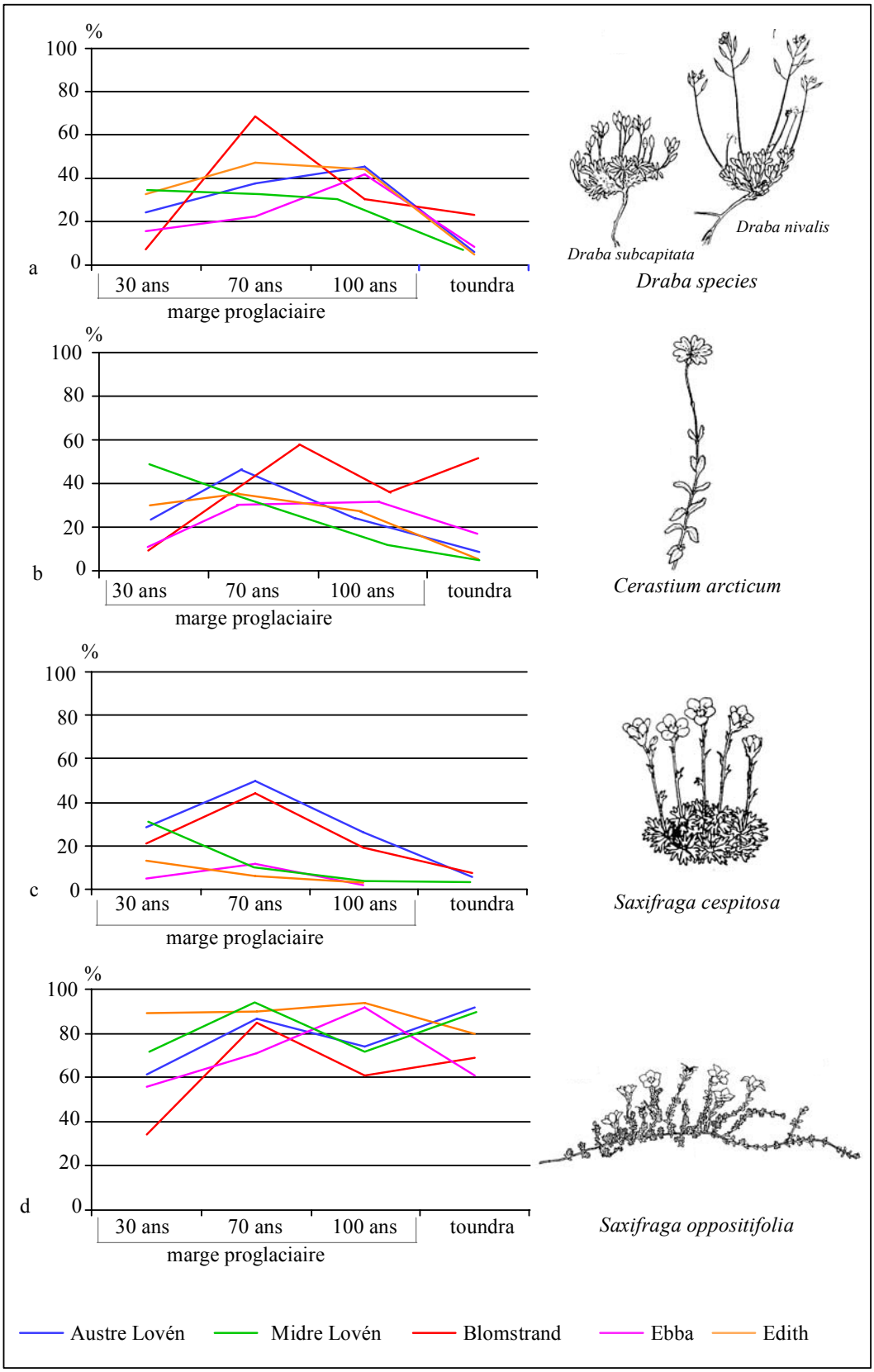


Fig. 92 – Évolution de la fréquence des espèces végétales pionnières ubiquistes en relation avec la durée de déglaciation des moraines et dans la toundra *(d'après 1 550 relevés et illustrations d'après O.I. Rønning, 1996)*

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

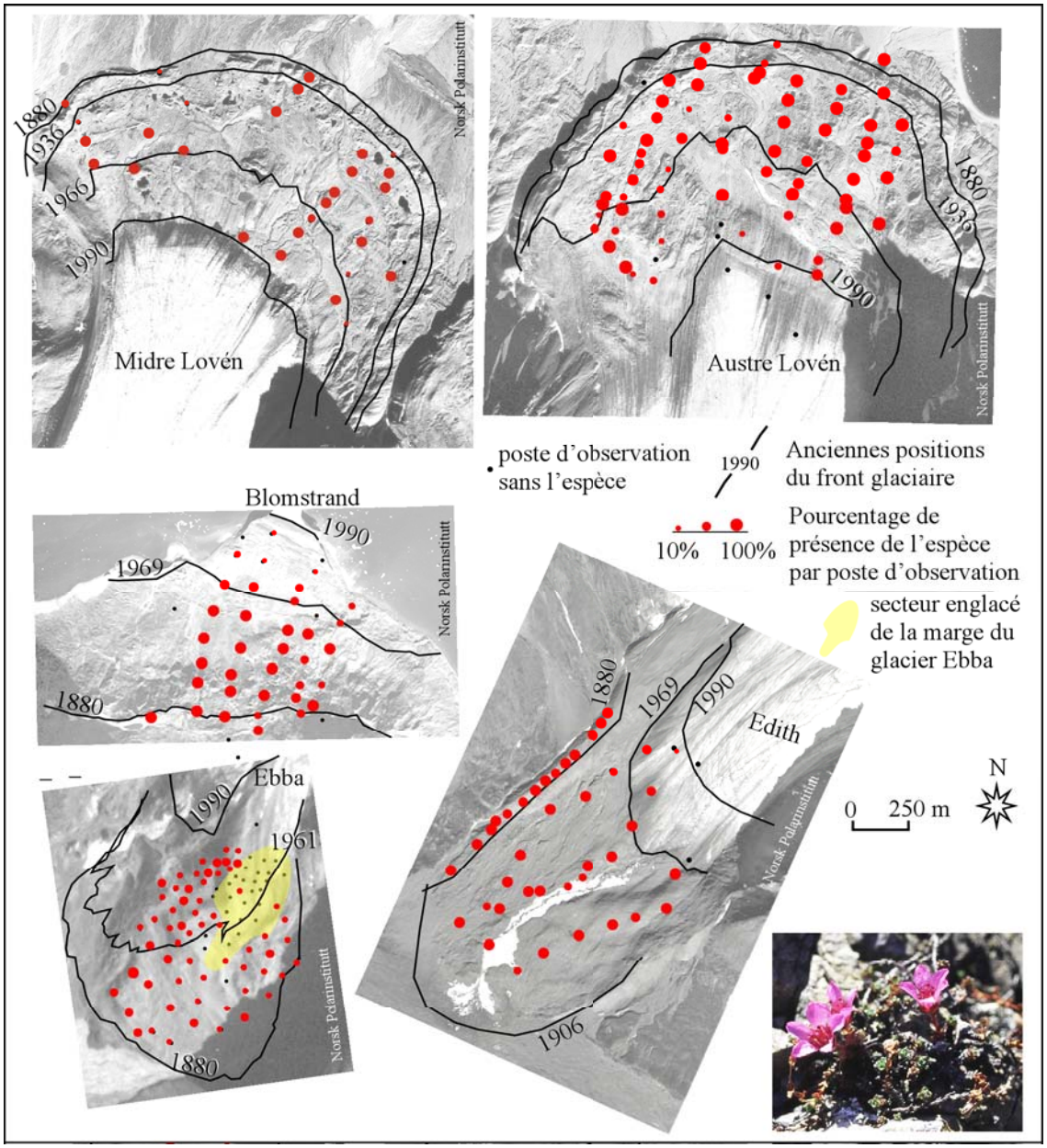


Fig. 93 – Répartition spatiale de* Saxifraga oppositifolia *sur les cinq marges proglaciaires *(d'après 1 550 relevés).*

Le seul obstacle à la colonisation de *Saxifraga oppositifolia* est représenté par les secteurs englacés de la marge du glacier Ebba. En effet, pour la marge du glacier Ebba, en jaune sur la figure 93, a été soulignée la partie englacée à l'intérieur de laquelle l'espèce n'est pas installée. En revanche, en dehors de cette partie, pour des dépôts d'âge équivalent, *Saxifraga oppositifolia* est fortement représentée.

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

3.3. Les espèces édificatrices

Le troisième comportement spécifique est celui des espèces édificatrices, éléments floristiques constitutifs de la formation de toundra. On compte parmi elles *Dryas octopetala, Polygonum viviparum, Silene acaulis*. La figure 94 illustre leurs faibles fréquences sur les dépôts récemment déglacés qui s'opposent aux fréquences plus élevées des espèces pionnières qui colonisent rapidement les dépôts. Par exemple, sur la marge du glacier Edith, *Silene acaulis* et *Polygonum viviparum* occupent moins de 5 % des dépôts déglacés depuis 30 ans. La majorité des espèces édificatrices ne colonisent les moraines qu'après 70 ans de déglaciation, comme *Dryas octopetala* pour les marges des glaciers Lovén, Blomstrand et Ebba (fig. 94). Ces espèces ont une dynamique de colonisation de l'espace qui s'intensifie avec l'augmentation de la durée de déglaciation. Pour la plupart, 70 ans minimum sont nécessaires à leur s'installation et 100 ans pour accroître leur occupation. Dans la toundra, elles atteignent une fréquence maximum, dépassant 60 % voire 80 % de présence. La dynamique végétale des espèces édificatrices est donc inverse de celle que nous avons observée pour les espèces pionnières, dont la présence périclite parallèlement à l'allongement de la durée de déglaciation et dont le déclin se poursuit dans la toundra.

En terme spatial, la localisation des espèces édificatrices est reliée aux espaces morainiques anciennement déglacés comme l'illustrent les cartographies de *Dryas octopetala* (fig. 95). *Dryas octopetala* colonise les dépôts morainiques antérieurs à 1960, aucune plante de l'espèce n'étant recensée sur les dépôts de la première auréole morainique, excepté dans le cas du glacier Edith pour lequel nous avons déjà remarqué que le rythme de reconquête végétale est plus rapide pour les espèces édificatrices. Ces espèces colonisent tardivement les dépôts car elles nécessitent que l'environnement ait été modifié précédemment par des espèces pionnières (apport de matière organique, stabilisation du substrat…).

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

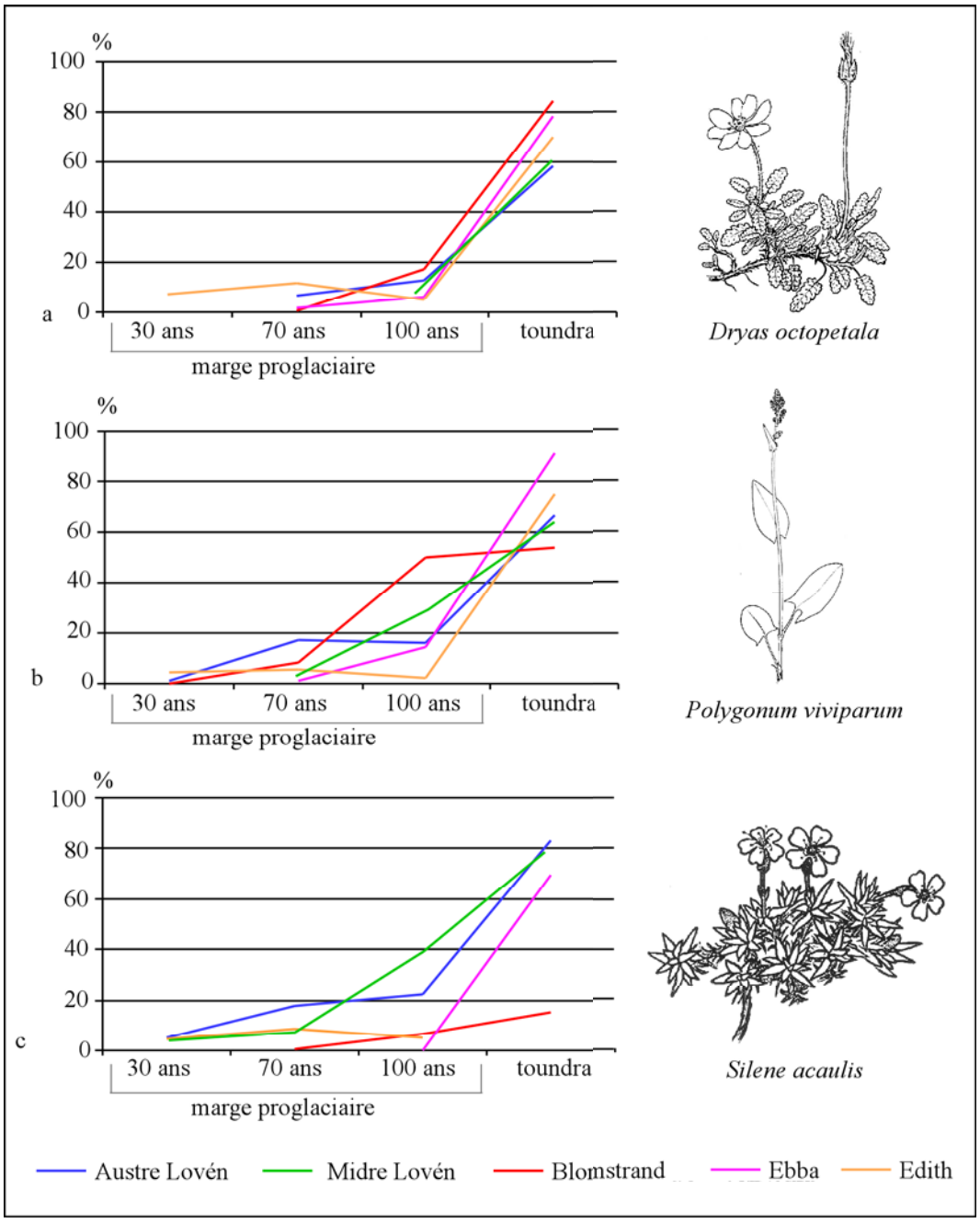


Fig. 94 – Évolution de la fréquence des espèces végétales édificatrices en relation avec la durée de déglaciation des moraines et dans la toundra *(d'après 1 550 relevés, illustrations (b, d) d'après N. Polunin, 1959, et (a, c) d'après O.I. Rønning, 1996).*

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

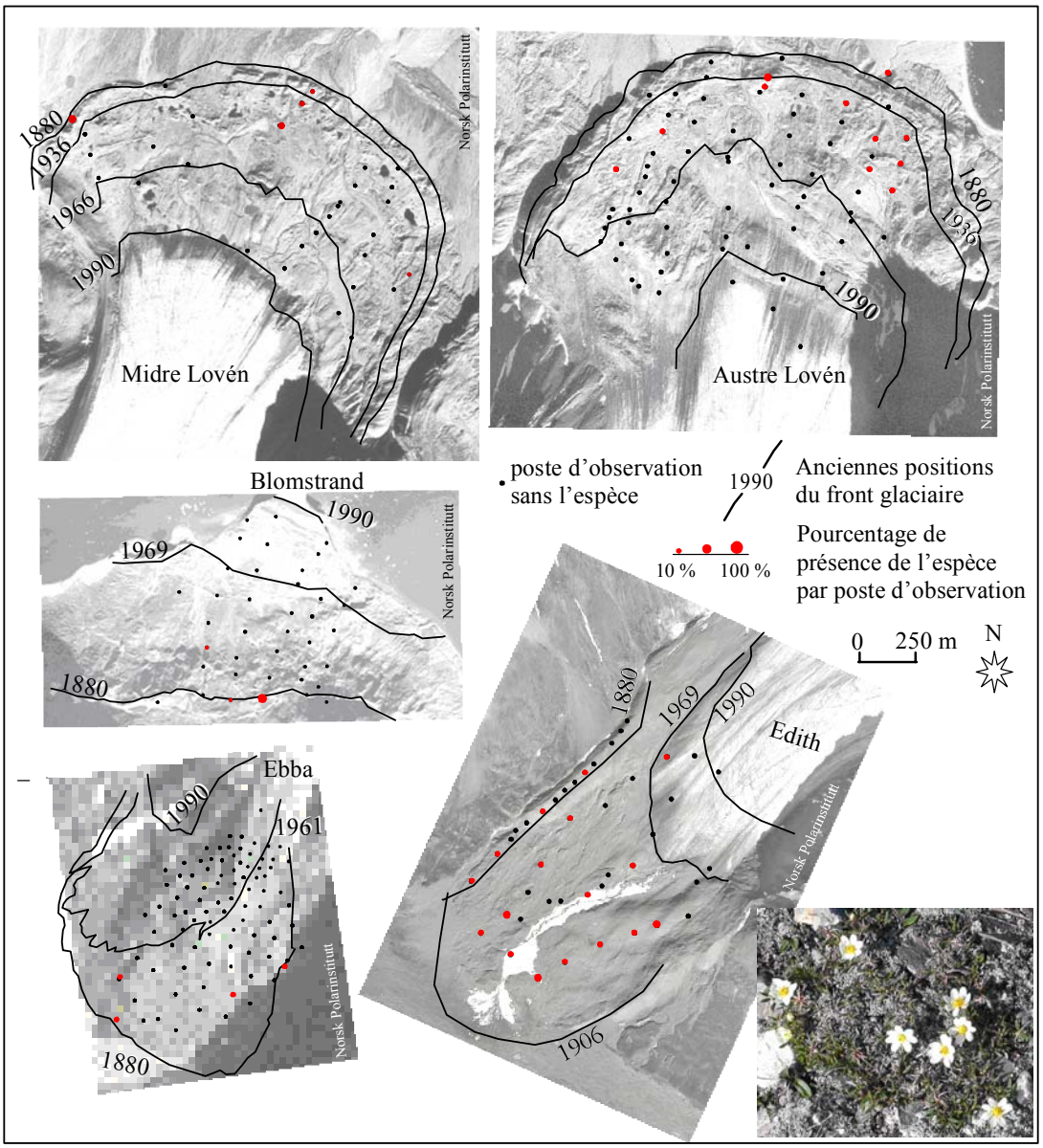


Fig. 95 – Répartition spatiale de* Dryas octopetala *sur les cinq marges proglaciaires *(d'après 1 550 relevés).*

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

Se relaient dans le temps et dans l'espace, entre dépôts récemment déglacés et dépôts plus anciens, les espèces pionnières puis les espèces édificatrices préfigurant la formation végétale future : la toundra. De ce point de vue, notre analyse montre que les espèces développent des stratégies spatiales différentes, dans la reconquête des milieux ouverts à la colonisation, depuis la fin du Petit Âge Glaciaire. Des familles d'espèces se constituent aux comportements spatio-temporels différenciés au cours de la reconquête :

- *les ultra-pionnières qui ne présentent pas de distribution spatiale cohérente d'un point de vue temporel. Leur présence est due à certaines conditions mésologiques locales ;*
- *les pionnières ubiquistes qui colonisent les moraines indifféremment à la durée de déglaciation et aux particularités locales avec de fortes fréquences ;*
- *les édificatrices qui ont une présence davantage reliée à la durée de déglaciation qu'aux conditions stationnelles.*

4. Mise en perspective synthétique

Nous venons d'expliquer, selon plusieurs angles d'analyse, les rythmes et les modalités de la reconquête. Au terme de cette démarche de mise à plat systématique de l'information, il convient d'effectuer une synthèse de l'ensemble afin de dégager des conclusions significatives. À cette fin, nous avons recours à l'AFC dans laquelle nous intégrons les variables granulométriques (taux de recouvrement de chacune des 5 classes granulométriques dans les relevés[1]), les composantes floristiques communes aux cinq marges[2] et les durées de déglaciation des surfaces (30, 70, 100 ans).

[1] Nous rappelons que les cinq classes sont découpées ainsi : ≤ 2mm, 2-6 mm, 6 mm-5 cm, 5-25 cm, > 25 cm et que le taux de recouvrement de chacune des classes à l'intérieur du relevé est ainsi codé : 1. < 10 %, 2= - 10-30 %, 3= 30-50 %, 4 > 50 %.

[2] N'ont pas été considérées les espèces végétales dont la présence est inférieure à 10 %.

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

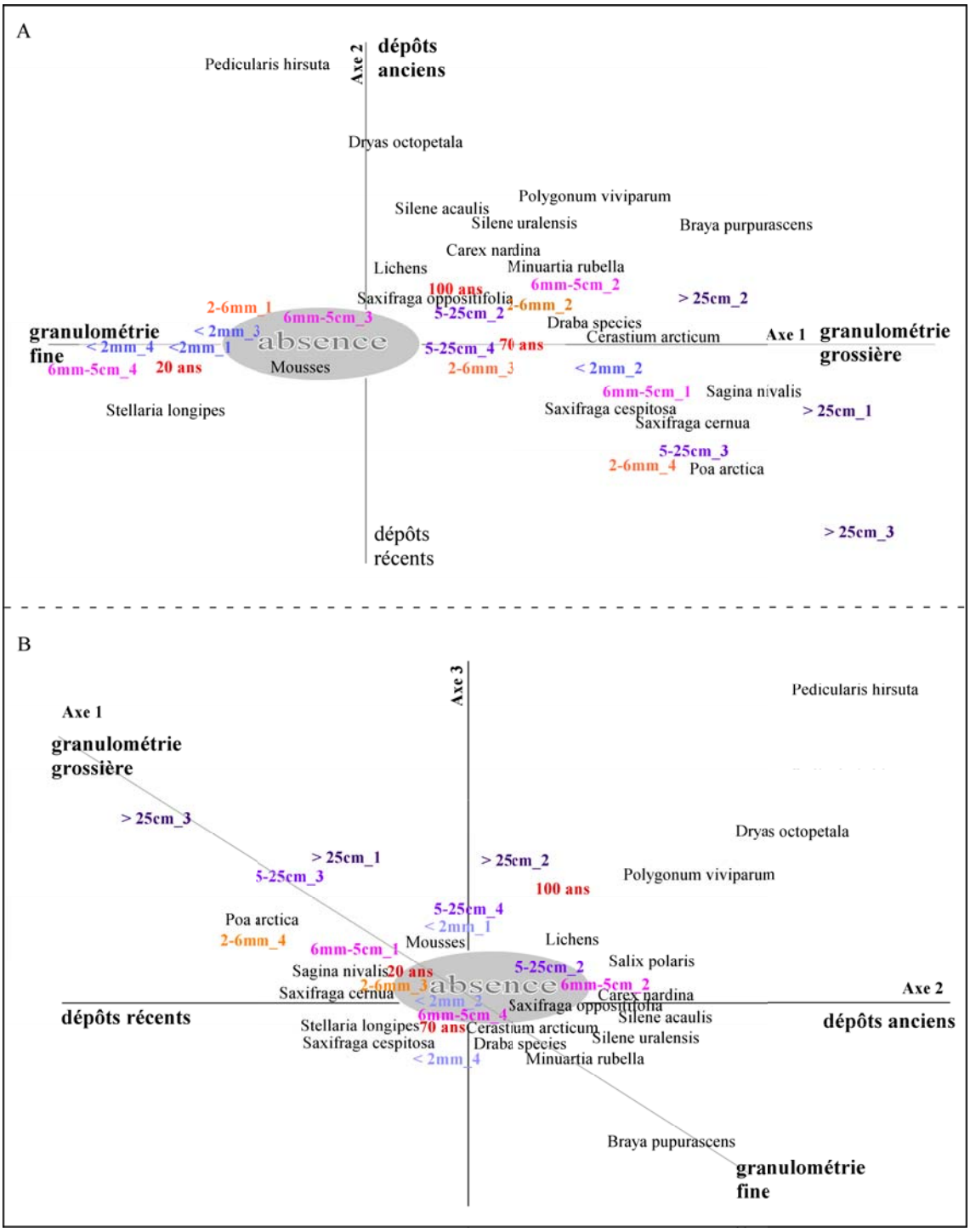


Fig. 96 – Analyse Factorielle des Correspondances des classes granulométriques et des espèces végétales des cinq marges proglaciaires *(d'après 1 550 relevés). Pour l'AFC ont été intégrées les trois générations des dépôts (30, 70 et 100 ans), les espèces végétales en présence et en absence (le cercle grisé localise les absences) et les classes granulométriques (< 2 mm, 2-6 mm, 6 mm-5 cm, 5-25 cm, > 25 cm) avec le code correspondant au recouvrement qu'elles ont dans les relevés (1. ≤ 10 %, 2. 10-30 %, 3. 30-50 %, 4. > 50 %).*

L'axe 1 de l'AFC (fig. 96 A) structure, de gauche à droite, les éléments granulométriques fins à grossiers. Sur la gauche de l'axe sont rassemblées trois classes d'éléments ≤ 2 mm dont la classe 4, ce qui signifie que les éléments fins couvrent plus de 50 % des relevés. Inversement, à l'extrémité droite se localisent les classes

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

d'éléments grossiers, avec celles des éléments granulométriques > 25 cm, dont la classe 3 signifiant que les éléments occupent 30 à 50 % des relevés. Cependant, les autres classes granulométriques se distribuent sans organisation hiérarchique apparente. En effet, dans le centre de l'espace factoriel, le long de l'axe 1, se trouvent rapprochées la classe des éléments de 5-25 cm, avec un taux de recouvrement > 50 %, et la classe des éléments de 2-6 mm couvrant entre 30-50 % des relevés. De plus, l'organisation des espèces, le long de cet axe, n'est pas cohérente avec la signification que nous venons de lui attribuer. En effet, *Poa arctica* et *Sagina nivalis* se trouvent rapprochées des éléments granulométriques les plus grossiers alors que nous avons précédemment évoqué leur lien avec les substrats à granulométrie fine. De même, *Stellaria longipes* est positionnée à proximité de l'extrémité gauche de l'axe 1 (fig. 96 A) correspondant aux éléments fins alors que l'espèce n'est pas exclusivement rattachée à ce type de granulométrie. Il est donc difficile d'établir une relation entre la distribution des espèces le long de l'axe 1 et le rôle que peuvent avoir les différentes classes granulométriques.

Sur l'axe 2, les espèces végétales sont structurées en fonction de la durée de déglaciation des dépôts morainiques, des plus récents, dans la partie inférieure de l'axe, jusqu'aux plus anciens dans la partie supérieure (fig. 96 A). Ainsi, de bas en haut, nous pouvons suivre la chronologie de reconquête végétale que nous avons mise en évidence dans l'analyse précédente. Ce sont d'abord les espèces pionnières *Poa arctica, Saxifraga cespitosa, Saxifraga cernua* et *Sagina nivalis ;* puis vient le groupe des espèces pionnières ubiquistes, localisées au centre de l'espace factoriel car elles occupent de façon similaire les espaces récemment déglacés et les plus anciens. Ce sont *Saxifraga oppositifolia, Draba species* et *Cerastium arcticum* auxquelles sont associés les lichens. En progressant à nouveau le long de l'axe 2 viennent s'ajouter les espèces qui nécessitent des conditions environnementales évoluées avec *Minuartia rubella, Carex nardina* et *Silene uralensis.* Enfin, le dernier niveau de progression est celui des espèces édificatrices *Silene acaulis, Polygonum viviparum, Dryas octopetala* et *Pedicularis hirsuta.* Seules *Braya purpurascens* et *Phippsia concinna* semblent ne pas être positionnées, dans l'espace factoriel, en relation avec la durée de déglaciation. Cela correspond à ce que nous avons précédemment relevé, pour certaines espèces ultra-pionnières, leur localisation étant reliée à des conditions mésologiques plutôt qu'à la durée de déglaciation des dépôts.

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

Enfin, l'axe 3 (fig. 96 B) n'apporte pas d'informations supplémentaires et ne semble pas avoir de signification particulière. Nous retrouvons le long de cet axe 3 une structuration des espèces qui se rapproche de celle que nous venons d'observer en relation avec la durée de déglaciation.

À la lecture de l'AFC, aucun trait significatif ne se dessine quant au rôle joué par la granulométrie dans la reconquête végétale. Les espèces végétales qui ont été retenues pour réaliser l'AFC sont celles dont la présence est supérieure à 10 %. Ces espèces ont des amplitudes écologiques suffisamment élevées pour qu'aucune situation granulométrique n'influence leur implantation. La granulométrie joue sur des particularités spécifiques, à l'échelle de chaque marge, mais pour des espèces très faiblement présentes. Par exemple, dans le cas du glacier Blomstrand, la présence de *Juncus biglumis* est associée aux éléments fins, abondants sur le site, mais aussi aux conditions édaphiques humides.

L'AFC vient conforter les résultats que nous avons précédemment avancés par rapport au calendrier de colonisation des espèces. La figure 97 schématise dans l'espace factoriel, les enchaînements de groupes spécifiques selon un axe temporel allant de quelques années de déglaciation jusqu'à la fin du Petit Âge Glaciaire. Cette analyse permet d'introduire une nuance avec l'identification d'espèces dites spécialisées, parmi lesquelles *Silene uralensis, Carex nardina* et *Minuartia rubella.* Ces espèces sont moins représentées que les ubiquistes et ont une présence associée à quelques particularités mésologiques, *Minuartia rubella* pour les environnements xériques.

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

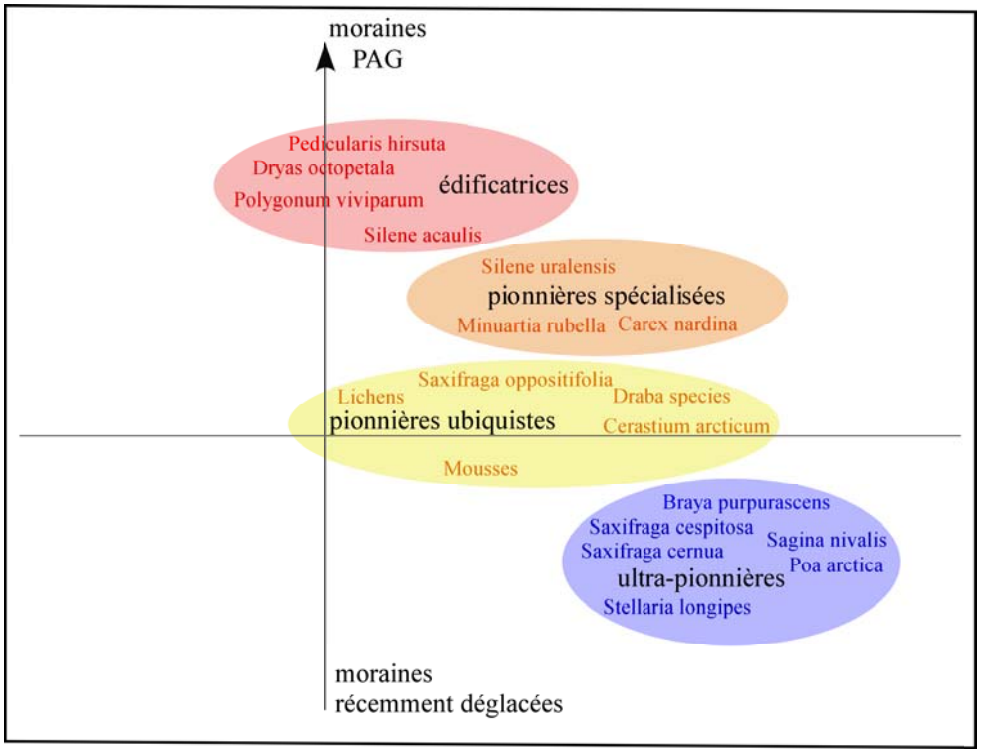


Fig. 97 – Schéma du calendrier de la reconquête végétale. *Le schéma est basé sur l'AFC regroupant les modalités granulométriques et les espèces végétales (fig. 105).*

Pris dans leur globalité, les systèmes morainiques du Petit Âge Glaciaire répondent à des dynamiques majeures qui réservent un rôle limité à la granulométrie. Les espèces communes aux marges proglaciaires sont trop ubiquistes pour que la granulométrie ait un impact sur leur localisation.

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

Conclusion

Les formations végétales qui se mettent en place sur les marges proglaciaires permettent de jalonner les premiers épisodes de la reconquête végétale qui, en terme d'évolution, doivent conduire à la toundra, telle que l'on peut l'observer sur les espaces limitrophes, les plus anciens et les plus stables. Nous avons mis en évidence comment les « rôles » se distribuent au cours du processus de colonisation, selon les espèces et leur comportement. Il ne s'agit pas d'un mouvement univoque d'enrichissement et de diversification de la couverture végétale, puisque les stratégies des espèces pionnières et des espèces édificatrices jouent en sens inverse et présentent une grande diversité de nuances. Bien que l'occupation spatiale diffère pour chaque espèce, d'un site à l'autre, les phases de colonisation s'enchaînent dans le même ordre. Toutefois, les rythmes de la reconquête végétale sont tributaires des conditions environnementales de chaque marge proglaciaire. L'analyse conjointe des cinq sites nous permet d'identifier et de hiérarchiser les paramètres environnementaux qui jouent sur la distribution des espèces au cours de la reconquête. La figure 98 en donne une vue synthétique que nous détaillons ici.

- **Paramètres environnementaux conditionnant les rythmes de la reconquête**.

Deux paramètres environnementaux semblent jouer un rôle majeur sur la progression du couvert végétal dans le temps (fig. 98).

- Le premier est l'épaisseur de la couche de débris qui couvre les noyaux de glace contenus dans certaines moraines. La présence d'une glace subaffleurante, dans le cas de la marge du glacier Ebba, entrave la reconquête végétale. Dès que la couverture morainique s'épaissit, et/ou que la glace disparaît, la diversité floristique et le développement de la couverture végétale augmentent. C'est ce qu'illustre le cas des marges des glaciers Lovén où, bien que leurs moraines soient à cœur de glace, la couverture de débris, qui avoisine un mètre d'épaisseur, est suffisamment épaisse pour que la glace n'entrave pas la reconquête végétale.
- Le deuxième paramètre est la proximité du fjord qui, dans le cas de la marge du glacier Blomstrand, ralentit le développement végétal. Ce retard affecte principalement les dépôts le long des rives, l'effet s'estompant au fur et à mesure que la distance au littoral s'acroît. Parallèlement, la situation en bord de

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

mer semble favoriser une diversité spécifique, puisque certaines espèces, colonisant les dépôts du glacier Blomstrand, sont propres à ce site et absentes des autres marges. Ces observations ont été confirmées sur la marge du glacier Conway, située également sur les rives du fjord, où les mêmes espèces sont recensées. L'impact du fjord, comme les embruns et les dépôts de sels associés ont un rôle probable, mais nous ne pouvons pas ici en apporter la preuve.

- **Paramètres différenciant les particularités spécifiques.**

Secondairement, les conditions édaphiques interviennent dans la diversification des réponses végétales, entre les marges proglaciaires, parmi quelques espèces spécialisées (fig. 98).

- La marge du glacier Edith correspond floristiquement à un milieu plus sec que les marges des glaciers Lovén. La sécheresse édaphique est associée à l'absence de glace et à la faible dynamique de ruissellement dans la marge plutôt qu'au mésoclimat du site.
- À l'opposé, les marges proglaciaires des glaciers Blomstrand et Ebba ont un profil floristique hygrophile favorisé par l'importance des fines qui permettent une meilleure rétention de l'eau.

- **Paramètre affectant quelques espèces.**

En troisième lieu, nous réservons un rôle très limité à deux paramètres.

- Au pâturage du renne qui n'affecte que les lichens du genre *Cetraria* (fig. 98). Le renne contribue à la diminution de ces lichens en presqu'île de Brøgger, alors qu'ils sont mieux représentés sur l'île de Blomstrand où la présence du renne est limitée.
- À la granulométrie qui, localement, peut influencer la répartition spatiale de certaines espèces mais qui, à l'échelle des marges, n'entraîne pas de distinction majeure car les dépôts sont granulométriquement peu différenciés, selon l'âge des moraines. En effet, sur le plan géomorphologique, ce sont des dépôts glaciaires jeunes et non triés.

- **Paramètres sans conséquences sur la végétation.**

Les deux caractéristiques environnementales régionales, le climat et la pétrographie, qui différencient les secteurs du Kongsfjord et de la baie de Pétunia, ne distinguent pas les reconquêtes.

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

- La situation climatique n'affecte pas la reconquête végétale. Aucune différence n'est visible, ni dans les rythmes ni dans les cortèges floristiques entre les quatre marges proglaciaires du Kongsfjord et celle de la baie de Pétunia.
- De même, la pétrographie ne joue apparemment pas de rôle significatif. Les espèces pionnières ont de grandes possibilités de reconquête sur des substrats divers. Il n'est donc pas étonnant qu'en milieu morainique le rôle de la pétrographie, comme celui de la granulométrie, s'exprime peu dans la végétation.

Cependant, la marge du glacier Ebba, en raison de son englacement, ne permet pas à la végétation d'investir l'ensemble de la marge et d'exprimer le processus de reconquête végétale dans sa globalité. Il aurait été intéressant d'approfondir ce point en étudiant une autre marge proglaciaire moins englacée de la région de la baie de Pétunia, ce qui n'a pas été matériellement possible dans le cadre de la thèse.

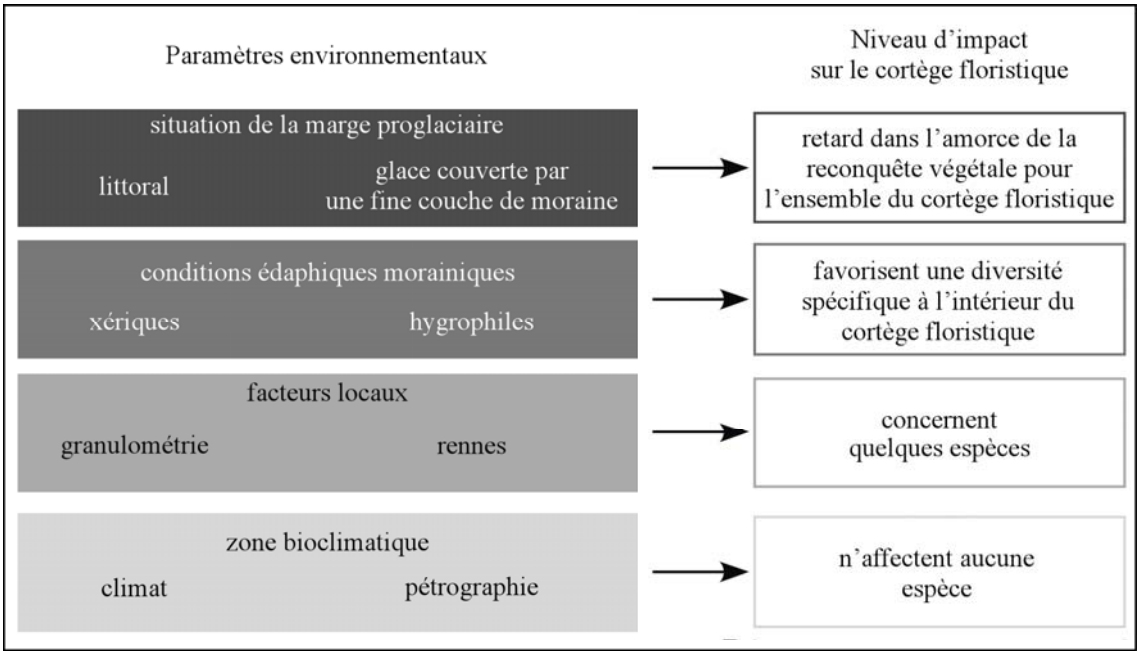


Fig. 98 - Impact des paramètres environnementaux sur la reconquête végétale. *Les paramètres sont organisés par ordre hiérarchique selon leur impact à l'échelle du cortège floristique des marges proglaciaires.*

L'analyse du rôle des facteurs environnementaux permet d'appréhender les échelles géographiques auxquelles se manifestent les différences dans les modalités de reconquête. À un niveau d'observation fin, sur les marges des glaciers Lovén, il n'y a pas de différenciation floristique. Au niveau de la presqu'île de Brøgger, des différences

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

entre les marges des glaciers Lovén et Edith s'inscrivent à la fois dans les rythmes de progression de la reconquête, légèrement plus rapide dans le cas de l'Edith, et les différences mésologiques. À l'échelle du Kongsfjord, des variations sur l'ensemble des cortèges floristiques se marquent entre les sites de la presqu'île et du Blomstrand, à la fois dans les rythmes et dans la composition floristique. Enfin, à l'échelle du Spitsberg, entre le Kongsfjord et la baie de Pétunia des différences sont visibles, mais restent comparables à celles que l'on peut rencontrer au sein d'une même région comme celle du Kongsfjord.

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

Conclusion de la deuxième partie

Le suivi de cent ans de reconquête végétale montre que, même si certains traits de la toundra d'équilibre sont déjà acquis au terme de cette période, la végétation n'est pas parvenue au stade de toundra mature. Dans les marges proglaciaires se côtoie, en un même lieu, un large éventail d'espèces pionnières, du fait des stades successifs de la reconquête (fig. 99), de la diversité des réponses floristiques selon les marges, et des décalages dans les rythmes de progression qui font de ces environnements des milieux originaux en terme floristique.

Les paysages du Spitsberg sont caractérisés, comme l'illustre la figure 99, par les secteurs à dominante minérale, d'une part les versants auxquels nous associons les glaciers, et d'autre part les secteurs végétalisés à toundra. Sur les versants, M.-F. André (1993) insiste sur l'importance de la colonisation par les lichens, dont les recouvrements n'excèdent 20 % que très localement. Ce n'est que sur les replats des versants que l'installation des phanérogames[1] est significative avec *Papaver dahlianum, Saxifraga oppositifolia* et *cespitosa, Draba species, Salix polaris* et *Poa abbreviata*. Les versants dominent des langues glaciaires dépourvues de végétation (fig. 99). À l'opposé de ces ensembles minéraux et glacés, les secteurs plans des anciens niveaux glacio-marins et sandurs sont colonisés par la toundra. Entre ces deux principaux contextes paysagers, s'intercalent les secteurs récemment déglacés où le minéral chaotique des moraines se mêle à une végétation éparse et variée selon les stades de la reconquête. Les marges proglaciaires se présentent comme des zones de transition entre les secteurs à toundra des anciens niveaux glacio-marins et les secteurs essentiellement minéraux et/ou glacés des versants et des glaciers. À partir de ce schéma des principales structures paysagères, nous proposons de définir les marges proglaciaires comme un écotone[2], espace de transition entre les secteurs végétalisés et ceux sans végétation, où se mêlent des espèces de la toundra et des éléments pionniers liés aux caractères juvéniles des marges proglaciaires (fig. 99). C. Lévêque (2001) dit à propos des écotones *qu'ils sont des zones de transition entre les systèmes écologiques adjacents. […] Un écotone n'est pas*

[1] Phanérogame : plante dont les organes reproducteurs, visibles, sont les fleurs.
[2] Écotone : lieu de contact et de transition entre deux communautés biologiques différentes. Un écotone est peuplé d'espèces présentes dans les communautés voisines auxquelles s'ajoutent des éléments originaux liés aux conditions mésologiques locales.

une zone statique de contact entre deux communautés, mais une zone dynamique qui change avec le temps et possède des propriétés particulières. G. Rougerie (2003) évoque *la richesse des écotones en espèces végétales. Ce trait paraît une conséquence logique de l'addition, en ces lieux de transition, des formes vivantes qui leur sont propres avec bon nombre de celles qui appartiennent aux biocénoses situées en deçà et au-delà.* Le développement de ces écotones, que sont les marges proglaciaires, est lié aux changements climatiques et présente, à l'échelle du Spitsberg, une grande valeur écologique en se différenciant de la formation végétale de toundra, relativement homogène. Les marges proglaciaires permettent le côtoiement d'espèces propres aux milieux pionniers lorsque ces espèces sont réparties ponctuellement dans les secteurs de la toundra ou sur quelques replats des versants. Les marges proglaciaires s'affichent alors comme des zones de refuge pour les espèces pionnières. Cette spécificité biogéographique des marges proglaciaires permet de jeter un autre regard sur le recul glaciaire lié aux changements climatiques.

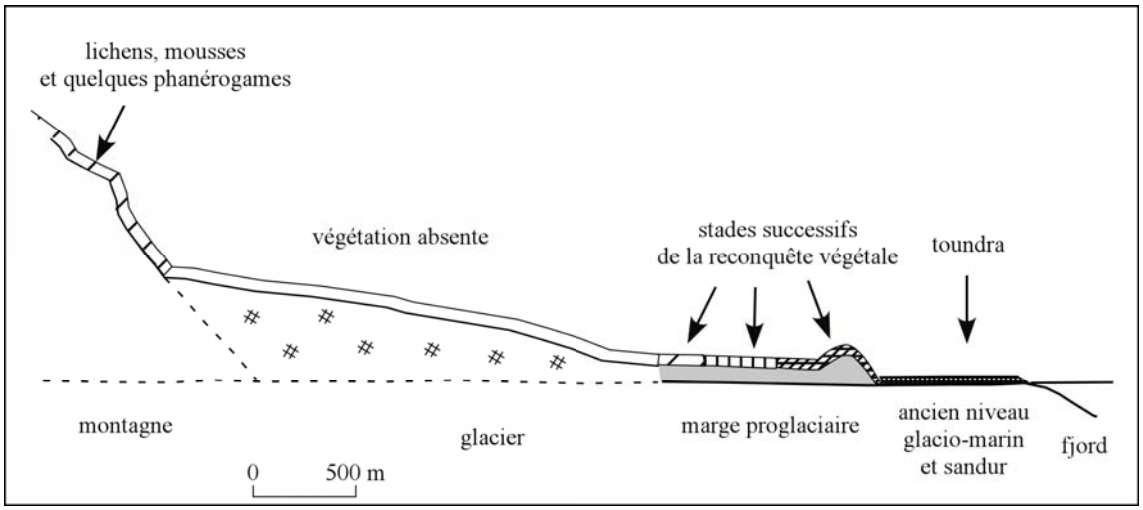


Fig. 99 – La marge proglaciaire en tant qu'écotone entre toundra et secteurs peu ou pas colonisés par la végétation au Spitsberg. *Le schéma est fondé sur une coupe topographique théorique en presqu'île de Brøgger pour le glacier Austre Lovén.*

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

Troisième partie

Modalités locales de la reconquête végétale

La grande réussite des sciences a été, au cours de trois siècles, ce frayage aisé du local au global. Le chemin du prolongement analytique fut le vrai chemin de méthode. Il ne faut pas se le cacher, la méthode cartésienne parlait haut mais ne servait rien, le chemin du calcul ne disait pas son nom, mais conduisait à la trouvaille. Il allait du plus fin, de la plus délicate analyse de voisinage, à l'occupation maîtrisée de la totalité. Lorsqu'on avait à résoudre un problème, à l'intérieur de la pensée savante, on agissait ainsi, on suivait ce chemin. Du coup lorsqu'on avait à penser la science comme telle, on reprenait le même geste, on suivait le même chemin (M. Serres, 1980).

Photo 59 - Front d'une ancienne loupe de gélifluxion végétalisée. *Depuis la partie supérieure de la loupe se succèdent* Salix polaris *(en vert) et des lichens* Cetraria delisei*. La végétation profite de la microtopographie créée par la marche pour s'installer et contraste avec les parties limitrophes dénudées d'un tel tapis végétal. Prise de vue sur l'île de Blomstrand, juillet 2002.*

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

Introduction de la troisième partie

Nous venons de voir qu'en fonction des échelles auxquelles la reconquête végétale est observée, des différences floristiques sont sensibles selon les contextes proglaciaires. Afin de compléter notre analyse sur les modalités de mise en place de la reconquête végétale, il nous reste à conduire une approche locale des paramètres environnementaux conditionnant la distribution des espèces à l'intérieur de la marge. Nous souhaitons aborder le plus grand nombre de facteurs mésologiques qui caractérisent les stations et distinguent les conditions locales du contexte général. Certains auteurs[1], dont nous avons déjà évoqué les travaux, ont souligné le rôle des facteurs locaux, parallèlement à celui joué par la durée de déglaciation, dans la distribution des espèces au cours de la reconquête. Cependant, aucune réponse n'a encore été apportée sur les paramètres qui participent à cette structuration, la diversité des faciès floristiques qui peuvent en découler, et leur organisation spatiale.

Pour réaliser une approche plus fine des micromilieux, nos observations se sont concentrées sur la marge du glacier Midre Lovén pour laquelle nous disposons d'un Modèle Numérique de Terrain d'une résolution de 2 mètres (Th. Brossard *et al.*, 1996). Pour cette échelle d'observation des milieux, nous avons dû définir un second protocole de collecte, par échantillonnage stratifié, dont le contenu a été précédemment détaillé[2]. Rappelons que 300 postes ont été échantillonnés, regroupant 1 200 relevés à l'intérieur desquels un comptage systématique a permis d'affecter aux espèces un code d'abondance. Comme le montre la figure 100, ces données de terrain ont été mises en rapport avec les données exogènes : la durée de déglaciation et les données dérivées du MNT. Les informations de surfaces calculées à partir du MNT étaient disponibles pour l'ensemble de l'espace morainique, permettant de disposer des mêmes données environnementales pour chaque point de l'échantillonnage. Ces couches d'information comprennent la pente, l'orientation, le vent et les températures (fig. 100). L'ensemble de ces données a été géré par un système d'information géographique dont l'analyse nous conduira, dans un premier temps, à préciser l'impact des paramètres environnementaux sur les composantes floristiques et leur distribution dans la marge

[1] P. Worsley et M.R. Ward, 1974 ; R. Elven, 1978 ; H.H. Birks, 1980 ; Th. Brossard, 1985 ; J.A. Matthews et R.J. Whittaker, 1987, J.A. Matthews, 1992, R.J. Whittaker, 1993 ; D.J. Helm et E.B. Allen, 1995 ; J. Stöcklin et E. Bäumler, 1996 ; Y. Frenot *et al.*, 1998 ; A. Jumpponen *et al.*, 1999.

[2] Se reporter au chapitre 2, méthodologie.

(fig. 100). Dans un deuxième temps, à l'aide d'analyses multivariées et de probabilités conditionnelles, nous procéderons à un diagnostic spatial de la reconquête végétale à l'échelle du secteur d'étude (fig. 100). L'aboutissement de ce travail consistera à proposer une spatialisation des faciès paysagers dans la marge proglaciaire.

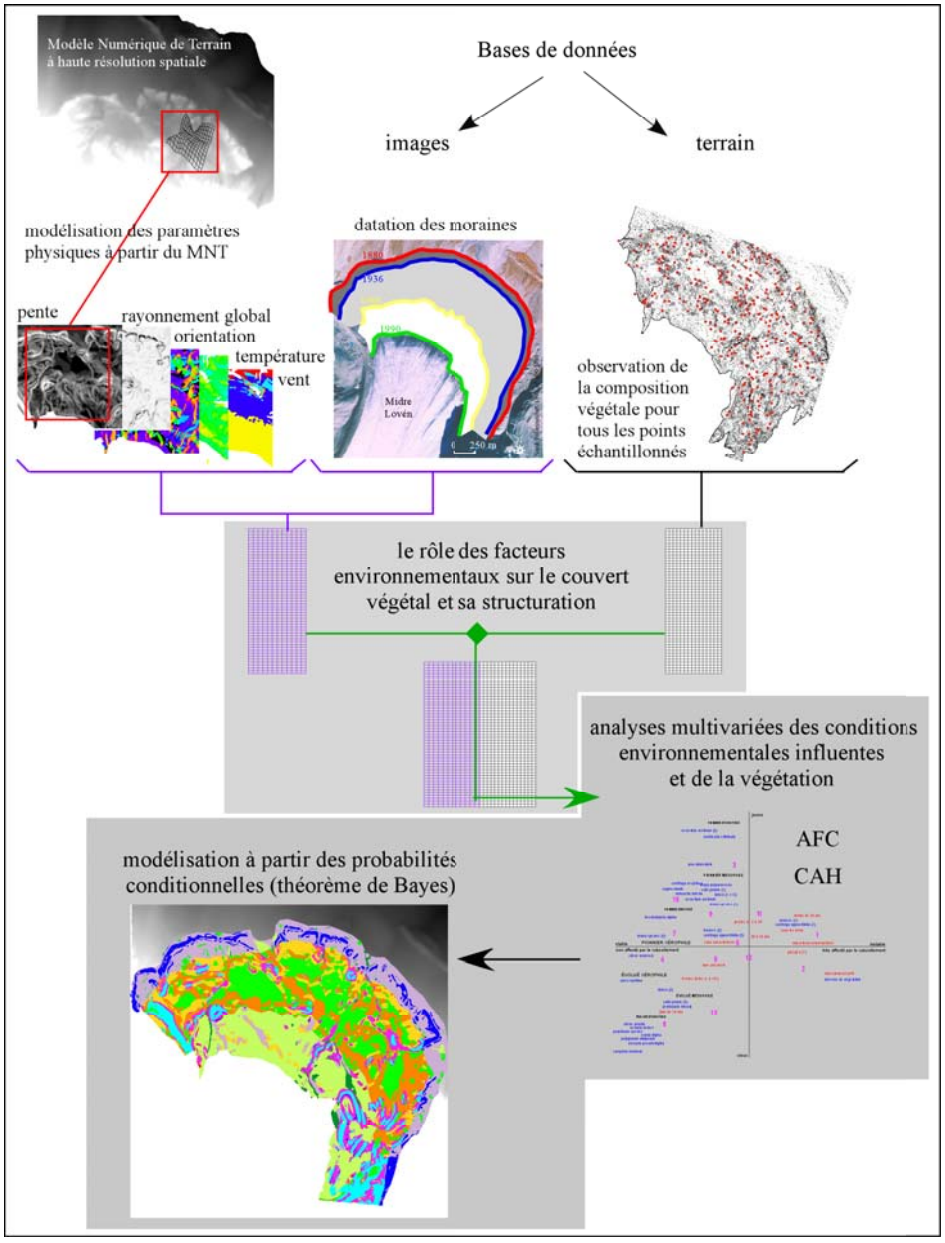


Fig. 100 – Schéma de la démarche d'analyse des modalités locales de la reconquête végétale sur la marge du glacier Midre Lovén.

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

Chapitre 5

Le rôle des facteurs environnementaux sur le couvert végétal et sa structuration

1. Remarques préliminaires concernant les résultats des échantillonnages sur la marge du glacier Midre Lovén

2. Le rôle des formes et des processus géomorphologiques

3. Le rôle des facteurs climatiques locaux

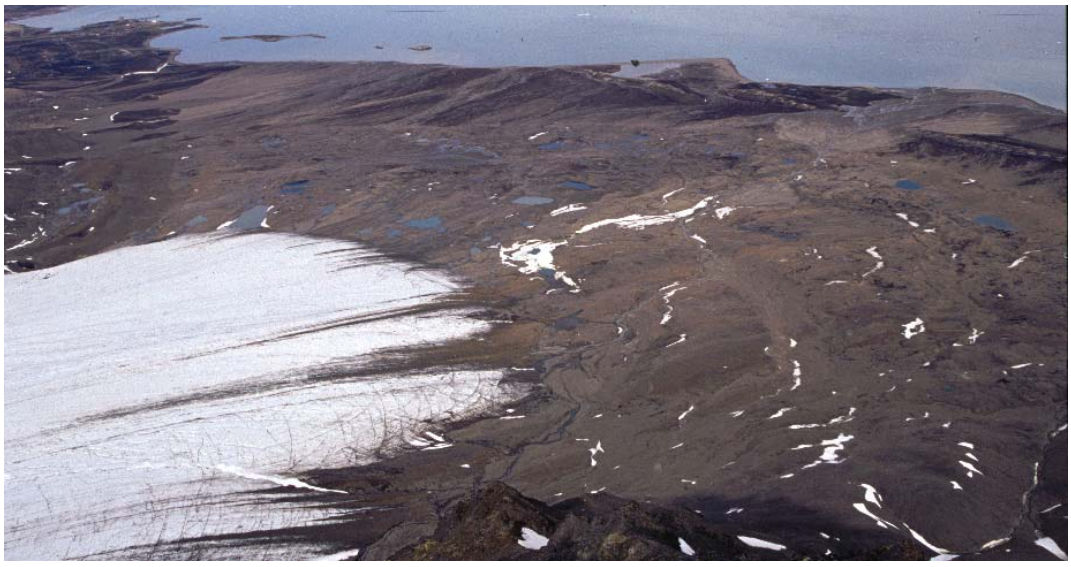


Photo 60 – Le front du glacier Midre Lovén et sa marge proglaciaire. *Prise de vue depuis le Slåtto, juillet 2001.*

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

Dans la suite logique de notre propos, nous avons procédé à une étude minutieuse des paramètres locaux à l'intérieur de la marge. La démarche consiste à envisager l'ensemble des conditions locales pour lesquelles nous disposons d'informations, et à en analyser les conséquences sur la reconquête. Deux ensembles de paramètres ont été distingués : ceux se rapportant directement aux contextes morainiques (pente, stabilité, morphodynamique) et ceux induits indirectement par la forme du dépôt : les éléments microclimatiques (rayonnement, température, exposition, vent). Nous ne reviendrons pas sur le rôle du Temps dans la différenciation des séquences floristiques dont les modalités ont été détaillées dans le chapitre 4. L'analyse de ces paramètres et des cortèges floristiques qu'ils permettent de distinguer devrait permettre de hiérarchiser leur impact. Au préalable, notons que la marge du Midre Lovén a été observée à deux reprises au cours de la thèse. De ce fait, nous disposons de deux séries d'observations, pour ce même site, effectuées avec des protocoles différents, par transects et par échantillonnages stratifiés. Aussi, il nous paraît utile, dans un premier temps, de comparer les résultats obtenus par les deux méthodes sur la marge du Midre Lovén, de manière à illustrer leurs intérêts respectifs.

1. Remarques préliminaires concernant les résultats des échantillonnages sur la marge du glacier Midre Lovén

Suite au protocole d'observation en transects, dont la figure 101 rappelle le cheminement, nous disposons de données sur 32 postes, à l'intérieur desquels, au total, 151 relevés d'1 m², soit 0,08 % de la surface morainique, ont été conduits en juillet 2001. La seconde prospection de terrain a été réalisée en juillet 2003, selon un plan d'échantillonnage stratifié systématique non-aligné, mentionné dans la figure 101. Elle concernait 300 postes d'observation, totalisant 1 200 relevés d'1 m² (quatre relevés sont réalisés par poste), soit 0,6 % de la surface morainique.

Les résultats des deux collectes sont synthétisés dans la figure 102 qui précise la fréquence des espèces. L'échantillonnage le long des transects a permis de recenser 21 espèces végétales et l'échantillonnage stratifié 32 espèces. Cependant, en ne considérant que les espèces dont la présence dans les relevés est supérieure à 1 %, 22 espèces sont totalisées par l'échantillonnage stratifié. Les deux méthodes d'échantillonnage ont donc recensé les mêmes composantes végétales (fig. 102).

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

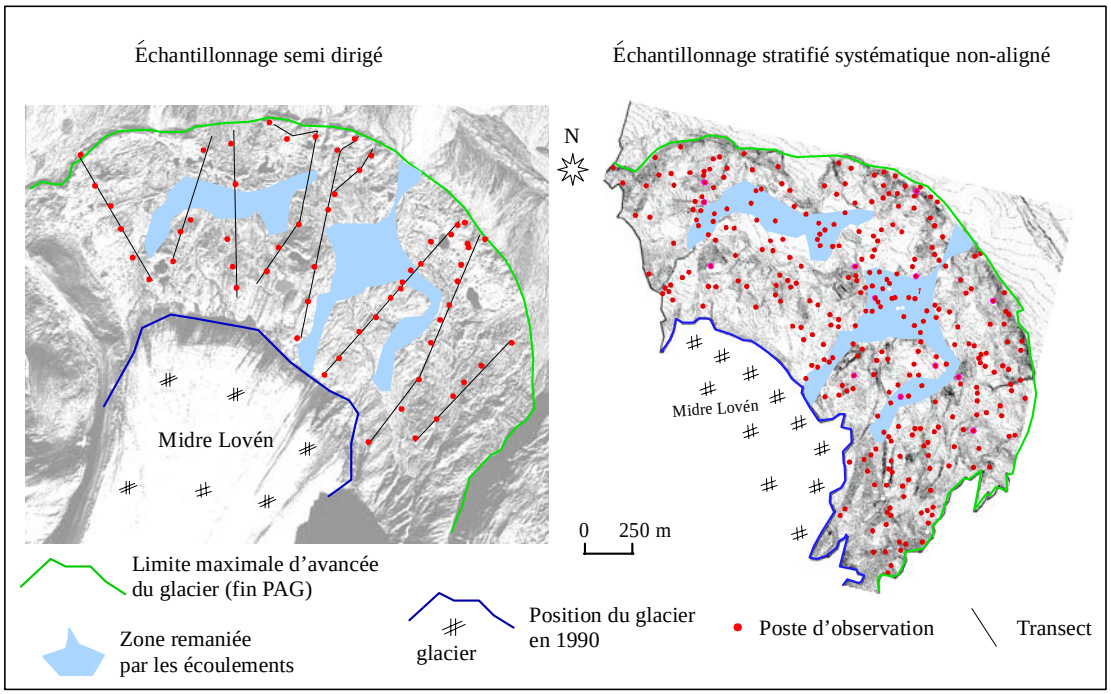


Fig. 101 – Les deux plans d'échantillonnage réalisés sur la marge du glacier Midre Lovén.

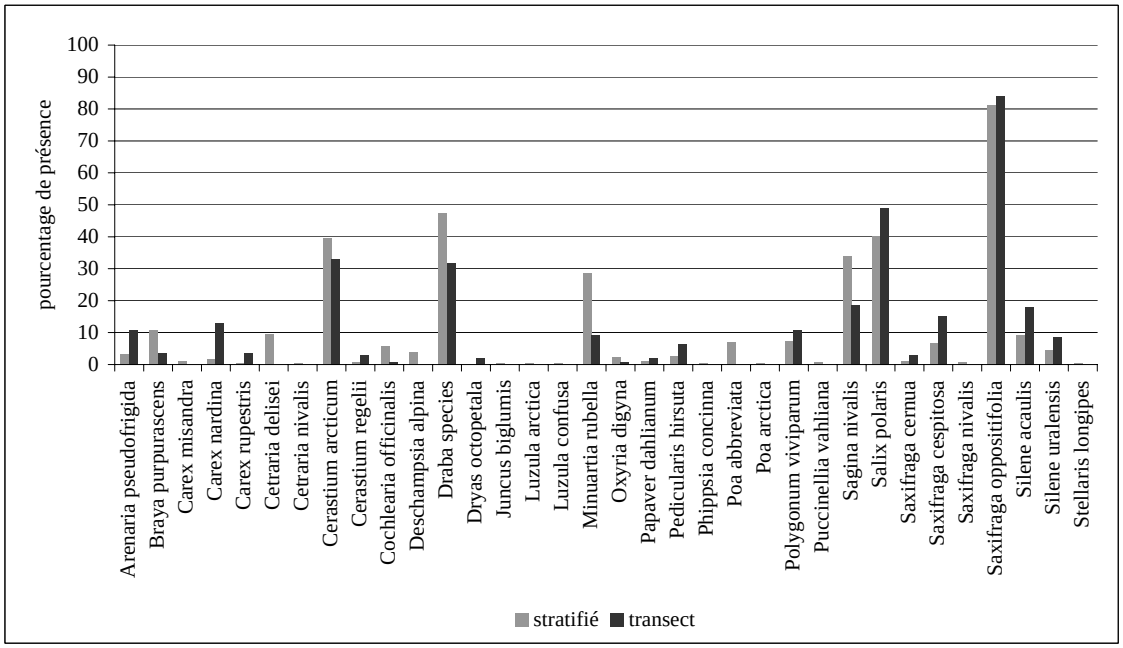


Fig. 102 - Les cortèges floristiques recensés par les deux méthodes d'échantillonnage sur la marge du glacier Midre Lovén. *Sur l'axe des abscisses sont énumérées, par ordre alphabétique, les espèces végétales comprenant deux lichens (genre* Cetraria*). Sur l'axe des ordonnées est précisé le pourcentage de présence de chaque espèce dans les 300 relevés de l'échantillonnage stratifié et les 151 relevés de l'échantillonnage par transects.*

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

Parmi les espèces présentes dans moins de 1 % des relevés, issus de l'échantillonnage stratifié (mais absentes dans l'échantillonnage par transects) sont recensées, d'après la figure 102, *Carex misandra, Luzula arctica, Luzula confusa* et le lichen *Cetraria delisei*. Ces espèces, plus abondantes sur les pans de toundra, se retrouvent sur les secteurs anciennement déglacés que l'échantillonnage stratifié a mieux couvert. De même *Deschampsia alpina, Juncus biglumis* et *Poa abbreviata,* espèces hygrophiles, rencontrées surtout dans les secteurs de ruissellement, n'ont pas été considérées, comme le rappelle la figure 102, dans l'échantillonnage par transects. Les différences entre les résultats des deux échantillonnages tiennent au fait que l'échantillonnage stratifié a mieux couvert l'espace et donc il inclut une plus grande diversité d'environnements que celui effectué le long de transects.

À l'inverse, *Dryas octopetala* et *Carex rupestris* n'ont été relevés qu'avec la méthode par transects, ce qui peut s'expliquer par la taille des surfaces échantillonnées. Le long des transects, pour chaque poste, une surface de 16 m² a été couverte. Pour l'échantillonnage stratifié, la surface était réduite à 4 m². Cette différence fait que *Dryas octopetala* et *Carex rupestris* ont pu échapper à l'échantillonnage stratifié. Comme le précisent A. Hirzel et A. Guisan (2002), la taille de l'échantillon augmente la précision des modèles, à la fois en terme d'habitat approprié et de présence-absence.

En dehors de ces différences spécifiques, pour l'ensemble des espèces recensées par les deux échantillonnages, les résultats donnent des fréquences différentes, mais dans des proportions équivalentes, ce qui permet d'identifier ces espèces comme dominantes. Ainsi, d'après la figure 102, pour les deux méthodes, *Cerastium arcticum, Draba species, Sagina nivalis, Salix polaris* et *Saxifraga oppositifolia,* ont des fréquences supérieures à celles des autres espèces. De même, elles peuvent distinguer un ensemble d'espèces dont la présence est minoritaire, oscillant de quelques pour cent de présence à 10 %, comme *Braya purpurascens, Minuartia rubella* et *Pedicularis hirsuta.*

Enfin, nous complétons cette comparaison avec une troisième étude également réalisée sur la marge du glacier Midre Lovén, par I.D. Hodkinson *et al.* (2003), pour suivre la progression du couvert végétal. Les auteurs ont défini un plan d'échantillonnage limité à un transect, allant du front du glacier Midre Lovén jusqu'aux rives du fjord. Nous ne

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

considérons ici que la partie des observations réalisées sur la marge proglaciaire. I.D. Hodkinson *et al.* ont réparti le long du transect cinq carrés de 20×30 m, à l'intérieur desquels ils ont utilisé une grille de 0,5 m² pour relever la présence ou l'absence des espèces. En moyenne, 30 à 40 carrés, localisés de manière aléatoire, ont été recensés par poste. La méthode est proche de celle des transects que nous avons adoptée.

Le tableau 8 montre que I.D. Hodkinson *et al.* ont relevé des espèces de toundra comme *Cassiope tetragona* et le lichen *Cetraria delisei* que nous n'avons pas trouvés. En revanche, n'ont pas été relevées par ces auteurs *Silene uralensis, Saxifraga cespitosa*, *Carex nardina*, alors que nous les avons identifiées avec des pourcentages de présence supérieurs à 8 % (fig. 102), ce qui ne les classe pas comme rares. La comparaison de ces deux prospections montre qu'un échantillonnage, le long d'un unique transect, laisse échapper une partie significative de l'information.

La confrontation de trois types d'échantillonnage, couvrant l'espace de la manière la plus réduite par I.D. Hodkinson et al. *à la plus précise adoptée par l'échantillonnage stratifié, montre qu'augmenter le nombre de relevés permet de recenser plus finement les espèces dont la présence peut être considérée comme rare. Néanmoins, les trois échantillonnages permettent d'identifier les mêmes espèces végétales dominantes. Le choix des méthodes dépendra du niveau d'approche auquel on souhaite observer la distribution des espèces.*

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

	Hodkinson *et al.* (2003)	Moreau (2003)
Arenaria pseudofrigida	*	*
Braya purpurascens	*	*
Carex nardina		*
Carex rupestris	*	*
Cassiope tetragona	*	
Cetraria delisei	*	
Cerastium arcticum	*	*
Cerastium regelii		*
Cochlearia officinalis		*
Draba species	*	*
Dryas octopetala	*	*
Luzula arctica	*	
Minuartia rubella	*	*
Oxyria digyna	*	*
Papaver dahlianum		*
Pedicularis hirsuta	*	*
Poa arctica	*	*
Polygonum viviparum	*	*
Sagina nivalis	*	*
Salix polaris	*	*
Saxifraga cernua	*	*
Saxifraga cespitosa		*
Saxifraga oppositifolia	*	*
Silene acaulis	*	*
Silene uralensis		*

Tableau 8 – Espèces végétales de la marge du glacier Midre Lovén recensées par les échantillonnages conduits le long de transects au cours de cette étude et par I.D. Hodkinson* et al. *(2003).

2. Rôle des formes et des processus géomorphologiques

Les différences de résultats entre les données collectées par plusieurs méthodes d'échantillonnage permettent une première analyse de l'ensemble du cortège floristique de la marge. Nous abordons maintenant l'étude du rôle des différents contextes morainiques sur la distribution et l'abondance des espèces.

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

2.1. La pente

Le MNT permet de connaître, dans le détail, les degrés d'inclinaison de chacune des surfaces dont la figure 103 présente une image d'après le travail de L. Nilsen *et al.* (1996). C'est à partir de cette image que nous avons pu connaître les valeurs de pente des 300 points échantillonnés, comprises entre 0 et 23°. Nous avons défini trois classes de pente, sur la base du contexte morphodynamique auquel elles correspondent pour la végétation : 0°-2°, 2°-10° et 10°-23°. Les relevés associés à chacune des trois classes ont été regroupés et permettent de définir les trois cortèges floristiques présentés dans la figure 104.

La première classe correspond aux surfaces quasiment planes entre 0° et 2°. Les déplacements de surface de type gélifluxion et cryoreptation y sont inexistants. L'analyse du cortège floristique sur ces pentes montre que la reconquête y est plus difficile que sur les autres pentes (fig. 104). En effet, on y compte 20 espèces contre 24 pour les pentes supérieures à 2° et l'abondance des espèces est également inférieure à celle identifiée sur les autres surfaces. Par exemple *Cerastium arcticum* a 35 % de présence contre plus de 48 % sur les autres (fig. 104). De même *Draba species* a 33 % de présence sur les surfaces de moins de 2° et plus de 58 % pour les autres. Ce faible développement floristique est lié au fait que ces secteurs sont le siège des écoulements proglaciaires. En effet, 40 % des relevés réalisés sur les pentes de 0 à 2° sont affectés par le ruissellement et seuls 25 % des relevés ne sont pas concernés. Sur la figure 103, on peut suivre le cheminement des écoulements à l'intérieur de ces secteurs. Les faibles pentes sont aussi les secteurs les plus humides, en partie à cause des écoulements, mais également parce qu'elles favorisent le maintien de la neige ce qui n'est pas forcément possible sur les secteurs de fortes pentes. Les espèces hygrophiles *Cochlearia officinalis, Poa abbreviata* et *Deschampsia alpina* sont les biomarqueurs des conditions édaphiques humides des secteurs plans. D'ailleurs, d'après la figure 104, leur présence diminue dès que la pente augmente, voire disparaît dans le cas de *Cochlearia officinalis.*

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

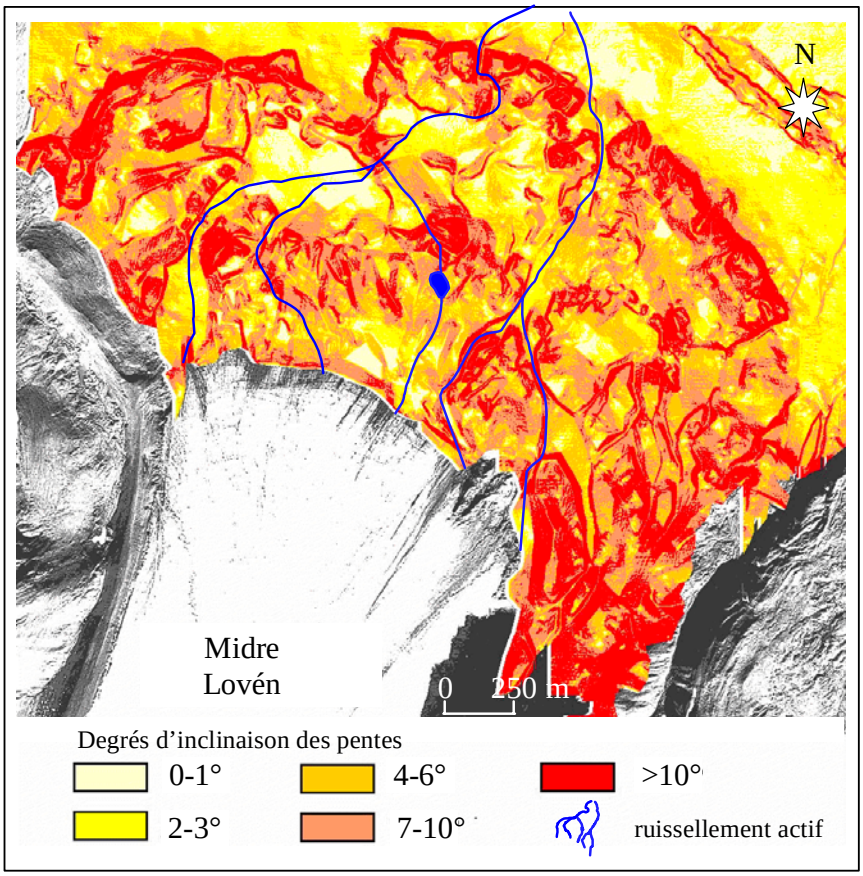


Fig. 103 - Cartographie des valeurs de pente de la marge du glacier Midre Lovén. *Les données sont dérivées du Modèle Numérique de Terrain (L. Nilsen* et al., *1996). La cartographie des écoulements est tirée de la photographie aérienne de 1990.*

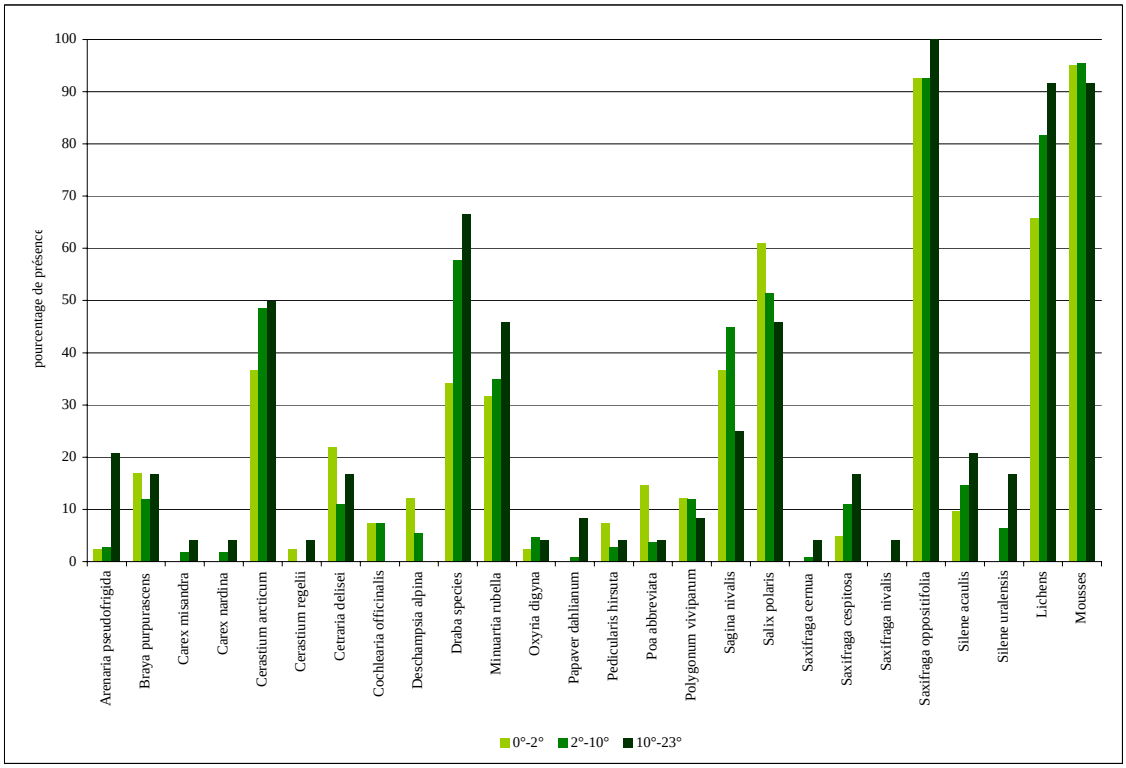


Fig. 104 - Cortèges floristiques des trois classes de pente *(d'après 1 200 relevés).*

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

La deuxième classe de pente s'étend de 2° à 10°. Sur de telles pentes peuvent s'amorcer des mouvements susceptibles d'affecter la végétation par un fluage lent, quasi-laminaire et par cryoreptation (B. Van Vliet Lanöe, 1987). Le cortège floristique de cette classe a un développement végétal intermédiaire entre les deux autres niveaux de pente avec des fréquences pour chaque espèce comprises entre celle des faibles et des fortes pentes (fig. 104).

Le troisième type de pente comprend les surfaces inclinées entre 10° et 23°. Nous avons retenu le seuil de 10 °, que P.L. Nimis (1985) avait identifié comme entraînant un changement de groupement végétal dans la toundra en presqu'île de Brøgger. Sur les pentes fortes, dominent des espèces xérophiles telles *Arenaria pseudofrigida, Carex nardina* et *Draba species* dont la présence décroît avec la diminution de la pente. Par exemple, la figure 104, montre que *Arenaria pseudofrigida* passe de 20 % à moins de 5 % sur les pentes inférieures à 10°.

Au total, les pentes contrôlent fortement la distribution des espèces et déterminent leur abondance, notamment par l'intermédiaire des conditions édaphiques qu'elles induisent, dont les espèces en sont les biomarqueurs. Le maigre développement floristique est associé aux faibles pentes, principalement à cause du ruissellement. Cependant, le ruissellement est loin d'être un paramètre dont l'impact est homogène dans le temps et l'espace, ce qui nécessite d'appréhender plus finement son rôle.

2.2. Les morphodynamiques

Nous venons d'évoquer que les secteurs où se concentrent les écoulements, étaient moins favorables à la reconquête que ceux restés en place dont ils sont absents. Les morphodynamiques peuvent remettre en question le processus de reconquête dès que les dépôts sont remobilisés, voire complètement détruits. Au cours de la prospection dans la marge, deux types de morphodynamiques ont été observés : la gélifluxion et le ruissellement.

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

2.2.1. Impact spatial très limité de la gélifluxion

La gélifluxion n'a pas une forte emprise spatiale sur la marge ; 15 phénomènes y ont été recensés, soit 5 % des relevés, contre 113 relevés concernés par le ruissellement, notamment parce que les temps pour la mise en place de la gélifluxion sont plus longs que ceux du ruissellement. Bien qu'elle soit susceptible de la perturber et/ou de la détruire, la gélifluxion n'empêche pas la colonisation végétale. En effet, l'analyse des relevés réalisés sur les loupes de gélifluxion et rassemblés dans la figure 105, montre que 17 espèces sont recensées sur les sites concernés contre 32 pour l'ensemble de la marge. On remarque la forte abondance des espèces pionnières, par exemple, d'après la figure 105, *Cerastium arcticum* avec 55 % de présence. Les espèces hygrophiles sont également représentées avec *Deschampsia alpina, Cochlearia officinalis* et *Poa abbreviata.* Ces espèces trouvent dans les secteurs de gélifluxion, des conditions d'humidité édaphiques satisfaisantes. À l'inverse, on relève l'absence des espèces xérophiles comme *Arenaria pseudofrigida* (fig. 105). En dehors de quelques différenciations floristiques, il apparaît que la gélifluxion a un impact très mineur sur la reconquête végétale comparé à celui du ruissellement.

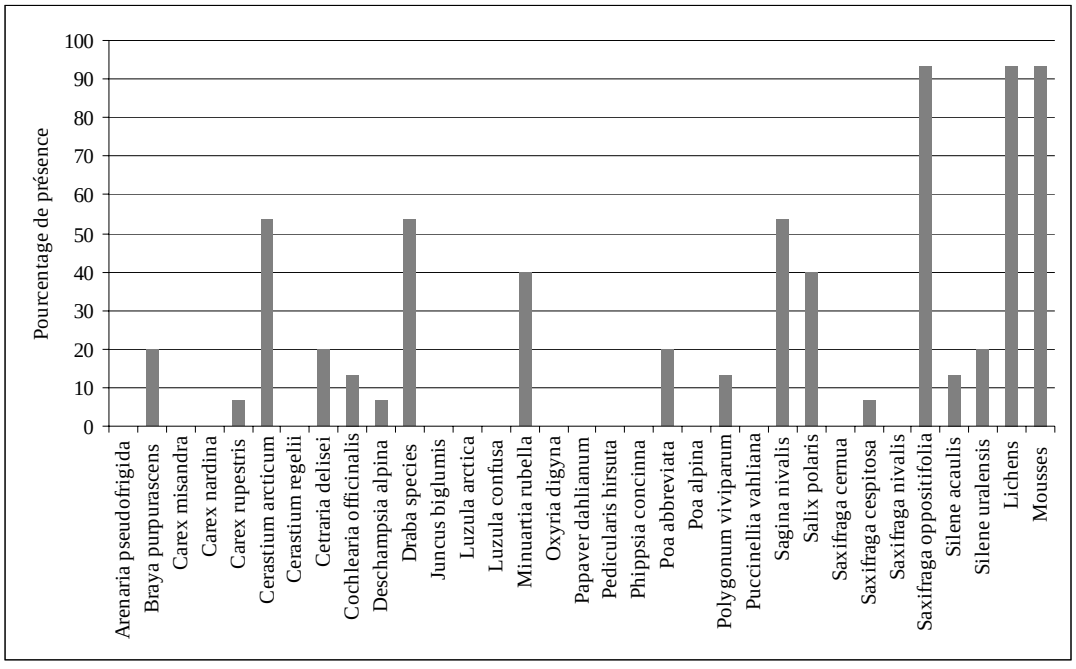


Fig. 105 - Espèces végétales recensées dans les zones affectées par la gélifluxion *(d'après 60 relevés concernés par la gélifluxion ; 4 relevés sont conduits sur 15 loupes)*

2.2.2. Forte emprise spatiale du ruissellement

Au cours de la collecte des données sur le terrain, nous avons identifié des secteurs qui ont été affectés par une forme active ou héritée de ruissellement : ils concernent au total 113 relevés, soit 37 % de l'échantillonnage, illustrant la forte emprise spatiale de cette dynamique au sein de l'espace proglaciaire. Nous avons distingué les formes de ruissellement en fonction des conséquences de cette dynamique sur les modelés morainiques avec, d'une part, le ruissellement qui détruit les moraines, illustré sur la photo 61 et, d'autre part, le ruissellement qui entaille les moraines sans les détruire, comme le montre la photo 62. Le premier type de morphodynamique construit des plaines d'épandage et concerne 85 % des relevés, correspondant à des secteurs entièrement remaniés et aplanis : les plaines intramorainiques. Le deuxième type de ruissellement laisse les moraines en place, mais créée des ravines et chenaux encaissés qui incisent épisodiquement les moraines sans en effacer la topographie (photo 62). Ce type de ruissellement, qui ne concerne que 15 % des relevés, a des conséquences spatiales relativement mineures comparées à celles du ruissellement construisant les plaines intramorainiques, qui lui ne concerne que peu de relevés. Aussi, ne considérerons nous pas ces secteurs dans notre étude et concentrerons nous nos observations sur les plaines intramorainiques.

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

Photo 61 - Plaine intramorainique de la marge du glacier Midre Lovén. *Les eaux de fonte alimentent un écoulement qui remobilise les dépôts morainiques. Ces secteurs aplanis contrastent avec ceux restés en place comme à l'arrière plan gauche de la photo, à gauche du front du glacier Midre Lovén. Prise de vue depuis la marge vers le sud-est, 20 juillet 2003 (16h00).*

Photo 62 - Chenal entaillant une colline morainique sur la marge du glacier Midre Lovén. *L'écoulement a peu remobilisé les dépôts et entaille seulement la moraine de ce chenal. Prise de vue depuis la marge vers le sud, 13 juillet 2004.*

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

Trois types de plaines sont distingués selon la dynamique de ruissellement passée ou présente. La figure 106 présente l'emprise spatiale de chacune de ces plaines :

- les plaines intramorainiques de transit dont les chenaux sont caractérisés par une dynamique d'écoulement proglaciaire balayant l'espace d'une saison à l'autre (dit actif dans la figure 106) ;
- les plaines intramorainiques affectées par des écoulements locaux ;
- les plaines intramorainiques non fonctionnelles (écoulement inactif sur la figure 106).

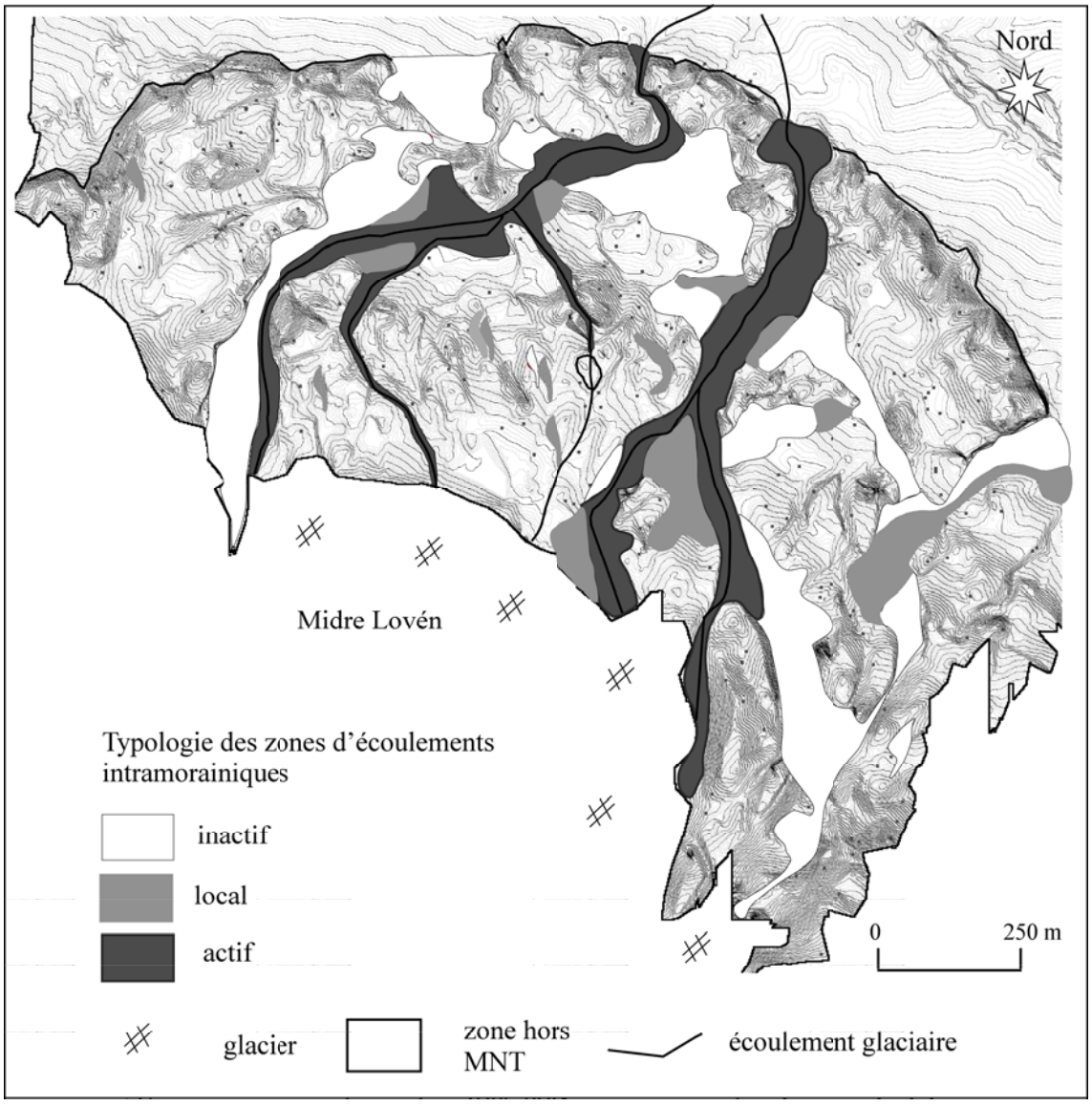


Fig. 106 - Cartographie des différents types de plaines intramorainiques sur la marge du glacier Midre Lovén. *Le fond topographique de la carte est celui du MNT (L. Nilsen* et al.*, 1996). Le tracé des écoulements glaciaires correspond à celui identifié sur la photographie aérienne de 1990.*

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

- **Les plaines de transit actif**

Ces zones, à l'heure actuelle, sont empruntées par les eaux de fonte glaciaire dont le tracé, qui peut être suivi à partir de la figure 106, se situe au cœur des plaines actives. Ces plaines sont le siège d'un transit permanent en « été », relativement fort, de type torrentiel. Sur l'ensemble des relevés réalisés dans les plaines, 29 % sont rattachés au ruissellement actif. La lame d'eau occupe le talweg du chenal et les méandres d'inondation sont utilisés de manière épisodique. Les écoulements fluvioglaciaires remanient fortement les dépôts en créant des chenaux encaissés surtout dans les espaces les plus récemment déglacés, à proximité du front glaciaire (photo 63). Après une phase de tressage, le ruissellement se concentre progressivement. Il recoupe les vallums en de puissants ravins et entretient au cours de l'été un travail de sape, créant des surplombs qui déstabilisent la moraine. Enfin, ce ruissellement exporte les sédiments jusque dans les eaux du fjord (D. Mercier, 1998).

La synthèse des relevés réalisés dans ces plaines actives permet d'identifier un cortège floristique au sein duquel la figure 107 (a) présente l'abondance de chaque espèce. La faible diversité, 8 espèces contre 32 pour l'ensemble de la marge, témoigne des difficultés pour la végétation à coloniser ces espaces. En effet, les espaces disponibles à la végétation se limitent aux rives des chenaux et aux seuils émergés entre les chenaux qui ne sont pas remaniés par le ruissellement durant plusieurs saisons hydrologiques. L'abondance est également peu élevée. Seule, *Saxifraga oppositifolia* domine, d'après la figure 107 (a), avec 30 % de présence. L'espèce s'adapte à la dynamique de ruissellement en développant une tige allongée et étirée dans le sens de l'écoulement, surtout dans les zones d'alimentation temporaire. Parmi les autres espèces, on peut noter la présence de *Cochlearia officinalis* et *Poa abbreviata*, dont nous avons déjà indiqué qu'elles étaient adaptées aux milieux humides.

Les secteurs d'écoulement actif connaissent un faible développement végétal qui reflète les conditions pionnières d'un environnement juvénile, conditions proches de celles existant sur les dépôts récemment déglacés. Le tableau 9 compare l'abondance des éléments floristiques identifiés d'une part pour les trois types de plaines et, d'autre part, pour les trois périodes de déglaciation[1]. Pour des contextes pionniers ouverts depuis peu

[1] Le détail des compositions floristiques de chaque auréole morainique, déterminé à partir de l'échantillonnage stratifié, est reporté dans les annexes.

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

à la végétation, les débuts de la reconquête végétale diffèrent selon qu'ils prennent place sur les espaces perturbés ou sur les surfaces déglacées depuis 30 ans. Ainsi, dans les plaines d'écoulement actif, 8 espèces sont recensées contre 14 sur les dépôts déglacés depuis 30 ans. Des différences d'abondance s'observent également. Par exemple, d'après le tableau 9, *Salix polaris* a 9 % de présence sur les dépôts déglacés depuis 30 ans et 11 % dans les plaines actives ; il en va de même pour *Poa abbreviata* et *Silene acaulis*. Inversement, *Cerastium arcticum* est peu présente dans les chenaux actifs avec 3 % contre 9 % sur les dépôts déglacés depuis 30 ans.

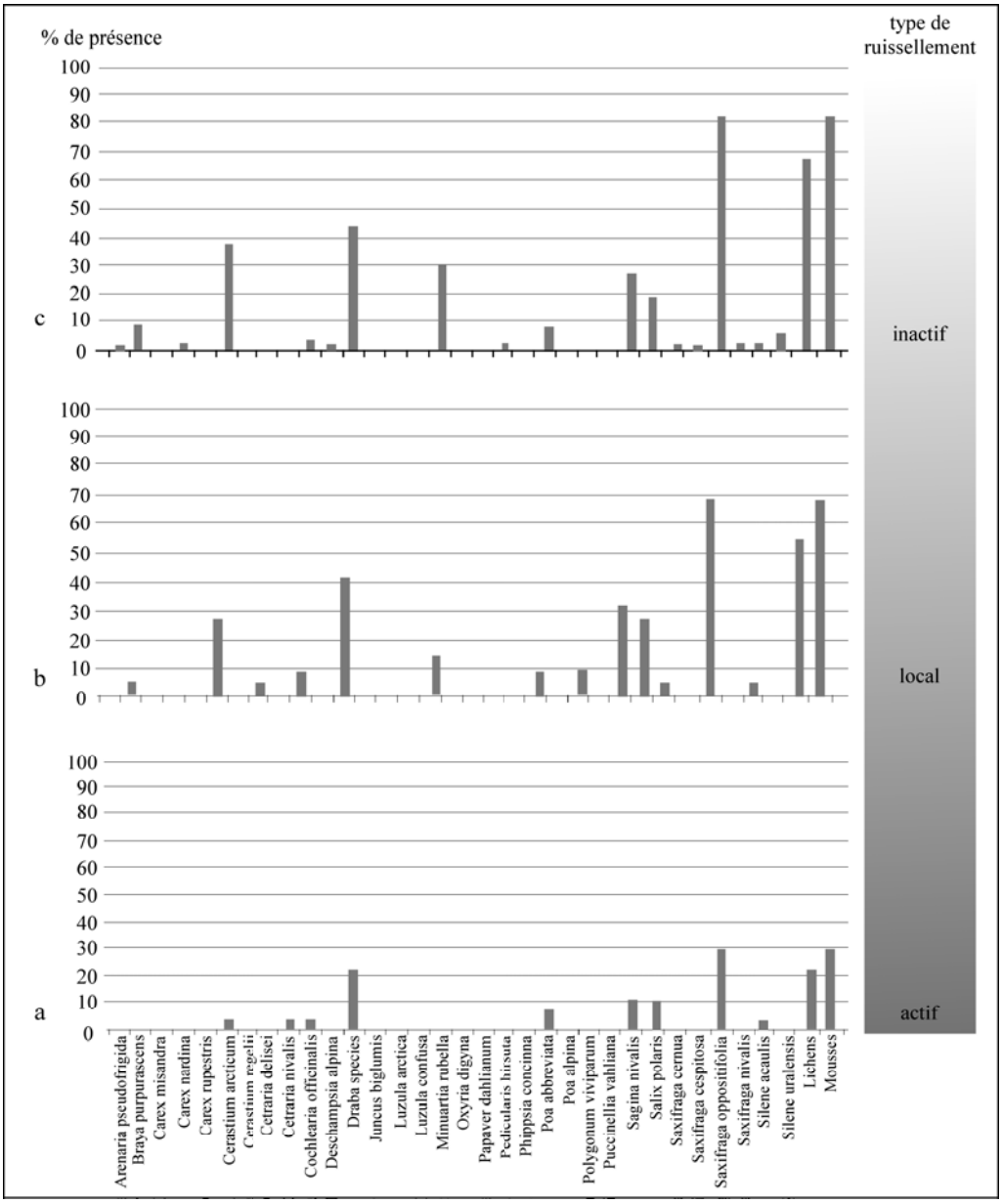


Fig. 107 – Différenciation des cortèges floristiques selon les trois types de plaines intramorainiques *(d'après 384 relevés). Sur l'axe des abscisses sont énumérées les espèces, par ordre alphabétique, et sur l'axe des ordonnées est indiqué le pourcentage de présence de chaque espèce en relation avec le type de ruissellement caractérisant les trois types de plaines intramorainiques, indiqué à la droite des graphiques.*

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

Espèces	Durée de déglaciation des dépôts			Type de ruissellement		
	30 ans	70 ans	100 ans	actif	local	inactif
Arenaria pseudofrigida		1	17			2
Braya purpurascens	14	9	11		4	8
Carex nardina		1	6			2
Cerastium arcticum	39	42	31	3	27	38
Cetraria delisei	1	7	34		4	
Cochlearia officinalis	12	4		4	9	4
Deschampsia alpina	1	6	2			2
Draba species	33	53	49	22	41	45
Minuartia rubella	9	36	32		14	30
Pedicularis hirsuta		4	2			2
Poa abbreviata	4	9	4	7	9	8
Polygonum viviparum		6	23		9	
Sagina nivalis	31	39	19	11	28	32
Salix polaris	9	45	72	11	27	19
Saxifraga cespitosa	8	8				2
Saxifraga oppositifolia	72	82	91	30	68	83
Silene acaulis	2	6	34	4	4	2
Silene uralensis	4	9	4			6
Lichens	43	71	94	22	54	68
Mousses	74	82	94	30	68	83
Nombre total d'espèces	14	18	16	8	12	16

9 les chiffres dans les carrés grisés indiquent le pourcentage de présence de l'espèce

Tableau 9 – Période de colonisation des espèces en relation avec la durée de déglaciation et le type de plaine intramorainique. *Seules les espèces recensées à la fois sur les dépôts restés en place et dans les plaines intramorainiques sont mentionnées. Le nombre total d'espèces ne prend pas en compte les mousses et lichens.*

- **Les chenaux d'écoulements locaux**

Ces chenaux se caractérisent par un ruissellement plus ténu que celui des chenaux actifs dans la mesure où ils ne sont fonctionnels qu'au début de la saison « estivale » et que leur débit est plus faible que celui lié à la fonte du glacier. Ces écoulements sont alimentés par la fonte de la neige, les précipitations et la fonte de la glace contenue sous la couche de débris morainiques. Ils concernent 21 % des relevés. La faible dynamique des écoulements n'est pas une entrave à la reconquête végétale. Le couvert végétal peut s'installer jusque sur les bords des rives des chenaux, comme l'illustre la photo 64.

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

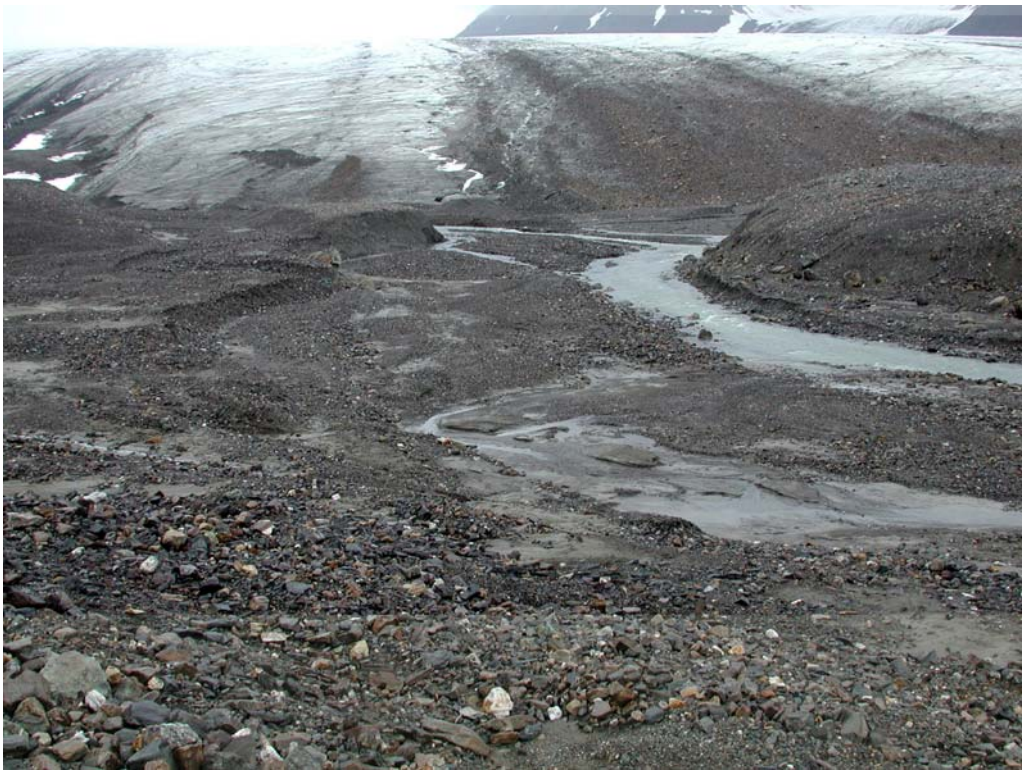


Photo 63 - Chenal de type actif utilisé par les eaux de fonte de la neige et du glacier. *Le recul du glacier s'accompagne d'écoulements importants qui détruisent les accumulations morainiques. Prise de vue depuis la marge vers le front du glacier Midre Lovén en direction du sud, 20 juillet 2002 (10h20).*

Photo 64 - Chenal de type local utilisé par un ruissellement de fonte nivale. *Cet écoulement léger n'empêche pas la végétation de coloniser ses rives. Prise de vue depuis la marge du glacier Midre Lovén vers l'ouest, 19 juillet 2003 (11h06).*

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

Cela se traduit par une diversité floristique plus importante (12 espèces) que celle rencontrée dans les chenaux actifs où 8 espèces ont été recensées. Le développement végétal est également marqué par un accroissement de l'abondance des espèces. Par exemple, d'après la figure 107, *Cerastium arcticum* passe de quelques pour cent de présence à 27 % dans les chenaux d'écoulements locaux. Cependant, bien que ces chenaux soient aptes à la reconquête végétale, ils conservent l'expression floristique d'un milieu pionnier ; en témoigne la comparaison avec les éléments floristiques recensés sur les dépôts déglacés depuis 30 ans. Un grand nombre d'espèces ont une abondance, dans les secteurs de ruissellement local, inférieure à celle qu'elles atteignent sur les dépôts déglacés depuis 30 ans comme *Saxifraga oppositifolia, Cerastium arcticum, Sagina nivalis, Braya purpurascens* et les mousses (tableau 9). À cela s'ajoute le fait que certaines espèces rencontrées sur les espaces déglacés depuis 30 ans ne colonisent pas les chenaux d'écoulements locaux ; il s'agit notamment de *Saxifraga cespitosa, Carex nardina, Silene uralensis* et *Deschampsia alpina* (tableau 9). Cependant, paradoxalement, alors que le développement floristique semble plus avancé sur les dépôts récemment déglacés que sur ces plaines, certaines espèces édificatrices y ont une abondance supérieure. Par exemple, d'après le tableau 9, *Minuartia rubella* a 14 % de présence dans ces plaines contre 9 % sur les dépôts de 30 ans, différence également remarquable pour *Salix polaris, Cetraria delisei* et *Silene acaulis.* Ces comparaisons montrent que la progression du couvert végétal, en relation avec la durée de déglaciation et celle, qui répond aux dynamiques de ruissellement, ne suivent pas les mêmes modalités.

- **Les chenaux inactifs**

Les chenaux inactifs sont actuellement abandonnés par les écoulements et constituent des plaines intramorainiques inactives, qui ne demandent qu'à s'activer à la première crue glaciaire (M. Griselin, 1982). Ces espaces ont été édifiés par les deux types d'écoulement décrits précédemment dont ils gardent la trace, comme l'illustre la photo 65. L'emprise spatiale de ces plaines, qui regroupent 47 % des relevés, témoigne de l'important ruissellement qui accompagne les différentes étapes du retrait glaciaire. D'après la cartographie des plaines (fig. 106), on peut remarquer la disposition transversale des plaines inactives, à l'intérieur de la marge, correspondant au dessin d'un ancien front glaciaire. Cette orientation contraste avec celle des plaines affectées par un ruissellement actif ou local qui incisent longitudinalement la marge proglaciaire.

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

La stabilité de ces secteurs s'accompagne d'un développement du couvert végétal caractérisé par un plus grand nombre d'espèces, qui est de 18 contre 13 pour les chenaux d'écoulement locaux (fig. 107). Cette augmentation est liée à la présence des espèces édificatrices *Arenaria pseudofrigida, Carex nardina* et *Pedicularis hirsuta.* L'abondance des espèces est également supérieure à celle identifiée sur les autres plaines. Par exemple, d'après la figure 107, *Minuartia rubella* passe de 15 % dans les chenaux locaux à 30 % dans les chenaux inactifs. En revanche, l'absence d'écoulements entraîne un changement des conditions mésologiques et amène notamment un environnement édaphique sec. En terme floristique, cela se traduit par la diminution de l'abondance des espèces hygrophiles comme *Cochlearia officinalis* qui passe de 9 %, dans les plaines d'écoulement local, à 4 % ici (fig. 107).

Photo 65 - Chenal de type inactif, abandonné par les écoulements. *Les chenaux sont en voie de colonisation végétale. À l'arrière-plan, la plaine intramorainique est encore activement parcourue par les eaux du torrent proglaciaire. Prise de vue depuis la marge proglaciaire vers le nord-ouest, 11 juillet 2002.*

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

La stabilité des dépôts se marque par un développement floristique qui a dépassé un stade strictement pionnier contrairement à celui des dépôts récemment déglacés. En effet, d'après le tableau 9, les espèces édificatrices colonisant les chenaux inactifs, citées plus haut, ne colonisent pas les secteurs récemment déglacés. L'abondance spécifique est également plus forte dans les chenaux inactifs, par exemple *Draba species* avec 45 % de présence contre 33 % sur les dépôts de 30 ans.

La reconquête végétale qui se met en place en relation avec la nature des écoulements correspond à une succession végétale secondaire, processus de reconstitution de la végétation dans un espace antérieurement colonisé, mais dont les plantes ont été éliminées. Cette succession secondaire vient après la succession primaire, qui correspond à l'installation de plantes dans un milieu qui n'a jamais été peuplé et qui se met en place, ici, en relation avec la durée de déglaciation. Bien qu'avec l'affaiblissement de la dynamique de ruissellement, le nombre et l'abondance des espèces augmentent, comme on l'observe également pour la succession primaire, les enchaînements floristiques ne sont pas les mêmes de l'une à l'autre, notamment dans les entrées des espèces au cours de chacune des deux successions. Ces différences sont à mettre en relation avec les changements de contexte mésologique entre les dépôts récemment déglacés et ceux affectés par un ruissellement.

2.3. Comportements différenciés des espèces en fonction des contextes mésologiques

Nous venons de voir que des différences de présence et d'abondance spécifique permettent de distinguer les espaces stables des espaces affectés par le ruissellement. Au cours des successions primaires et secondaires, chaque espèce développe sa stratégie d'occupation de l'espace disponible, en réponse aux différences mésologiques de ces deux environnements. Les espaces déglacés restés en place et ceux affectés par le ruissellement ne bénéficient pas des mêmes apports hydriques. Les eaux de ruissellement qui parcourent les plaines intramorainiques peuvent faire défaut dans les secteurs restés en place. Nous avons procédé à une analyse cartographique systématique pour chaque espèce qui permet d'appréhender les différences de comportement spécifique. Afin d'illustrer ces distinctions, nous présentons trois distributions-types à titre d'exemple.

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

- ***Salix polaris*, une colonisation subordonnée aux conditions mésologiques**

Salix polaris est une espèce relativement abondante dans l'espace proglaciaire dont la répartition spatiale est illustrée par la figure 108. Cependant, dans le détail, l'espèce apparaît surtout sur les moraines stabilisées et plus faiblement dans les plaines intramorainiques parcourues par les écoulements. *Salix polaris* est une espèce mésophile[1] et de ce fait colonise difficilement les secteurs affectés par le ruissellement qui présentent des conditions d'humidité potentiellement répulsives. Cela ne signifie pas qu'elle soit complètement exclue des plaines, car l'espèce peut y être rencontrée, mais sa distribution spatiale y est réduite par rapport à ce qu'elle est sur les secteurs restés en place. Inversement, *Salix polaris* est moins présente sur les fortes pentes du vallum où les conditions sont les plus sèches. Les caractéristiques mésophiles de l'espèce se traduisent spatialement par sa faible distribution dans les situations édaphiques marquées par l'humidité et la sécheresse.

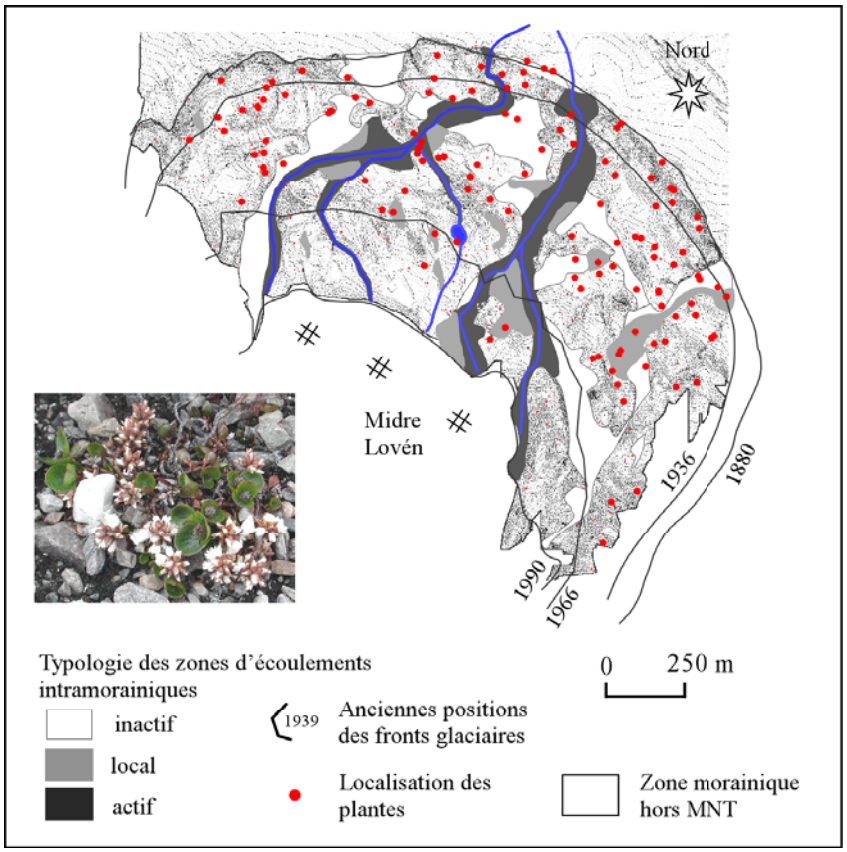


Fig. 108 – Localisation de* Salix polaris *sur la marge du glacier Midre Lovén *(d'après 1 200 relevés).*

[1] Mésophile : se dit d'un groupement ou d'une espèce ne tolérant pas les valeurs extrêmes d'un facteur écologique quelconque.

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

- ***Poa abbreviata*, une stratégie de diffusion polarisée**.

La cartographie de *Poa abbreviata*, d'après la figure 109, montre une concentration spatiale des plantes dans une partie de la marge, distribution qui s'oppose à celle observée pour *Salix polaris*. L'espèce, d'après la carte, est localisée dans un même secteur à la fois sur les dépôts restés en place et sur les plaines. Cela traduit une dissémination de l'espèce qui est dépendante de la proximité des stocks d'éléments reproducteurs. L'espèce est capable de coloniser des environnements variés, mais dans un espace peu étendu. Par ailleurs, à l'inverse de *Salix polaris*, en tant qu'espèce hygrophile, elle ne présente pas de difficultés pour coloniser les plaines intramorainiques affectées par les écoulements.

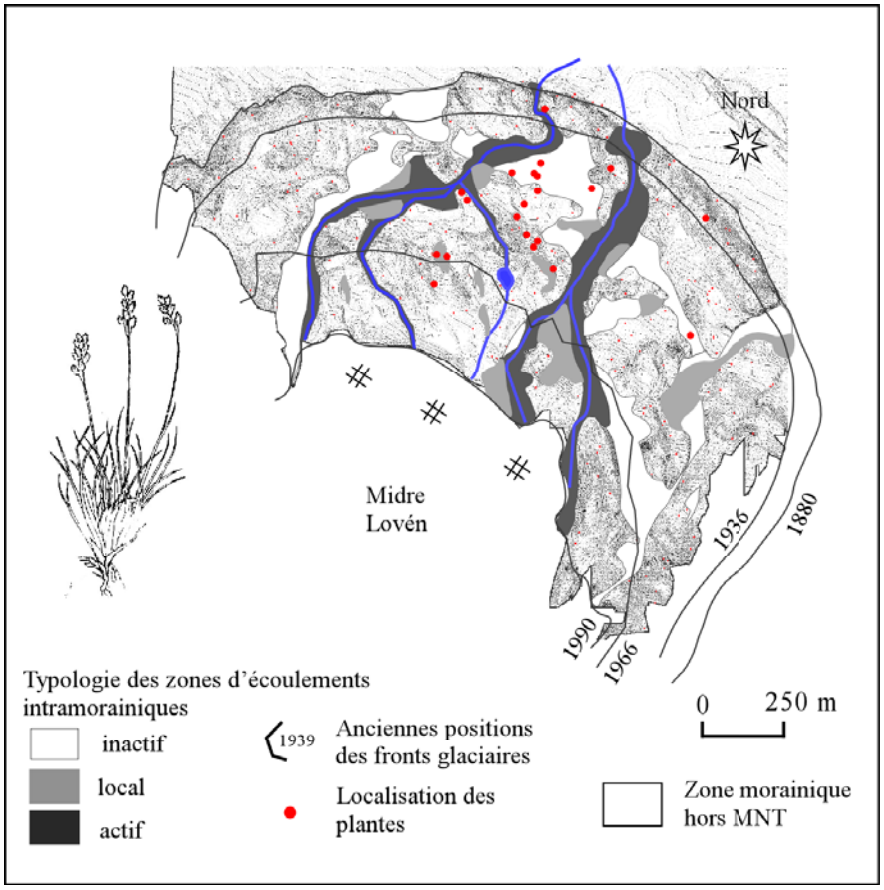


Fig. 109 – Localisation de* Poa abbreviata *sur la marge du glacier Midre Lovén *(d'après 1 200 relevés, dessin de O.I. Rønning, 1996).*

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

- ***Saxifraga oppositifolia*, une dissémination homogène.**

Un troisième comportement spécifique est illustré par *Saxifraga oppositifolia* qui colonise indifféremment l'ensemble de l'espace proglaciaire à la fois dans les secteurs restés en place et dans les plaines (fig. 110). Cette espèce ubiquiste s'accommode d'une grande variété d'environnements intramorainiques lui assurant une dissémination indifférente aux conditions mésologiques. Cette distribution contraste avec celle, localisée et discrète, de *Poa abbreviata* (fig. 109), et celle de *Salix polaris* (fig. 108), faiblement représentée dans les secteurs de ruissellement.

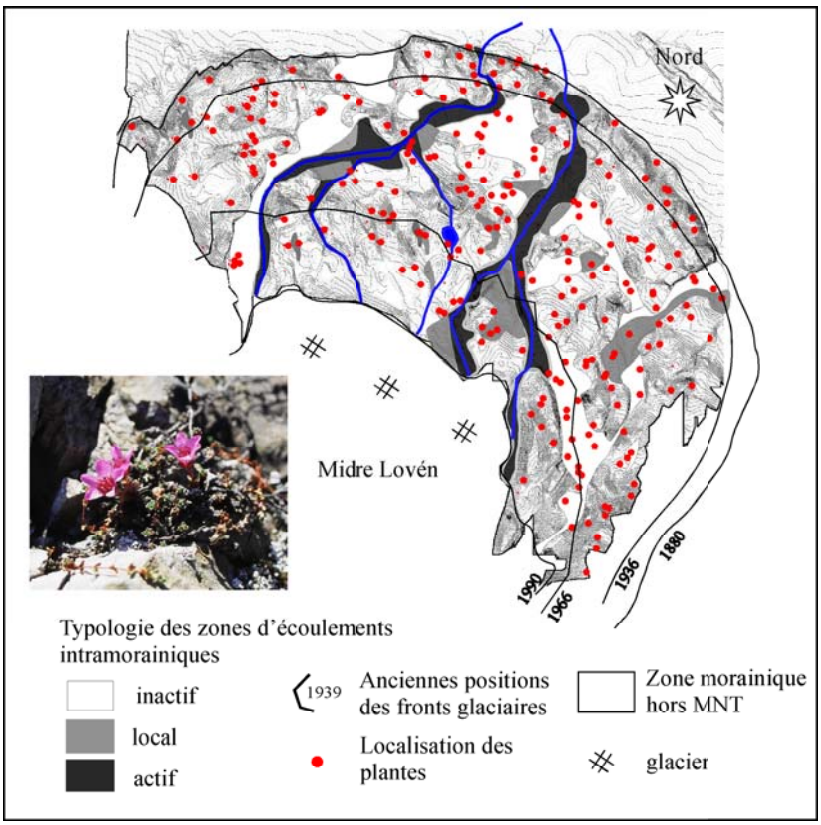


Fig. 110 – Localisation de* Saxifraga oppositifolia *sur la marge du glacier Midre Lovén *(d'après 1 200 relevés).*

Dans l'espace proglaciaire, les séquences floristiques des successions primaires et secondaires et celles déterminées par les conditions édaphiques signent une diversité de cortèges floristiques et une distribution spatiale contrastée des espèces.

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

3. Le rôle des paramètres climatiques locaux

À partir du couplage des données topographiques dérivées du MNT et des informations climatiques obtenues par des relevés météorologiques (R. Fury et D. Joly, 2003), nous disposons des informations microclimatiques relatives à chaque point de l'échantillonnage. Les paramètres climatiques envisagés ont été le rayonnement, l'exposition et le vent. La température n'a pas été intégrée dans cette analyse, compte tenu de la faible variation de ses valeurs d'un site à l'autre. Pour les 300 relevés, les températures moyennes sont comprises entre 6 et 8°C, avec 80 % des valeurs comprises entre 7,2 à 7,5°C. Les faibles différences entre les valeurs ne nous permettent pas de différencier des cortèges floristiques.

3.1. Le rayonnement global

Les relevés sont regroupés, après analyse de la forme de la distribution des valeurs et compte tenu des seuils statistiques, en trois classes de rayonnement : 984 à 1 012 KW/m², 1 012-1 016 KW/m² et 1 016-1 018 KW/m². Pour chacune des classes, un cortège floristique distinct est présenté (fig. 111).

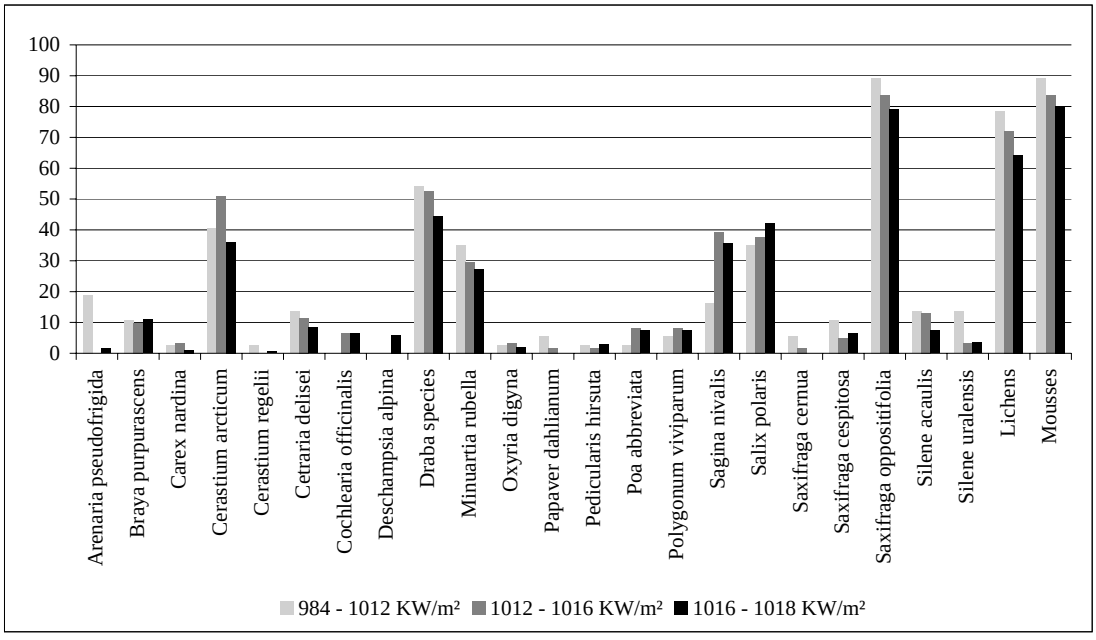


Fig. 111 – Cortèges floristiques des trois classes de rayonnement *(d'après 1 200 relevés).*

Peu de différences se marquent entre les trois cortèges, les mêmes espèces y sont recensées avec des fréquences très proches. Par exemple, *Draba* species a 52 % de présence sur les surfaces aux rayonnements faibles et 45 % pour les surfaces aux plus

fortes valeurs de rayonnement. Quelques variations sont néanmoins remarquables (fig. 111) : *Arenaria pseudofrigida* est plus fréquente sur les surfaces aux valeurs de rayonnement les plus faibles, alors que *Salix polaris* l'est davantage sur les surfaces aux plus fortes valeurs de rayonnement. Cependant, mis à part ces quelques variations, l'ensemble des cortèges floristiques de chacune des classes ne présente pas de variation en réponse aux changements des valeurs de rayonnement reçues par les surfaces.

3.2. L'exposition

Les cortèges floristiques recensés pour les trois expositions sud-ouest, est et nord, présentés dans la figure 112, de la même manière que pour le rayonnement, ne montrent pas de différences spécifiques significatives. La diversité spécifique est sensiblement la même pour les expositions sud-ouest (21 espèces), est (19) et nord (23). Les fréquences des espèces sont relativement proches. Par exemple, d'après la figure 112, *Cerastium arcticum* a une présence de 35 % sur les expositions sud-ouest et avoisine 40 % pour les expositions est et nord. Le tour d'horizon du soleil, au cours de la période végétative, n'entraîne pas de phénomène d'opposition d'adret et d'ubac aussi marqué que sous des latitudes plus tempérées. L'exposition n'est donc pas un paramètre discriminant en matière de reconquête végétale.

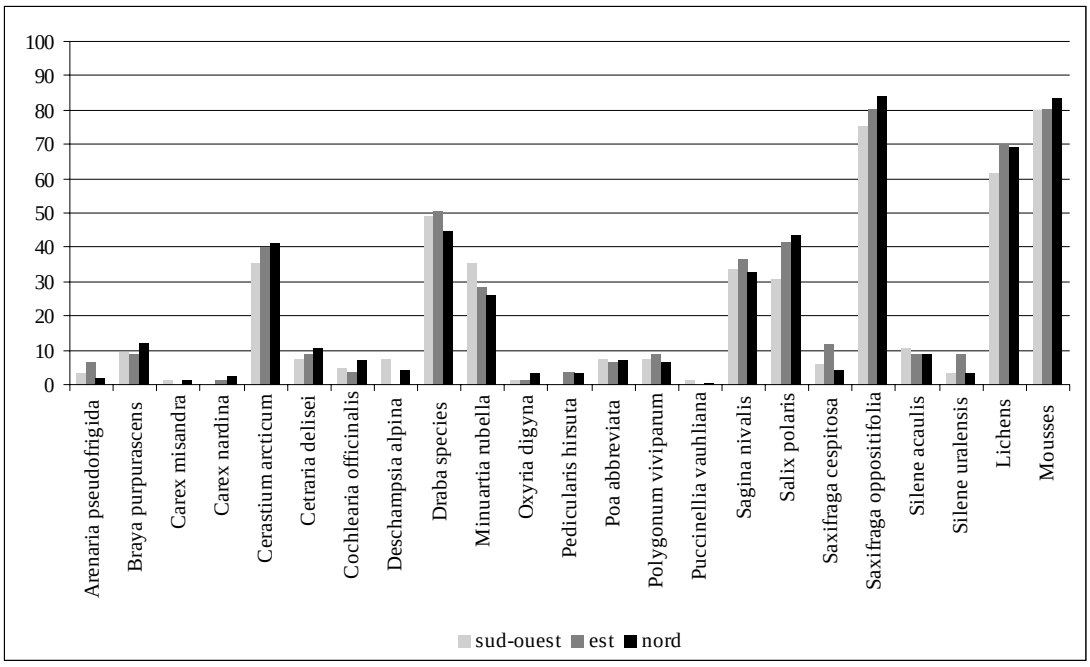


Fig. 112 - Cortèges floristiques selon les expositions *(d'après 1 200 relevés). Les relevés en exposition sud et ouest ont été rassemblés car leur nombre est insuffisant pour qu'ils soient observés individuellement.*

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

3.3. Le vent

Les relevés ont été regroupés en fonction des situations exposées au vent et à l'abri de celui-ci. La figure 113 présente les cortèges floristiques identifiés dans ces deux situations. Quasiment aucune différence spécifique n'est visible, la diversité spécifique recensée est la même. Cependant, de grands écarts dans la fréquence des espèces sont à noter, les situations face au vent concentrant les plus fortes valeurs. Par exemple, le cas le plus démonstratif, d'après la figure 113, est celui de *Salix polaris* qui est présent dans 58 % des relevés au vent contre 32 % sous le vent. De même, *Silene acaulis* a quelques pour cent de présence à l'abri et atteint 20 % dans les relevés exposés au vent. Seules, les espèces hygrophiles comme *Cochlearia officinalis* et *Poa abbreviata* ont des abondances supérieures sur les surfaces sous le vent (fig. 113). Leur faible présence sur les surfaces face au vent peut être liée à l'assèchement plus important sur les zones exposées, pouvant induire un stress hydrique sur certaines plantes. À l'inverse, *Arenaria pseudofrigida* et *Carex nardina*, espèces xérophiles, colonisent exclusivement les surfaces face au vent (fig. 113). Les deux cortèges floristiques distingués font du vent un paramètre climatique jouant un rôle dans la structuration de la reconquête végétale.

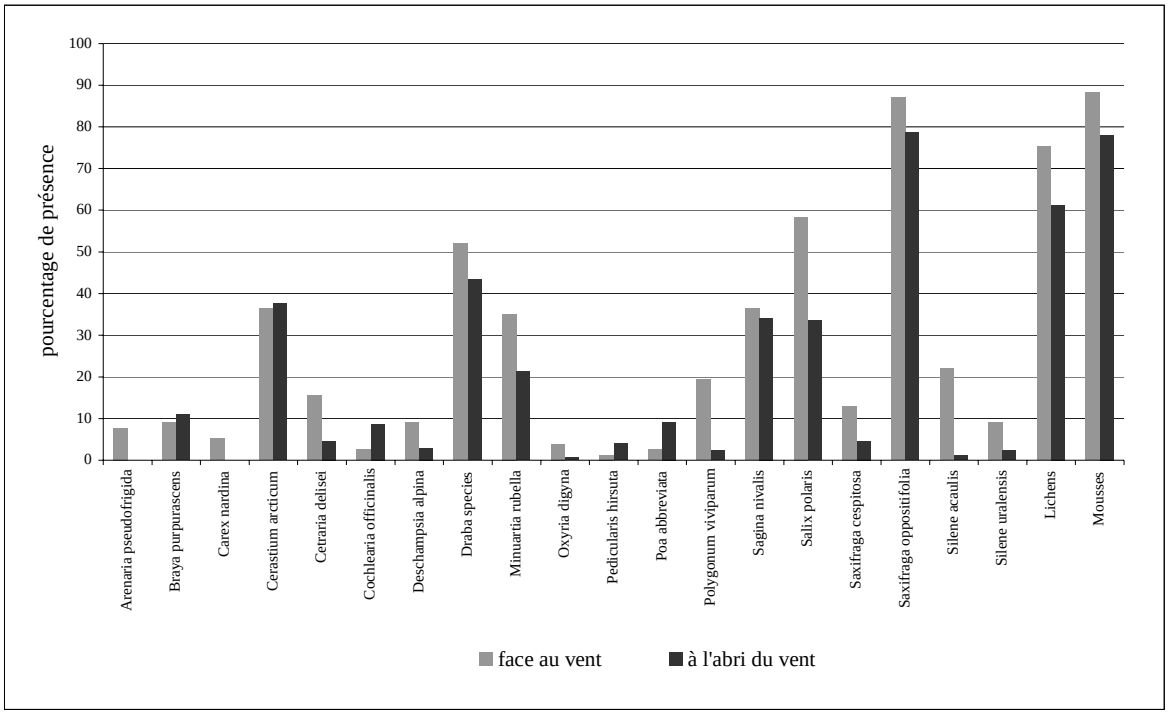


Fig. 113 – Distribution des cortèges floristiques selon les situations par rapport au vent *(d'après les 1 200 relevés).*

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

Parmi l'ensemble des paramètres climatiques que nous venons d'analyser, le vent est celui qui influence le plus la répartition spatiale des espèces. Cependant, cette analyse reste incomplète, car il manque l'étude de la neige, dont l'impact est connu pour être discriminant sur le couvert végétal. L'influence du vent est sans doute importante également sur la distribution du manteau neigeux. On sait combien la neige joue un rôle déterminant en matière de colonisation végétale, mais cette variable ne peut être abordée ici du fait de l'absence de données la décrivant.

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

Conclusion

L'analyse conduite à échelle fine a permis de différencier des cortèges floristiques en réponse aux conditions morphodynamiques et microclimatiques. Plus que les différences de présence des espèces, la fréquence des espèces s'avère être un indicateur de l'impact des paramètres. Il est possible, à l'issue de cette étude, de classer ces paramètres en fonction de leur rôle sur la distribution des espèces qui s'organise, comme le montre la figure 114, autour du ruissellement.

Le ruissellement, par son impact spatial et floristique, peut être placé au centre du système paysager de la marge proglaciaire. En tout premier lieu, c'est la mobilité et la nature des écoulements qui vont déterminer, d'une part, des secteurs détruits, les plaines intramorainiques, et, d'autre part, les secteurs restés en place. Dans ces deux contextes, deux signatures floristiques s'expriment. Sur les dépôts stables, la colonisation végétale se met en place en relation avec la durée de déglaciation (succession primaire). Sur les dépôts affectés par le ruissellement, en réponse aux dynamiques passées et actuelles des écoulements, se met en place une autre colonisation végétale. Cette succession secondaire participe au renouvellement des cortèges floristiques, notamment parce que les entrées floristiques sont différentes.

Parallèlement, les plaines et les dépôts non remaniés se caractérisent par des conditions édaphiques différentes, associées aux classes de pente (fig. 114). Les moraines restées en place conservent de fortes pentes induisant des environnements secs qui, en terme végétal, se marquent par une végétation xérophile. À l'opposé, les plaines, en raison de leur subhorizontalité, sont le siège de stations humides, favorisant l'implantation d'espèces hygrophiles.

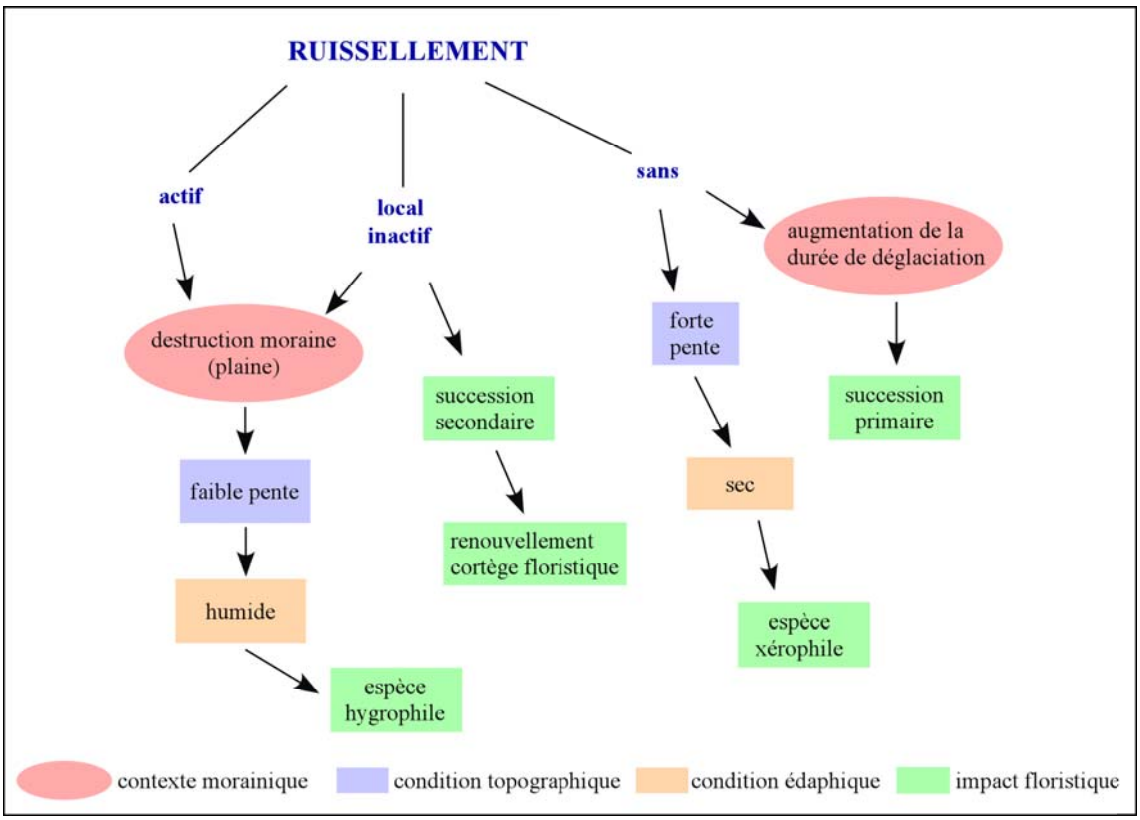


Fig. 114 – Le ruissellement au centre du système paysager de la marge du glacier Midre Lovén.

Enfin, il faut garder à l'esprit que les dépôts morainiques stables correspondent à une situation à un instant *t* qui peut être remise en question en quelques heures par les divagations brutales des cours d'eau. D. Mercier (1998) précise que *la mobilité du réseau hydrographique est la règle sur ces marges glaciaires.* M. Griselin (1982) recense, au cours des mois de juillet et août 1980 dans la marge du glacier Austre Lovén, plusieurs crues hydrologiques, dont le débordement a remobilisé certaines moraines mineures stabilisées de longue date. De même, Th. Brossard (1991) a échantillonné dans la marge du glacier Midre Lovén sept stations de relevés dont six ont été reprises par les eaux. Cette mobilité spatio-temporelle des écoulements renforce la position centrale du ruissellement dans le système paysager intramorainique.

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

Les paramètres morphodynamiques, comme nous venons de le voir pour le ruissellement, prennent le pas sur les paramètres microclimatiques dans la distribution des éléments floristiques. Les espèces végétales qui colonisent les moraines ont de fortes capacités de colonisation dans des environnements pionniers, mais sont peu réactives aux différenciations climatiques. Les espèces pionnières ne sont pas suffisamment sensibles pour que des différences entre les conditions microclimatiques ressortent, comme il peut y en avoir dans la toundra, où la structuration est très forte. Seul le vent joue un rôle important.

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

Chapitre 6

Organisation paysagère de l'espace intramorainique

1. Étude des liens entre végétation et conditions mésologiques

2. Identification des faciès paysagers intramorainiques

3. Essai de diagnostic spatial de la reconquête végétale

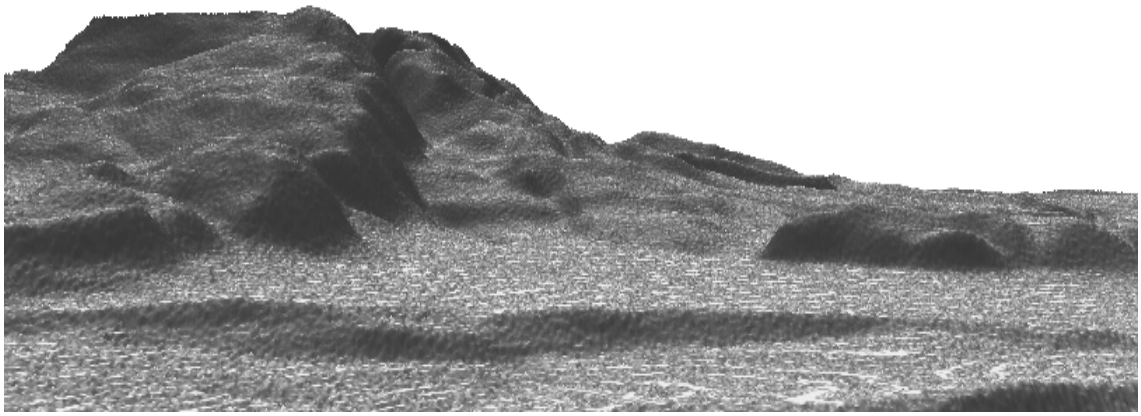


Fig. 115 – Vue en trois dimensions de la marge du glacier Midre Lovén à partir du MNT (D. Laffly).

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

Nous avons identifié plusieurs paramètres environnementaux qui participent à la différenciation des cortèges floristiques dans l'espace intramorainique : la pente, le ruissellement, la durée de déglaciation et le vent. Nous avons également observé que l'impact de ces différents paramètres sur la végétation n'est pas le même. Certains conditionnent le niveau de progression du couvert végétal, d'autres structurent les espèces en relation avec les conditions édaphiques qu'ils induisent. Il nous reste désormais à analyser, dans la marge du Midre Lovén, comment se combinent le rôle du Temps et celui des conditions mésologiques afin de définir la mosaïque de faciès paysagers qui en découle et qui caractérise la mise en place de la reconquête végétale. Dans cette recherche de structures fortes qui unissent les paramètres environnementaux et les éléments floristiques, nous avons recours aux analyses multivariées. Elles permettront de prendre en compte simultanément l'ensemble des individus et des variables pour dégager les structures qui sous-tendent l'organisation de l'ensemble du système.

1. Étude des liens entre végétation et conditions mésologiques

Nous avons réalisé une analyse factorielle des correspondances[1] dans laquelle ont été intégrés les paramètres environnementaux que nous avons précédemment identifiés comme les plus significatifs : la pente (3 classes : 0-2°, 2°-10°, 10°-23°), le vent (de face et à l'abri), la durée de déglaciation des surfaces (30 ans, 70 ans, 100 ans) et le type de ruissellement (absent, actif, local, inactif). Les espèces végétales sont également incluses et celles dont la présence est supérieure à 20 % sont distinguées par un code d'abondance de deux à trois classes.

1.1. Le rôle du contexte morainique

La figure 116 présente le graphe des axes 1 et 2 de l'AFC et le graphe des axes 2 et 3. La position, dans l'espace factoriel, des espèces végétales et des paramètres environnementaux montre que l'axe 1 organise les espèces selon la dynamique de ruissellement (fig. 116 A). Le long de cet axe se mettent en opposition les espaces soumis à une dynamique de ruissellement évoluant d'un état actif (à droite) vers un état inactif (à gauche). La traduction biogéographique, suivant cet axe 1, est le passage d'un espace strictement minéral à une situation floristique plus développée caractérisée par

[1] Les valeurs propres des trois premiers axes retenus sont marquées par un faible taux de décroissance qui témoigne de la forme éclatée du nuage factoriel (axe 1 : 0,10783, axe 2 : 0,04311, axe 3 : 0,03305).

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

une diversité spécifique. En outre, on constate sur la figure 116 A que le faciès minéral de l'extrémité droite de l'axe 1 est lié à l'absence totale d'espèces. Au fur et à mesure de l'abandon de la dynamique d'écoulement, la colonisation végétale débute avec la présence à faible taux des mousses et de *Saxifraga oppositifolia* (moins de 20 % de présence), pour passer progressivement à 20-50 % de présence. À ce niveau, s'opère un enrichissement floristique marqué par le groupe des espèces pionnières : *Draba species, Cerastium arcticum, Minuartia rubella* et *Sagina nivalis.* Enfin, à l'extrémité gauche de l'axe 1 se trouvent les espèces caractéristiques d'un environnement stable et évolué avec *Carex nardina, Polygonum viviparum, Silene acaulis* et le lichen *Cetraria delisei*.

Nous venons de suivre, le long de l'axe 1, la mise en place de la succession secondaire. Le grand vide de la partie droite du graphe s'explique par la dynamique de ruissellement qui entrave la colonisation végétale. Ce vide contraste avec la partie gauche du graphe, où les dépôts n'ont pas été affectés par le ruissellement et où se déclinent tous les types de groupements végétaux. La structuration verticale, dans ce secteur de l'espace factoriel, est associée à la durée de déglaciation des dépôts qui organise, le long de l'axe 2, la succession primaire des espèces végétales. La figure 116 A met également en évidence les dépôts récemment déglacés situés en haut de l'axe 2. Ils sont caractérisés par un groupement d'espèces pionnières avec *Braya purpurascens, Saxifraga cespitosa, Sagina nivalis, Minuartia rubella* et *Draba species.* Progressivement, la présence des espèces s'accroît avec notamment, l'abondance de *Draba species* et *Saxifraga oppositifolia* qui passe de 20 à 50 % de présence. De façon également remarquable, les lichens atteignent plus de 50 %. Les environnements évolués marquent le pas dans la partie basse de l'axe 2 où se trouvent des espèces édificatrices telles *Silene acaulis, Cetraria delisei* et *Polygonum viviparum*.

Certaines espèces se trouvent isolées dans l'espace factoriel quand d'autres sont agrégées dans le graphe. C'est le cas de *Poa abbreviata, Deschampsia alpina* et *Carex nardina*. Ces positions sont liées à l'axe 3 du graphe qui introduit une nuance dans l'organisation des caractères des axes 1 et 2, celle liée aux conditions édaphiques. *Cerastium arcticum et Cochlearia officinalis* sont également sous l'influence du troisième axe.

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

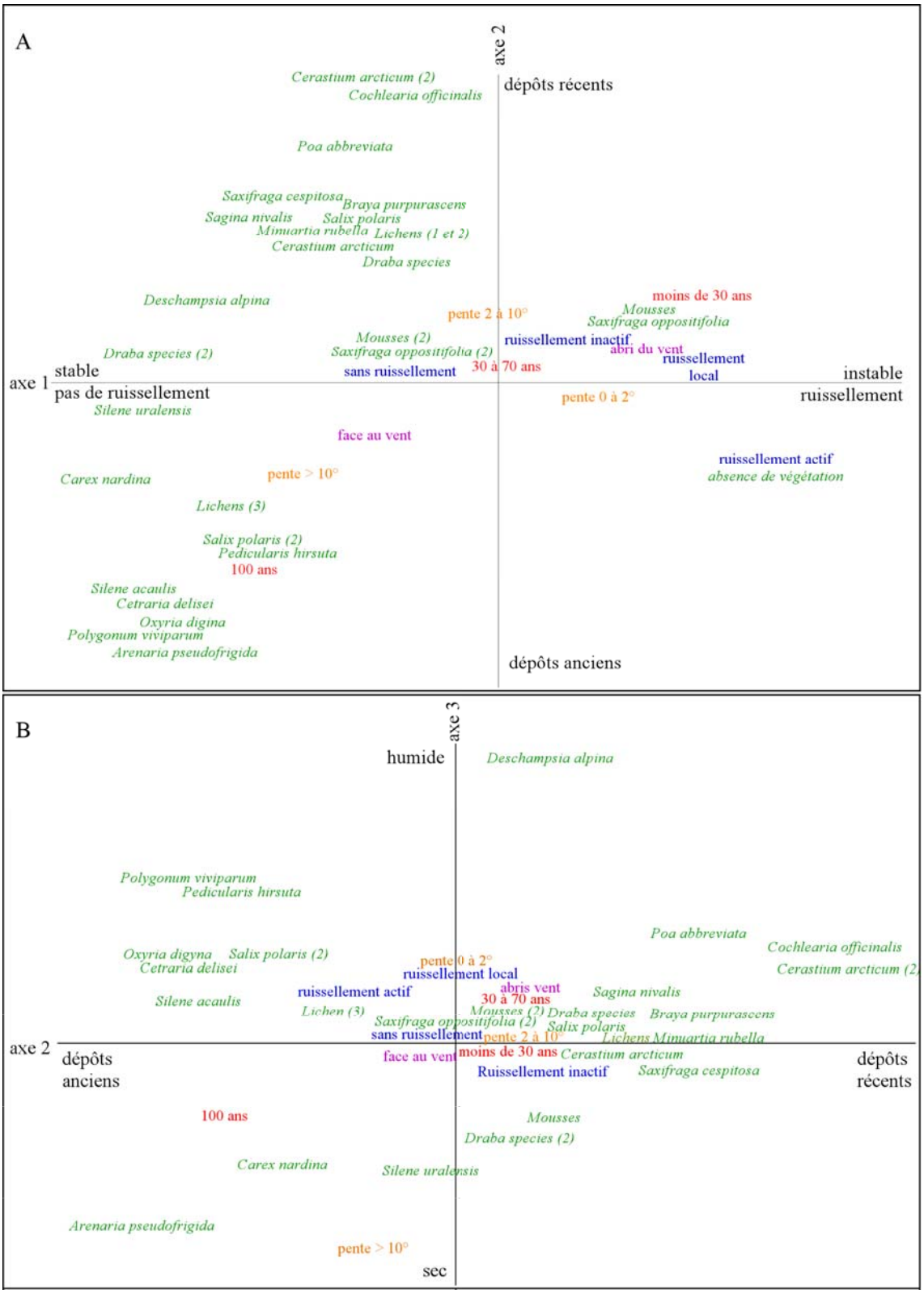


Fig. 116 – Graphes factoriels des caractères de végétation et des paramètres environnementaux selon les axes 1 et 2 (A) et les axes 2 et 3 (B)*, d'après 1 200 relevés. Les espèces sont codées en terme de présence et d'absence, mais afin de rendre la lecture des graphes plus facile seule la présence est représentée dans l'AFC. Pour les espèces présentes dans plus de 20 % des relevés, leur abondance est indiquée entre parenthèses (2 : 20-50 %, 3 : > 50 %).*

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

1.2. Influence des conditions édaphiques

L'axe 3 structure les faciès végétaux en fonction des conditions édaphiques (fig. 116 B). Les espèces rassemblées en haut de l'axe 3 ont des caractères hygrophiles tandis que celles réunies en bas ont des affinités avec les environnements secs. De part et d'autre de l'axe 3, les espèces se répartissent, selon l'axe 2, en fonction de la durée de déglaciation des dépôts qui oppose, comme nous l'avons vu précédemment, les éléments pionniers aux éléments évolués (fig. 116 B).

L'extrémité supérieure de l'axe 3 (fig. 116 B) est marquée par *Deschampsia alpina*, espèce caractéristique des environnements très humides, voire engorgés, dont la localisation dans l'espace factoriel est davantage due aux conditions édaphiques qu'à une période de déglaciation et à un niveau de développement floristique. Suivent, à droite de l'axe 3 pour les secteurs pionniers, des espèces hygrophiles de milieux non engorgés, avec *Poa abbreviata*, *Cochlearia officinalis* et *Cerastium arcticum* dont l'abondance est de 20 à 50 % (fig. 116 B). Pour les secteurs plus anciens, dans la partie gauche du graphe, *Pedicularis hirsuta* et *Polygonum viviparum* sont associées au milieu humide. Au centre de l'axe 3 se trouvent les espèces propres aux environnements mésophiles avec, pour les milieux pionniers *Draba species*, *Braya purpurascens*, *Salix polaris* et, pour les sites plus anciens, *Oxyria digyna*, *Silene acaulis*, et *Salix polaris* dont la présence plus abondante (20 à 50 %) traduit l'ancienneté du milieu. La tendance sèche du milieu est exprimée dans la partie basse de l'axe 3 avec *Silene uralensis* pour les secteurs pionniers, *Carex nardina* et *Arenaria pseudofrigida* pour les faciès évolués. Davantage d'espèces sont rattachées aux milieux humides et mésiques qu'aux conditions xériques, soulignant l'importance de l'eau dans les modalités de la reconquête végétale.

Parallèlement à la mise au jour de l'organisation des éléments floristiques, les graphes des axes 1 et 2, 2 et 3 (fig. 116) relient les paramètres environnementaux aux caractères mésologiques des sites. Les secteurs de ruissellement actif et local sont associés aux secteurs plans (0°-2°), récemment déglacés (30 à 70 ans) et situé à l'abri du vent, où la végétation prend des caractères hygrophiles. Les secteurs non affectés par le ruissellement, marquées par une végétation xérophile, sont associés aux fortes pentes et aux moraines les plus anciennes (100 ans).

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

Pour résumer, la figure 117 schématise la structuration des cortèges floristiques dans l'espace factoriel. Les conditions édaphiques jouent un rôle majeur dans l'organisation du couvert végétal. Les nuances mésophiles rassemblent le plus grand nombre d'espèces en regroupant des espèces propres aux environnements humides et secs, mais non caractérisés par l'abondance. Par exemple, *Cerastium arcticum*, dont la présence est abondante dans les environnements humides, n'a pas de caractère d'abondance en milieu mésique (fig. 117). De même, *Draba species* est abondante dans les milieux secs et ne l'est pas dans les environnements mésiques. La structuration floristique, selon les conditions mésologiques, se voit dans les variations d'abondance des espèces ubiquistes.

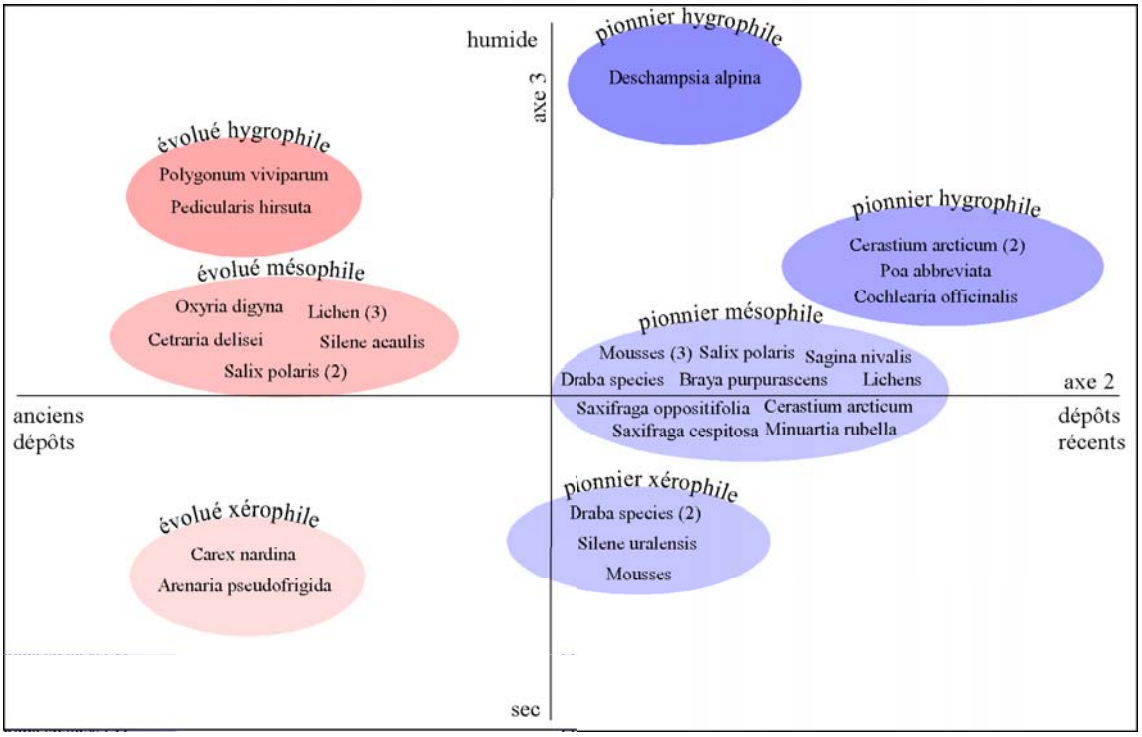


Fig. 117 - Schéma de synthèse des groupements floristiques pionniers et évolués en fonction des conditions mésologiques. *Le schéma est réalisé d'après le graphe des axes 2 et 3 de l'AFC.*

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

L'espace de synthèse dégagé par l'AFC permet d'identifier les principales structures qui expliquent les paysages observés. Le ruissellement s'affirme comme un facteur majeur dans le développement du couvert végétal en déterminant sa présence et son absence. À l'échelle de la marge, le ruissellement est le seul paramètre qui semble pouvoir empêcher la colonisation végétale. Par ailleurs, ce sont les conditions édaphiques qui jouent un rôle majeur dans la différenciation des composantes floristiques, à la fois pour les stades pionniers et les stades évolués.

2. Identification des faciès paysagers intramorainiques

Afin d'identifier des ensembles homogènes qui permettront de caractériser plus précisément les liens entre les conditions du milieu et les éléments floristiques, nous avons recours à une classification ascendante hiérarchique (CAH) couplée aux résultats de l'AFC. Nous individualisons 13 classes[1] sur le dendrogramme, correspondant chacune à un faciès paysager. La figure 118 présente la dispersion des classes dans l'espace factoriel. L'analyse de ce schéma permet d'observer l'organisation spatiale des classes à la fois en terme de densité des points à l'intérieur de chacune des classes et en terme de disposition des classes les unes par rapport aux autres dans l'espace factoriel dont nous connaissons la signification. Ainsi, d'après le graphe A (fig. 118), les classes s'articulent entre elles selon le niveau de développement du couvert végétal depuis les stades ultra-pionniers (classes 1 et 2) jusqu'aux stades les plus évolués (classes 13 et 8). L'ensemble de cette organisation dessine une parabole, indiquée par la flèche dans la figure 118 A, qui illustre l'évolution du couvert végétal dans le temps. Cette organisation dans l'espace factoriel est caractéristique d'une structure d'ordre. Le deuxième graphe (fig. 118 B), affine l'interprétation de cette organisation en intégrant les variations liées aux conditions édaphiques, des plus humides (classe 4) aux plus sèches (classes 13 et 7). Une autre parabole se dessine dans le graphe (fig. 118 B), matérialisée par la flèche qui indique une structure d'ordre en réponse aux conditions édaphiques. Les deux structures d'ordre identifiées signifient que les 13 faciès paysagers[2] sont caractérisés à la fois par un niveau de développement floristique, des

[1] Les numéros des classes sont attribués par la CAH mais ne constituent pas un classement d'ordre.
[2] Les faciès sont dénommés par les caractères de la végétation. Par exemple, on utilisera le terme de faciès hygrophile plutôt que celui de faciès humide.

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

étapes de la reconquête végétale (pionnier, transition, évolué), et par les conditions édaphiques.

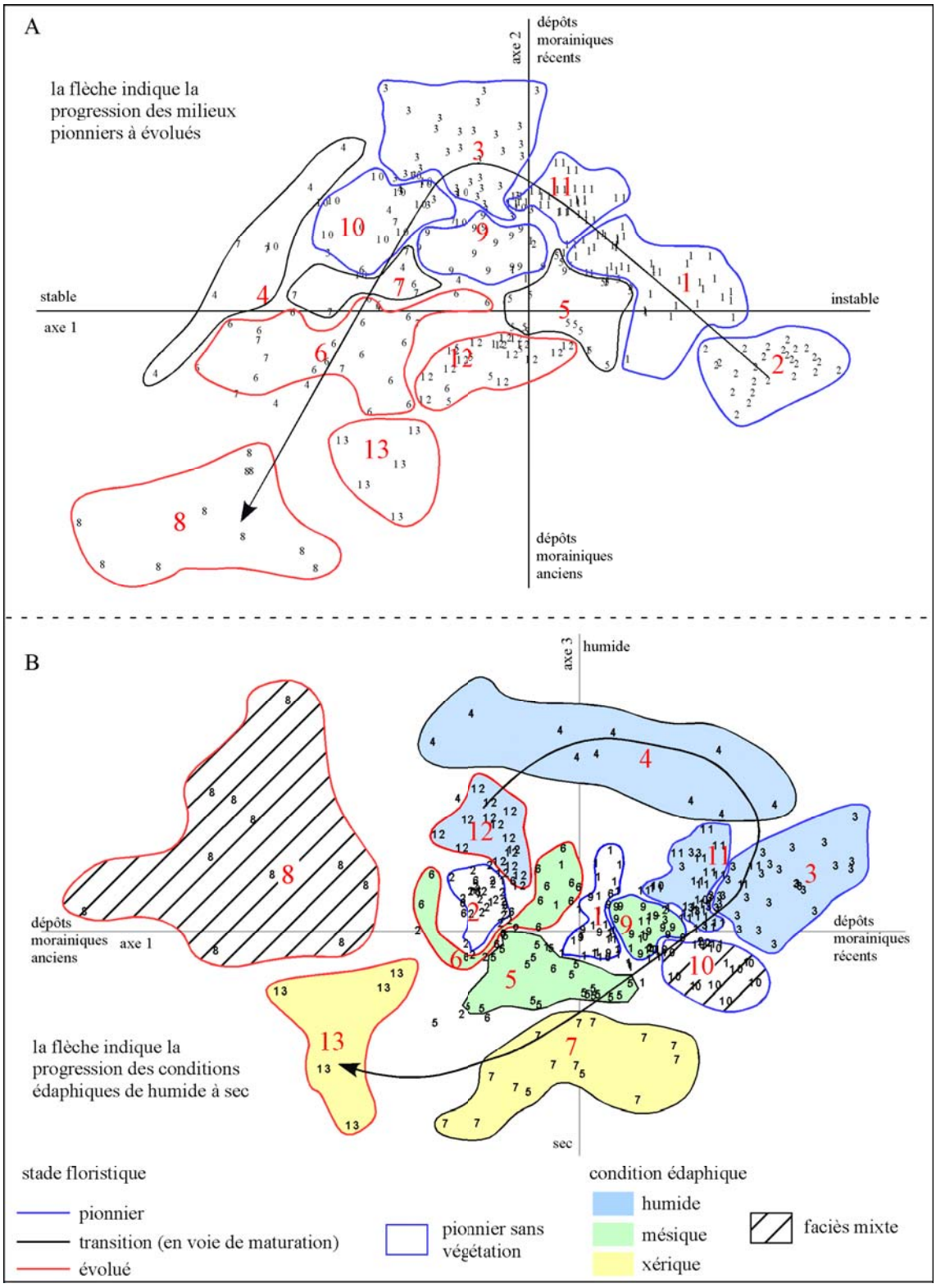


Fig. 118 – Résultats de la classification ascendante hiérarchique présentée dans l'espace factoriel de l'AFC selon les axes 1 et 2 (A) et les axes 2 et 3 (B), *d'après les 1 200 relevés. Les numéros des classes sont attribués par la classification mais ne présentent pas un classement d'ordre.*

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

Les classes sont également définies par des profils thématiques qui présentent les pourcentages de présence et d'absence de chaque variable binaire, comprenant à la fois celles dérivées des données images (pente, âge, ruissellement, vent) et celles issues du terrain (espèce végétale). Ces profils thématiques permettent l'interprétation détaillée des classes en complément de leur position dans l'espace factoriel.

2.1. Faciès minéral

Le faciès minéral est associé aux classes 1 et 2 localisées dans la partie droite de l'espace factoriel caractéristiques des secteurs instables, affectés par le ruissellement (fig. 118 A). La lecture de leur profil (fig. 119) montre que des nuances peuvent être apportées entre les deux classes en distinguant un faciès minéral strict sans végétation (classe 2) et un faciès ultra-pionnier où quelques espèces sont rencontrées (classe 1). Le faciès minéral strict correspond aux dépôts morainiques récemment déglacés et à ceux affectés par le ruissellement où aucune colonisation végétale n'est possible ou n'a débuté. Sur les environnements moins affectés par le ruissellement se met en place un faciès ultra-pionnier (classe 1) où la colonisation végétale est amorcée avec, d'après le profil (fig. 119), un faible développement végétal dominé par les mousses et quelques espèces vasculaires, dont *Saxifraga oppositifolia, Cerastium arcticum* et *Braya purpurascens*. Il est à noter que le faible développement de la végétation à ce stade ne permet pas de différencier des réponses floristiques en fonction des conditions édaphiques. Succèdent à ces stades à dominante minérale, des faciès pionniers marqués par le développement du couvert végétal.

2.2. Faciès pionniers

Les faciès pionniers rassemblent les classes 11, 3, 9, 10 pour lesquelles la colonisation végétale est engagée, notamment à la faveur d'une faible dynamique de ruissellement et de dépôts stabilisés depuis 70 ans. La stabilité se marque avec le développement du couvert végétal caractérisé par un groupe d'espèces pionnières avec *Cerastium arcticum, Draba species, Saxifraga oppositifolia* et *Sagina nivalis* ainsi que des espèces ultra-pionnières comme *Braya purpurascens.* Les nuances édaphiques s'inscrivent dans les cortèges floristiques et distinguent des groupements hygrophiles pour les classes 11 et 3, mésophile pour la classe 9 et mixte pour la classe 10.

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

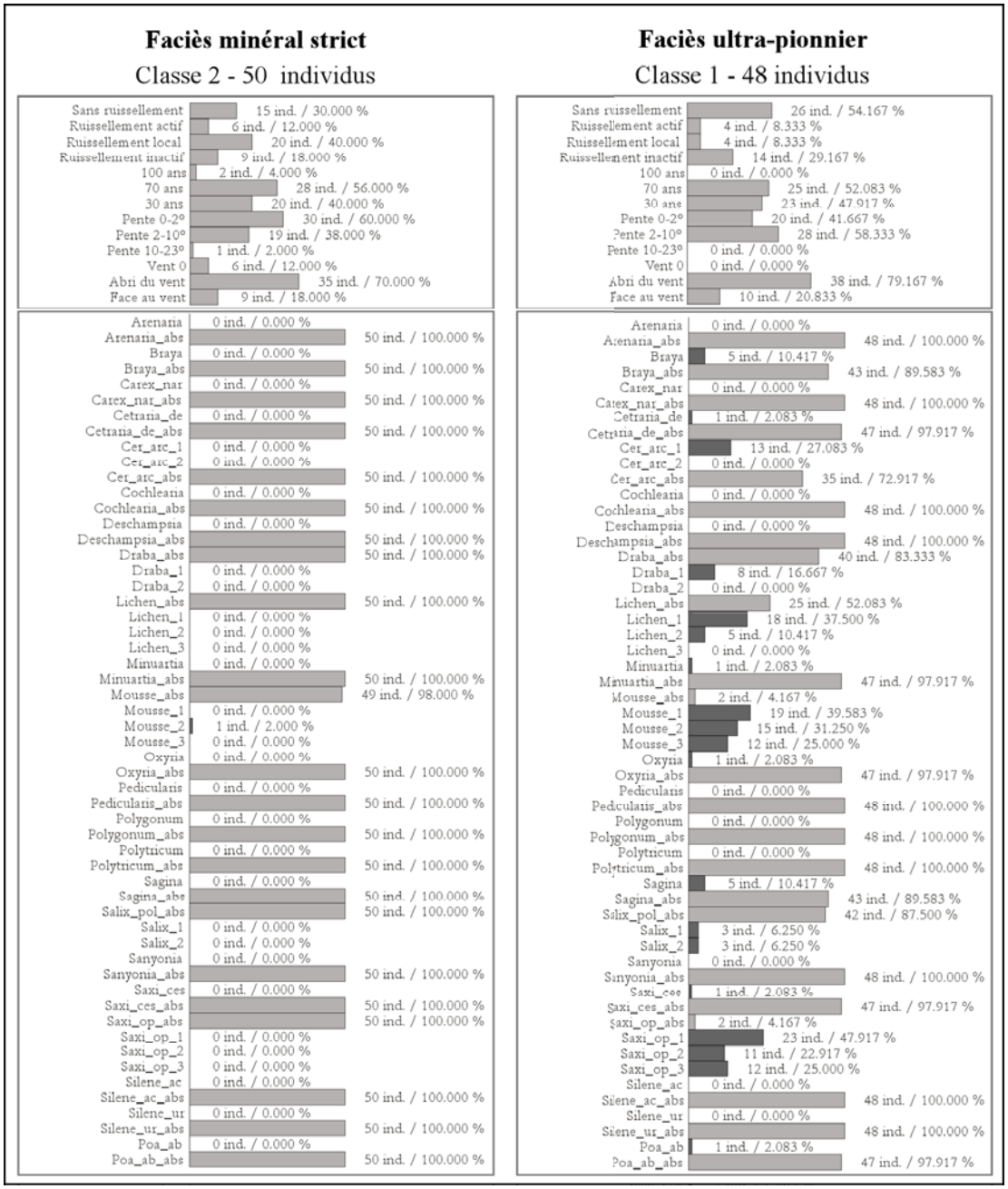


Fig. 119 – Profils des classes au faciès minéral *(d'après les 1 200 relevés). Le profil est divisé en deux parties avec dans la partie haute les variables environnementales et dans la partie basse les variables floristiques. Les noms des espèces sont écrits en abrégé. Le nom complet est mentionné en annexe. La modalité d'absence de l'espèce est indiquée par :* _abs. *Les modalités de présence sont indiquées en gris foncé. Enfin la présence de certaines espèces est codée selon trois modalités d'abondance précisées par :* _1 *(< 20 %),* _2 *(20 à 50 %),* _3 *(> 50 %).*

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

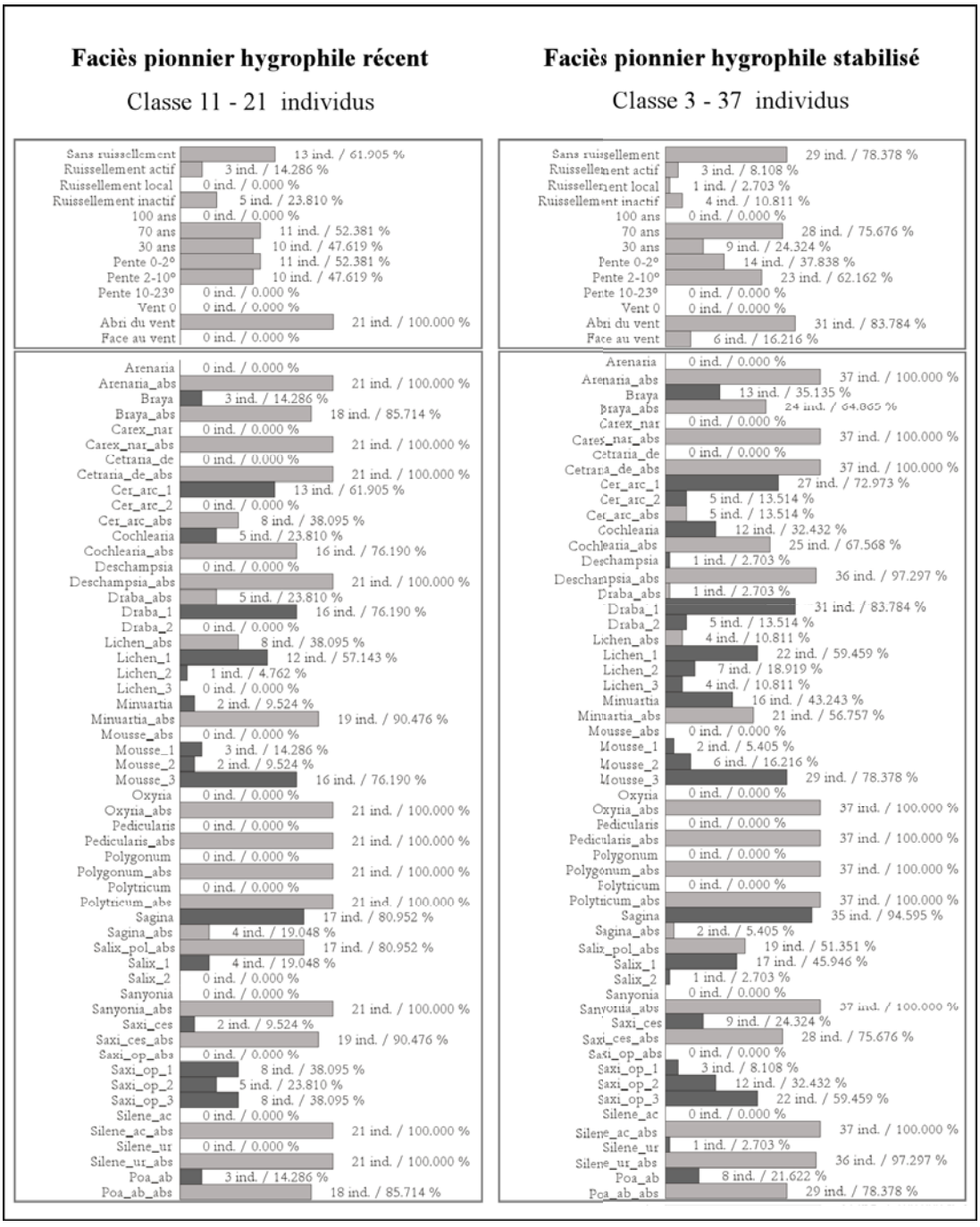


Fig. 120 – Profils des classes aux faciès paysagers pionniers hygrophiles *(d'après les 1 200 relevés). Le profil est divisé en deux parties avec dans la partie haute les variables environnementales et dans la partie basse les variables floristiques. Les noms des espèces sont écrits en abrégé. Le nom complet est mentionné en annexe. La modalité d'absence de l'espèce est indiquée par :* _abs*. Les modalités de présence sont indiquées en gris foncé. Enfin, la présence de certaines espèces est codée selon trois modalités d'abondance précisées par : _1 (< 20 %), _2 (20 à 50 %), _3 (> 50 %).*

- La nuance **hygrophile** du faciès pionnier (classes 11 et 3 ; fig. 120) est associée aux présences de *Sagina nivalis, Poa abbreviata, Cochlearia officinalis* et à l'abondance des mousses. Les conditions d'humidité des faciès sont associées à des secteurs en situation d'abri au vent et à des pentes qui n'excèdent pas 10°.

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

- le **faciès mésophile** (classe 9 ; fig. 121), se caractérise par l'absence d'espèces hygrophiles et la diminution de la présence de *Sagina nivalis* à 10 % alors qu'elle atteignait 94 % dans la classe 3. L'environnement mésophile est associé à des situations moins à l'abri au vent (70 % des relevés contre plus de 80 % pour les faciès hygrophiles).

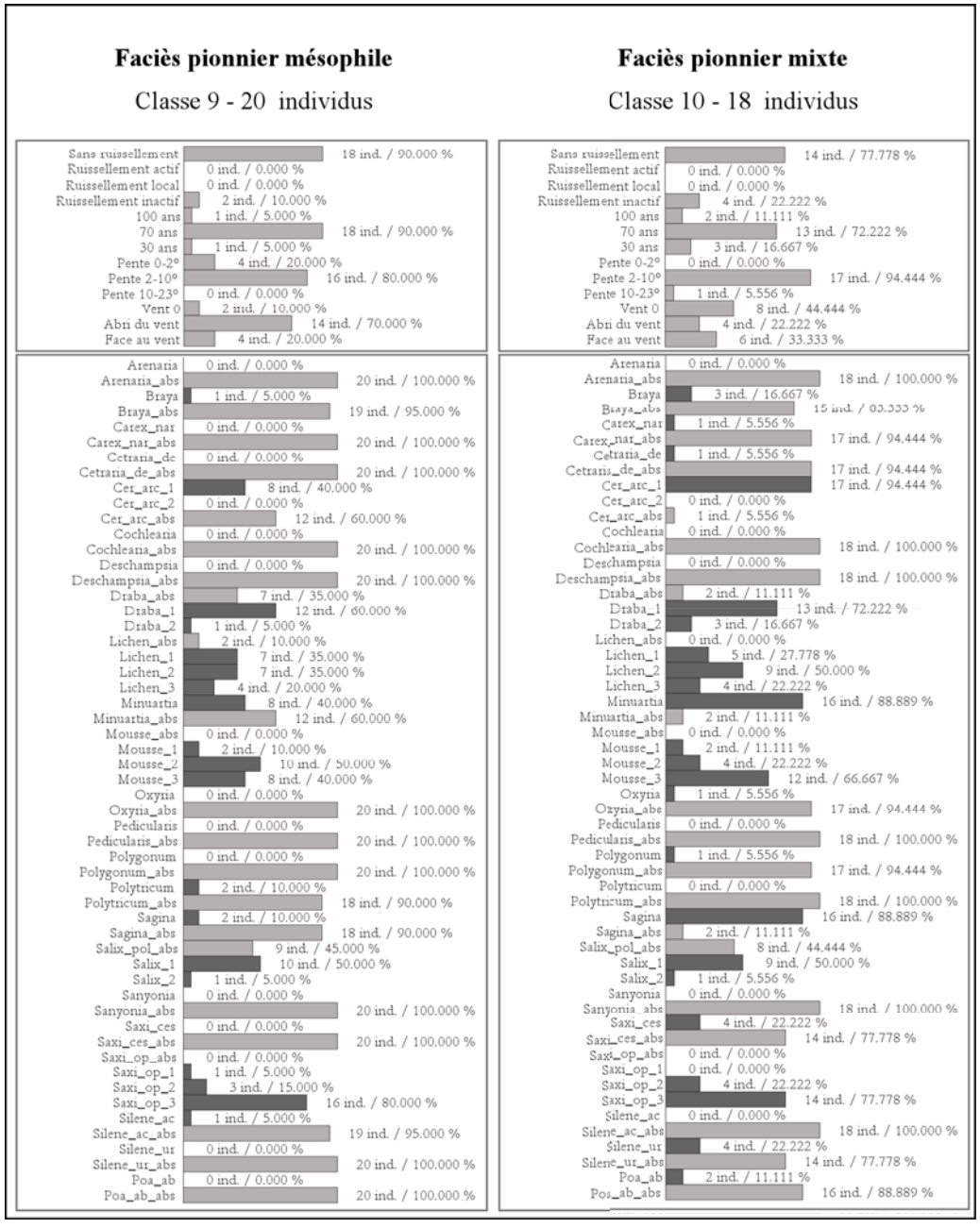


Fig. 121 – Profils des classes aux faciès pionniers mésophile et mixte *(d'après les 1 200 relevés). Le profil est divisé en deux parties avec dans la partie haute les variables environnementales et dans la partie basse les variables floristiques. Les noms des espèces sont écrits en abrégé. Le nom complet est mentionné en annexe. La modalité d'absence de l'espèce est indiquée par :* _abs. *Les modalités de présence sont indiquées en gris foncé. Enfin, la présence de certaines espèces est codée selon trois modalités d'abondance précisées par : _1 (< 20 %), _2 (20 à 50 %), _3 (> 50 %).*

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

- Enfin, le **faciès pionnier mixte** (classe 10), faiblement représenté dans l'espace factoriel, en position intermédiaire entre les classes 4 et 9 (fig. 118 A), se distingue par un mélange d'espèces aux affinités édaphiques diverses. Ainsi *Silene uralensis* et *Carex nardina,* propices aux environnements xérophiles, côtoient des espèces propres aux environnements humides telles *Poa abbreviata* et *Sagina nivalis*. Cette classe pionnière, que nous qualifions de mixte se pose comme un intergrade entre groupements xérophiles et hygrophiles.

2.3. Faciès de transition

Les faciès paysagers de transition rassemblent des éléments floristiques des environnements pionniers et matures, regroupant trois classes (4, 5, 7). Le couvert végétal a dépassé le stade ultra-pionnier mais n'a pas toutes les caractéristiques d'un stade évolué. Floristiquement, cela se traduit par la présence d'espèces pionnières et édificatrices qui se différencient d'une classe à l'autre en fonction des conditions mésologiques qui évoluent avec l'augmentation de la pente : humide (classe 4), mésique (classe 5) et xérique (classe 7).

- **Le faciès humide** (classe 4) est l'expression floristique la plus hygrophile de la marge proglaciaire où domine *Deschampsia alpina* à plus de 80 % accompagnée de *Poa abbreviata* avec 41 % de présence (fig. 122). La classe 4 correspond au faciès intermédiaire entre la classe 3 (faciès pionnier hygrophile stabilisé) et un stade plus évolué identifié par la classe 8. Floristiquement, cette transition se marque par la présence simultanée d'espèces édificatrices telles *Silene acaulis, Cetraria delisei, Pedicularis hirsuta* et *Polygonum viviparum*, et d'espèces pionnières avec *Braya purpurascens, Minuartia rubella, Sagina nivalis* et *Saxifraga cespitosa.* Ce faciès est concentré à 50 % sur les faibles pentes (inférieures à 2°) ; lorsque celles-ci augmentent légèrement, de 2° à 10°, on trouve alors le faciès mésophile.

- La tendance **mésophile** (classe 5 ; fig. 123) est marquée par l'absence d'espèces des environnements humides. Pour ce faciès, se côtoient l'espèce édificatrice *Arenaria pseudofrigida* et des espèces pionnières comme *Draba species* et *Cerastium arcticum.* Comme précédemment, l'accroissement de la pente (10 à 23°) se traduit par un changement de faciès avec la mise en place du faciès xérophile.

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

- Le **faciès xérophile** (classe 7 ; fig. 123) est marqué par la présence d'espèces xérophiles à la fois pionnières telle *Silene uralensis* et édificatrices comme *Arenaria pseudofrigida* et *Carex nardina*.

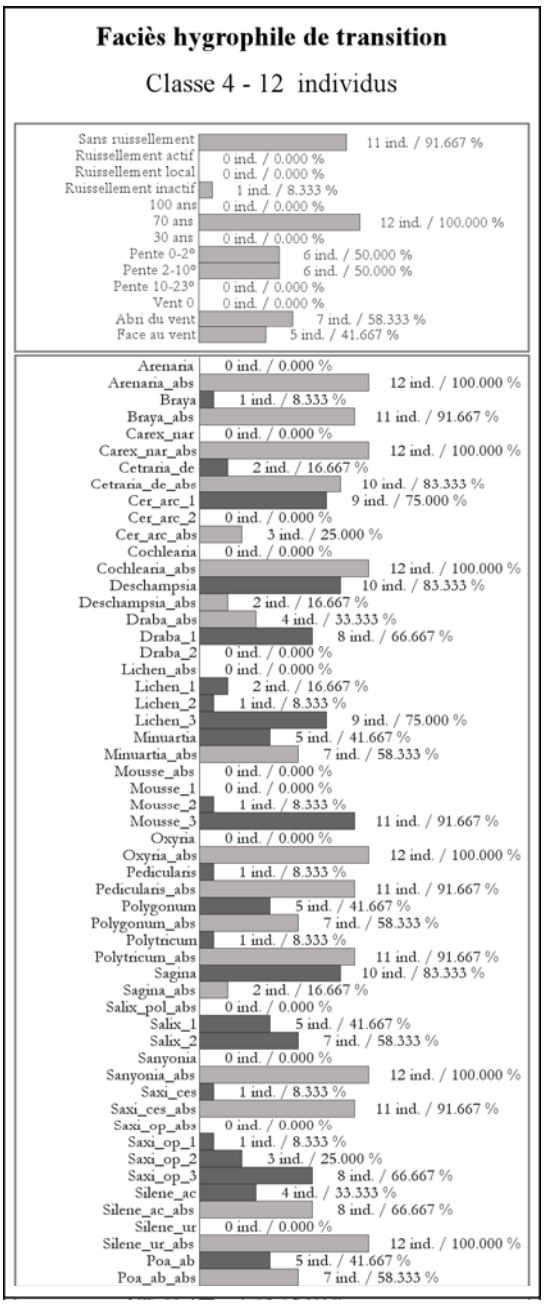


Fig. 122 – Profil de la classe au faciès hygrophile de transition *(d'après les 1 200 relevés). Le profil est divisé en deux parties, avec dans la partie haute les variables environnementales et dans la partie basse les variables floristiques. Les noms des espèces sont écrits en abrégé. Le nom complet est mentionné en annexe. La modalité d'absence de l'espèce est indiquée par :* _abs. *Les modalités de présence sont indiquées en gris foncé. Enfin, la présence de certaines espèces est codée selon trois modalités d'abondance précisées par :* _1 *(< 20 %),* _2 *(20 à 50 %),* _3 *(> 50 %).*

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

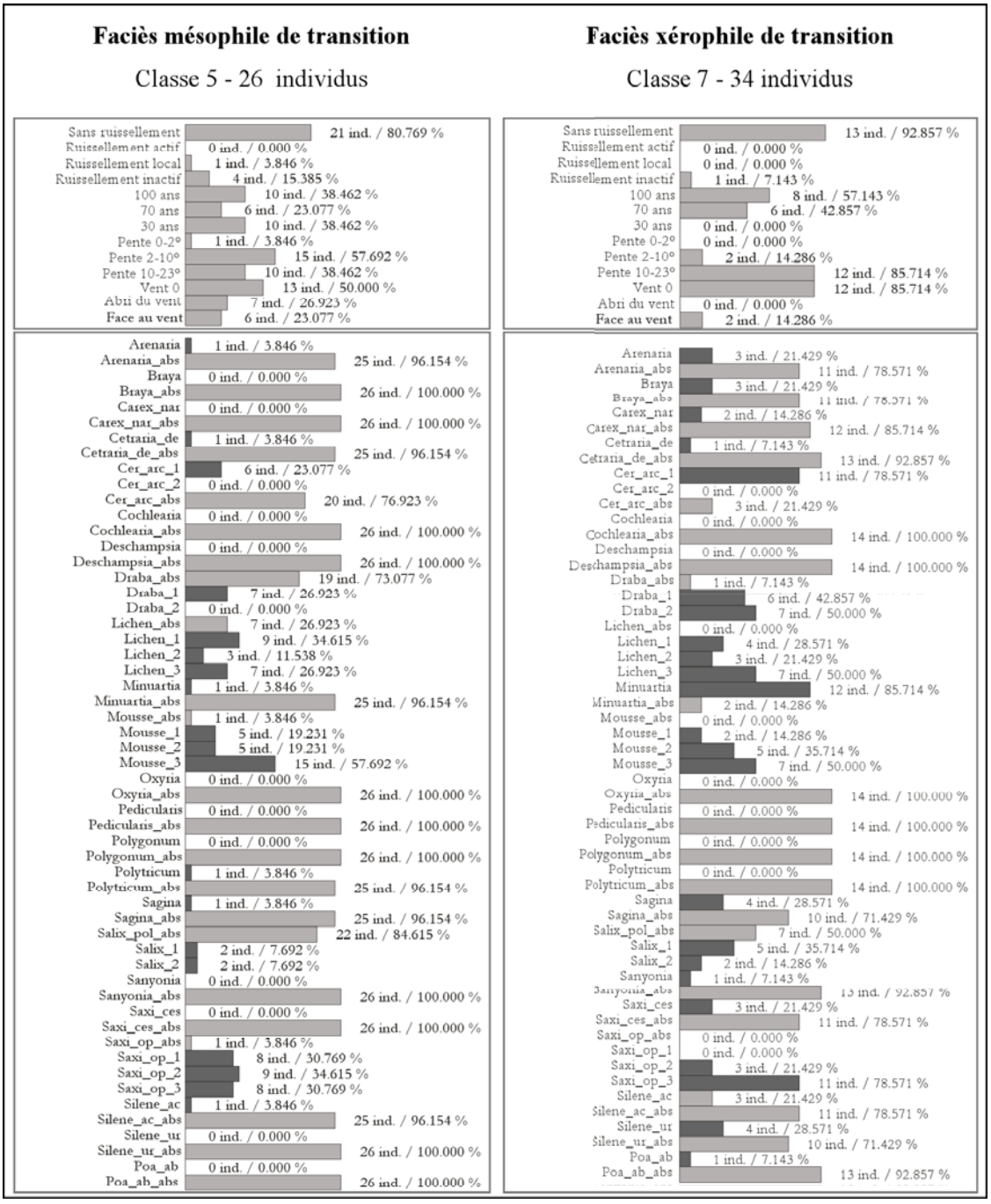


Fig. 123 – Profils des classes aux faciès mésophile et xérophile de transition *(d'après les 1 200 relevés). Le profil est divisé en deux parties, avec dans la partie haute les variables environnementales et dans la partie basse les variables floristiques. Les noms des espèces sont écrits en abrégé. Le nom complet est mentionné en annexe. La modalité d'absence de l'espèce est indiquée par :* _abs*. Les modalités de présence sont indiquées en gris foncé. Enfin, la présence de certaines espèces est codée selon trois modalités d'abondance précisées par : _1 (< 20 %), _2 (20 à 50 %), _3 (> 50 %).*

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

2.4. Faciès évolués

Les faciès évolués correspondent aux secteurs morainiques les plus anciennement stabilisés. Ils sont marqués floristiquement par l'absence d'espèces pionnières comme *Cerastium arcticum* et *Saxifraga cespitosa* et la domination des espèces édificatrices telles *Polygonum viviparum* et *Pedicularis hirsuta,* dont les pourcentages de présence sont supérieurs à ceux des espèces pionnières. Quatre nuances floristiques sont à distinguer au sein de ce faciès en fonction des environnements : humide (classe 12), mésique (classe 6), mixte (classe 8) et xérique (classe 13).

- La nuance **hygrophile** (classe 12 ; fig. 124) est donnée par la présence de *Polygonum viviparum* et *Pedicularis hirsuta* et par l'abondance de *Salix polaris.* Les conditions d'humidité sont toujours associées, ici encore, aux faibles pentes, comprises entre 0-2°, pour 60 % des relevés ainsi qu'aux situations à l'abri du vent. Lorsque les expositions aux vents sont plus contrastées, les conditions édaphiques deviennent davantage mésiques.

- La nuance **mésophile** (classe 6 ; fig. 124) se caractérise par de faibles pourcentages de présence d'espèces hygrophiles, telle *Poa abbreviata,* et xérophiles, telles *Polygonum viviparum* et *Silene uralensis*. *Silene acaulis* et *Salix polaris* sont, par ailleurs, les espèces plus rencontrées dans ce faciès.

- Le groupement **mixte** (classe 8) est le faciès le plus mature de la marge proglaciaire. La position de la classe à l'extrémité de l'axe 2, dans l'espace factoriel (fig. 118), l'illustre et les importants taux de présence des espèces édificatrices en témoignent. Ainsi *Polygonum viviparum* est présente à 100 %, *Silene acaulis* et le lichen *Cetraria delisei* sont présents à 90 % et les lichens sont recensés dans plus de 50 % des relevés. En revanche, on relève à l'intérieur du faciès un mélange d'espèces aux affinités xérophiles comme *Arenaria pseudofrigida* et *Carex nardina*, et d'espèces aux affinités hygrophiles telles *Polygonum viviparum* et *Pedicularis hirsuta.* C'est ce mélange qui donne à ce faciès son caractère mixte. Des nuances floristiques auraient pu être faites, à l'intérieur de cette classe, pour distinguer deux faciès selon les caractères hygrophiles et xérophiles. Cependant, la classe ne regroupe que 11 individus, ce qui ne suffit pas pour constituer deux groupes significatifs.

- La nuance **xérophile** (classe 13 ; fig. 125) est observée sur les fortes pentes (10-23°). Elle est marquée par la domination d'*Arenaria pseudofrigida* avec 60 % de

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

présence. Le faciès regroupe peu d'espèces, traduisant les contraintes de la pente et des conditions sèches qui pèsent sur la mise en place du couvert végétal.

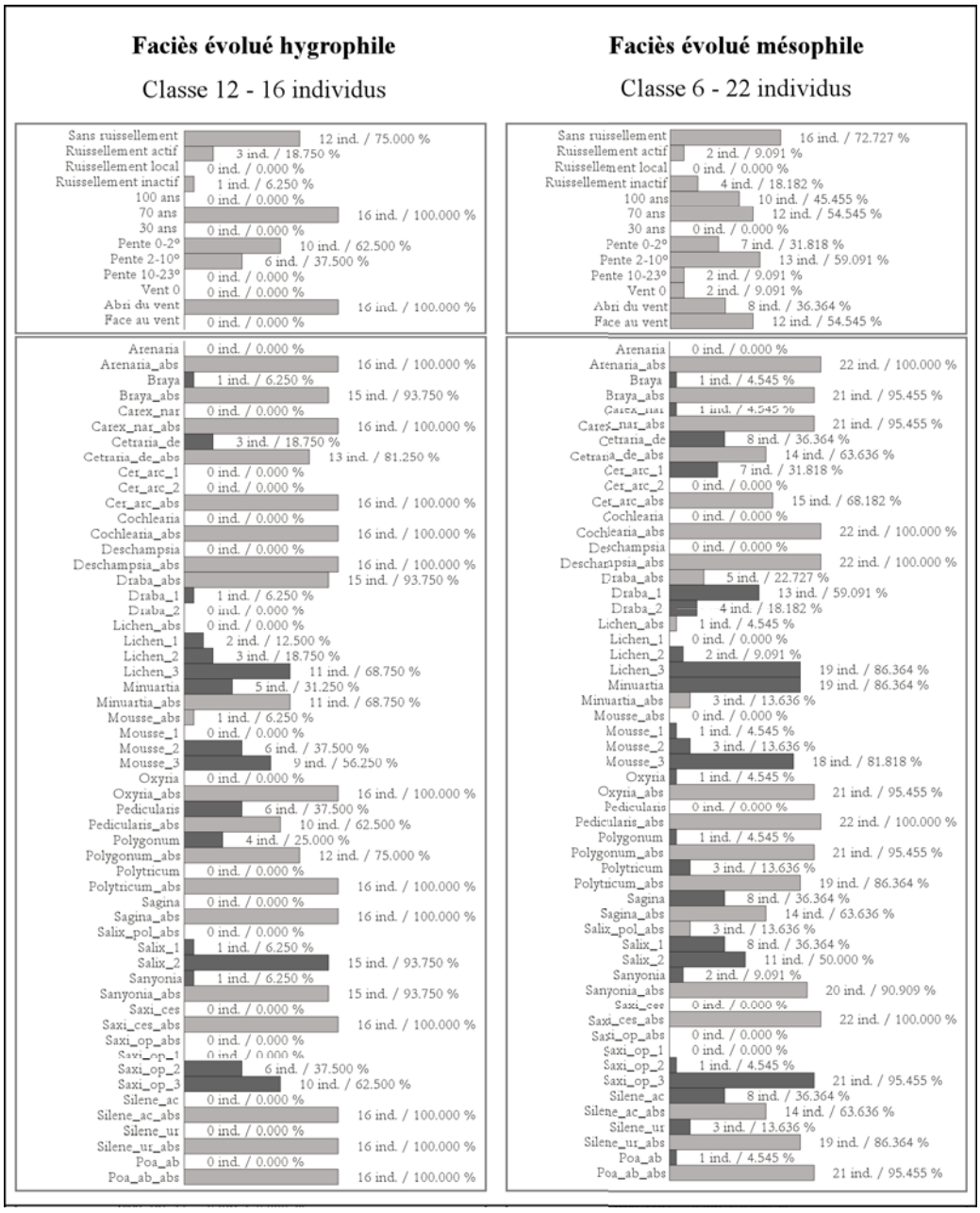


Fig. 124 – Profils thématiques des classes de faciès évolués hygrophile et mésophile *(d'après les 1 200 relevés). Le profil est divisé en deux parties, avec dans la partie haute les variables environnementales et dans la partie basse les variables floristiques. Les noms des espèces sont écrits en abrégé. Le nom complet est mentionné en annexe. La modalité d'absence de l'espèce est indiquée par :* _abs*. Les modalités de présence sont indiquées en gris foncé. Enfin, la présence de certaines espèces est codée selon trois modalités d'abondance précisées par : _1 (< 20 %), _2 (20 à 50 %), _3 (> 50 %).*

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

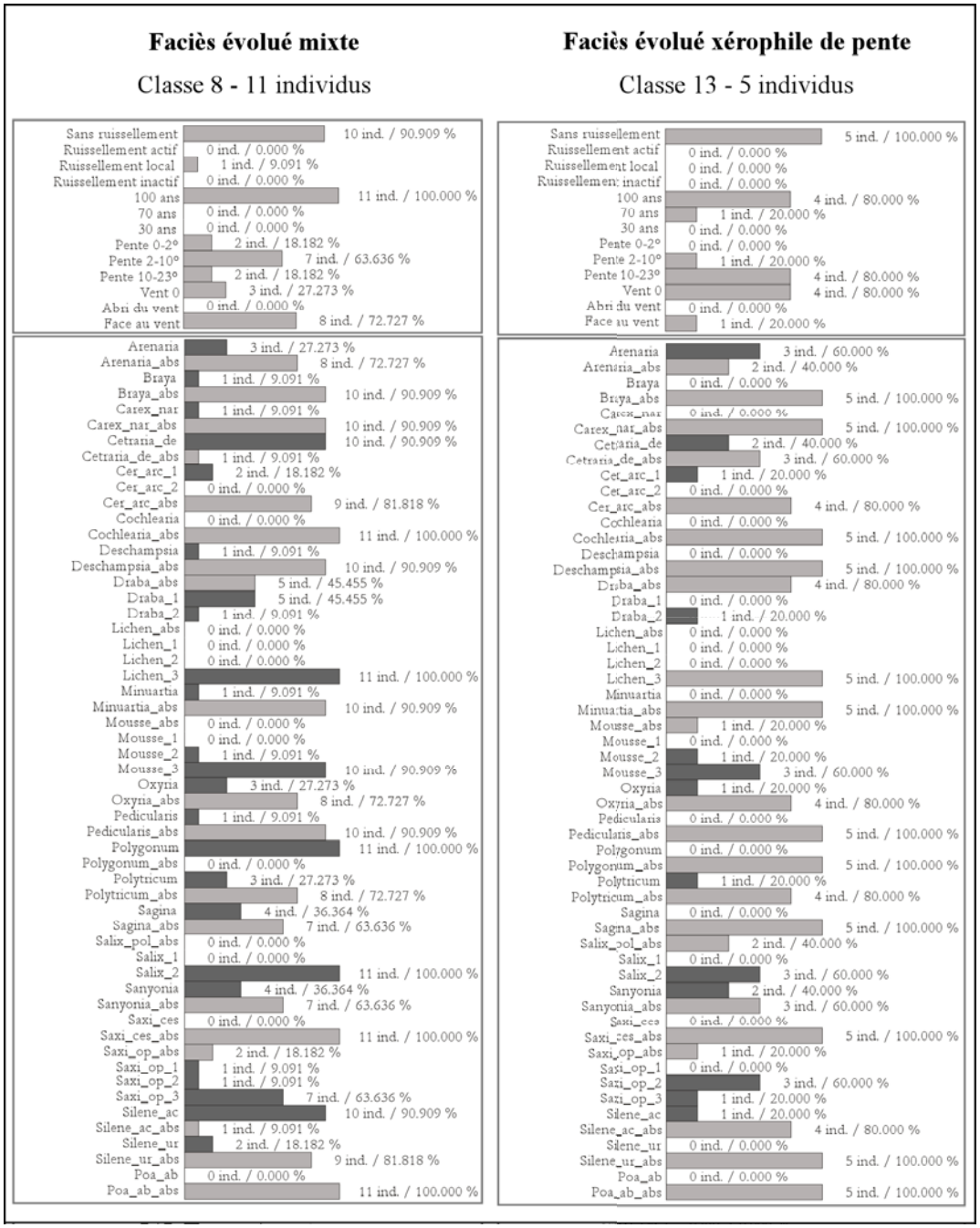


Fig. 125 – Profils des classes aux faciès évolués mixte et xérophile *(d'après les 1 200 relevés). Le profil est divisé en deux parties, avec dans la partie haute les variables environnementales et dans la partie basse les variables floristiques. Les noms des espèces sont écrits en abrégé. Le nom complet est mentionné en annexe. La modalité d'absence de l'espèce est indiquée par :* _abs. *Les modalités de présence sont indiquées en gris foncé. Enfin, la présence de certaines espèces est codée selon trois modalités d'abondance précisées par : _1 (< 20 %), _2 (20 à 50 %), _3 (> 50 %).*

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

La classification, couplée aux résultats de l'AFC, met au jour 13 faciès paysagers. La figure 126 résume le poids relatif de chacun des faciès dans l'échantillonnage. Les faciès minéral et pionnier dominent avec près des deux tiers des relevés et, à l'opposé, les faciès évolués sont minoritaires. Par ailleurs, ce sont les tendances hygrophiles qui dominent au sein des faciès pionniers, mis en avant dans la figure 126, mais aussi au regard de la répartition spatiale. La carte de la répartition spatiale des classes (fig. 127) montre l'importance des conditions humides avec la domination des teintes bleues, qui se concentrent sur les secteurs de faibles pentes dans les zones d'écoulements. Les caractères xérophiles sont minoritaires et associés aux surfaces exposées au vent et aux fortes pentes, notamment celles du vallum.

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

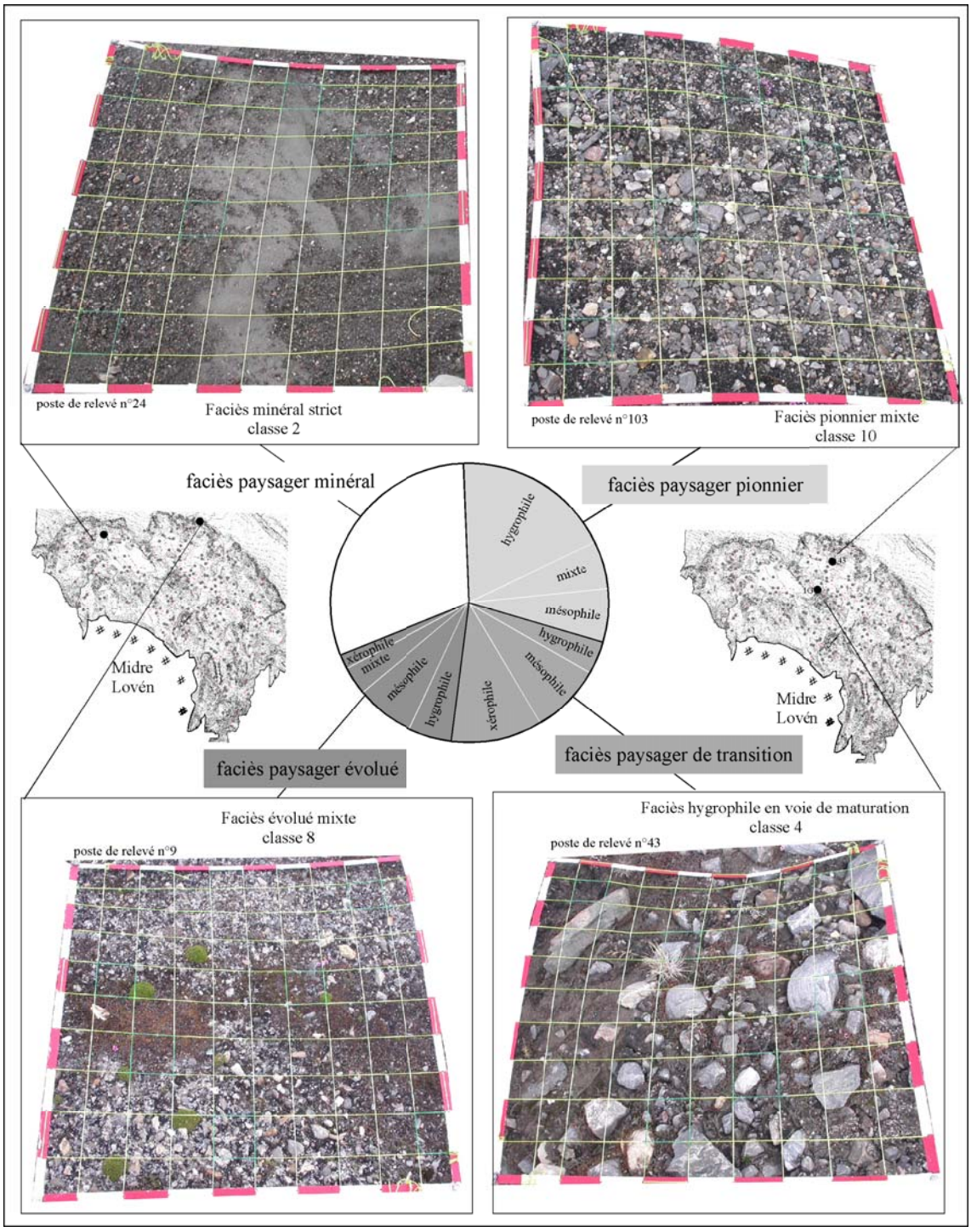


Fig. 126 – Représentation des faciès paysagers dans la marge du glacier Midre Lovén. *La grille se rapportant à la classe 2 correspond à un faciès paysager strictement minéral et porte les marques d'un écoulement récent. La grille de la classe 10 illustre l'amorce de la colonisation végétale avec la présence de* Saxifraga oppositifolia, Draba species, Minuartia rubella, Sagina nivalis, Salix polaris, *des mousses et des lichens. La grille de la classe 4 montre un faciès hygrophile assurant l'interface entre le stade pionnier et un niveau évolué. Le faciès se caractérise par les mêmes espèces que celles du faciès précédent avec en plus* Deschampsia alpina *qui marque la nuance hygrophile. Enfin, le faciès évolué, illustré par la grille de la classe 8, rassemble* Carex misandra, Draba species, Saxifraga oppositifolia, Silene acaulis, Cetraria delisei.

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

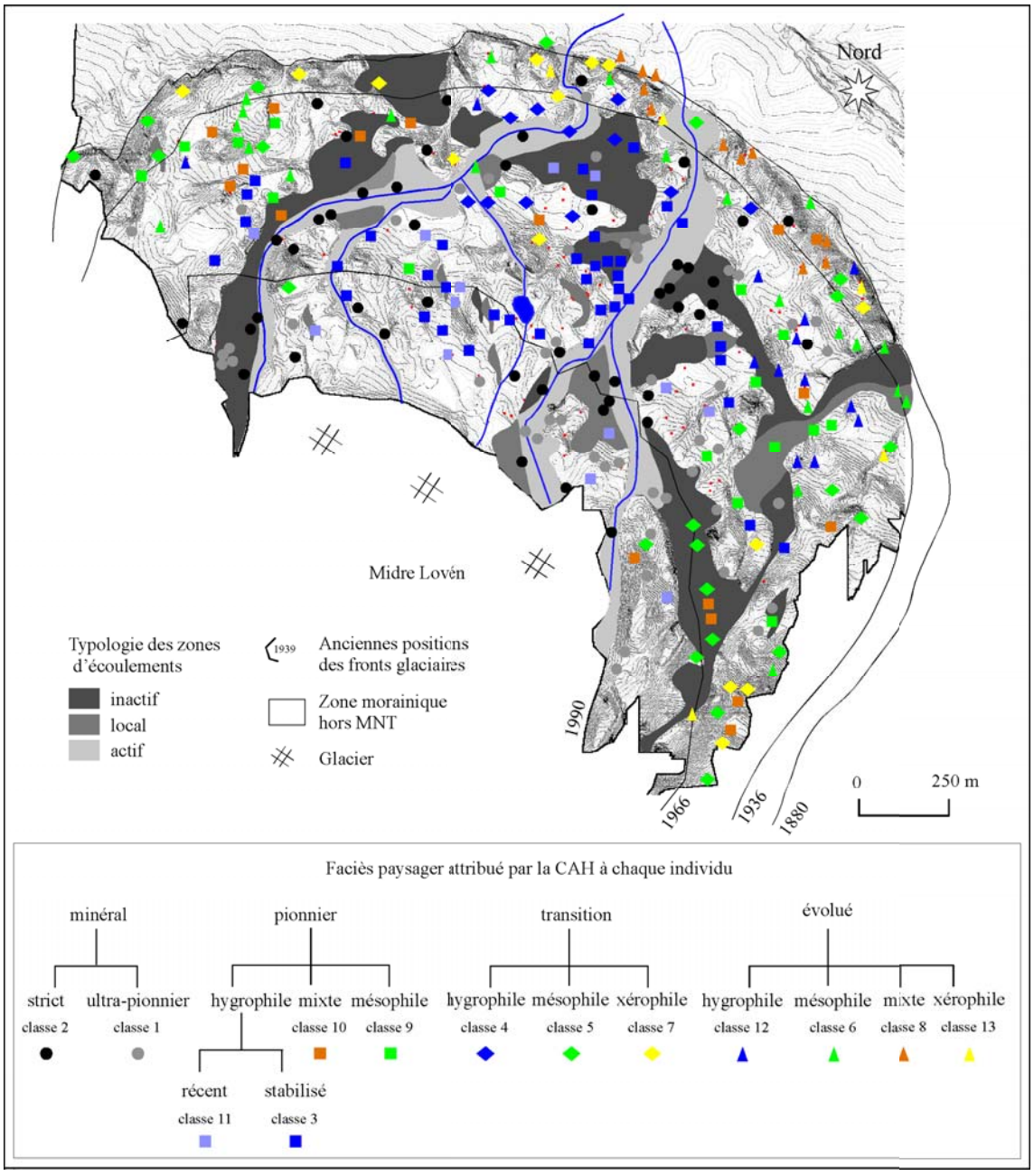


Fig. 127 - Répartition spatiale des 13 classes de faciès paysagers *(d'après 1 200 relevés). Les 300 individus sont localisés dans la marge et pour chacun d'eux est indiqué la classe à laquelle il se rapporte.*

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

3. Essai de diagnostic spatial de la reconquête végétale

Afin de comprendre comment les faciès identifiés plus haut s'articulent et se répartissent dans l'espace proglaciaire, nous avons transformé la localisation ponctuelle de chacune des 13 classes en une information couvrant l'ensemble des surfaces du MNT. La généralisation a été fondée sur un modèle de probabilités conditionnelles (théorème de Bayes) dont le principe consiste à utiliser les profils de probabilités[1] des différentes classes pour cartographier la probabilité d'apparition de la classe pour chaque pixel décrivant la moraine. Toutes les classes ont une probabilité non nulle d'apparaître, la cartographie finale associe à chaque pixel la classe pour laquelle la probabilité est la plus forte (D. Laffly et M. Moreau, 2004).

3.1. Recherche des liens unissant les faciès paysagers et les paramètres environnementaux : la cartographie des classes

Les analyses conjointes des profils de probabilités pondérées et des cartes[2] de probabilités d'apparition de chaque classe révèlent que tous les faciès paysagers n'ont pas les mêmes probabilités d'apparition. Nous avons distingué trois types de paramètres qui déterminent la localisation des faciès, illustré chacun par un type de carte : la morphodynamique, la durée de déglaciation, la pente. Un quatrième type de carte est caractéristique des faciès qui sont faiblement rattachés aux conditions locales. Pour chaque forme de lien spatial, nous avons choisi quelques exemples cartographiques parmi les plus représentatifs ; les autres sont reportés en annexe.

3.1.1. Faciès associés au ruissellement

La figure 128 présente les cartes de probabilités des classes 2 et 11 pour lesquelles les probabilités d'apparition dans la marge sont associées au ruissellement. La classe 2, au faciès minéral, est très nettement rattachée aux secteurs de ruissellement actif dont les zones de probabilités les plus fortes dessinent le réseau hydrographique. La carte témoigne que le ruissellement constitue un facteur limitant essentiel pour la végétation, puisqu'aucune espèce végétale n'a été relevée. La classe a de faibles probabilités d'être

[1] Les profils sont reportés en annexe.

[2] Pour chacune des cartes de probabilité, nous avons adopté des gammes de gris, en fonction de la distribution des probabilités, cela pour une meilleure lisibilité. Aussi, la plus forte probabilité présentée par une gradation en niveau de gris est rarement de 100 %.

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

présente ailleurs dans la marge, témoignant que peu d'espaces ne sont pas propices à la reconquête végétale. De manière moins explicite, la classe 11, faciès pionnier humide, est également rattachée aux secteurs de ruissellement. Les plus fortes probabilités d'apparition sont rattachées aux secteurs de plaines où la dynamique de ruissellement n'est pas un obstacle à la colonisation et où l'environnement est marqué par des conditions relativement humides. Les faibles probabilités de la classe sont associées aux secteurs de plus fortes pentes, notamment ceux du vallum, en clair sur la carte (fig. 128). La classe est rattachée aux plaines.

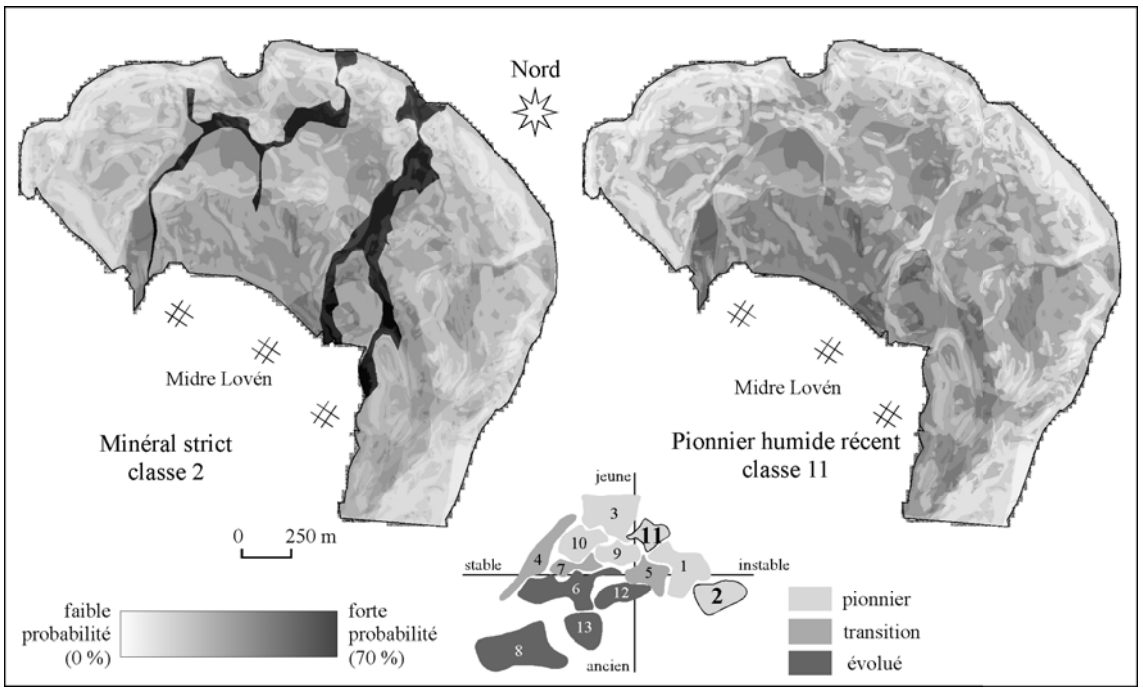


Fig. 128 – Cartes de probabilités des faciès associés au ruissellement *d'après le calcul des probabilités conditionnelles pondérées.*

3.1.2. Faciès associés à la durée de déglaciation

Les faciès pour lesquels la durée de déglaciation des dépôts joue un rôle déterminant dans la mise en place de la végétation ont de fortes probabilités d'apparition liées à une auréole morainique. D'après la figure 129, c'est le cas du faciès ultra-pionnier (classe 1) associé au secteur récemment déglacé, il y a moins de 30 ans. Les probabilités d'apparition de la classe 1 deviennent moins fortes sur les plus anciens dépôts. Ce faciès correspond à l'amorce de la reconquête végétale. Il est à noter que la teinte relativement uniforme de la carte illustre le faible rattachement des faciès ultra-pionniers à des conditions locales particulières. Inversement, la classe 8 est très fortement rattachée à l'auréole morainique déglacée depuis 100 ans qui se détache avec des teintes les plus

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

foncées (fig. 129). La classe 8 correspond au faciès évolué mixte expliquant la faible différenciation, à l'intérieur de l'auréole morainique, selon les classes de pentes.

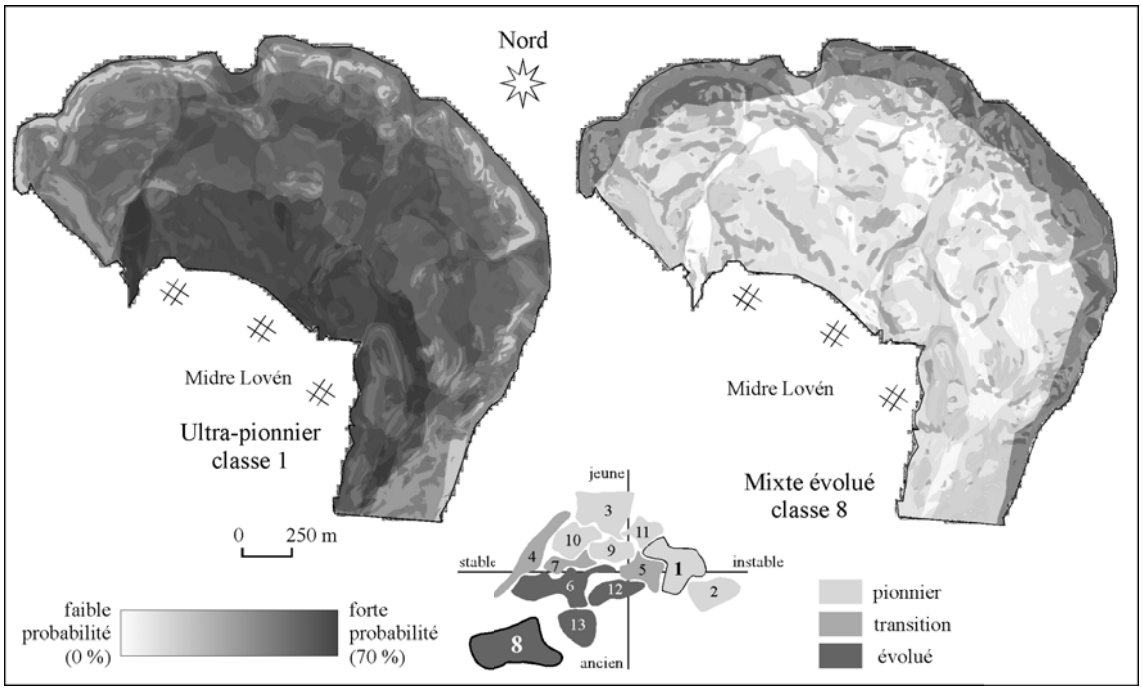


Fig. 129 – Cartes de probabilités des faciès associés à la durée de déglaciation des moraines *d'après le calcul des probabilités conditionnelles pondérées.*

3.1.3. Faciès associés à la pente

Le troisième type de faciès est lié aux valeurs de pente comme l'illustre la classe 7 (fig. 130), nuance xérophile du faciès paysager de transition, qui a de fortes probabilités d'apparition sur les secteurs de fortes pentes. Inversement, cette classe a de très faibles probabilités de présence sur les secteurs de pente intermédiaire, nulle sur les secteurs plans. La classe 10, faciès pionnier mixte, est rattachée aux pentes moyennes. Le détail du relief morainique se détache très distinctement, en grisé, et dessine le système de pentes en laissant, en plus clair, les secteurs plans et ceux de fortes pentes réservés à la classe 7. La classe 10 est rattachée à des pentes indépendamment de la durée de déglaciation des dépôts.

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

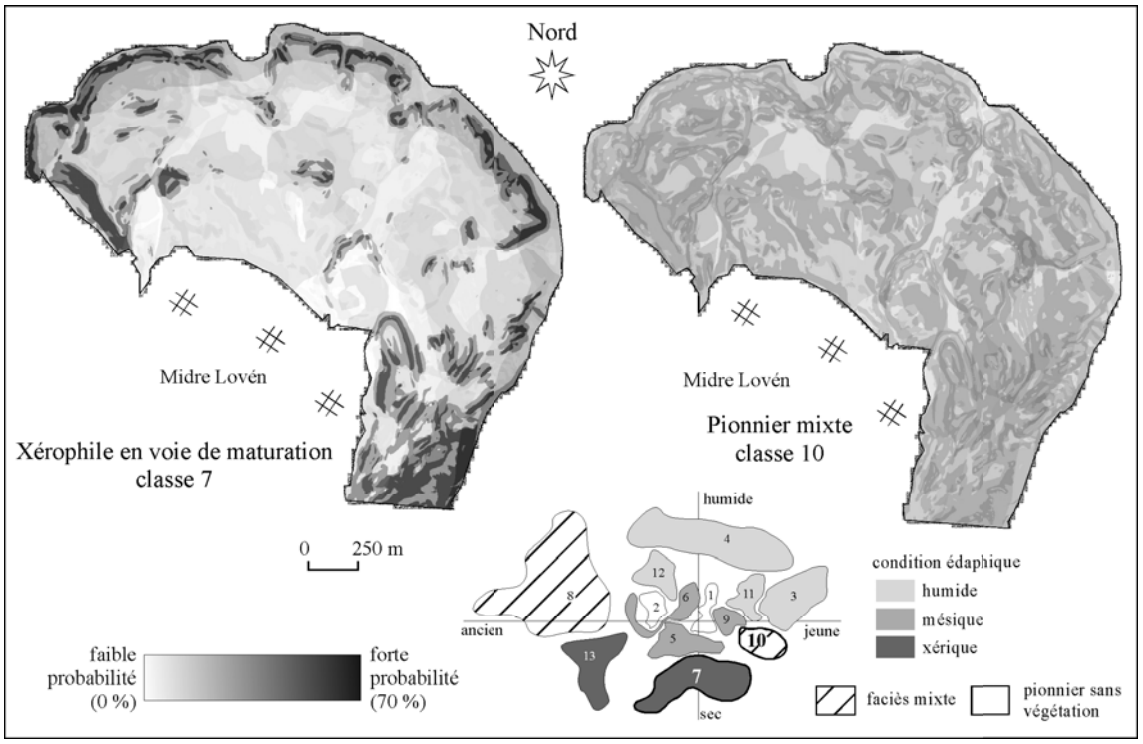


Fig. 130 – Cartes de probabilités des faciès associés à la pente *d'après le calcul des probabilités conditionnelles pondérées.*

3.1.4. Faciès faiblement associés aux paramètres environnementaux

Certaines classes présentent peu ou pas de contrastes dans leur répartition spatiale ce qui se traduit par des cartes aux teintes uniformes. Ces cartes ne permettent pas de rattacher les faciès à une caractéristique environnementale particulière. Par exemple, la classe 6 (fig. 131), d'une manière générale, a de faibles probabilités d'apparition dans la marge, aucun secteur ne semblant être associé, plus qu'un autre, à la présence du faciès. De même, la classe 9 (faciès mésophile) ne présente pas de probabilités de localisation contrastée, ses plus fortes probabilités sont rattachées à l'auréole morainique centrale, mais elles demeurent néanmoins relativement faibles. Ces deux classes sont mésophiles, expliquant leur distribution sur des milieux variés, sans marque d'attachement particulier à certaines conditions mésologiques comme les faciès hygrophiles et xérophiles.

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

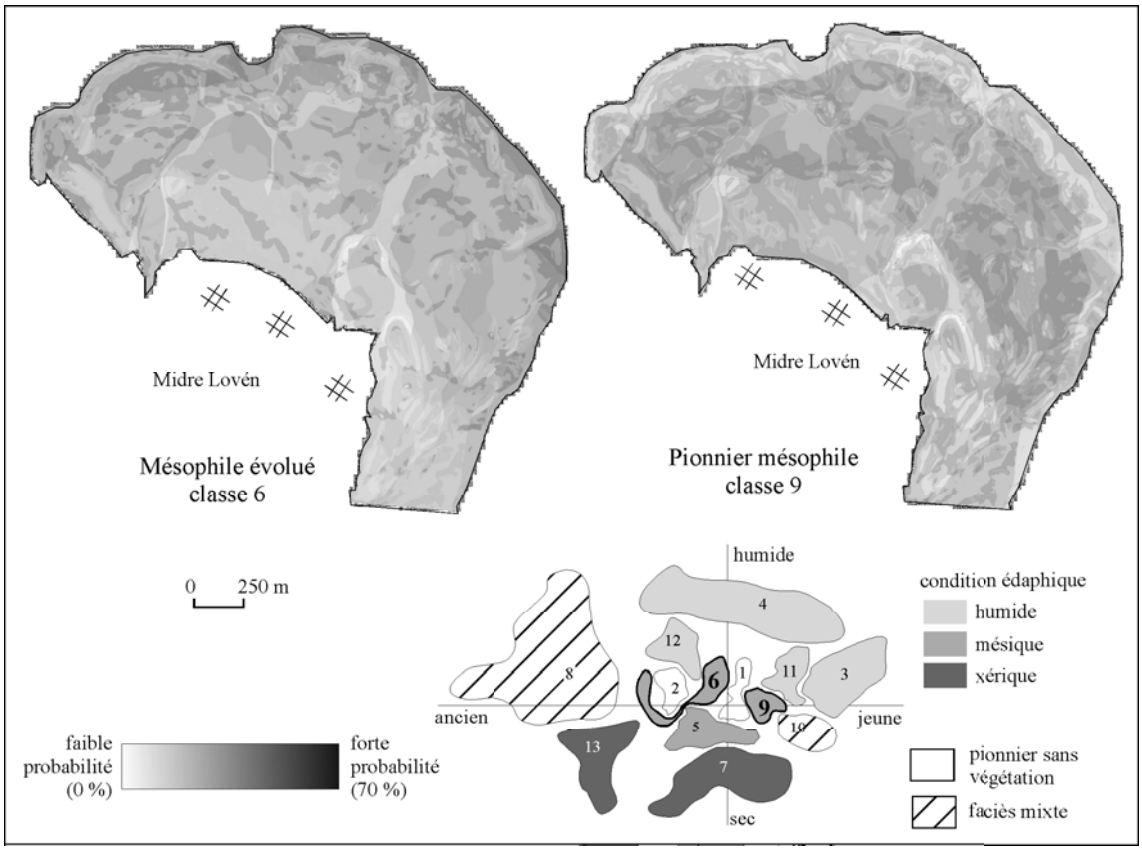


Fig. 131 – Cartes de probabilités des faciès associés à des paramètres environnementaux*, d'après le calcul des probabilités conditionnelles pondérées.*

3.2. Répartition spatiale des 13 classes de faciès : cartographie de synthèse

Après avoir observé les paramètres environnementaux qui unissent chaque faciès aux secteurs de la marge, nous abordons l'analyse de la répartition spatiale des 13 faciès. Nous avons vu que toutes les classes ont des probabilités, plus ou moins fortes, d'être rattachées à chacune des surfaces. Pour une surface caractérisée par divers paramètres environnementaux, nous cherchons celui qui détermine le rattachement du faciès au site et, en terme d'occupation spatiale, le paramètre qui concerne les plus importantes surfaces. À cette fin, l'ensemble des cartes de probabilités, établies pour chacune des classes, a été combiné en une carte de synthèse des faciès paysagers (fig. 132). Parmi les 13 valeurs de probabilités pondérées attribuées à un pixel, la plus forte valeur a été retenue pour attribuer la classe au pixel. *In fine*, la carte obtenue spatialise 10 des 13 classes de faciès paysagers. Les classes 3, 5 et 6 ne sont pas représentées car leurs valeurs de probabilités sont toujours inférieures à celles d'une ou plusieurs autres classes.

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

Les trois auréoles morainiques[1] se détachent nettement à la lecture de la carte (fig. 132). La durée de déglaciation apparaît donc comme le paramètre fondamental dans la structuration des faciès paysagers. Une lecture détaillée de chacune des auréoles permet d'observer les nuances paysagères induites par les conditions topographiques locales. Par exemple, la première auréole morainique, déglacée depuis 30 ans, est dominée par un faciès pionnier hygrophile (classe 11) traduisant les conditions d'engorgement et d'humidité des dépôts à proximité du front glaciaire. Le faciès devient mixte sur les pentes (classe 10, en jaune), et prend des caractères xérophiles sur les plus fortes pentes avec la classe 7.

L'auréole morainique déglacée depuis 70 ans est moins nettement dominée par un faciès paysager. La classe 9 (faciès pionnier mésophile) se concentre sur les faibles pentes, à l'abri du vent, et rassemble des espèces de groupement pionnier stable telles *Salix polaris* et *Saxifraga oppositifolia*. La classe 12 est caractérisée par les mêmes conditions topographiques que la classe 9, mais avec des éléments floristiques plus matures liés aux plus fortes probabilités de rencontrer le lichen *Cetraria delisei* et *Polygonum viviparum*. Comme pour l'auréole morainique déglacée depuis 30 ans, les mêmes faciès rattachés aux pentes sont rencontrés avec la classe 10, à laquelle succède la classe 7 pour les plus fortes pentes. Enfin, la classe 4, faciès hygrophile de transition, se localise à l'interface des auréoles morainiques déglacées depuis 70 et 100 ans, illustrant la caractéristique du faciès de transition entre les faciès paysagers des deux secteurs morainiques.

Les dépôts morainiques déglacés depuis 100 ans sont caractérisés par deux faciès paysagers différenciés selon la pente. La classe 8, faciès mixte, est associée aux surfaces planes et faiblement inclinées (< 10°). On y observe une forte probabilité de rencontrer des espèces matures telles *Carex nardina* et le lichen *Cetraria delisei*. La classe 13, faciès xérophile, souligne le réseau de fortes pentes du vallum et marque la nuance floristique xérophile avec *Arenaria pseudofrigida.*

[1] Nous rappelons que les limites des auréoles morainiques correspondent aux dessins des anciens fronts glaciaires établis à partir des photographies aériennes.

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

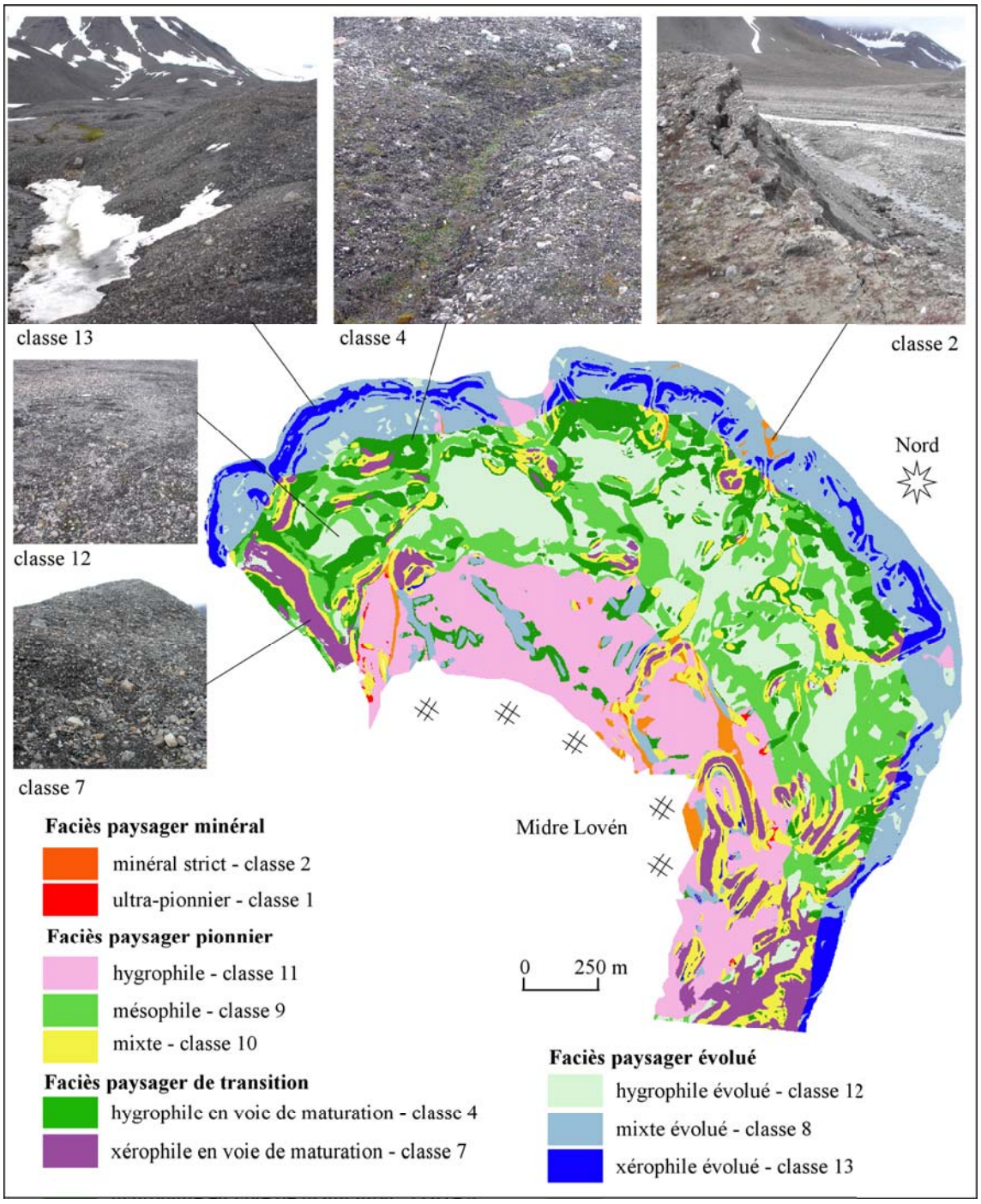


Fig. 132 – Carte de probabilités des faciès paysagers sur la marge du glacier Midre Lovén. *Les classes sont attribuées à chaque pixel de l'image pour lequel la valeur de probabilités de la classe est la plus forte. Les clichés illustrent les faciès paysagers (juillet 2004).*

Une lecture détaillée fait ressortir que la classe 11, précédemment identifiée comme caractéristique des dépôts déglacés depuis 30 ans, est associée à certains secteurs de l'auréole morainique déglacés depuis 100 ans. La forte probabilité de rencontrer la classe 11 est alors liée à la dynamique de ruissellement qui a remobilisé les dépôts. Les surfaces rajeunies sont colonisées par un couvert végétal pionnier qui se démarque du

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

couvert évolué rencontré sur l'auréole morainique déglacée depuis 100 ans. De même, la classe 2, au faciès strictement minéral, traverse les trois auréoles morainiques le long des talwegs où le développement de la végétation n'est pas possible.

L'interprétation de la carte des probabilités d'apparition des faciès paysagers souligne la complexité de la mise en place de la reconquête végétale. La durée de déglaciation est le facteur dominant nuancé secondairement par le ruissellement, l'exposition au vent, les valeurs de pente et les conditions environnementales qui en découlent (humide-sec). Par ailleurs, la cartographie montre que l'augmentation de la durée de déglaciation s'accompagne d'une diminution de la diversité des faciès paysagers. Ainsi, l'auréole morainique déglacée depuis 30 ans rassemble 7 classes, l'auréole déglacée depuis 70 ans, 5 classes et enfin l'auréole déglacée depuis 100 ans, 4 classes. In fine, *peu de secteurs ont une forte probabilité de ne pas avoir de développement végétal. L'espace proglaciaire prend donc la forme d'une mosaïque de vastes surfaces potentiellement ouvertes à la reconquête végétale.*

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

Conclusion

La typologie issue de l'analyse multivariée a permis de différencier 13 classes dont la cartographie, à l'intérieur de l'espace proglaciaire, a permis de mettre en évidence la complexité de la mise en place de la végétation. Loin de prendre la forme d'un simple mouvement d'enrichissement des espèces en relation avec la durée de déglaciation et la maturation du couvert végétal, la reconquête végétale met en place une mosaïque de faciès paysagers en réponse aux paramètres environnementaux. L'impact de ces paramètres se distingue en fonction des échelles auxquelles on aborde l'espace proglaciaire.

- À l'échelle de la marge, la durée de déglaciation et la nature des écoulements déterminent les niveaux de progression des cortèges floristiques entre groupements pionniers et évolués. Dans ce cadre, le ruissellement participe au maintien de groupements pionniers dans les secteurs où des groupements matures prennent place, notamment au sein des auréoles morainiques anciennement déglacées.
- Au sein de chaque secteur déglacé, des nuances floristiques s'expriment en réponse aux conditions édaphiques. Ces conditions sont étroitement associées à l'environnement topoclimatique (conditions de pente et d'exposition au vent). Le passage d'un niveau de pente à un autre, ainsi que les changements d'exposition par rapport au vent sont floristiquement signés par des faciès hygrophiles, mésophiles puis xérophiles et ce pour tous les stades d'évolution du couvert végétal.

Le modèle de probabilités conditionnelles que nous avons utilisé pour la cartographie des classes de faciès a également été appliqué dans une démarche exploratoire de cartographie des espèces une par une. Les résultats[1] sont de qualité inégale. Peu de cartes reflètent clairement les liens mis en évidence par les analyses multivariées. À titre d'exemple, nous présentons les cartes de probabilités d'absence et de présence de *Draba species*. Les cartes de *Draba species* indiquent que l'espèce a de très faibles probabilités d'absence dans la marge proglaciaire (fig. 133 a). Cependant, les cartes de probabilités de présence indiquent également de faibles probabilités d'apparition de

[1] L'ensemble des cartes est reporté en annexe.

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

l'espèce (fig. 133 b, c) et ce pour les deux niveaux d'abondance, ce qui ne correspond pas à la distribution attendue de *Draba species*. On a vu en effet que cette espèce est ubiquiste et pionnière, dans le sens où elle colonise l'ensemble des dépôts, relativement indifféremment à la durée de déglaciation et aux conditions topographiques. Le modèle de probabilités n'est pas pertinent à un niveau de description aussi fin.

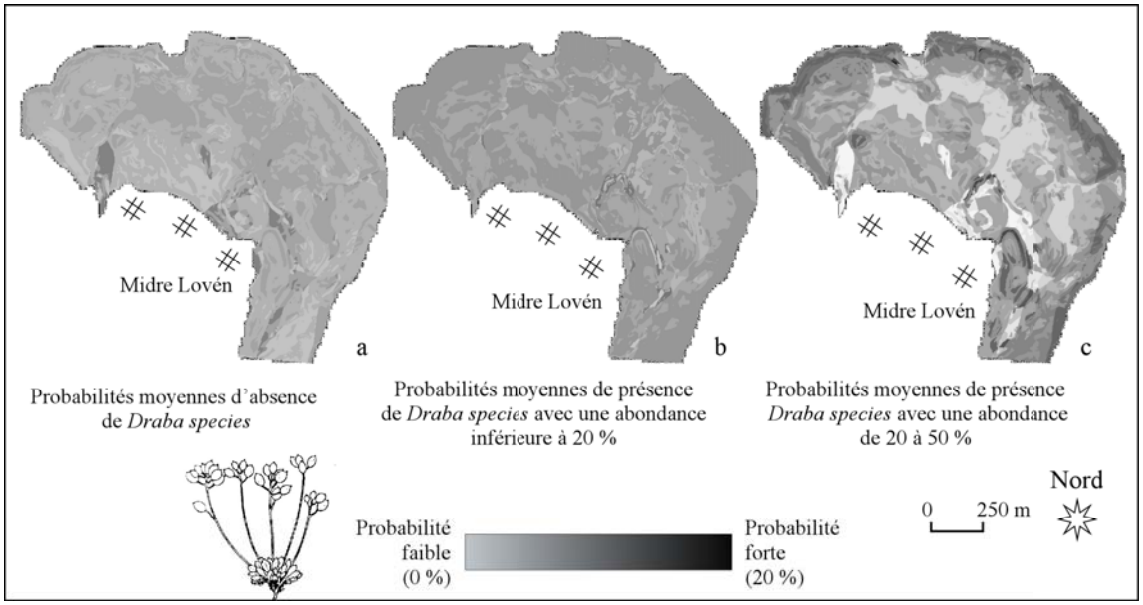


Fig. 133 – Cartes de probabilités d'absence et de présence de* Draba species *sur la marge du glacier Midre Lovén. *D'après les probabilités conditionnelles moyennes calculées à partir des 13 valeurs données pour chacune des classes (dessin de O.I. Rønning, 1996).*

La microtopographie, la microclimatologie, la durée de déglaciation et les modalités de ruissellement ne sont pas des variables suffisamment explicatives pour que le modèle de probabilités soit cohérent. Nous touchons là une des limites inhérentes à la représentativité des variables environnementales utilisées pour spatialiser les plantes observées ponctuellement. Il conviendrait d'avoir recours à d'autres sources d'informations disponibles sous forme numérique. Malheureusement, ce choix est limité. Par exemple, il semblerait que la répartition du manteau neigeux joue un rôle majeur pour expliquer la distribution spatiale des plantes. Ce type d'information n'existe pas en l'état. Il faudra l'acquérir dans le futur soit *in situ* soit à partir d'images radar à très haute résolution spatiale (par exemple radarsat 2).

Le modèle est néanmoins correct à l'échelle des faciès comme nous l'avons vu. On pourra donc passer à une phase décisionnelle en l'appliquant à d'autres sites

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

comparables, par exemple la marge du glacier voisin Austre Lovén pour laquelle on dispose également d'un MNT à très haute résolution spatiale. En supposant que les variables environnementales utilisées puissent être disponibles d'une manière générale, le modèle de probabilités pourrait ainsi être appliqué à l'ensemble des marges proglaciaires. L'intérêt serait double : d'une part, la validité du modèle lui-même pourrait être analysée en détail, d'autre part, les cartographies offriraient un bilan floristique de ces nouveaux espaces récemment déglacés.

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

Conclusion de la troisième partie

L'analyse multivariée conduite à très haute résolution spatiale a permis de mettre en évidence un ensemble de facteurs contrôlant les modalités de la reconquête végétale. La figure 134 présente une synthèse de la chronologie des principales modalités de mise en place du couvert végétal dans l'espace proglaciaire.

- Quelques années après le retrait du glacier, les secteurs récemment déglacés sont dépourvus de végétation phanérogamique. La reconquête végétale n'a pas encore débuté.
- Dans les premiers temps de la colonisation végétale, les faciès sont dominés par le minéral avec quelques espèces pionnières. La faible diversité floristique ne permet pas de mettre en évidence des différenciations végétales en réponse aux multiples conditions édaphiques.
- Dans un deuxième temps, avec le développement du couvert végétal, des cortèges floristiques différenciés apparaissent par rapport aux milieux, notamment au profit des environnements humides.

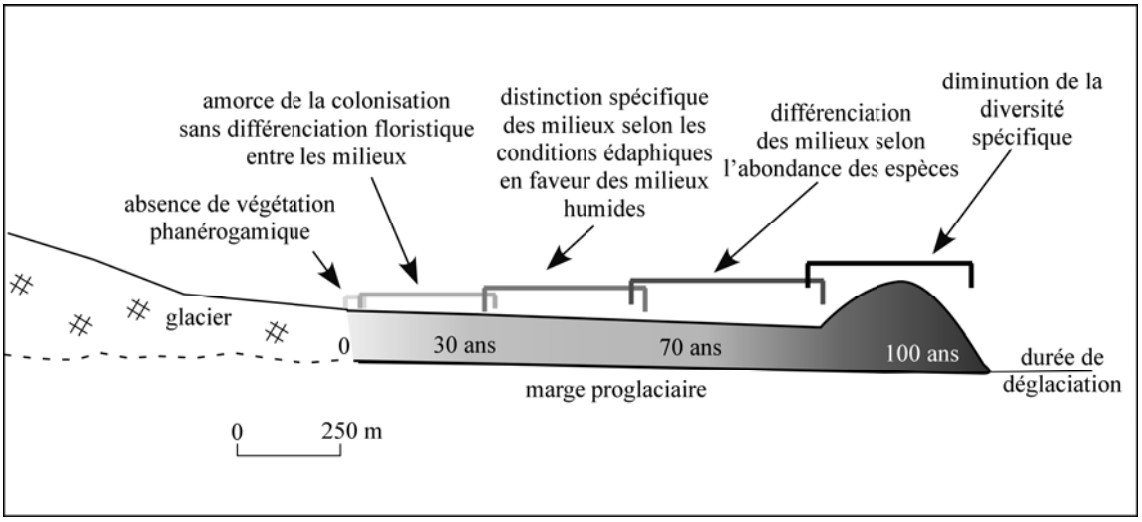


Fig. 134 – Schéma théorique des modalités locales de la reconquête végétale sur la marge du glacier Midre Lovén.

- Dans une troisième étape, la différenciation, entre les milieux, s'exprime par l'abondance des espèces, qui oppose les environnements humides aux milieux xériques. Les milieux mésiques ne portent pas de caractère d'abondance, mais concentrent la plus grande diversité spécifique et permettent le côtoiement d'espèces aux affinités diverses.
- Dans une dernière étape, celle des stades matures, une diminution de la variété des faciès marque un appauvrissement de la diversité spécifique. Cette baisse peut être liée au moindre morcellement de la végétation qui entraîne une compétition spatiale entre les faciès. Les environnements aux caractères édaphiques marqués, xériques des fortes pentes du vallum et engorgés des bas-fonds, sont répulsifs et ne rassemblent que peu d'espèces. Ailleurs, le développement floristique est plus marqué.

L'analyse intégrée conduite à l'intérieur de la marge à un niveau très fin d'observation dégage des structures liées aux conditions environnementales qui viennent s'ajouter à celles induites par l'âge des surfaces. Les stratégies d'échantillonnage pour sélectionner les points d'observation et la méthode de relevé elle-même sont des éléments clés dans la mise en place de la démarche exploratoire que nous avons retenue. La méthodologie de traitement leur est ainsi intimement liée.

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

Conclusion générale

> *Il est vrai que le nombre d'espèces a beaucoup changé tout au long de l'histoire de la Terre. L'évolution à l'œuvre pendant des milliards d'années en fait continuellement apparaître de nouvelles tandis que d'autres disparaissent. En régime de croisière, entre les périodes cataclysmiques de la géologie (chutes de météorites, volcanisme à l'échelle planétaire, etc), des perturbations variées, causées par exemple par des changements climatiques, entraînent l'élimination de certaines espèces. Mais ces pertes sont compensées par l'arrivée de nouvelles espèces mieux adaptées* (H. Reeves, 2003).

Apport du suivi diachronique de la reconquête végétale sur cinq marges proglaciaires au Spitsberg

L'observation de la végétation à l'intérieur de cinq marges proglaciaires nous a permis de définir les particularités floristiques de la moraine par rapport à celles de la toundra. On y observe principalement une plus grande diversité d'espèces pionnières. Un échantillonnage statistique rigoureux, construit de manière identique sur les cinq sites, couplé avec la datation des dépôts à partir des photographies aériennes, nous a permis de mettre en évidence les étapes significatives de la reconquête végétale, semblables pour les cinq sites. Ces similarités signent une évolution comparable de la végétation où, dans l'espace et le temps, se relaient les espèces ultra-pionnières et les espèces édificatrices, éléments constitutifs de la toundra. Au-delà de ces caractéristiques communes, certaines modalités régionales dans la reconquête végétale ont été mises en évidence, comme la proximité du littoral et de la glace sous les débris, qui participent à une diversité spécifique entre les secteurs déglacés.

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

Contribution méthodologique d'une approche instrumentée par Système d'Information Géographique

L'apport méthodologique majeur de ce travail est l'objectivation du phénomène de reconquête végétale par une méthode instrumentée et reproductible. Celle-ci repose sur les apports de la statistique, notamment dans la définition de stratégies d'échantillonnage ajustées. Elle implique ensuite l'exploitation systématique des données collectées, par le tri à plat et l'analyse multivariée, puis par un modèle de probabilités. Le recours à des bases de données numériques, en nous fournissant les clés de la répartition des éléments observés, nous a permis d'élargir la portée de nos conclusions à l'espace dans sa continuité. Nous retenons principalement que :

- le MNT est une source d'informations très riche pour décrire les variables environnementales de surface, qui, grâce au positionnement précis par GPS, sont liées à l'information ponctuelle collectée sur le terrain ;
- le MNT est également un complément d'informations face aux limites de l'utilisation des images satellites et des photographies aériennes pour la cartographie dans les secteurs récemment déglacés ;
- l'ensemble des variables associées dans une méthodologie bayésienne fournit une solution méthodologique appréciable pour montrer les liens significatifs entre les observations de terrain *in situ* et les données de l'image. Cette approche offre la possibilité de produire des cartes thématiques qui décrivent les dynamiques de végétation en relation avec les caractéristiques environnementales.

Les données qui alimentent le SIG ont apporté plusieurs éléments de réponses quant à la connaissance et à la cartographie de l'évolution des secteurs déglacés depuis 100 ans. Associées aux observations conduites pour les cinq marges, les analyses nous permettent de décliner les modalités de la reconquête végétale à l'échelle du Spitsberg.

Modalités régionales et locales de la reconquête végétale au Spitsberg

Combinée à l'approche locale conduite sur la marge du glacier Midre Lovén, l'approche conduite à l'échelle de cinq marges nous permet de distinguer les paramètres environnementaux qui structurent le couvert végétal en fonction des niveaux d'échelles d'observation (fig. 135).

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

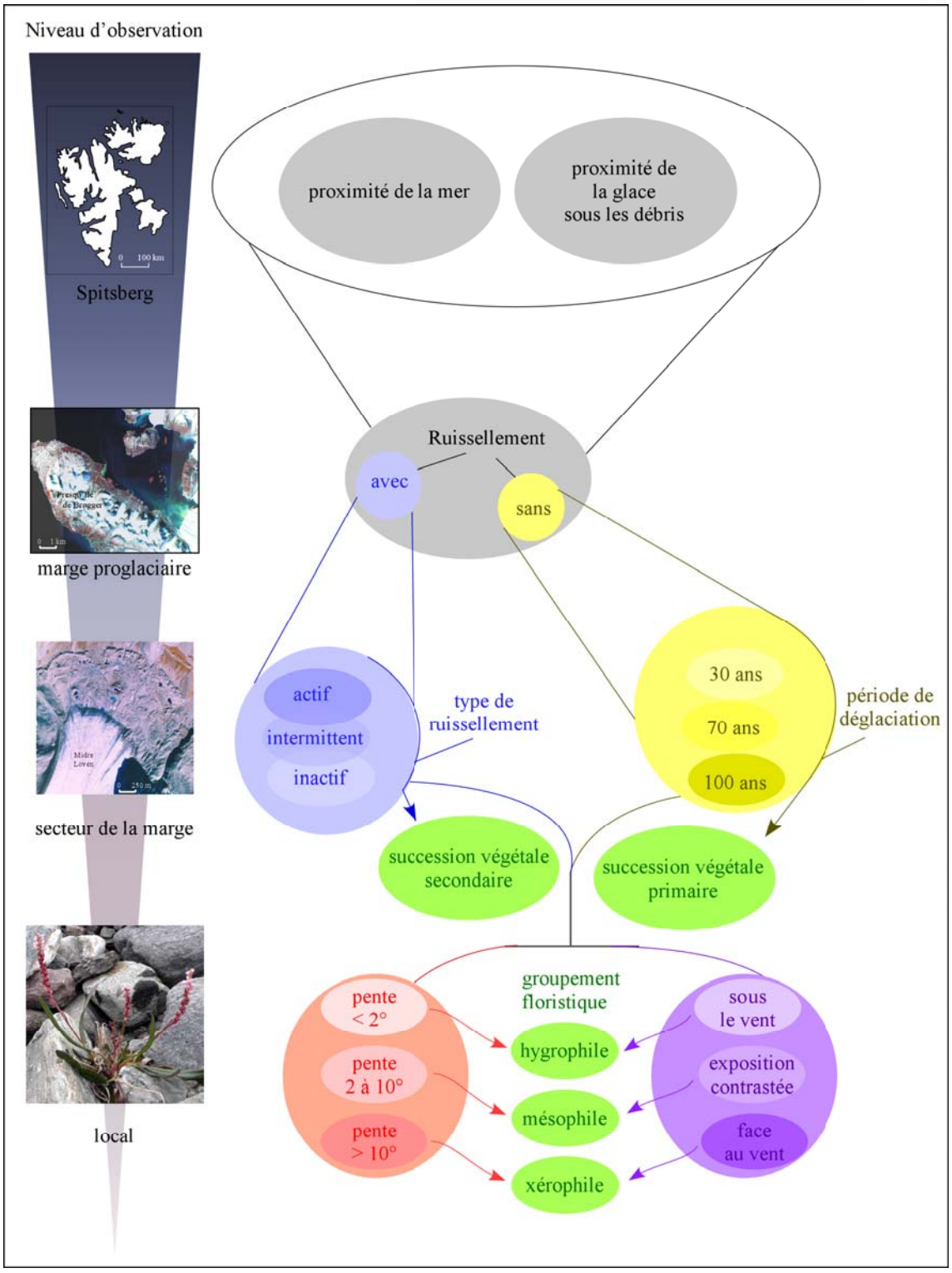


Fig. 135 – Schéma des facteurs environnementaux intervenant dans la reconquête végétale selon les niveaux d'observation.

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

- **Différenciations régionales des rythmes de reconquête végétale entre les marges proglaciaires du Spitsberg.**

Deux facteurs jouent un rôle prédominant :

- **l'épaisseur de la couche de débris**, qui recouvre les noyaux de glace préservés à l'intérieur des moraines. Lorsque la couche de débris est fine, la reconquête végétale est bloquée ou fortement ralentie. Dès que la couche de débris est suffisamment épaisse pour isoler le couvert végétal du froid de la glace, la progression végétale est significative.

- **la proximité du fjord** semble également ralentir la reconquête végétale. L'effet s'estompe graduellement avec l'augmentation de la distance à la mer. Par ailleurs, une diversité floristique propre à l'environnement littoral se marque sur les espaces proglaciaires.

- **À l'intérieur de chaque marge proglaciaire : le rôle du ruissellement**

La durée de déglaciation a longtemps été avancée comme jouant le rôle principal dans la différenciation des faciès paysagers dans l'espace proglaciaire. Nous avons constaté que le ruissellement en est l'élément clef. L'accroissement de la durée de déglaciation des dépôts n'est possible que si le ruissellement ne remobilise pas les surfaces. Comme le montre la figure 135 :

- sur les secteurs restés en place s'installe une **succession végétale primaire** ;

- parallèlement, sur les secteurs affectés par le ruissellement, selon la nature des écoulements, se met en place une **succession végétale secondaire**.

- **Entre les secteurs intramorainiques**

Deux paramètres environnementaux singularisent les groupements floristiques dans la marge en fonction des conditions édaphiques qu'ils induisent :

- la **pente** : les faibles pentes caractérisent les stations les plus humides, majoritairement le siège des écoulements, et les fortes pentes correspondent aux secteurs les plus secs (surfaces égouttées, isolées des écoulements) ;

- le **vent** : sur les surfaces exposées sont rencontrées les milieux xériques et sur les surfaces abritées, les stations humides. Lorsque les expositions sont contrastées, pour moitié à l'abri et exposée, les milieux mésiques prennent place.

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

Ces deux paramètres vont induire des groupements floristiques hygrophile, mésophile et xérophile (fig. 135).

La connaissance acquise au cours des observations détaillées de la végétation révèle l'extrême richesse de ces milieux et les fortes potentialités de reconquête. Seuls quelques espaces, peu étendus, sont impropres à la colonisation végétale.

Le potentiel spatial des marges proglaciaires pour la végétation : une réponse aux changements climatiques

L'ensemble des facteurs environnementaux influençant la répartition du couvert végétal dans les marges proglaciaires, montrent que ces espaces sont loin d'être uniformes en terme paysager. Les différents stades de la reconquête végétale des moraines, les décalages des rythmes de reconquête entre les marges et les caractéristiques spécifiques en réponse à chaque environnement intramorainique font des marges proglaciaires des sites d'une grande richesse spécifique. Par ailleurs, ce sont des espaces où l'on rencontre des espèces propres aux milieux pionniers, alors que ces dernières sont réparties ponctuellement dans les secteurs de toundra. Elles y sont fortement concurrencées et ne sont présentes que dans les secteurs où le couvert végétal n'est pas suffisamment développé pour entraîner une compétition interspécifique. Les marges proglaciaires s'affichent alors, à l'échelle du Spitsberg, comme des réserves d'espèces pionnières. En ce sens, nous avons défini les marges proglaciaires comme des écotones entre la toundra et les milieux minéraux stricts. Nous considérons les marges proglaciaires comme des secteurs porteurs de biodiversité pour les espèces pionnières selon la définition de M. Lamy (1999) : *la diversité d'espèces est généralement celle qui recouvre le terme de biodiversité c'est-à-dire le nombre d'espèces présentes dans un milieu […]. Mais il serait réducteur de ne considérer que le nombre des espèces quand on parle de biodiversité. En effet, les écologistes ont montré qu'une très riche diversité écologique est le résultat de l'organisation fonctionnelle des espèces en peuplement*[1]*, biocénoses*[2] *et écosystèmes*[1]. Dans les marges proglaciaires se trouvent concentrées des espèces disséminées ponctuellement dans la toundra à la faveur de secteurs perturbés.

[1] Peuplement : ensemble des êtres vivants, des plantes d'un même aspect physionomique occupant en commun un milieu ou un espace donné.

[2] Biocénose : communauté de végétaux et d'animaux d'un biotope donné, constituant un système biologique régi par des relations d'interdépendance.

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

Les potentialités spatiales des secteurs déglacés, en terme floristique, sont particulièrement importantes dans le cadre des préoccupations actuelles liées aux conséquences des changements climatiques sur la végétation de la zone arctique. Ainsi, M.D. Walker *et al.* (2001) évoquent la « remontée » vers le nord des zones de végétation comme la forêt et le désert polaire arctique. Les marges proglaciaires sont donc un espace potentiel d'extension au nord de la végétation notamment pour les espèces menacées dans la toundra.

Les limites de la recherche

- **Manque de comparaison avec d'autres régions arctiques**

Nous aurions souhaité comparer les observations que nous avons conduites dans les marges proglaciaires du Spitsberg avec des études réalisées ailleurs dans le monde où les glaciers reculent. Néanmoins, les rythmes et les modalités de la reconquête végétale sont avant tout tributaires des caractères généraux du climat qui définissent les formations végétales. Il n'est pas envisageable de faire des comparaisons avec des études réalisées sur des marges proglaciaires qui sont situées dans la zone sud de la toundra ou en montagne. Dans la majorité des cas, la forêt (glacier d'Aletsch, Alpes Suisse) ou des formations arbustives (Glacier Bay, Alaska) composent les formations végétales d'équilibre. Les progressions végétales sont alors caractérisées par des cortèges floristiques différents de ceux du Spitsberg. Aucune étude n'a été réalisée dans des secteurs situés à des latitudes comparables ou sous des climats proches de celui du Spitsberg, au Groenland ou en Nouvelle-Zemble, par exemple. Quant aux travaux réalisés au Spitsberg, ils ne permettent pas non plus une comparaison avec les résultats issus de notre étude. Le travail de M. Kuc, dans le sud du Spitsberg, dans le Hornsund, date de 1964. La chronologie végétale que M. Kuc a observée, est trop courte pour être comparée à la nôtre (1918-1964 et 1918-2004). Une seconde étude a été réalisée par W. Ziaja et E. Dubiel (1996), à l'intérieur des secteurs déglacés du centre du Spitsberg, dans le Nordenskiold. Leur travail correspond à une prospection dans les secteurs déglacés consistant à inventorier les plantes et n'est donc pas une étude diachronique au sens propre du terme.

[1] Écosystème : ensemble constitué d'une biocénose, de son biotope et leurs interrelations et interactions.

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

- **Données manquantes dans le SIG**

Dans l'étude conduite dans la marge du glacier Midre Lovén, une limite méthodologique a été atteinte, qui apparaît clairement dans la carte des faciès paysagers. Les trois auréoles morainiques qui se dessinent, sont tributaires des clichés photographiques dont nous disposions pour dater les dépôts morainiques et non d'un changement floristique identifié sur le terrain. Cartographiquement, les limites entre les trois stades de développement floristique suivent les positions des fronts du glacier et ne sont pas identifiables par un changement floristique sur le terrain.

Une couche d'information manque également au SIG, celle de la couverture neigeuse. Nous avons à plusieurs reprises soulevé le rôle probable du manteau neigeux notamment sur les conditions édaphiques (humide, sèche). Il serait désormais pertinent de disposer d'une couche d'information sur la distribution du manteau neigeux durant l'hiver et pendant la fonte, au printemps, pour distinguer les secteurs bénéficiant d'une protection thermique de ceux qui sont découverts et exposés au gel hivernal.

Pistes de recherche

- **Compléter le SIG de la marge du glacier Midre Lovén**

Nous venons de soulever la nécessité de compléter le SIG avec l'intégration d'une nouvelle couche d'informations sur la couverture neigeuse. Deux solutions complémentaires peuvent être envisagées pour intégrer cette variable environnementale. Un travail de terrain pourrait être conduit durant la période hivernale afin de mesurer la hauteur de neige pour chacun des 300 points de l'échantillonnage. Un second travail consisterait à différencier les périodes de fonte de la neige, pour les 300 relevés, ce qui implique un suivi diachronique de l'évolution de la couverture neigeuse depuis le début de la période de fonte (mi-juin) jusqu'aux plaques neigeuses qui se maintiennent plus tardivement. Une prospection sur le terrain serait trop fastidieuse à conduire pour mener à bien ce suivi diachronique de la fonte du manteau neigeux. Nous pensons l'effectuer à partir de l'imagerie radar, dans un futur proche. Le satellite radarsat 2 sera mis en orbite fin 2005 équipé d'un capteur dont les résolutions spatiales seront compatibles avec notre niveau d'observation (3 m en mode ultra fin monopolarisé, 11×9 m en mode fin multipolarisé). L'utilisation de plusieurs images offrira la possibilité de suivre l'évolution de la neige. Au final, l'épaisseur de neige mesurée sur le terrain, associée

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

aux périodes de fonte et aux autres variables environnementales du SIG, permettra de mettre en relation la distribution de la neige avec les conditions édaphiques et le couvert végétal.

- **Comparer l'évolution floristique des secteurs déglacés avec celui de la toundra**

Nous avons observé que les marges proglaciaires sont des zones d'extension pour les espèces pionnières qui occupent une surface très réduite dans la toundra. Il serait intéressant d'observer ce que sont en terme floristique les secteurs où la toundra est dégradée, notamment dans les zones de sandur parcourues par les écoulements. En terme de végétation, ces espaces sont-ils propices, comme les marges proglaciaires, aux espèces végétales pionnières ? E. Roussel (2005) a mis en évidence une végétalisation des espaces abandonnés par le ruissellement à partir de la comparaison de photographies aériennes. Cette reconquête végétale des sandurs correspond-t-elle aux enchaînements floristiques qui se mettent en place dans les marges proglaciaires ? Une prospection dans les secteurs végétalisés des sandurs, datés de différentes périodes, permettrait de retracer les rythmes et les modalités de la colonisation végétale de ces secteurs, sur des pas de temps relativement courts, depuis 1960.

Enfin, Th. Brossard a mis en place en 1975, en presqu'île de Brøgger, dans le voisinage de la base J. Corbel, 80 carrés (1 m²) d'observation de la végétation. Pour les 80 carrés, une série de relevés de végétation, ainsi qu'une collecte de clichés photographiques, ont été conduits, en 1975 et en 1981, pour chacun des carrés. Réaliser aujourd'hui une nouvelle série de relevés permettrait d'observer sur un temps relativement court, 30 ans, l'évolution de la végétation. Un tel travail n'a pas été conduit à ce jour dans l'Arctique.

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

Références bibliographiques

ACIA, 2005 - *Impacts of a Warming Climate – Arctic Climate Impact Assessment.* Corporate Author Arctic Monitoring and Assessment Program Secretariat. Cambridge, Cambridge University Press. 144 p.

Adams, J., Maslin, M., Thomas, E., 1999 - Sudden climate transitions during the Quaternary. *Progress in Physical Geography*, 23 (1) : 1-36.

Aiken, S.G., Dallwitz, M.J., Consaul, L.L., McJannet, C.L., Gillespie, L.J., Boles, R.L., Argus, G.W., Gillett, J.M., Scott, P.J., Elven, R., LeBlanc, M.C., Brysting, A.K. Solstad, H., 1999 - Flora of the Canadian Arctic Archipelago. <URL http://www.mun.ca/biology/delta/arcticf/

Åkerman, J., 1983 - Notes concerning the vegetation on deflation surfaces, Kapp Linné, Spitsbergen. *Polar Research*, 1 (2) : 161-169.

Alastair, G.D., 1992 - *Ice Age Earth*. London, Routledge. 293 p.

Andersson, T., Forman, S., Ingólfsson, Ó., 2000 - Stratigraphic and morphologic constraints on the Weichselian glacial history of the northern Prins Karls forland, western Svalbard. *Geografiska Annaler,* 82A (4) : 455-470.

André, M.-F., 1985 - Lichénométrie et vitesses d'évolution des versants arctiques pendant l'Holocène (région de la Baie du Roi, Spitsberg, 79°N). *Revue de Géomorphologie Dynamique,* 2 : 49-71.

André, M.-F., 1986 - Dating slope deposits and estimating rates of rock wall retreat in northwest Spitsbergen by lichenometry. *Geografiska Annaler,* 68A (1-2) : 65-75.

André, M.-F., 1991 - Colonisation végétale et géodynamique des versants en milieu polaire océanique. *Inter-Nord*, 19 : 415-425.

André, M.-F., 1992 - Les glaciers rocheux du Spitsberg. *Revue de géomorphologie dynamique,* 2 : 47-63.

André, M.-F., 1993 - *Les versants du Spitsberg. Approche géographique des paysages polaires.* Nancy, Presse Universitaire de Nancy. 361 p.

André, M.-F., 1994 - Rock glaciers in Svalbard. *Geografiska Annaler*, 76A (4) : 235-245.

André, M.-F., 1995 - Holocene climate fluctuations and geomorphologic impact of extreme events in Svalbard. *Geografiska Annaler*, 77A (4) : 241-250.

André, M.-F., 1999 - La livrée périglaciaire des paysages polaires : l'arbre qui cache la forêt ? *Géomorphologie : relief, processus, environnement,* 3 : 231-252.

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

André, M.-F., Joly, D., 1986 - Estimation du gel estival d'altitude en domaine arctique océanique. *Cahiers de géographie de Besançon*, 2 : 60-82.

Austin, M.P., 2002 - Spatial prediction of species distribution : an interface between ecological theory and statistical modelling. *Ecological Modelling*, 157 : 101-118.

Ballantyne, C.K., 2002 - A general model of paraglacial landscape response. *The Holocene*, 12 (3) : 371-376.

Ballantyne, C.K., 2002 - Paraglacial geomorphology. *Quaternary Science Reviews*, 21 : 1935-2017.

Ballantyne, C.K., Benn, D.I., 1994 - Paraglacial slope adjustment and resedimentation following recent glacier retreat, Fåbergstølsdalen, Norway. *Arctic and Alpine Research*, 26 (3) : 255-269.

Baranowski, S., 1970 - The origine of fluted moraine at the fronts of contemporary glaciers. *Geografiska Annaler,* 52A (1) : 68-75.

Baranowski, S., 1975 - The climate of West Spitsbergen in the light of material obtained from Isfjord Radio and Hornsund. *Acta Universitatis Wratislaviensis*, 251 : 21-34.

Baranowski, S., Karlén, W., 1976 - Remnants of viking age tundra in Spitsbergen and northern Scandinavia. *Geografiska Annaler,* 58 A (1-2) : 35-40.

Baranowski, S., Pekala K., 1982 - Nival-eolian processes in the tundra area and in the nunatak zone of the Hans and Werenskiold glaciers (SW Spitsbergen). *Acta Universitatis Wratislaviensis*, 525 : 11-27.

Barbaroux, L., 1967 - Le quaternaire de la péninsule de Brøgger et régions voisines. *Bulletin de l'Association française pour l'étude du Quaternaire*, 4 (13) : 281-292.

Barbaroux, L., 1970 - Étude géologique et sédimentologique de la presqu'île de Brøgger. *Mémoires et Documents du CNRS,* 10 : 67-94.

Beguin, C., Mathieu, D., Ritter, J., 1975 - Remarques sur la végétation de l'étage alpin de la Haute-Ubaye. *Bulletin de la société Neuchâteloise des Sciences Naturelles,* 98 : 90 -112.

Bekku, Y., Kume, A., Nakatsubo, T., Masuzawa, T., Kanda, H., Koizumi, H., 1999 - Microbial biomass in relation to primary succession on arctic deglaciated moraines. *Polar Bioscience,* 12 : 47-53.

Bell, M., Walker, M.J.C., 1996 - *Late Quaternary Change, Physical and Human Perspectives*. England, Longman, 273 p.

Benn, D.I., 1992- The genesis and significance of "hummocky moraine" : evidence from the isle of Skye, Scoland. *Quaternary Science Reviews*, 11 : 781-799.

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

Benn, D.I., Evans, D.J.A., 1998 - *Glaciers & Glaciation.* London, New York, Sydney, Auckland, Arnold. 734 p.

Bennett, M.R., Glasser, N.F., 1996 - *Glacial Geology. Ice Sheets and Landforms.* Chichester, Wiley. 364 p.

Bennett, M.R., Hambrey, M.J., Huddart, D., 1997 - Modification of clast shape in High-Arctic glacial environments. *Journal of Sedimentary Research*, 67 (3) : 550-559.

Bennett, M.R., Hambrey, M.J., Huddart, D., Ghienne, J.F., 1996 - The formation of a geometrical ridge network by the surge-type glacier Kongsvegen, Svalbard. *Journal of Quaternary Science,* 11 (6) : 437-449.

Bennett, M.R., Huddart, D., Hambrey, M.J., Ghienne, J.F., 1996 - Moraine development at the high-arctic valley glacier Pedersenbreen, Svalbard. *Geografiska Annaler,* 78A (4) : 209-222.

Billings, W.D., 1987 - Constraints to plant growth, reproduction, and establishment in Arctic environments. *Arctic and Alpine Research,* 19 (4) : 357-365.

Billings, W.D., 1992 - Phytogeographic and evolutionary potential of the arctic flora. In *Arctic ecosystems in changing climate – An ecophysiological perspective*. San Diego, Academic Press : 91-109.

Birkenmajer, K., 1960 - Raised marine features of Hornsund. *Studia geologica polonica,* 5 : 7-95.

Birkenmajer, K., 1982 - Talus moraines in South Spitsbergen and comparison with East Greenland. *Acta Universatis Wratislaviensis,* 525 : 29-38.

Birks, H.J.B., 1980 - The present flora and vegetation of the moraines of the Klutan Glacier, Yukon territory, Canada : a study in plant succession. *Quaternary Research*, 14 : 60-86.

Birks, H.H., 1991 - Holocene vegetation history and climatic change in the west Spitsbergen – plant macrofossils from Skadtjorna, an Arctic lake. *The Holocene,* 1 (3) : 209-218.

Birks, H.H., Pau, Aa., Svendsen, J.I., Alm, T., Mangerud, J., Landvik, J.Y., 1994 - Late Weichselian environmental change in Norway, including Svalbard. *Journal of Quaternary Science*, 9 (2) : 133-145.

Birot, P., 1965 - *Les formations végétales du globe.* Paris, SEDES. 508 p.

Bischof, J., 2000 - *Ice drift, ocean circulation and climate change.* Chichester, New York, Springer. 215 p.

Blake, W., 1981 - Glacial history of Svalbard and the problem of the Barents ice sheet : comments. *Boreas,* 10 : 125-131.

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

Bliss, L.C., Peterson, K.M., 1992 - Plant succession, competition and physiological constraints. In *Arctic ecosystems in changing climate – An ecophysiological perspective*. San Diego, Academic Press : 111-136.

Borsuk, M.E., Stow, C.A., Reckhow, K.H., 2004 - A Bayesian network of eutrophication models for synthesis, prediction, and uncertainty analysis. *Ecological Modelling,* 173 : 219-239.

Boullard, B., 1988 - *Dictionnaire de botanique.* Paris, Ellipses. 398 p.

Boulton, G.S., 1979 - Glacial history of the Spitsbergen archipelago and the problem of a Barents Shelf ice sheet. *Boreas*, 8 : 31-57.

Boulton, G.S., Rhodes, M., 1974 - Isostatic uplift and glacial history in northern Spitsbergen. *Geological Magazine,* 111 (6) : 481-576.

Brattbakk, I., 1981 - Engelsbukta, Brøggerhalvøya, Svalbard vegetasjonskart 1/10 000, K. Norske Vidensk. Selsk. Mus. Bot. Avd. Trondheim (n° S10 V28H50).

Brattbakk, I., 1981 - Lovénøyane, Brøggerhalvøya, Svalbard vegetasjonskart 1/10 000, K. Norske Vidensk. Selsk. Mus. Bot. Avd. Trondheim (n° S10 V36H60).

Brattbakk, I., 1986 - Flora og vegetasjon, Øritsland, N.A. *Svalbardreinen Og Dens Livsgreennlag*, 2 : 15-34.

Braun-Blanquet, J., 1954 - La végétation alpine et nivale des Alpes françaises. *Travaux du comité scientifique du Club Alpin Français*. 250 p.

Brázdil, R., 1988 - Variation of air temperature and atmospheric precipitation in the region of Svalbard and of Jan Mayen. In *Gregory S. (ed.) Recent climatic change*. London, Belhaven press : 53-68.

Broll, G., Tarnocai, C., Mueller, G., 1999 - Interactions between vegetation, nutrients and moisture in soils in the Pangnirtung Pass area, Baffin Island, Canada. *Permafrost Periglac. Process.*, 10 : 265-277.

Brossard, Th., 1977 - *Les équilibres biogéographiques liés aux équilibres dynamiques de versants dans les paysages du Svalbard (Ny-Ålesund).* Thèse de 3ème cycle de géographie, Paris, EPHESS. 892 p.

Brossard, Th., 1980 - Analyse emboîtée et niveau d'organisation des micro-milieux arctiques. *Cahiers de Géographie de Besançon*, 20 : 5-35.

Brossard, Th., 1980 - Classification hiérarchique et cartographie expérimentale. Exemple d'une toundra sur sandur au Spitsberg. *Bulletin de l'Association des Géographes Français*, 474 : 363-371.

Brossard, Th., 1985 - Évolution biogéographique d'un secteur de moraine au Svalbard (glacier Loven central) bilan quantitatif 1978-1981. *Inter-Nord*, 17 : 33-46.

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

Brossard, Th., 1991 - *Pratique des paysages en baie du Roi et sa région.* Paris, Annales littéraires de l'université de Franche-Comté. 428 p.

Brossard, Th., Deruelle, S., Nimis, P.L., Petit, P., 1984 - An interdisciplinary approach to vegetation mapping on lichen-dominated systems in High Arctic environment, Ny-Ålesund (Svalbard). *Phytocoenologia*, 12 (4) : 433-453.

Brossard, Th., Desservy, G., Joly, D., 1998 - Le GPS comme source de données géographiques à grande échelle. *L'Espace Géographique*, 1 : 23-30.

Brossard, Th., Elvebakk, A., Joly, D., Nilsen, L., 2002 - Modelling index of thermophily of a multi-source database on Brøggerhalvøya Peninsula (Svalbard). *In. J. Remote Sensing*, 23 (21) : 4683-4698.

Brossard, Th., Elvebakk, A., Fury, R., Joly, D., Nilsen, L., 2003 - Modèle spatiaux à grande échelle en climatologie : exemple de la température et du vent au front des glaciers Lovén. *Bulletin de l'Association des Géographes Français*, 80 (4) : 355-361.

Brossard, Th., Joly, D., 1990 - Plantes et climat : pour une modélisation phénogéographique du paysage. *Inter-Nord*, 19 : 427-437.

Brossard, Th., Joly, D., 1994 - Probability models, remote sensing and field observation : test for mapping some plant distributions in the Kongsfjord area, Svalbard. *Polar Research*, 13 (1) : 153-161.

Brossard, Th., Joly, D., 1999 - Représentation du paysage visible et échelles spatiales d'information. *Revue Internationale de Géomatique*, 9 (3) : 359-375.

Brossard, Th., Joly, D., Laffly, D., Vuillod, P., Wieber, J.-C., 1994 - Pratique des systèmes d'information géographique et analyse des paysages. *Revue Internationale de Géomatique*, 4 (3-4) : 243-256.

Brossard, Th., Joly, D., Nilsen, L., 2000 - Cartographie géomorphologique au Spitsberg grâce à une base de données en haute résolution. *Rev. Internat. Institut of Refrigeration* : 269-276

Brückner, H., Schellmann, G., Van der Borg, K., 2002 - Uplifted beach ridges in northern Spitsbergen as indicators for glacio-isostasy and palaeo-Oceanography. *Zeitschrift für Geomorphology N.F.*, 46 (3) : 309-336.

Brysting, A.K., Gabrielsen, T.M., Sørlibråten, O., Ytrehorn, O., Brochmann, C., 1996 - The Purple Saxifrage, *Saxifraga oppositifolia,* in Svalbard : two taxa or one? *Polar Research*, 5 (2) : 93-104.

Brzeziecki, B., Kienast, F., Wildi, O., 1993 - A simulated map of the potential natural forest vegetation of Switzerland. *Journal of Vegetation Science*, 4 : 499-508.

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

Buttler, A., 1998 - *Cours SSTEP : Méthodes d'études de la végétation*. Université de Franche Comté. 49 p.

Callaway, R.M., Brooker, R.W., Choler, P., Kikvidze, Z., Lortie, C.J., Michalet, R., Paolini, L., Pugnaire, F.I., Newingham, B., Aschehoug, E.T., Armas, C., Kikodze, D., Cook, B.J., 2002 - Positive interactions among alpine plants increase with stress. *Nature*, 407 : 844-848.

Cannone, N., Gerbol, R., 2003 - Vegetation as an ecological indicator of surface instability in rock glaciers. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 35 (3) : 384-390.

Chadule (groupe), 1997 - *Initiation aux pratiques statistiques en géographie.* Paris, Armand Colin. 203 p.

Chapin III, F.S., Walker, L.R., Fastie, C.L., Sharman, L.C., 1994 - Mechanisms of primary succession following deglaciation at Glacier Bay, Alaska. *Ecological Monographs*, 64 (2) : 149-175.

Chapin, S., Komer, C., 1995 - *Arctic and Alpine biodiversity: patterns, causes and ecosystem consequences.* Berlin, Springer-Verlag. 332 p.

Choler, P., Michalet, R., Callaway, R.M., 2001 - Facilitation and competition on gradients in alpine plant communities. *Ecology*, 82 (12) : 3295-3308.

Church, M., Ryder, J.M., 1972 - Paraglacial sedimentation : a consideration of fluvial processes conditioned by glaciation. *Geological Society of America Bulletin*, 83 : 3059-3072.

Clavel, B., 2005 – *Le royaume du Nord.* Paris, Omnibus. 1 027 p.

Clements, F.E., 1916 - *Plant succession.* Washington, Carnegie Institute Publication. 512 p.

Connell, J.H., Noble, I.R., Slatyer, R.O., 1987 - On the mechanisms producting successional change. *Oikos*, 50 (1).

Cooper, D.J., 1989 - Geographical and ecological relationships of the arctic-alpine vascular flora and vegetation, Arrigetch Peaks region, central Brooks Range, Alaska. *Journal of Biogeography*, 16 : 279-295.

Cooper, E.J., Wookey, P.A., 2003 - Floral herbivory of *Dryas octopetala* by Svalbard reindeer. *Arctic, Antartic, and Alpine Research*, 35 (3) : 369-376.

Cooper, W.S., 1923 - The recent ecological history of Glacier Bay, Alaska. *Ecology*, 6 : 1-197.

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

Corbel, J., 1966 a - Recherche sur les climats du Spitsberg et leurs variations récentes. In *Spitsberg 1964 et premières observations 1965.* Lyon, CNRS-RCP 42, Audin : 42-54.

Corbel, J., 1966 b - Paysages de la Baie du Roi. In *Spitsberg 1964 et premières observations 1965.* Lyon CNRS-RCP 42, Audin : 265-268.

Corbel, J., 1966 c - Datation au carbone 14 des terrasses marines de la Baie du Roi. In *Spitsberg 1964 et premières observations 1965.* Lyon CNRS-RCP 42, Audin : 309-314.

Cornelissen, J.H.C., Callaghan, T.V., Alatalo, J.M., Michelsen, A., Graglia, E., Hartley, A.E., Hik, D.S., Hobbie, S.E., Press, M.C., Robinson, C.H., Henry, G.H.R., Shaver, G.R., Phoenix, G.K., Gwynn Jones, D., Jonasson, S., Chapin III, F.S., Molau, U., Neill, C., Lee, J.A., Melillo, J.M., Sveinbjörnsson, B., Aerts, R., 2001 - Global change and arctic ecosystems : is lichen decline a function of increases in vascular plant biomass ? *Journal of Ecology,* 89 : 984-994.

Crawford, R.M.M, 1989 - Plant survival in the Arctic. In *Studies in plant survival.* Oxford, Blackwell Scientific Publications, Chap. 3 : 47-75.

Crawford, R.M.M., Smith, L.C., 1997 - Responses of some high Arctic shore plants to variable lengths of growing season. *Opera Botanica*, 132 : 201-214.

Croot, D.G., 1988 - Glaciotectonics and surging glaciers : a correlation based on Vestspitsbergen, Svalbard, Norway. In *Glaciotectonics : forms and processes.* Rotterdam, Ed. Croot : 49-60.

Cushman, S.A., McGarigal, K., 2004 - Patterns in the species-environment relationship depend on both scale and choice of response variables. *Oikos*, 105 : 117-124.

CVAM Team, 2003 - *Circumpolar Arctic Vegetation Map*. Scale 1 : 7 500 000. Conservation of Arctic Flora and Fauna (CAFF) Map N°1. U.S. Fish and Wildlife servise, Anchorage, Alaska.

Dabski, M., 2005 - Sorted patterned grounds in marginal zones of Fláajökull (SE Iceland) and Elisbreen (NW Spitsbergen). Shifting lands, Sediflux Network, 20-22 janvier 2005.

Daget P., Poissonnet J., 1969 - *Analyse phytologique des prairies, applications agronomiques*. Montpellier, CNRS-CEPE. 67 p.

Dajoz, R., 2000 - *Précis d'écologie*. Paris, Dunod. 615 p.

Da Lage, A., Métailié, G., 2000 - *Dictionnaire de la biogéographie végétale*. Paris, CNRS éditions. 579 p.

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

Dallman, K.K., Ohta, Y., Birjukov, A.S., Karnousenko, E.P., Sirotkin, A.N., 1994 - Geological map of Svalbard, 1/1 000 000, sheet C7G Dicksonfjorden, Preliminary version, updated February 2000, Norsk Polarinstitutt.

Descorbay, M., 1953 - *L'expédition française au Spitsberg, 1952*. Paris, Edition France-Empire. 286 p.

Dowdeswell, J.A., Hamilton, G.S., Hagen, J.O., 1991 - The duration of the active phase on surge-type glaciers : contrasts between Svalbard and other regions. *Journal of glaciology,* 37 (127) : 388-399.

Dowdeswell, J.A., Hambrey, M.J., 2002 - *Islands of the Arctic*. Cambridge, Cambridge University Press. 280 p.

Dubayah, R.C., 1994 - Modelling a solar radiation topoclimatology for the Rio Grande River Basin. *Journal of Vegetation Science*, 5 : 627-640.

Duckworth, J.C., Kent, M., Ramsay, P.M., 2000 - Plant functional types : an alternative to taxonomic plant community description in biogeography ? *Progress in Physical Geography*, 24 (4) : 515-542.

Dunkerley, W.D., Dekker, P.de, Kershaw, P., Chapell, J., 1998 - *Quaternary Environments*. London, Arnold. 329 p.

Dymond, C.C., Johnson, E.A., 2002 - Mapping vegetation spatial patterns from modelled water, temperature and solar radiation gradients. *Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 57 : 69-85.

Eitel, B., Van der Borg, K., Eberle, J., Megies, H., 2002 - Late Pleistocene/Early Holocene glacial history of northern Andréeland : evidence from glacial and fluvio-glacial deposits. *Zeitschrift für Geomorphology N.F.,* 46 (3) : 337-364.

Elvebakk, A., 1982 - Geological preferences among Svalbard plants. *Inter-Nord*, 16 : 11-29.

Elvebakk, A., 1985 - Higher phytosociological syntaxa on Svalbard and their use in subdivision of the Arctic. *Nord J. Bot.,* 5 : 273-284.

Elvebakk, A., 1994 - A survey of plant associations and alliances from Svalbard. *Journal of Vegetation Science,* 5 : 791-802.

Elvebakk, A., 1997 - Tundra diversity and ecological characteristics of Svalbard. In *Ecosystems of the world.* Oxford, edited by Wielgolaski F.E., Chap. 15 : 347-359.

Elvebakk, A., Elven, R., Razzhivin, Yu, V., 1999 - Delimitation, zonal and sectorial subdivision of the Arctic for the panarctic flora project. *Skrifter,* 38 : 375-386.

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

Elven, R., 1978 - Association analysis of moraine vegetation at the glacier Hardangerjökulen, Finse, South Norway. *Norwegian Journal of Botany*, 3 : 171-191.

Elven, R., Elvebakk, A., 1996 - Part. 1. Vascular plants. *Norsk Polarinstitutt Skrifter*, 198 : 9-55.

Embleton, C., Liedtke, H., 1990 - Geomorphological mapping, remote sensing and terrain models. *Zeitschrift für Geomorphology*, Sul.-Bd. 80 : 1-5.

Engelskjøn, T., Lund, L., Alsos, I.G., 2003 - Twenty of the most thermophilous vascular plant species in Svalbard and their conservation state. *Polar Research*, 22 (2) : 317-339.

Escofier, B., Pagés, J., 1998 - *Analyses factorielles simples et multiples. Objectifs, méthodes et interprétation.* Paris, Dunod. 284 p.

Etienne, J.L., Glasser, N.F., Hambrey, M.J., 2003 - Proglacial sediment-landform associations of a polythermal glacier : Storglaciären, northern Sweden. *Geografiska Annaler*, 85A (2) : 149-164.

Etzelmüller, B., 2000 - Quantification of thermo-erosion in pro-glacial areas-examples from Svalbard. *Zeitschrift für Geomorphology,* 44 (3) : 343-361.

Etzelmüller, B., Hagen, J.O., Vatne, G., Ødegård, R.S., Sollid, J.L., 1996 - Glacier debris accumulation and sediment deformation influenced by permafrost : examples from Svalbard. *Annals of Glaciology*, 22 : 53-62.

Etzelmüller, B., Sollid, J.L., 1991 - The role of weathering and pedological processes for the development of sorted circles on Kvadehuksletta. *Polar Research*, 9 (2) : 181-191.

Etzelmüller, B., Vatne, G., Ødegård, R.S., Sollid, J.L., 1993 - Dynamics of two subpolar valley glaciers - Erikbreen and Hannabreen, Liefdefjorden, Northern Spisbergen. *Geografiska Annaler,* 75 A (1-2) : 41-54.

Evans, D.J.A., 1999 - A soil chronosequence from neoglacial moraines in western Norway. *Geografiska Annaler,* 81A (1) : 47- 62.

Fargione, J., Tilman, D., 2002 - Competition and coexistence in terrestrial plants. *Ecological studies*, 161 : 165-198.

Federoff, N., 1966 - Les sols du Spitsberg occidental. In *Spitsberg 1964 et premières observations 1965.* Lyon, CNRS-RCP 42, Audin : 111-228.

Foody, G.M., 2001 - GIS : the accuracy of spatial data revisited. *Progress in Physical Geography,* 25 (3) : 389-398.

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

Førland, E.J., Hanssen-Bauer, I., 2000 - Increased precipitation in the Norwegian Arctic : true or false ? *Climatic Change*, 46 : 485-509.

Førland, E.J., Hanssen-Bauer, I., 2003 - Past and future climate variations in the Norwegian Arctic : overview and novel analyses. *Polar Research*, 22 (2) : 113-124.

Førland, E.J., Hanssen-Bauer, I., Nordli, P.O., 1997 - Climate statistics and long term series of temperature and precipitation at Svalbard and Jan Mayen. *Det Norste Meteorologiske Institutt - Report*, 21/97, KLIMA. 72 p.

Forman, S.L., 1989 - Late Weichselian glaciation and deglaciation of Forlandsundet area, western Spitsbergen, Svalbard. *Boreas,* 18 : 51-60.

Forman, S.L., 1990 - Post-glacial relative sea-level history of northwestern Spitsbergen, Svalbard. *Geological Society of America Bulletin*, 102 : 1580-1590.

Forman, S.L., Mann, D.H., Miller, G.H., 1987 - Late Weichselian and Holocene relative sea-level history of Brøggerhalvøya, Spitsbergen. *Quaternary Research*, 27 : 41-50.

Forman, S.L., Miller, G.H., 1984 - Time-dependent soil morphologies and pedogenic processes on raised beaches, Brøggerhalvøya, Spitsbergen, Svalbard archipelago. *Arctic and Alpine Research*, 16 (4) : 381-394.

Fortin, M.-J., 1999 - Effects of quadrat size and data measurement on the detection of boundaries. *Journal of Vegetation Science*, 10 : 43-50.

Fortin, M.-J., Drapeau, P., Legendre, P., 1989 - Spatial autocorrelation and sampling design in plant ecology. *Vegetatio*, 83 : 209-222.

Fowler, N.L., 1988 - What is a safe site? : neighbour, litter, germination date, and patch effects. *Ecology*, 69 (4) : 947-961.

Franklin, J., 1998 - Predicting the distribution of shrub species in southern California from climate and terrain-derived variables. *Journal of Vegetation Science*, 9 : 733-748.

French, H.M., 1996 - *The Periglacial Environment.* Eastbourne, Longman. 341p.

Frenot, Y., Gloaguen, J.C., Cannavacciuolo, M., Bellido, A., 1998 - Primary succession on glacier forelands in the subantarctic Kerguelen Islands. *Journal of Vegetation Science,* 9 : 75-84.

Frenot, Y., Van Vliet-Lanoë, B., Gloaguen, J.-C., 1995 - Particle translocation and initial soil development on a glacier foreland, Kerguelen Islands, Subantarctic. *Arctic and Alpine Research,* 27 (2) : 107-115.

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

Fridriksson, S., 1987 - Plant colonization of a volcanic island, Surtsey, Iceland. *Arctic and Alpine Research*, 19 (4) : 425-431.

Frontier, S., 1983 - *Stratégies d'échantillonnage en écologie*. Paris, Masson. 494 p.

Fury, R., Joly, D., 2003 - Analyse microclimatologique des variations du vent en fonction des températures au Spitsberg. *Publication de l'Association Internationale de Climatologie*, 15 : 200-206.

Gardner, T.W., Sasowsky, K.C., Day, R.L., 1990 - Automated extraction of geomorphometric properties from digital elevation data. *Zeitschrift für Geomorphology*, Sul.-Bd. 80 : 57-68.

Geoffray, H., 1970 - Note préliminaire sur les glaciers du Spitsberg Nord-Occidental. *Mémoires et documents du CNRS*, 10 : 164-184.

Giessen, L.K., Karlsruhe, G., H, 1993 - Photogrammetry and geomorphology of High-Arctic push moraines, examples from Ellesmere Island, Canadian arctic, and Spisbergen, Svalbard archipelago. *Zeitschrift für Geomorphology, Sul.-Bd,* 92 : 21-38.

Glasser, N.F., Bennett, M.R., Huddart, D., 1999 - Distribution of glaciofluvial sediment within and on the surface of a high arctic valley glacier : Mathabreen, Svalbard. *Earth Surface and Landforms,* 24 : 303-318.

Glasser, N.F., Hambrey, M.J., 2003 - Ice-marginal terrestrial landsystems : Svalbard polythermal glaciers. In *Glacial Landsystems,* sous la dir. de D.J.A Evans. Londres, Arnold : 65-88.

Godard, A., André, M.-F., 1999 - *Les milieux polaires*. Paris, Armand Colin. 451 p.

Goldfarb, B., Pardoux, C., 2000 - *Introduction à la méthode statistique.* Paris, Dunod. 336 p.

Gough, L., Shaver, G.R., Carroll, J., Royer, D.L., Laundre, J.A., 2000 - Vascular plant species richness in Alaskan arctic tundra : the importance of soil pH. *Journal of Ecology*, 88 : 54-66.

Gould, W.A., Walker, M.D., 1999 - Plant communities and landscape diversity along a Canadian Arctic river. *Journal of Vegetation Science,* 10 : 537-548.

Griselin, M., 1982 - *Les modalités de l'écoulement liquide et solide sur les marges polaires.* Thèse de 3ème cycle de géographie physique, Nancy II. 500 p.

Griselin M., 1985 - L'abondance annuelle et le bilan hydrologique d'un bassin partiellement englacé de la côte nord-ouest du Spitsberg. *Norois*, 32 (125) : 19-33.

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

Griselin, M., Marlin, C., 1998 - Origin of the water circulation in the moraine plain of the Lovén East Glacier (Spitsbergen). *Salzburger Geographische Materialien*, 28 : 61-71.

Griselin M., Marlin Ch., Dever L., Moreau L., 1995 - Hydrologie et géochimie du glacier Lovén Est, Spitsberg. Actes du 3e symposium international Cavités glaciaires et cryokarst en régions polaires et de haute montagne, Chamonix 1-6 novembre 1994, annales littéraires de l'université de Franche-Comté : 51-76.

Grove, J.M., 1988 - *The Little Ice Age*. London, New York, Methuen. 498 p.

Grove, J.M., 2001 - The initiation of the "Little Ice Age" in regions around the north Atlantic. *Climatic Change*, 48 : 53-82.

Grulke, N.E., 1995 - Distribution of *Phippsia algida* and autosuccession in the polar semidesert, Canadian High Arctic. *Arctic and Alpine Research,* 27 (2) : 172-179.

Guisan, A., Zimmermann, N.E., 2000 - Predictive habitat models in ecology. *Ecological Modelling*, 135 : 147-186.

Hagen, J.O., Liestøl, O., 1990 - Long-term glacier mass-balance investigations in Svalbard, 1950-88. *Annals of Glaciology,* 14 : 102-106.

Hagen, J.O., Liestøl, O., Roland, E., Jørgensen, T., 1993 - *Glacier atlas of Svalbard and Jan Mayen*. Meddelesier, Oslo, n° 129. 141 p.

Hagen, J.O., Melvold, K., Eiken, T., Isaksson, E., Lefauconnier, B., 1999 - Mass balance methods on Kongsvegen, Svalbard. *Geografiska Annaler,* 81A (4) : 593-601.

Hagen, J.O., Melvold, K., Pinglot, F., Dowdeswell, J.A., 2003 - On the net mass balance of the glaciers and ice caps in Svalbard, Norwegian arctic. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 35 (2) : 264-270.

Häggblom, A., 1982 - Driftwood in Svalbard as an indicator of sea ice conditions. *Geografiska Annaler,* 64A (1-2) : 81-94.

Hald, M., Dahlgren, T., Olsen, T-E., Lebesbye, E., 2001 - Late Holocene palaeoceanography in Van Mijenfjorden, Svalbard. *Polar Research*, 20 (1) : 23-35.

Hallet, B., Prestrud, S., 1986 - Dynamics of periglacial sorted circles in Western Spitsbergen. *Quaternary Research*, 26 : 81-99.

Hambrey, M.J., 1994 – *Glacial Environments.* Londres, UCL Press. 296 p.

Hambrey, M.J., Bennett, M.R., Dowdeswell, J.A., Glasser, N.F., Huddart, D., 1999 - Debris entrainment and transfert in polythermal valley glaciers. *Journal of Glaciology*, 45 (149) : 69-86.

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

Hambrey, M.J., Huddart, D., 1995 - Englacial and proglacial glaciotectonic processes at the snout of thermally complex glacier in Svalbard. *Journal of Quaternary Science,* 10 (4) : 313-326.

Hammer, K.M., Smith, N.D., 1983 - Sediment production and transport in a proglacial stream : Hilda glacier, Alberta Canada. *Boreas*, 12 : 91-106.

Hansen, S., 2003 - From surge-type to non-surge-type glacier behaviour : midre Lovénbreen, Svalbard. *Annals of Glaciology,* 36 : 97-102.

Haugland, J.E., 2004 - Formation of patterned ground and fine-scale soil development within two late Holocene glacial chronosequences : Jotunheimen, Norway. *Geomorphology*, 61 : 287-301.

Heilbronn, T.D., Walton, W.H., 1984 - Plant colonization of actively sorted stone stripes in the subantartic. *Arctic and Alpine Research*, 16 (2) : 161-172.

Helm, D.J., Allen, E.B., 1995 - Vegetation chronosequence near Exit Glacier, Kenai Fjords National Park, Alaska, U.S.A. *Arctic and Alpine Research,* 27 : 246-257.

Helm, D.J., Allen, E.B., Trae, J.M., 1996 - Mycorrhizal chronosequence near Exit Glacier, Alaska. *Can. J. Bot.*, 74 : 1496-1506.

Henry, M., Stevens, H., Carson, W.P., 1999 - Plant density determines species richness along an experimental fertility gradient. *Ecology*, 80 (2) : 455-465.

Héquette, A., 1985 - Découverte de structures de cryosols immergés et hypothèses de transgression marine récente en péninsule de Brøgger. *Norois*, 32 (127) : 429-433.

Héquette, A., 1986 - *Morpho-sédimentologie et évolution de littoraux meubles en milieu arctique. Péninsule de Brøgger, Spitsberg nord-occidental.* Thèse de doctorat de géographie physique, Brest. 397 p.

Héquette, A., 1988 - Vues récentes sur l'évolution du Svalbard au quaternaire. *Revue de Géomorphologie Dynamique*, 4 : 129-141.

Héquette, A., 1990 - Dynamique morpho-sédimentologique et évolution du littoral dans la région du Kongsfjord, Spitsberg. *Inter-Nord*, 19 : 439-443.

Héquette, A., 1992 - Post-glacial relative sea-level history of northwestern Spitsbergen, Svalbard : alternative interpretation and reply. *Geological Society of America Bulletin*, 104 : 1059-1066.

Héquette, A., Ruz, M.-H., 1986 - Progradation de cordons littoraux sur processus de débordements de tempête dans le cadre d'une transgression marine, Kvadehuk, péninsule de Brøgger, Spitsberg. *Géographie physique et Quaternaire*, 40 (2) : 197-206.

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

Hindrum, R., 1998 - Opportunities and problems associated with the development of Arctic tourism : a case study from Svalbard. *Meddelelser*, 159 : 75-79.

Hirzel, A., Guisan, A., 2002 - Which is the optimal sampling strategy for habitat suitability modelling? *Ecological Modelling*, 157 : 331-341.

Hjelle, A., 1993 - *Geology of Svalbard*. Oslo, Norsk Polarinstitutt, Polarhåndbok 7. 162 p.

Hodkinson, I.D., Coulson, S.J., Webb, N.R., 2003 - Community along proglacial chronosequences in the high Arctic : vegetation and soil development in north-west Svalbard. *Journal of Ecology,* 91 : 651-663.

Hodkinson, I.D., Webb, N.R., Coulson, S.J., 2002 - Primary community assembly on land – the missing stages : why are the heterotrophic organisms always three first ? *Journal of Ecology*, 90 (3) : 569-577.

Hoe, G., Schytt, V., Häggblom, A., Österholm, H., 1969 - Studies of the glacial history of Hopen, Svalbard. *Geografiska Annaler,* 51A (4) : 185-192.

Hoelzle, M., Haeberli, W., Dischl, M., Peschke, W., 2003 – Secular glacier mass balances derived from cumulative glacier length changes. *Global and Planetary Change,* 36 : 295-306.

Hop, H., Pearson, T., Hegseth, E.N.H., Kovacs, K.M., Wiencke, C., Kwasniewski, S., Eiane, K., Mehlum, F., Gulliksen, B., Wlodarska-Kowalczuk, M., Lydersen, C., Weslawski, J.M., Cochrane, S., Gabrielsen, G.W., Leakey, R.J.G., Lønne, O.J., Zajaczkowski, M., Falk-Petersen, S., Kendall, M., Wängberg, S.Å., Bischof, K., Voronkov, A.Y., Kovaltchouk, N.A., Wiktor, J., Poltermann, M., Prisco, G., Papucci, C., Gerland, S., 2002 - The marine ecosystem of Kongsjorden, Svalbard. *Polar Research*, 21 (1) : 167-208.

Huddart, D., Bennett, M.R., Glasser, N.F., 1998 - Morphology and sedimentology of a high-arctic esker : Vegbreen, Svalbard. *Boreas,* 28 : 253-273.

Huddart, D., Bennett, M.R., Hambrey, M.J., Glasser, N.F., Crawford, K., 1998 - Origin of well-rounded gravels in glacial deposits from Brøggerhalvøya, northwest Spitsbergen : potential problems caused by sediment reworking in the glacial environment. *Polar Research*, 17 (1) : 61-69.

Huddart, D., Hambrey, M.J., 1996 - Sedimentary and tectonic development of a high-arctic, thrust-moraine complex : Comfortlessbreen, Svalbard. *Boreas,* 25 (4) : 227-243.

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

Hugenholtz, C.H., Lewkowicz, A.G., 2002 - Morphometry and environmental characteristics of turf-banked solifluction lobes, Kluane range, Yukon Territory, Canada. *Permafrost and Periglacial Processes*, 13 : 301-313.

Humlum, O., Instanes, A., Sollid, J.L., 2003 - Permafrost in Svalbard : a review of research history, climatic backgroung and engineering challenges. *Polar Research*, 22 (2) : 191-215.

Hyvärinen, H., 1970 - Flandrian pollen diagrams from Svalbard. *Geografiska Annaler*, 52A (3-4) : 213-222.

ICSU, 2004 - *A Framework for the International Polar Year 2007-2008.* ICSU IPY 2007-2008 Planning group. 57 p.
<URL http://www.icsu.org

IPCC, 2001 - *Climate change 2001 : the scientific basis.* Contribution of Working Group I to the third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. [Houghton, J. T., Ding, Y., Griggs, D. J., Noguer, M., van der Linden, P. J., Dai, X., Maskell, K., Johnson, C. A. (eds.)]. Cambridge, United Kingdom, New York, Cambridge University Press. 881 p.

Isachsen, G., 1907 - Carte du Spitsberg (côte nord-ouest) au 1/200 000. Exposition : Expéditions polaires au Spitsberg, Paris 16/11/02-18/02/03.

Isachsen, G., Hoel, A., 1913 - *Exploration du nord-ouest du Spitsberg entreprise sous les auspices de SAS le prince de Monaco par la mission Isachsen*. Deuxième partie. Résultats des campagnes scientifique par Albert 1er de Monaco. 95 p.

Isaksen, K., Holmlung, P., Sollid, J.L., Harris, C., 2001 - Three deep alpine-permafrost in Svalbard and Scandinavia. *Permafrost Periglac. Process.*, 12 : 13-25.

Isaksson, E., Pohjola, V., Jauhiainen, T., Moore, J., Pinglot, J.F., Vaikmäe, R., Wal, R.S.W., Hagen, J.O., Ivask, J., Karlöf, L., Martma, T., Meijer, H.A.J., Mulvaney, R., Thomassen, M., Broeke, M., 2001 - A new ice-core record from Lomonosovfonna, Svalbard : viewing the 1920-97 data in relation to present climate and environmental conditions. *Journal of Glaciology*, 47 (157) : 335-345.

Ives, J.D., Barry, R.G., 1974 – *Arctic and Alpine Environments.* London, Methuen. 999 p.

Jacek, J., Marzena, K., 1997 - Hans Glacier - a tidewater glacier in southern Spitsbergen : summary of some results. *Calving glaciers report of a workshop*, Report 15 : 95-104.

Jahn, A., 1978 - Les expéditions scientifiques polonaises au Spitsberg. *Inter-Nord*, 15 : 211-218.

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

Jahn, A., 1982 - Soil thawing and active layer of permafrost in Spitsbergen. *Acta Universitatis Wratislaviensis*, 525 : 57-75.

Jambu, M., 1989 - *Exploration informatique et statistique des données.* Paris, Bordas et CENT-ENST. 505 p.

Janet, F., 1998 - Predicting the distribution of shrub species in southern California from climate and terrain-derived variables. *Journal of Vegetation Science*, 9 : 733-748.

Jania, J., Glowacki, P., 1996 - Is the Hansbreen in south Spitsbergen (Svalbard) a surge-type glacier? *XXIII Polar Symposium* : 27-43.

Jefferies, R.L., Klein, D.R., Shaver, G.R., 1994 - Vertebrate herbivores and northern plant communities : reciprocal influences and responses. *Oikos*, 71 (2) : 193-206.

Johansen, S., Hafsten, U., 1988 - Airborne pollen and spore registrations at Ny-Ålesund, Svalbard, summer 1986. *Polar Research*, 6 : 11-17.

Joly, D., 1985 - Étude comparée du climat d'un sandur et d'une toundra selon trois ambiances climatiques. *Inter-Nord*, 17 : 95-101.

Joly, D., 1994 - *Ambiances climatiques instantanées au Spitsberg. Pour une approche méthodique par niveau d'échelle.* Paris, Annales Littéraires de l'université de Franche-Comté. 404 p.

Joly, D., Brossard, Th., Dupont, G., Elvebakk, A., Fury, R., Nilsen, L., 1999 - Localisation optimale de capteurs en vue de la modélisation des températures sur le piémont de deux glaciers au Spitsberg. *Publications de l'Association Internationale de Climatologie,* 12 : 460-467.

Joly, D., Kergomard, C., 1983 - Éléments pour une étude comparée du climat au nord et au sud de la presqu'île de Brøgger. *Norois,* 119 : 363-377.

Joly, F., 1970 - Carte géomorphologique de reconnaissance de la presqu'île de Brøgger (Spitsberg) au 1/50000. *Mémoires et documents du CNRS,* 10 : 115-123.

Jonsson, S., 1983 - On the geomorphology and past glaciation of Storöya, Svalbard. *Geografiska Annaler,* 65A (1-2) : 1-17.

Jumpponen, A., Väre, H., Mattson, K.G., Ohtonen, R., Trae, J.M., 1999 - Characterization of « safe sites » for pioneers in primary succession on recently deglaciated terrain. *Journal of Ecology,* 87 : 98-105.

Kane, D.L., Hinzman, L.D., Woo, M.K., Everett, K.K., 1992 - *Arctic Hydrology and climate change. In* Arctic ecosystems in changing climate – An ecophysiological perspective. San Diego, Academic Press : 35-57.

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

Kaufmann, R., Fuchs, M., Gosterxeier, N., 2002 - The soil fauna of an alpine glacier foreland : colonization and succession. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research,* 34 (3) : 242-250.

Keersmaecker, M.-L., 1987 - Stratégie d'échantillonnage des données de terrain intégrées dans l'analyse des images satellitaires. *L'Espace Géographique*, 3 : 195-205.

Kejna, M., Araźny, A., Siwek, K., 2000 - Spatial differentiation of weather conditions on Spitsbergen in summer season 1999. In *Polish Polar Studies*, *26th Polar Symposium* : 191-201.

Kempf, C., 1994 - *En voyage au Spitzberg terre polaire.* Paris, éditions de l'Est. 174 p.

Kenkel, N.C., Juhász-Nagy, P., Podani, J., 1989 - On sampling procedures in population and community ecology. *Vegetatio*, 83 : 195-207.

Kent, M., Gill, W.J., Weaver, R.E., Armitage, R.P., 1997 - Landscape and plant community boundaries in biogeography. *Progress in Physical Geography*, 21 (3) : 315-353.

Kergomard, C., 1978 - Quelques aspects de l'été arctique au Spitsberg occidental. *Hommes et Terres du Nord,* 2 : 19-36.

Kergomard, C., 1984 - Le retrait glaciaire et les transformations du domaine marginal de deux grands glaciers au Spitsberg occidental depuis le début du vingtième siècle. *Hommes et Terres du Nord*, 3 : 185-195.

Klimowicz, Z., 1997 - Soils associated with different types of sorted circles (West Spitsbergen). *In* P. Glowacki (*Ed) Polish Polar Studies. 24th Polar Symposium* : 159-163.

Klimowicz, Z., Uziak, A., 1996 - Arctic soil properties associated with micro-relief forms in the Bellsund region. *Catena*, 28 : 135-149.

Klokk, T., Rønning, O.I., 1987 - Revegetation experiments at Ny-Ålesund, Spitsbergen, Svalbard. *Arctic and Alpine Research*, 19 (4) : 549-553.

Klysz, P., Lindner, L., Makowska, A., Marks, L., Wysokiński, L., 1988 - Late Quaternary glacial episodes and sea level changes in the northeastern Billefjorden region, Central Spitsbergen. *Acta Geologica Polonica*, 38 (14) : 107-123.

Klysz, P., Lindner, L., Marks, L., Wysokiński, L., 1989 - Late Pleistocene and Holocene relief remodelling in the Ebbadalen-Nordenskiöldbreen region in Olav V Land, central Spitsbergen. *Polish Polar Research,* 10 (3) : 277-301.

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

Kojima, S., Wada, N., 1999 - Ecological characterization of some selected vascular species in the arctic environment of Ny-Ålesund, Svalbard, in relation to soil moisture conditions. *Polar Bioscience*, 12 : 76-86.

Kozarski, S., 1982 - The genetic variety of ice cores in the marginal forms of some Spitsbergen glaciers, Hornsund region. *Acta Universitatis Wratislaviensis*, 525 : 153-164.

Krüger, J., 1985 - Formation of a push moraine at the margin of Höfdabrekkujökull. *Geografiska Annaler*, 67A (3-4) : 199-212.

Krzyszowska, A.J., 1985 - Tundra degradation in the vicinity of the Polish Polar Station, Hornsund, Svalbard. *Polar Research*, 3 (3) : 247-252.

Krzyszowska, A.J., 1989 - Human impact on toundra environment at the Ny-Ålesund Station, Svalbard. *Polar Research,* 7 : 119-131.

Kuc, M., 1964 a - Deglaciation of Treskelen-Treskelodden in Hornsund, Vests-pitsbergen, as shown by vegetation. *Studia Geologica Polonica,* 11 : 197-206.

Kuc, M., 1964 b - Some botanical observations in connection with the "whale method" of calculating the land uplift in Hornsund, Vestspitsbergen. *Studia Geologica Polonica*, 11 : 207-216.

Kuc, M., 1996 - The vegetation zones of the Hornsund area (SW Spitsbergen). *Polish Polar Studies, 23th Polar Symposium* : 67-82.

Kuc, M., 1998 - Environs of the Polish Polar Station (Isbjörnhamna, North Hornsun, Spitsbergen) as surveyed in 1958 by vegetation maing and related methods. *Polish Polar Studies, 25th Polar Symposium* : 141-157.

Kudo, G., 1991 - Effects of snow-free period on the phenology of alpine plants inhabitting snow patches. *Arctic and Alpine Research,* 23 (4) : 436-443.

Kullman, L., 1994 - Climate and environmental change at high northern latitudes. *Progress in Physical Geography*, 18 (1) : 124-135.

Kume, A., Bekku, Y.S., Hamba, Y.T., Kanda, H., 2003 - Carbon isotope discrimination in diverging growth forms of *Saxifraga oppositifolia* in different successional stages in a High Arctic glacier foreland. *Arctic, Antartic, and Alpine Research*, 35 (3) : 377-383.

Laffly, D., Mercier, D., 1999 - Réflexion méthodologiques sur les observations de terrain et la télédétection. *Photo-Interprétation,* 2 : 15-58.

Laffly, D., Mercier, D., 2002 - Global change and paraglacial morphodynamic modification in Svalbard. *Int. J. Remote Sensing*, 23 (21) : 4743-4760.

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

Laffly, D., Moreau, M., 2004 - Aux premiers temps des paysages dans le haut-Arctique. *11ème journées de Rochebrune : Rencontres interdisciplinaires sur les systèmes complexes et naturels, le temps dans les systèmes complexes*, 25 janvier au 1er février 2004, ENST : 151-165.

Lamb, H.H., 1995 - *Climate, history and modern world.* London, New York, Routledge. 433 p.

Lambert, J.D.H., 1972 - Plant succession on tundra Mudflows : preliminary observations. *Arctic*, 25 (2) : 99-106.

Lamy, M., 1999 – *La biosphere, la biodiversité et l'homme.* Paris, Ellipses. 191 p.

Landvik, J.Y., Mangerud, J., Salvigsen, O., 1987 - The Late Weichselien and Holocene shoreline displacement on the west-central coast of Svalbard. *Polar Research*, 5, (1) : 29-44.

Landvik, J.Y., Salvigsen, O., 1985 - Glaciation development and interstadial sea-level on central Spitsbergen, Svalbard. *Polar Research*, 3 (1) : 1-10.

Lefauconnier, B., 1987 - *Fluctuations glaciaires dans le Kongsfjord. Analyses et conséquences.* Thèse de géographie physique, Grenoble I. 252 p.

Lefauconnier, B., 1990 - Fluctuations récentes des glaciers dans le Kongsfjord, 79°N Spitsberg. *Inter-Nord*, 19 : 449-453.

Lefauconnier, B., Hagen, J.O., 1990 - Glaciers and climate in Svalbard : statistical analysis and reconstruction of the Brøggerbreen mass balance for the last 77 years. *Annals of Glaciology*, 14 : 148-152.

Lefauconnier, B., Hagen, J.O., 1991 - *Surging and calving glaciers in Eastern Svalbard.* Oslo, Norsk Polarinstitutt. 130 p.

Lefauconnier, B., Hagen, J.O., Ørbaek, J. Ø., Isaksson, E., 1999 - Glacier balance trends in the Kongsfjorden area, western Spitsberg, Svalbard, in relation to the climate. *Polar Research*, 18 (2) : 307-313.

Lehman, S.J., Forman, S.L., 1992 - Late Weichselian glacier retreat in Kongsfjorden, West Spitsbergen, Svalbard. *Quaternary Research*, 37 : 139-154.

Lev, A., King, R.H., 1999 - Spatial Variation of Soil Development in a High Arctic Soil Landscape : Truelove Lowland, Devon Island, Nunavut, Canada. *Permafrost Periglac. Process.*, 10 (3) : 289-307.

Lévêque, Ch., 2001 – *Écologie. De l'écosystème à la biosphère.* Paris, Dunod. 502 p.

Lévesque, E., Svoboda, J., 1999 - Vegetation re-establishment in polar « lichen-kill » landscapes : a case study of the Little Ice Age Impact. *Polar Research*, 18 (2) : 221-228.

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

Lindner, L., Marks, L., Pekala, K., 1983 - Quaternary glaciations of south Spitsbergen and their correlation with Scandinavian glaciations of Poland. *Acta Geologica Polonica*, 33 (1-4) : 168-181.

Lliboutry, L., 1965 - *Traité de glaciologie. Glaciers - variations du climat - sols gelés. Tome 2.* Paris, Masson et Cie Editeurs. 611 p.

Long, G., 1974 - *Diagnostic phyto-écologique et aménagement du territoire. I. Principes généraux et méthodes.* Paris, Masson et Cie Editeurs. 252 p.

Lønne, I., Lauritsen, T., 1996 - The architecture of a modern push-moraine at Svalbard as inferred from ground-penetrating radar measurements. *Arctic and Alpine Research*, 28 (4) : 488-495.

Lowe, J.J., Walker, M.J.C., 1997 - *Reconstructing Quaternary Environments.* Harlow, Essex, Addison Wesley Longman. 446 p.

Lysså, A., Lønne, I, 2001 - Moraine development at a small High-Arctic valley glacier : Rieperbreen, Svalbard. *Journal of Quaternary Science*, 16 (6) : 519-529.

Machowski, J., 2000 - Liquidation of inoperative polar stations and bases as a means of environmental protection. *Polish Polar Studies*, *27th Polar Symposium* : 325-335.

Maessen, O., Freedman, B., Nams, M.L.N., Svoboda, J., 1982 - Ressource allocation in high-arctic vascular plants of differing growth form. *Can. J. Bot.*, 61 : 1680-1691.

Mangerud, J., Bolstad, M., Elgersma, A., Helliksen, D., Landvik, J.Y., Lønne, I., Lycke, A.K., Salvigsen, O., Sandahl, T., Svenden, J. I., 1992 - The last glacial maximum on Spitsbergen, Svalbard. *Quaternary Research,* 38 : 1-31.

Mangerud, J., Svenden, J.I., 1990 - Deglaciation chronology inferred from marine sediments in a proglacial lake basin, western Spitsbergen, Svalbard. *Boreas,* 19 : 249-272.

Mangerud, J., Svenden, J.I., 1992 - The last interglacial-glacial period on Spitsbergen, Svalbard. *Quaternary Science Reviews*, 11 : 633-664.

Mann, D.H., Sletten, R.S., Ugolini, F.C., 1986 - Soil development at Kongsfjorden, Spitsbergen. *Polar Research*, 4 (1) : 1-16.

Marks, L., 1983 - Late holocene evolution of the Treskelen Peninsula (Hornsund, Spitsbergen). *Acta Geologica Polonica*, 33 (1-4) : 159-167.

Matthew, R.B., Glasser, N.F., 1996 - *Glacial Geology. Ice Sheets and Landforms.* Chichester-New York-Brisbane-Toronto-Singapore, John Wiley & Sons. 364 p.

Matthew, R.B., Hambrey, M.J., Huddart, D., 1997 - Modification of clast shape in high-Arctic glacial environments. *Journal of Sedimentary Research,* 67 (3) : 550-559.

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

Matthews, J.A., 1992 - *The ecology of recently-deglaciated terrain. A geoecological approach to glacier forelands and primary succession.* Cambridge, Cambridge University press. 386 p.

Matthews, J.A., Berrisford, M.S., Quentin Dresser, P., Nesje, A., Dahl, S.O., Bjune, A.E., Bakke, J., John, H., Birks, B., Lie, Ø., Dumayne-Peaty, L., Barnett, C., 2005 - Holocene glacier history of Bjørnbreen and climatic reconstruction in central Jotunheimen, Norway, based on proximal glaciofluvial stream-bank mires. *Quaternary Science Reviews,* 24 : 67-90.

Matthews, J.A., Shakesby, R. A., Berrisford, M.S., McEven, L.J., 1998 - Periglacial patterned ground on the Styggedalsbreen glacier foreland, Jotunheimen, Southern Norway : micro-topographic, paraglacial and geoecological controls. *Permafrost Periglac. Process.*, 9 : 147-166.

Matthews, J.A., Whittaker, R.J., 1987 - Vegetation succession on the storbreen glacier foreland, Jotunheimen, Norway: a review. *Arctic and Alpine Research*, 19 : 385-395.

McCook, L.J., 1994 - Understanding ecological community succession : causal models and theories, a review. *Vegetatio*, 110 : 115-147.

Melvold, K., Hagen, J.O., 1998 - Evolution of a surge-type glacier in its quiescent phase : Kongsvegen, Spitsbergen, 1964-95. *Journal of Glaciology*, 44 (147) : 394-405.

Menzies, J., 1995 - *Modern glacial environnements : processes, dynamics and sediments.* Oxford, Butterworth-Heinemann. 621 p.

Menzies, J., 1995 - *Past glacial environments : sediments, forms and technique.* Oxford, Butterworth-Heinemann. 598 p.

Menzies, J., 2002 – *Modern and past glacial environments.* Oxford, Auckland, Boston, Johannesburg, Melbourne, New Delhi, Butterworth-Heinemann. 543 p.

Mercier, D., 1998 - *Le ruissellement au Spitsberg. L'impact d'un processus azonal sur les paysages d'un milieu polaire, presqu'île de Brøgger.* Thèse de doctorat de géographie, Clermont-Ferrand Blaise Pascal. 531 p.

Mercier, D., 2000 - Du glaciaire au paraglaciaire la métamorphose des paysages polaires au Svalbard. *Annales de Géographie,* 616 : 580-596.

Messer, A.C., 1988 - Regional variations in rates of pedogenesis and the influence of climatic factors on moraine chronosequence, Southern Norway. *Arctic and Alpine Research*, 20 (1) : 31-39.

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

Michalet, R., Gandoy, C., Joud, D., Pagès, J.P., 2002 - Plant community composition and biomass on calcareous and siliceous substrates in the Northern French Alps : comparative effects of soil chemistry. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research,* 34 (1) : 102-113.

Miljøverndepartementet, 2002 – *State of Environment in Norway : Protected areas*. Oslo, Ministry of the Environment <URL http://www.environment.no/templates/themepage_2812.aspx

Miller, G.H., 1982 - Quaternary depositional episodes, western Spitsbergen, Norway : aminostratigraphy and glacial history. *Arctic and Alpine Research,* 14 (4) : 321-340.

Miller, G.H., Sejrup, H.P., Lehman, S.J., Forman, S.L., 1989 - Glacial history and marine environmental change during the last interglacial-glacial cycle, western Spitsbergen, Svalbard. *Boreas*, 18 : 273-296.

Mizuno, K., 1998 - Succession processes of alpine vegetation in response to glacial fluctuations of Tyndall glacier, Mt. Kenya, Kenya. *Arctic and Alpine Research,* 30 (4) : 340-348.

Moign, A., 1973 - *Strandflats immergés et émergés du Spitsberg central et nord-occidental.* Thèse de doctorat de géographie, Lille III. 692 p.

Moign, A., 1974 - Géomorphologie du strandflat au Svalbard ; problèmes (âge, origine, processus). *Inter-Nord*, 13-14 : 57-72.

Moiroud, A., 1976 - *Étude écologique des marges glaciaires, en particulier de leur micropeuplement : exemple du glacier du Saint-Sorlin.* Thèse de doctorat de sciences naturelles, Lyon 1 Claude Bernard. 168 p.

Molenaar, J.G., 1987 - An ecohydrological approach to floral and vegetational patterns in Arctic landscape ecology. *Arctic and Alpine Research*, 19 (4) : 414-424.

Mølgaard, P., 1982 - Temperature observation in high arctic plants in relation to microclimat in the vegetation of Peary Land, North Greenland. *Arctic and Alpine Research*, 14 (2) : 105-115.

Moorman, B.J., Michel, F.A., 2000 - The burial of ice in the proglacial environment on Bylot Island, Arctic Canada. *Permafrost Periglac. Process.*, 11 : 161-175.

Moreau, M., 2001 - *La reconquête végétale sur la marge proglaciaire des Évettes, depuis la fin du Petit Âge de glace.* Mémoire de maîtrise de géographie, Paris I Panthéon-Sorbonne. 132 p.

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

Moreau, M., 2002 - *La reconquête végétale des marges proglaciaires des Lovén Est et Central, depuis la fin du Petit Âge de glace.* Mémoire de DEA de géographie, Paris I Panthéon-Sorbonne. 107 p.

Moreau, M. 2003 a - Impact biogéographique du recul glaciaire contemporain depuis la fin du Petit Âge Glaciaire au Spitsberg (79°N). *Environnements Périglaciaires*, 28 (10) : 34-45.

Moreau, M., 2003 b - La reconquête végétale des marges libérées des glaces, depuis la fin du Petit Âge Glaciaire, au Spitsberg. *Bulletin de l'Association des Géographes Français,* 80 (4) : 377-385.

Moreau, M., 2005 - Contexte environnemental et colonisation végétale des moraines récentes : étude comparée de deux glaciers en versant nord et sud de la presqu'île de Brøgger, Svalbard (79°N). *Norois,* 194 (1) : 73-84.

Moreau, M., Laffly, D., Joly, D., Brossard, Th., [*in press*] - Analysing the plant colonization on moraine since the end of the Little Ice Age by means of remote sensed data and a Bayesian approach. *Remote Sensing of Environment,* 99 (3) : 244-253.

Moreau, M., Mercier, D., Laffly, D., 2004 - Un siècle de dynamiques paraglaciaires et végétales au Svalbard (Midre Lovénbreen, Spitsberg nord-occidental), *Géomorphologie*, 2 : 157-168.

Morison, J., Aagaard, K., Steele, M., 2000 - Recent environmental changes in the Arctic : a review. *Arctic*, 53 (4) : 359-371.

Moureau, M., Brace, G., 2000 – *Dictionnaire des sciences de la terre. Anglais-Français, Français-Anglais*. Paris, Technip. 1 096 p.

Mueller, G., Broll, G., Tarnocai, C., 1999 - Biological Activity as Influenced by Microtopography in a Cryosolic Soil, Baffin Island, Canada. *Permafrost Periglac. Process.,* 10 (3) : 279-288.

Murray, D.F., 1997 - Regional and local vascular plant diversity in the Arctic. *Opera Botanica*, 132 : 9-18.

Nakatsubo, T., Bekku, Y., Kume, A., Koizumi, H., 1998 - Respiration of the belowground parts of vascular plants : its contribution to total soil respiration on a successional glacier foreland in Ny-Ålesund, Svalbard. *Polar Research,* 17 (1) : 53-59.

Neldner, V.J., Crooley, D.C., Cofinas, M., 1995 - Using geographic information systems (GIS) to determine the adequacy sampling in vegetation surveys. *Biological Conservation*, 73 : 1-17.

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

Nilsen, L., 1997 - *Vegetation of calcareous habitats on Svalbard. New approaches in vegetation mapping of the Ny-Ålesund area and studying of exclusive ridge communities in Sassendalen.* Dr. Scient. Thesis. Norway, Institute of biology, university of Tromsø. 129 p.

Nilsen, L., Brossard, Th., Joly, D., 1996 - Mapping plant communities in a local Arctic landscape laying scanned infrared aerial photographs in a geographic information system. *Remote Sensing of the Polar Environments,* 29 avril-1 mai 1996 *:* 159-168.

Nilsen, L., Elvebakk, A., Brossard, Th., Joly, D., 1999 - Mapping and analysing arctic vegetation : evaluating a method coupling numerical classification of vegetation data with SPOT satellite data in probability model. *Int. J. Remote Sensing,* 20 (15-16) : 2947-2977.

Nimis, P.L., 1985 - Structure and floristic composition of a high Arctic tundra : Ny-Ålesund. *Inter-Nord,* 17 : 47-58.

Nuttall, M., Callaghan, T.V., 2000 - *Environment, people, policy.* Amsterdam, Harwood Academic. 656 p.

Oberbauer, S.F., Dawson, T.E., 1992 - Water relations of arctic vascular plants. In *Arctic ecosystems in changing climate – An ecophysiological perspective*. San Diego, Academic Press : 259-275.

Odasz, A.M., 1994 - Nitrate reductive activity in vegetation below an arctic bird cliff, Svalbard, Norway. *Journal of Vegetation Science*, 5 : 913-920.

Oechel, W.C., 1997 - *Global change and arctic terrestrial ecosystems.* New York, Springer. 493 p.

Official Statistics of Norway, 2003 - *Svalbard Statistics 2003.* Oslo, Kongvinger. 228 p. <URL http://www.ssb.no/

Ohtonen, R., Fritze, H., Pennanen, T., Jumpponen, A., Trae, J., 1999 - Ecosystem properties and microbial community changes in primary succession on a glacier forefront. *Oecologia*, 119 (2) : 239-246.

Onfray, M., 2002 - *Esthétique du Pôle Nord*. Paris, Grasset. 186 p.

Ørbaek, J. Ø., Hisdal, V., Svaasand, L.E., 1999 - Radiation climate variability in Svalbard : surface and satellite observations. *Polar Research*, 18 (2) : 127-134.

Orwin, J.F., Smart, C.C., 2004 - The evidence for paraglacial sedimentation and its temporal scale in the deglaciarizing basin of Small River Glacier, Canada. *Geomorphology*, 58 : 175-202.

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

Osherenko, G., Young, O.R., 1989 - *The Age of the Arctic : hot conflicts and cold realities*. Cambridge, New York, Cambridge University Press. 316 p.

Ostendorf, B., Reynolds, J.F., 1993 - Relationships between a terrain-based hydrologic model and patch-scale vegetation patterns in an arctic tundra landscape. *Landscape Ecology*, 8 (4) : 229-237.

Österholm, H., 1986 - Studies of lake sediments and deglaciation on prins Oscars land, Nordaustlandet, Svalbard. *Geografiska Annaler,* 68A (4) : 329-344.

Österholm, H., 1990 - The late Weichselian glaciation and Holocene shore displacement on prins Oscars land, Nordaustlandet, Svalbard. *Geografiska Annaler,* 72A (3-4) : 301-317.

Osterkamp, T.E., Romanovsky, V.E., 1999 - Evidence for warming and thawing of discontinuous permafrost in Alaska. *Permafrost and Periglacial Processes,* 10 (1) : 17-37.

Ozenda, P., 1964 - *Biogéographie végétale.* Paris, Doin-Deren. 375 p.

Palmer, W.H., Miller, A.K., 1961 - Botanical evidence for the recession of a glacier. *Oikos*, 12 (1): 75-86.

Peguy, Ch.-P., 1969 – *Ces montagnes qui flottent sur le mer.* France, Arthaud. 311 p.

Peguy, Ch.-P, Brossard, Th., 1993 - Trente ans de présence française au Spitsberg (1963-1993). *Revue de géographie de Lyon,* 68 (2-3) : 203-205.

Petit-Renaud, G., 1976 - Remarques sur le refroidissement observé jusqu'à ces dernières années dans les régions arctiques et son extension à l'Europe du Nord et du Nord-Ouest. *Hommes et Terres du Nord*, 2 : 5-43.

Pickett, S.T., Collins, S.L., Armesto, J.J., 1987 - Models, Mechanisms and Pathways of Succession. *The Botanical Review*, 53 (3) : 335-371.

Pielou, E.C., 1994 - *A naturalist's guide to the Arctic*. Chicago and London, University of Chicago Press. 327 p.

Pillans, B., Naish, T., 2004 - Defining the Quaternary. *Quaternary Science Reviews*, 23 : 2271-2282.

Pissart, A., 1966 - Le rôle géomorphologique du vent dans la région de Mould Bay. *Zeitschrift für Geomorphology,* 10 : 226-236.

Pissart, A., 1987 - *Géomorphologie périglaciaire : texte des leçons de chair.* Laboratoire de géomorphologie et de géologie du quaternaire. 135 p.

Polunin, N., 1945 - Plant life in Kongsfjord, West Spitsbergen. *Journal of Ecology*, 33 (1) : 82-108.

Polunin, N., 1959 - *Circum-polar Arctic flora*. Oxford, Clarendon Press. 514 p.

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

Pruitt, W.O., 1978 - Boreal Ecology. *Studies in Biology*, 91 : 1-73.

Rabot, C., 1900 - *Variations de longueur des glaciers dans les régions Arctiques et Boréales*. Genève, Bale, Georg & Co. 250 p.

Råheim, E., 1992 - Registration of vehicular tracks on the Svalbard archipelago. *Meddelelser,* 122 : 3-51.

Ranson, K.J., Sun, G., Kharuk, V.I., Kovacs, K., 2004 - Assessing tundra-taiga boundary with multi-sensor satellite data. *Remote Sensing of Environment*, 93 : 283-295.

Rapley, C., 1999 - Global change and the polar regions. *Polar Research*, 18 (2) : 117-118.

Raynolds, M.K., Walker, D.A., Maier, H.A., [*in press*] - NDVI patterns and phytomass distribution in the circumpolar Arctic. *Int. J. Remote Sensing and Environment*.

Razzhivin, V.Y., 1997 - Life form adaptations of vascular plants to the most extreme environments of Asian Arctic. *Opera Botanica*, 132 : 169-178.

Reeves, H., 2003 – *Mal de Terre.* Paris, Seuil. 272 p.

Reidar, E., Elvebakk, A., 1996 - A catalogue of Svalbard plants, fungi, algae, and cyanobacteria. Part 1. Vascular plants. *Norsk Polarinstitutt Skrifter*, 198 : 9-55.

Research Council of Norway, 2002 - *Research in Svalbard 2002.* Longyearbyen, Svalbard Science forum. 174 p.

Reynold, J.F., Tenhunen, J.D., 1996 - *Landscape function and disturbance in arctic tundra.* Berlin, New York, Springer. 428 p.

Romanovsky, V., 1999 - *Le Spitsberg et les baleiniers basques.* Biarritz, Atlantica. 233 p.

Rønning, O.I., 1969 - Features of the ecology of some Arctic Svalbard plant communities. *Arctic and Alpine Research*, 1 (1) : 29-44.

Rønning, O.I., 1996 - *The flora of Svalbard.* Oslo, Norsk Polarinstitutt. 184 p.

Rougerie, G., 1970 - Micro-milieux et paysages végétaux au Spitsberg nord-occidental. *Mémoires et documents du CNRS,* 10 : 205-218.

Rougerie, G., 2003 – *Géographie des marges*. Paris, L'Harmattan. 150 p.

Roussel, E., 2005 - L'évolution morphologique récente du réseau hydrographique sur les marges des glaciers Lovén, presqu'île de Brøgger (Spitsberg, 79°N). *Norois,* 194 *:* 85-96.

Ryder, J.M., 1971 - The stratigraphy and morphology of paraglacial alluvial fans in south-central British Columbia. *Canadian Journal of Earth Sciences,* 10 : 279-298.

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

Sætersdal, M., Birks, H.J.B., 1997 - A comparative ecological study of Norwegian mountain plants in relation to possible future climatic change. *Journal of Biogeography,* 24 : 127-152.

Sagarin, R., Micheli, F., 2001 - Climate change in non-traditional data sets. *Science,* 294 : 811.

Sage, B., 1986 - *The Arctic and its wildlife.* London, Croom Helm. 190 p.

Salvigsen, O., 1984 - Occurrence of pumice on raised beaches and Holocene shoreline displacement in the inner Isfjorden area, Svalbard. *Polar Research*, 2 (1) : 107-113.

Salvigsen, O., Forman, S.L., Miller, G.H., 1992 - Thermophilous molluscs on Svalbard during the Holocene and their paleoclimatic implications. *Polar Research*, 11 (1) : 1-10.

Sanders, L., 1989 - *L'analyse statistique des données en géographie.* Montpellier, Reclus. 267 p.

Schaefer, J.A., Messier, F., 1995 - Scale-dependent correlations of arctic vegetation and snow cover. *Arctic and Alpine Research*, 27 (1) : 38-43.

Schöner, W., Schöner, M., 1997 - Effects of glacier retreat on the outbursts of Goësvatnet, southwest Spitsbergen, Svalbard. *Journal of Glaciology*, 43 (144) : 276-282.

Serebryannyy, L.P., Tishkov, A.A., Malyasova, Ye., 1984 - Reconstruction of the development of vegetation in Arctic High Latitudes. *Polar Geography and Geology*, 6 : 75-84.

Serres, M. 1980 - *Le passage du nord-ouest.* Paris, Les éditions de minuit. 195 p.

Serreze, M.C., Walsh, J.E., Chapin III, F.S., Osterkamp, T., Dyurgerov, M., Romanovsky, V., Oechel, W.C., Morison, J., Zhang, T., Barry, R.G., 2000 - Observational evidence of recent change in the northern high-latitude environment. *Climatic Change*, 46 : 159-207.

Shaver, G.R., Kummerow, J., 1992 - Phenology, resource allocation and growth of arctic vascular plants. In *Arctic ecosystems in changing climate – An ecophysiological perspective*. San Diego, Academic Press : 193-210.

Sigafoos, R.S., 1952 - Frost action as a primary physical factor in tundra plant communities. *Ecology*, 33 (4) : 480-487.

Six, D., Reynaud, L., Letréguilly, A., 2001 - Bilans de masse des glaciers alpins et scandinaves, leurs relations avec l'oscillation du climat de l'Atlantique nord. *Earth and Planetary Sciences,* 333 : 693-698.

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

Skye, E., 1989 - Changes to the climate and flora of Hopen Island during the last 110 years. *Arctic,* 42 (4) : 323-332.

Sletten, K., Lysså, A., Lønne, I., 2001 - Formation and disintegration of a high-arctic ice-cored moraine complex, Scott Turnerbreen, Svalbard. *Boreas,* 30 : 272-284.

Sletten, R.S., Ugolini, F.C., 1990 - Pedogenic processes in well-drained soils of Spitsbergen and Nordaustlandet. *Inter-Nord*, 19 : 465-470.

Snyder, J.A., Werner, A., Miller, G.H., 2000 - Holocene cirque glacier activity in western Spitsbergen, Svalbard : sediment records from proglacial Linnévatnet. *The Holocene,* 10 (5) : 555-563.

Sollid, J.L., Sørbel, L., 1988 - Influence of temperature in formation of end moraines in Fennoscandia and Svalbard. *Boreas,* 17 : 553-558.

Sommerville, P., Mark, A.F., Wilson, J.B., 1982 - Plant succession on moraines of the huer Dart Valley, southern South Island, New Zealand. *New Zealand Journal of Botany*, 20 (3) : 227-244.

Soutadé, G., Baudière, A., 1970 - Végétation et modelés des Hauts Versants Septentrionaux de la Sierra Nevada. *Annales de Géographie*, 436 : 709-736.

Soutadé, G., Baudière, A., 1985 - Sur la notion de système phytomorphogénétique et l'utilisation de ce concept pour l'étude de la végétation des milieux supra forestiers. *XIII*^{e} *Colloque phytosociologique sur la végétation et la géomorphologie* : 173-177.

Spjelkavik, S., 1995 - A satellite-based map compared to a traditional vegetation map of Arctic vegetation in the Ny-Ålesund area, Svalbard. *Polar Record,* 31 (177) : 257-269.

Stankowski, W., Kasprzak, L., Kostrzewski, A., Rygielski, W., 1989 - An outline of morphogenesis of the region between Hörbyedalen and Ebbadalen, Petuniabukta, Billefjorden, central Spitsbergen. *Polish Polar Research*, 10 (3) : 267-276.

Stevens, M.H., Carson, W.P., 1999 - Plant density determines species richness along an experimental fertility gradient. *Ecology*, 80 (2) : 455-465.

Stöcklin, J., Bäumler, E., 1996 - Seed rain, seedling establishment and clonal growth strategies on a glacier foreland. *Journal of Vegetation Science*, 7 : 45-56.

Somson, P., 1983 – *Contribution à l'étude de la végétation des pierriers et éboulis pyrénéens dans ses relations avec la dynamique du modèle support.* Thèse de 3ème cycle, Toulouse III. 243 p.

Stonehouse, B., 1989 - *Polar Ecology.* Glasgow, New York, Chapman et Hall, Blackie. 222 p.

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

Stork, A., 1963 - Plant immigration in front of retreating glaciers, with examples from the Kednekajse area, Northern Sweden. *Geografiska Annaler*, 45A : 1-21.

Stow, D.A., Hope, A., McGuire, D., Verbyla, D., Gamon, J., Huemmrich, F., Houston, S., Racine, C., Sturm, M., Tape, K., Hinzman, L., Yoshikawa, K., Tweedie, C., Nole, B., Silapaswan, C., Douglas, D., Griffith, B., Jia, G., Epstein, H., Walker, D., Daeschner, S., Petersen, A., Zhou, L., Myneni, R., 2004 - Remote sensing of vegetation and land-cover change in Arctic Tundra Ecosystems. *Remote Sensing of Environment*, 89 : 281-308.

Styszyńska, A., 2000 - Correlation between air temperature in the area of Spitsbergen and Jan Mayen and ice cover of the Barents and Greenland seas over period 1972-1994. *Polish Polar Studies, 27th Polar Symposium* : 280-295.

Surova, T.G., Troitsky, L.S., Skobeyeva, Ye.I., Puning, Ya.-M.K., 1988 - Changes in glacioclimatic conditions on Svalbard during the subboreal period. *Polar Geography and Geology*, 61 : 108-112.

Sveinbjörnsson, B., 1992 - Arctic tree line in a changing climate. In *Arctic ecosystems in changing climate – An ecophysiological perspective*. San Diego, Academic Press : 239-253.

Svendsen, H., Beszczynska-Møller, A., Hagen, J.O., Lefauconnier, B., Tverberg, V., Gerland, S., Ørbæk, J.B., Bischof, K., Papucci, C., Zajaczkowski, M., Azzolini, R., Bruland, O., Wiencke, C., Winther, J-G., Dallmann, W., 2002 - The physical environment of Kongsfjorden-Krossfjorden, an Arctic fjord system in Svalbard. *Polar Research*, 21 (1) : 133-166.

Svendsen, J.I., Mangerud, J., 1997 - Holocene glacial and climatic variations on Spitsbergen, Svalbard. *The Holocene,* 7 (1) : 45-57.

Svoboda, J., Henry, G.H.R., 1987 - Succession in marginal arctic environments. *Arctic and Alpine Research,* 19 (4) : 373-384.

Szponar, A., 1975 - Ablation of the ice-moraines ridges and its morphological effects, with glaciers of the Hornsund region as exemple. *Acta Universitatis Wratislaviensis*, 251 : 101-125.

Thomas, D.S.G., Goudie, A., 2000 - *The dictionary of Physical Geography*. USA, UK, Blackwell publishers. 610 p.

Toitsky, L.S., 1981 - The history of the glaciation of Svalbard. *Polar Geography and Geology,* 2 : 57-81.

Tolgensbakk, J., Sollid, J.L., 1987 – *Kvadehuksletta, geomorfologi og Kvartaergeologi, 1/10 000.* Oslo, Geografisk Institutt.

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

Tricart, J., 1963 - *Géomorphologie des régions froides.* Paris, Presse Universitaire de France. 289 p.

Uchida, M., Muraoka, H., Nakatsubo, T., Bekku, Y., Ueno, T., Kanda, H., Koizumi, H., 2002 - Net photosynthesis, respiration, and production of the moss *Sanyonia uncinata* on glacier foreland in the high arctic, Ny-Ålesund. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 34 (3) : 287-292.

UNET, 2002 – *Vital Arctic Graphics. People and global heritage on our last wild shores.* Norway, Ed. Ahlenuis, H., Johnsen, K., Nellemann, C. 48 p. <URL http://vitalgraphics.net/_documents/vitalarcticgraphics.pdf

Vallette, Y., 2001 - Le sommet du Spitsberg Newton ou Perrier ? *Revue XYZ*, 88 : 36-42.

Van Der Knaap, W.O., 1985 - Human influence on natural arctic vegetation in the 17th century and climatic change since A.D. 1600 in northwest Spitsbergen : a paleobotanical study. *Arctic and Alpine Research*, 17 (4) : 371-387.

Van Der Knaap, W.O., 1988 - A pollen diagram from Brøggerhalvøya, Spitsbergen : changes in vegetation and environment from CA. 4400 to CA. 800 BP. *Arctic and Alpine Research,* 20 (1) : 106-116.

Van Der Knaap, W.O., 1989 - Past vegetation and reindeer on Edgeøya (Spitsbergen) between c. 7 900 and c. 3 800 BP, studied by means of peat layers and reindeer faecal pellets. *Journal of Biogeography*, 16 : 379-394.

Van Vliet-Lanoë, B., 1988 - *Le rôle de la glace de ségrégation dans les formations superficielles de l'Europe de l'ouest.* Thèse de doctorat de géographie, Paris I. 857 p.

Van Vliet-Lanoë, B., 1990 - Recherches cryopédologiques sur la rive sud du Kongsfjord : de l'origine des sols structurés périglaciaires. Gonflement cryogénique différentiel et gradient de gélivité. *Inter-Nord*, 19 : 471-478.

Van Vliet-Lanoë, B., Francou, B., 1988 - Étude micromorphologique et dynamique comparative de sols striés et autres petites formes fluentes superficielle en milieu arctique, alpin, andin. *Bulletin du Centre de Géomorphologie de Caen,* 34 : 47-64.

Vetaas, O.R., 1994 - Primary succession of plant assemblages on a glacier foreland – Bødalsbreen, southern Norway. *Journal of Biogeography,* 21 : 297-308.

Vetaas, O.R., 1997 - Relationship between floristics gradients in a primary succession. *Journal of Vegetation Science*, 8 : 665-676.

Viereck, L.A., 1966 - Plant succession and soil development on gravel outwash of the Muldrow glacier, Alaska. *Ecological Monographs,* 3 : 181-199.

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

Viken, A., 1998 - Tourism regulation – cultural norms or legislation ? Outdoor life and tourim regulation in Finmark and on Svalbard. *Meddelelser*, 159 : 63-74.

Viken, A., Jørgensen, F., 1998 - Tourisme on Svalbard. *Polar Record*, 34 (189) : 123-128.

Vincent, M., Geoffray, H., 1970 - Étude d'un régime glaciaire en fonction de la température et de l'ensoleillement - Baie du Roi, été 66. *Mémoires et Documents du CNRS*, 10 : 107-113.

Virkanen, R.J., Lundberg, P.A., Moen, J., Oksanen, L., 1997 - Topographic and altitudinal patterns in plant communities on European arctic islands. *Polar Biology,* 17 (2) : 95-113.

Vivian, H., 1964 - Premières observations sur le régime estival des torrents glaciaires du Spitsberg. *Norois*, 41 : 281-307.

Vivian, R., 1965 - Glaces mortes et morphologie glaciaire. *Revue de Géographie Alpine*, 53 (3) : 371-401.

Wada, N., 1999 - Factors affecting the seed-setting success of *Dryas octopetala* in front of Brøggerbreen (Brøgger Glacier) in the high Arctic, Ny-Ålesund, Svalbard. *Polar Research,* 18 (2) : 261-268.

Wada, N., Kudo, G., Kojima, S., 1999 - Gender variation of *Dryas octopetala* along snowmelt and latitudinal gradients in the subarctic and the high Arctic. *Polar Bioscience*, 12 : 87-99.

Walker, D.A., Raynolds, M.K., Daniëls, F.J.A., Einarsson, E., Elvebakk, A., Gould, W.A., Katenin, A.E., Kholod, S.S., Markon, C.J., Melnikov, E.S., Moskalenko, N.G., Talbot, S.S., Yurtsev, B.A., 2004 – A vegetation map of the arctic tundra biome (scale 1 : 7 500 000) : 1. Overview, methods, and legend. *Journal of Vegetation Science*, manuscript for submission.

Walker, L.R., Chapin III, F.S., 1987 - Interactions among processes controlling successional change. *Oikos*, 50 (1) : 131-135.

Walker, M.D., Gould, W.A., Chapin III, F.S., 2001 – Scenarios of biodiversity changes in Arctic and Alpine tundra. *Ecological Studies,* 152 : 83-100.

Wallén, C.C., 1986 - Impact of present century climate fluctuations in the northern hemisphere. *Geografiska Annaler*, 68A (4) : 245-278.

Walsh, S.J., Davis, F.W., 1994 - Applications of remote sensing and geographic information systems in vegetation science: introduction. *Journal of Vegetation Science,* 5 : 610-613.

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

Wardle, P., 1980 - Primary succession in Westland National Park and its vicinity, New Zealand. *New Zealand Journal of Botany*, 18 (2) : 221-232.

Wartburton, J., 1990 - An alpine proglacial fluvial sediment budget. *Geografiska Annaler*, 72A : 261-272.

Watson, R.T., Zinyoxera, M.C., Moss, R.H., Dokken, D.J., 1997 - *The regional impacts of climate change : an assessment of vulnerability.* Special Report of IPCC Working group II, Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press. 517 p.

Werner, A., 1993 - Holocene moraine chronology, Spitsbergen, Svalbard : lichenometric evidence for multiple Neoglacial advances in the Arctic. *The Holocene,* 3 (2) : 128-137.

West, M.H., Maxted, A.P., 2000 - An assessment of tundra degradation resulting from the presence of a field camp in Kongsfjorden, Svalbard. *Polar Record,* 36 (198) : 203-210.

Whittaker, R.J., 1991 - The vegetation of the Storbreen gletschervorfeld, Jotunheimen, Norway. IV. Short-term vegetation change. *Journal of Biogeography*, 18 : 41-52.

Whittaker, R.J., 1993 - Plant population patterns in a glacier foreland succession : pioneer herbs and later-colonizing shrubs. *Ecography*, 16 : 117-136.

Wilmking, M., Juday, G.P., 2005 - Longitudinal variation of radial growth at Alaska's northern treeline – recent changes and possible scenarios for the 21st century. *Global and Planetary Change (*article in press).

Wilson, R.C.L., Drury, S.A., Chapman, J.L., 2000 - *The Great Ice Age, Climate Change and Life*. London, New York, Routledge. 267 p.

Winther, J.-G., Bruland, O., Sand, K., Killingtveit, Å., Marechal, D., 1997 - Snow accumulation distribution on Spitsbergen, Svalbard, in 1997. *Polar Research,* 17 (2) : 155-164.

Worsley, P., Ward, M.R., 1974 - Plant colonization of recent "annual" moraine ridges at Austre Okstindbreen, North Norway. *Arctic and Alpine Research*, 6 (2) : 217-230.

Wüthrich, Ch., Döbeli, C., Schaub, D., Leser, Basel, H., 1994 - The pattern of carbon-mineralisation in the high-arctic Tundra (Western and Northern Spitsbergen) as an expression of landscape ecologic environment heterogeneity. *Zeischrift für Geomorphology*, Sul.-Bd. 97 : 251-264.

Yurtsey, B.A., 1994 - Floristic division of the Arctic. *Journal of vegetation Science*, 5 : 765-776.

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

Ziaja, W., 1997 - Deglaciation of Sørkaland (Spitsbergen) in the 20th century. In *Polish Polar Studies, 24th Polar Symposium* : 233-236.

Ziaja, W., 1998 - Changes of coastline in Sørkaland (Spitsbergen) after the Little Ice Age. In *Polish Polar Studies, 25th Polar Symposium* : 239-277.

Ziaja, W., 2001 - Glacial recession in Sørkaland and Central Nordenskiöldland, Spitsbergen, Svalbard, during the 20th century. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research,* 33 (1) : 36-41.

Ziaja, W., Dubiel, E., 1996 - Vascular plant succession during contemporary deglaciation in the mountains of Nordenskiöld land, Spitsbergen. In *Polish Polar Studies, 23th Polar Symposium* : 99-104.

Zielke, M., Ekker, A.S., Olsen, R.A., Spjelkavik, S., Solheim, B., 2002 - The influence of abiotic factors on biological nitrogen fixation in different types of vegetation in the high arctic, Svalbard. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research,* 34 (3) : 293-299.

Zobel, M., 1992 - Plant species coexistence – the role of historical, evolutionary and ecological factors. *Oikos*, 65 : 314-320.

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

Annexes

1. Liste des abréviations des espèces végétales	373
2. Succession primaire dans la marge du Midre Lovén	374
3. Profil de probabilités des classes	375
4. Cartes de probabilités des classes de faciès paysagers	382
5. Cartes de probabilités des espèces végétales	384
6. Fiches de relevés de terrain	393
7. Liste des documents utilisés	396
8. Flore phanérogamique morainique	398

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

Annexe 1

Abréviations des espèces végétales

Abréviations utilisées dans le cas de l'étude de l'impact de la microtopographie dans la marge du glacier Midre Lovén (AFC, profil des classes de la CAH et des probabilités).

Arenaria	*Arenaria pseudofrigida*
Braya	*Braya purpurascens*
Carex_nar	*Carex nardina*
Cetraria_de	*Cetraria delisei*
Cer_arc	*Cerastium arcticum*
Cochlearia	*Cochlearia officinalis*
Deschampsia	*Deschampsia alpina*
Draba	*Draba species*
Lichen	Lichens
Minuartia	*Minuartia rubella*
Mousse	Mousses
Oxyria	*Oxyria digyna*
Pedicularis	*Pedicularis hirsuta*
Polygonum	*Polygonum viviparum*
Polytrichum	*Polytrichum species*
Sagina	*Sagina nivalis*
Salix_pol	*Salix polaris*
Sanyonia	*Sanyonia uncinata*
Saxi_ces	*Saxifraga cespitosa*
Saxi_op	*Saxifraga oppositifolia*
Silene_ac	*Silene acaulis*
Silene_ur	*Silene uralensis*
Poa_ab	*Poa abbreviata*

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

Annexe 2

Succession primaire sur la marge du glacier Midre Lovén

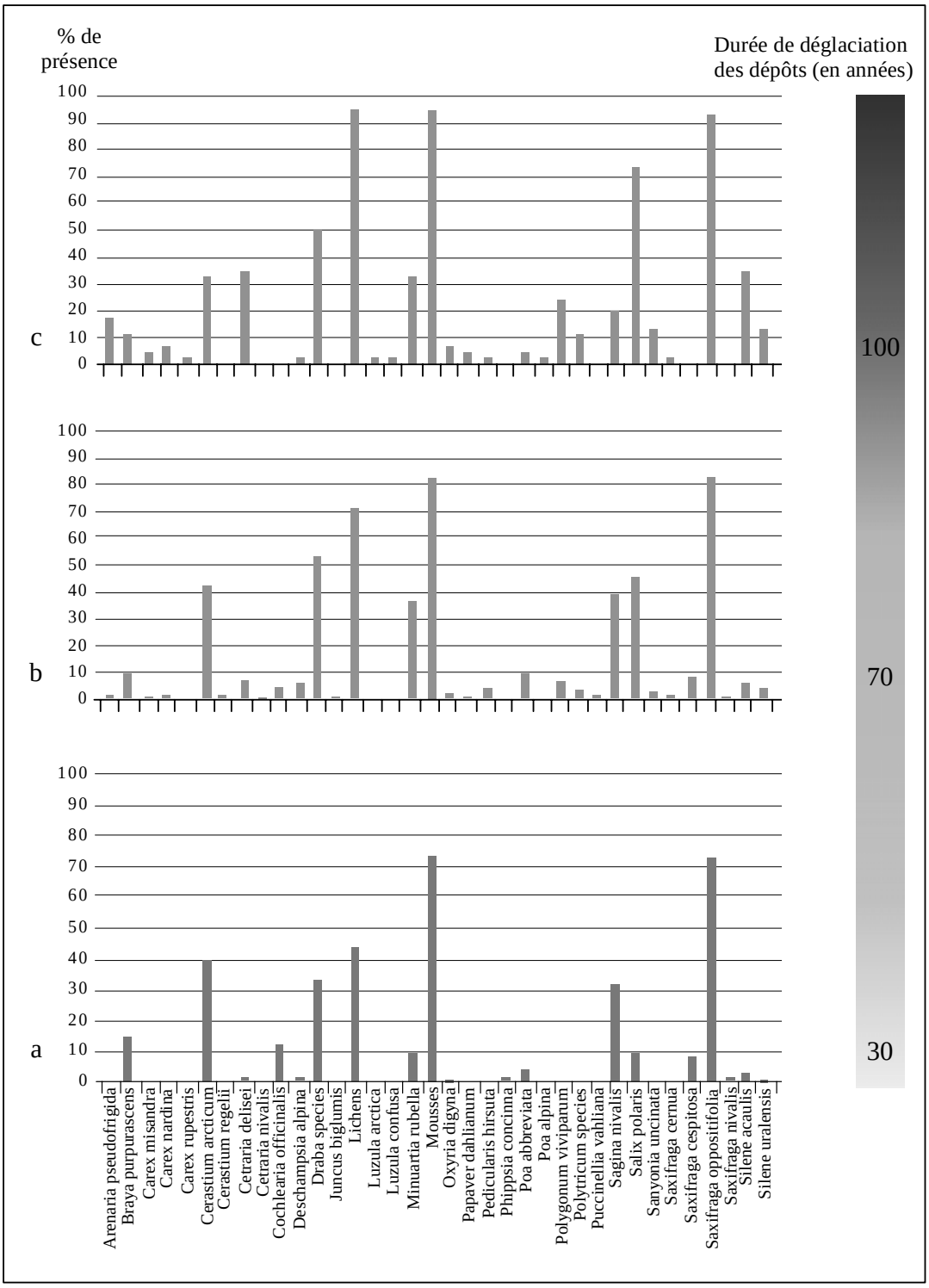


Fig. 136 - Évolution des cortèges floristiques sur la marge du glacier Midre Lovén en relation avec la durée de déglaciation des dépôts d'après l'échantillonnage stratifié systématique non-aligné. *Les relevés réalisés dans les zones de ruissellement ont été exclus de cette analyse, ce qui permet de totaliser 756 relevés.*

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

Annexe 3

Profils de probabilités des classes

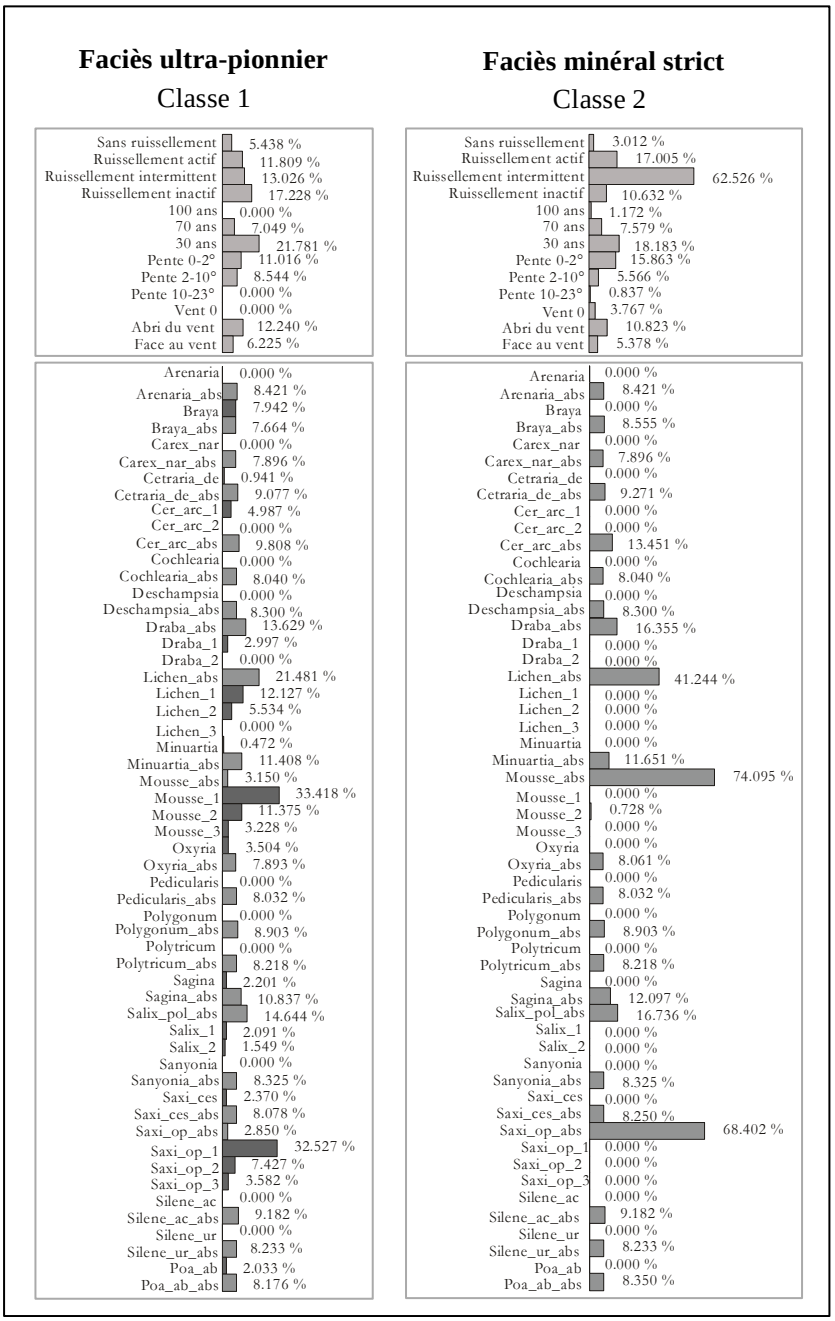


Fig. 137 – Profil des classes au faciès minéral à partir des probabilités conditionnelles pondérées par l'effectif de la classe.

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

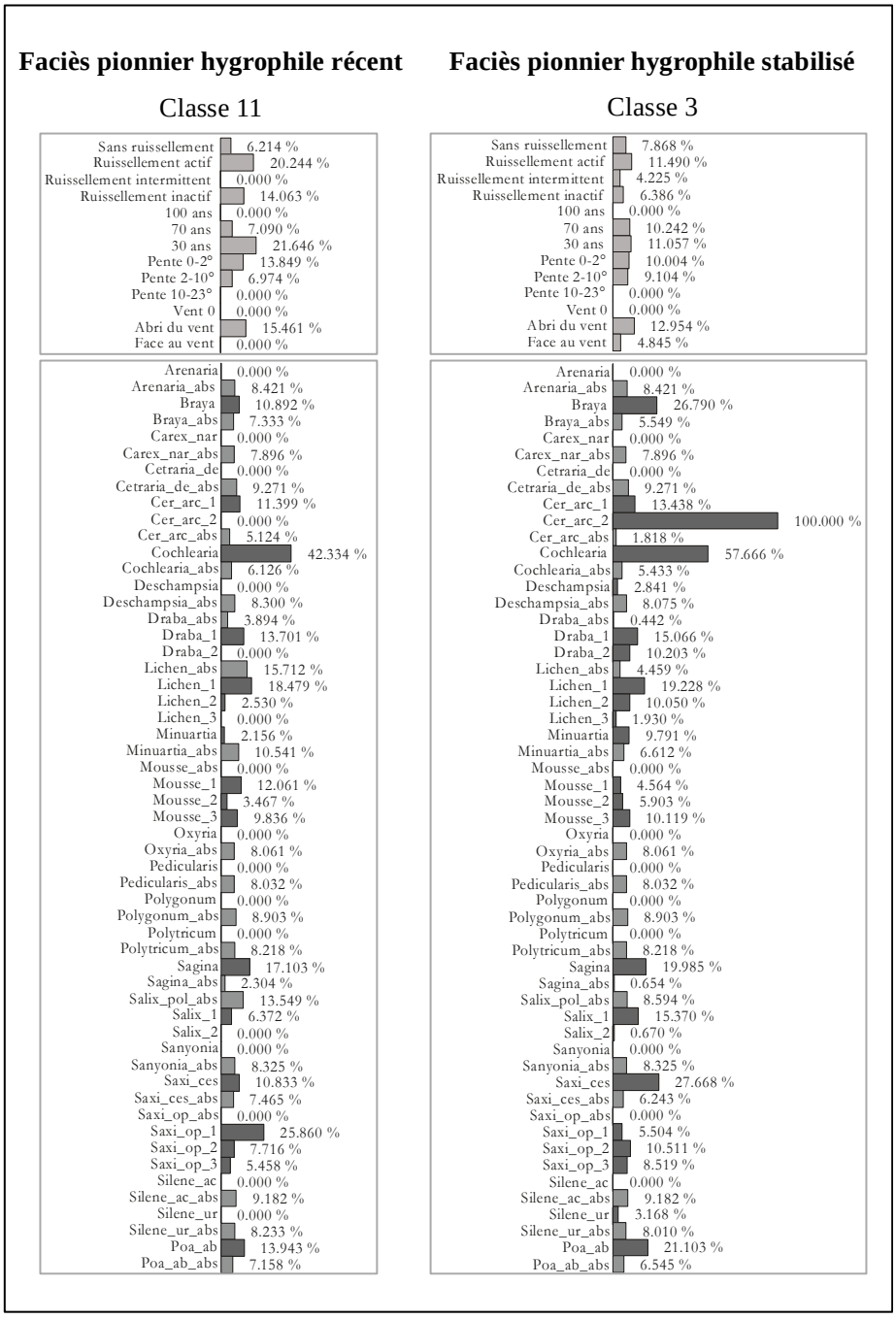


Fig. 138 – Profils des classes au faciès pionnier hygrophile à partir des probabilités conditionnelles pondérées par l'effectif de la classe.

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

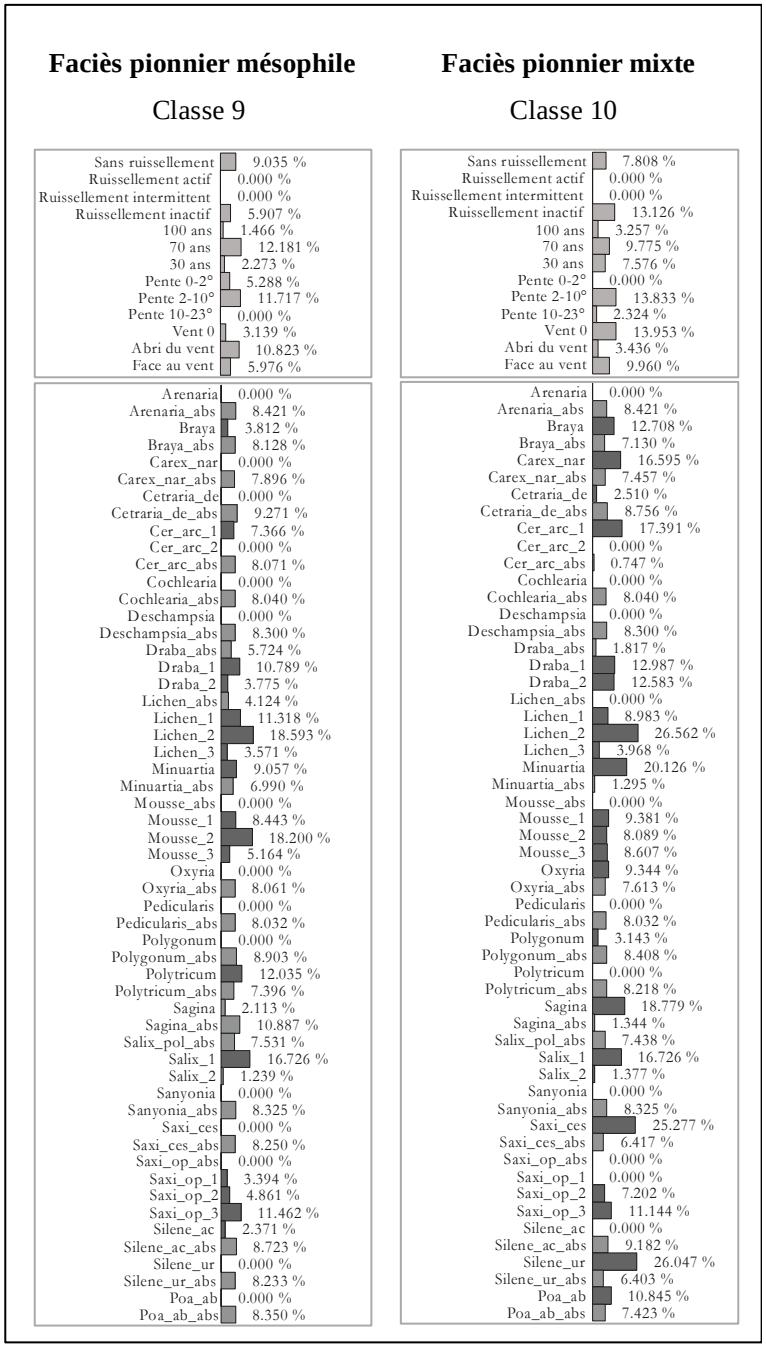


Fig. 139 – Profils des classes au faciès pionnier mésophile et mixte à partir des probabilités conditionnelles pondérées par l'effectif de la classe.

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

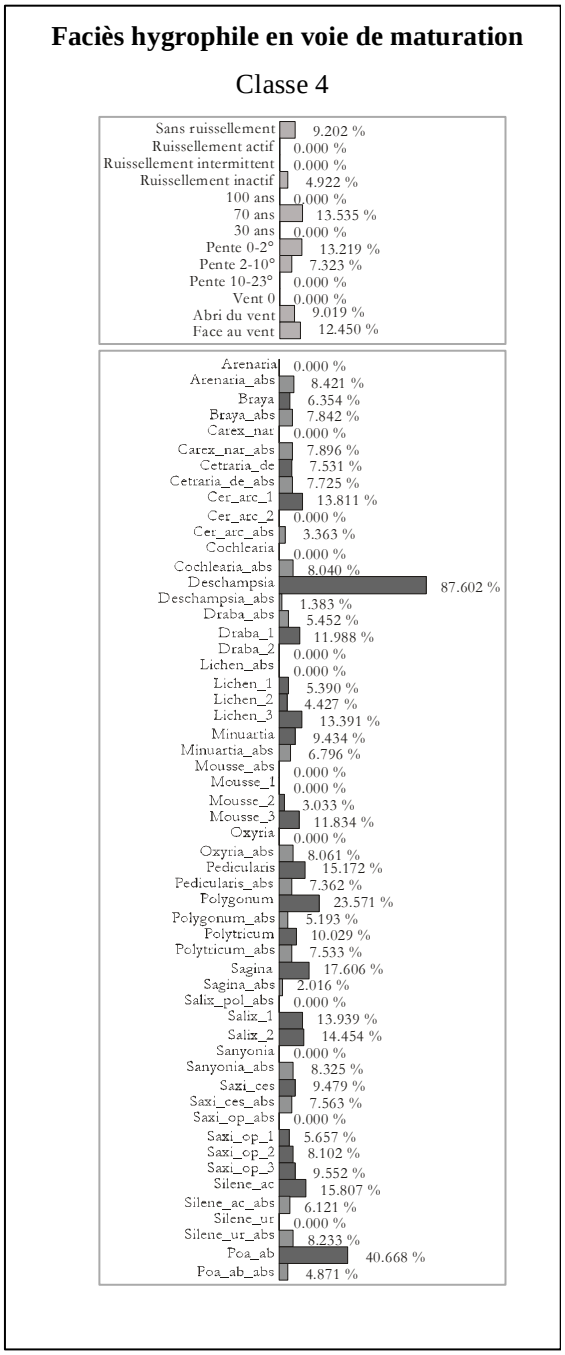


Fig. 140 – Profil de la classe au faciès hygrophile de transition à partir des probabilités conditionnelles pondérées par l'effectif de la classe.

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

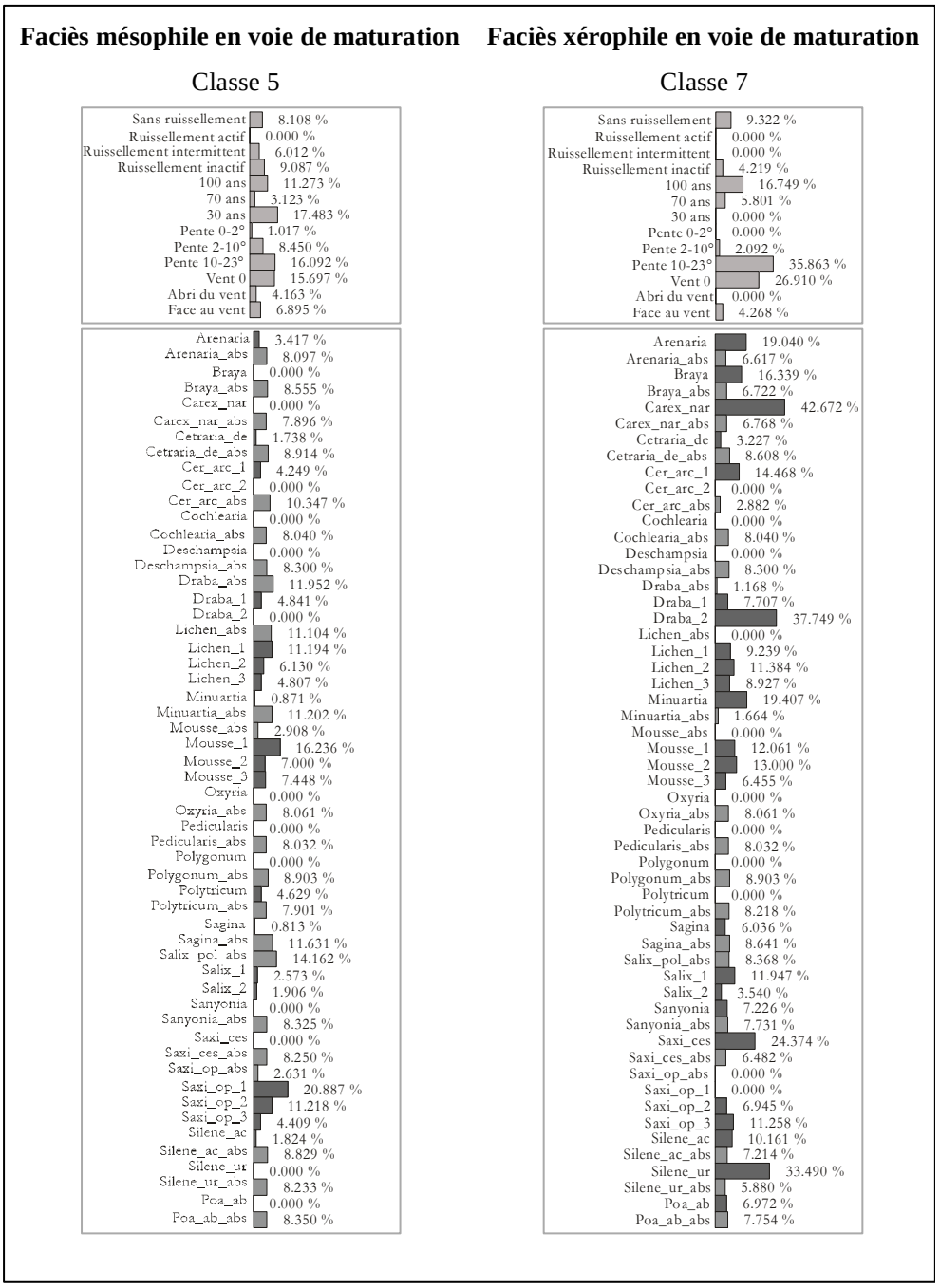


Fig. 141 – Profils des classes au faciès mésophile et xérophile de transition à partir des probabilités conditionnelles pondérées par l'effectif de la classe.

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

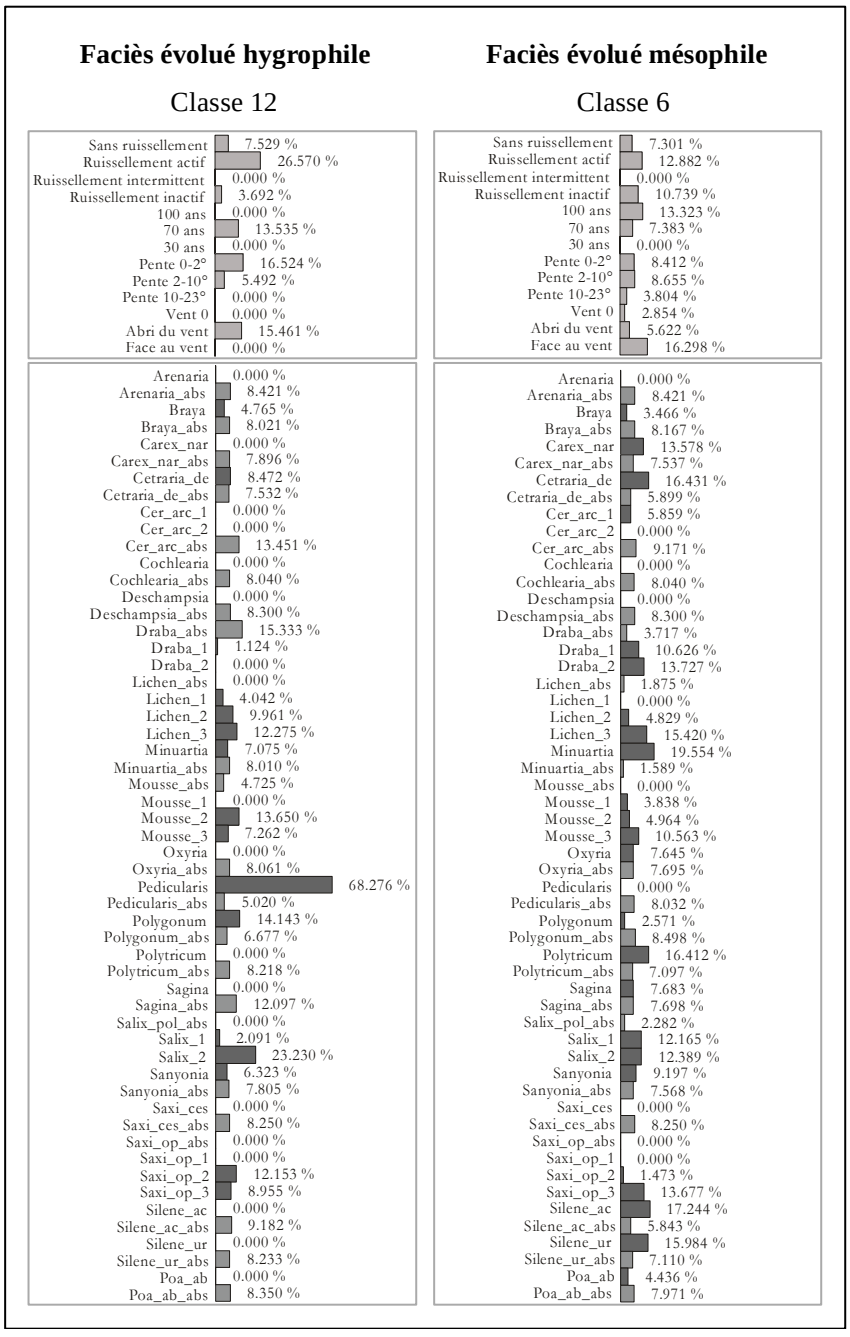


Fig. 142 – Profil des classes au faciès évolué hygrophile et mésophile à partir des probabilités conditionnelles pondérées par l'effectif de la classe.

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

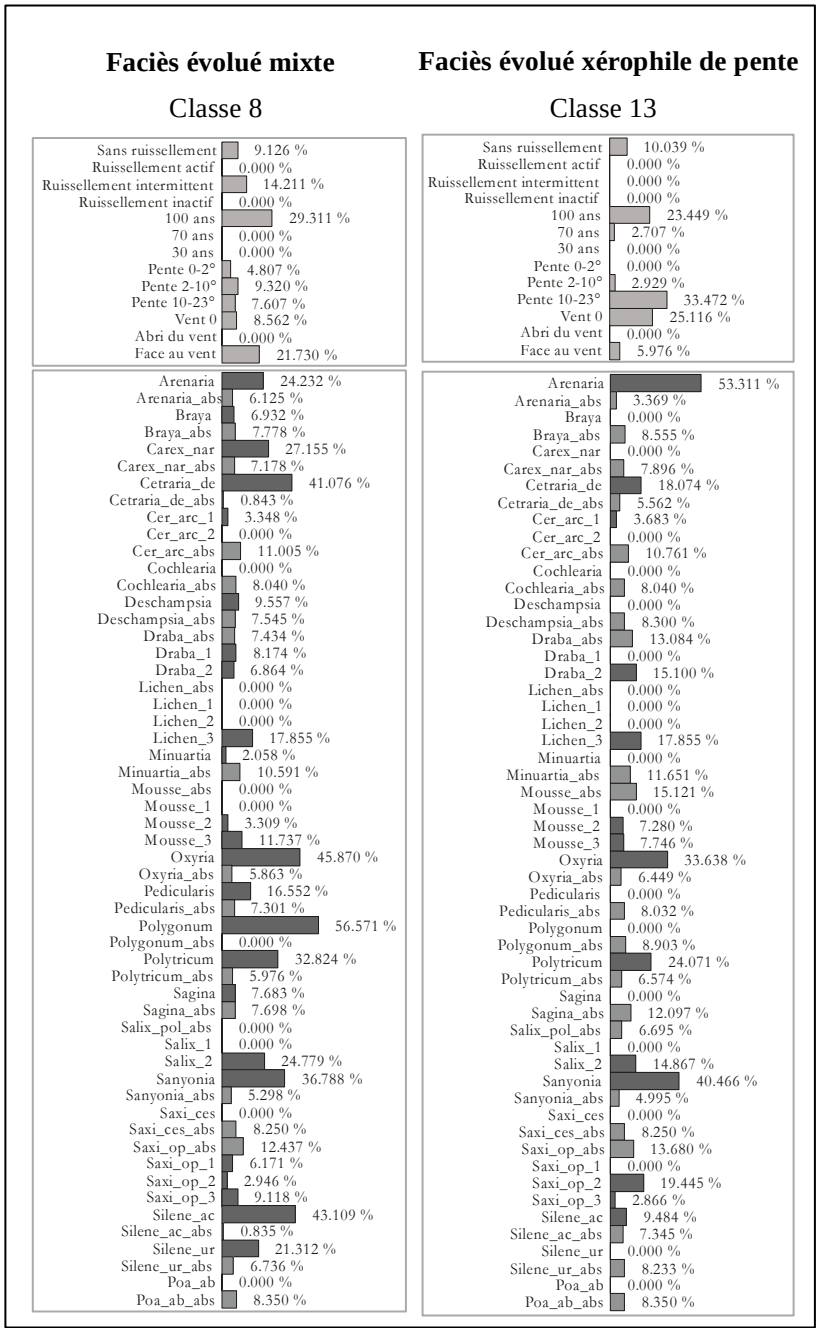


Fig. 143 – Profil des classes au faciès évolué mixte et xérophile à partir des probabilités conditionnelles pondérées par l'effectif de la classe.

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

Annexe 4

Cartes de probabilités conditionnelles des classes de faciès paysagers sur la marge du glacier Midre Lovén

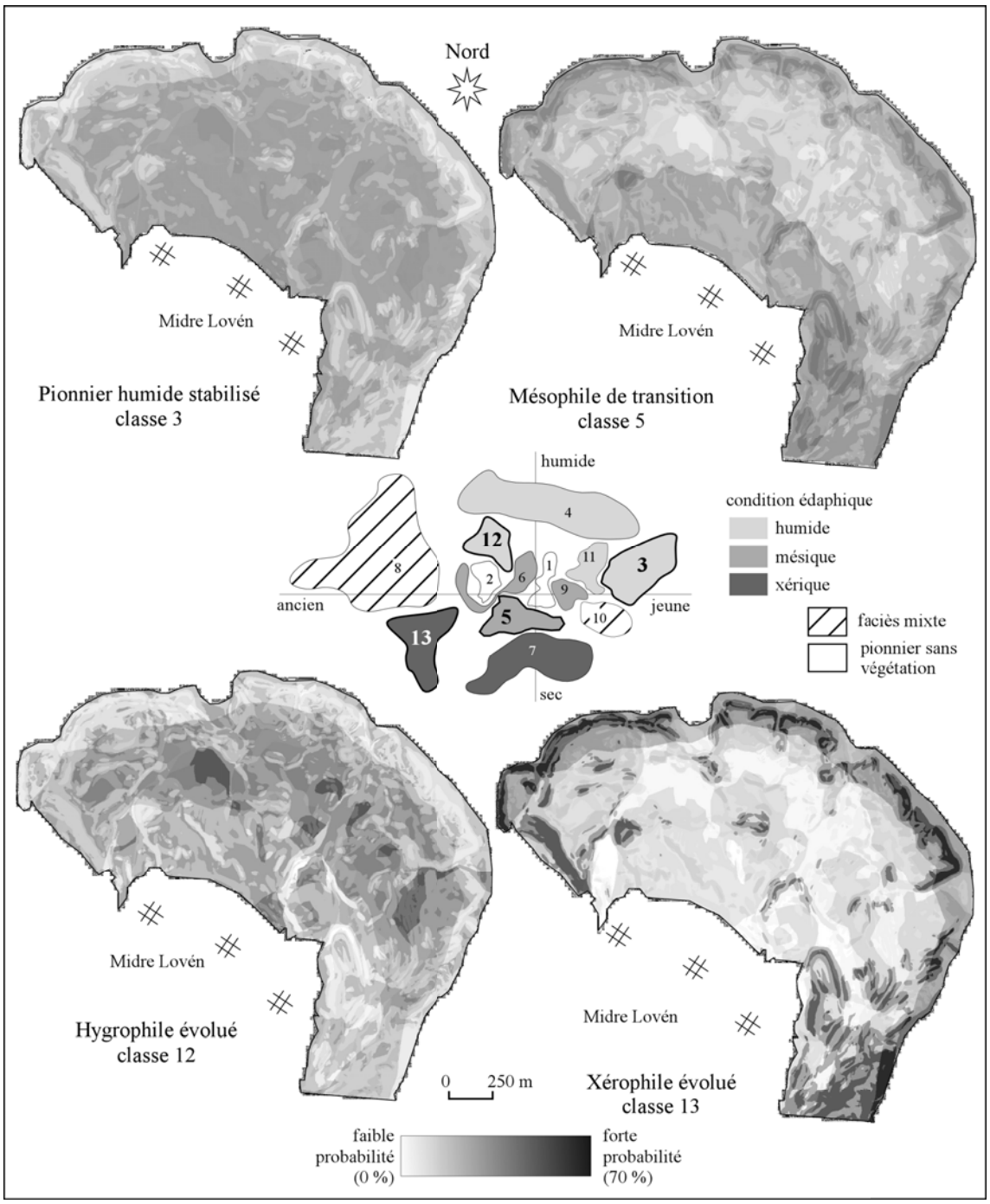


Fig. 144 – Cartes de probabilités des faciès faiblement associés aux conditions mésologiques (3, 5) et associés à la pente (12, 13) *d'après le calcul des probabilités conditionnelles pondérées.*

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

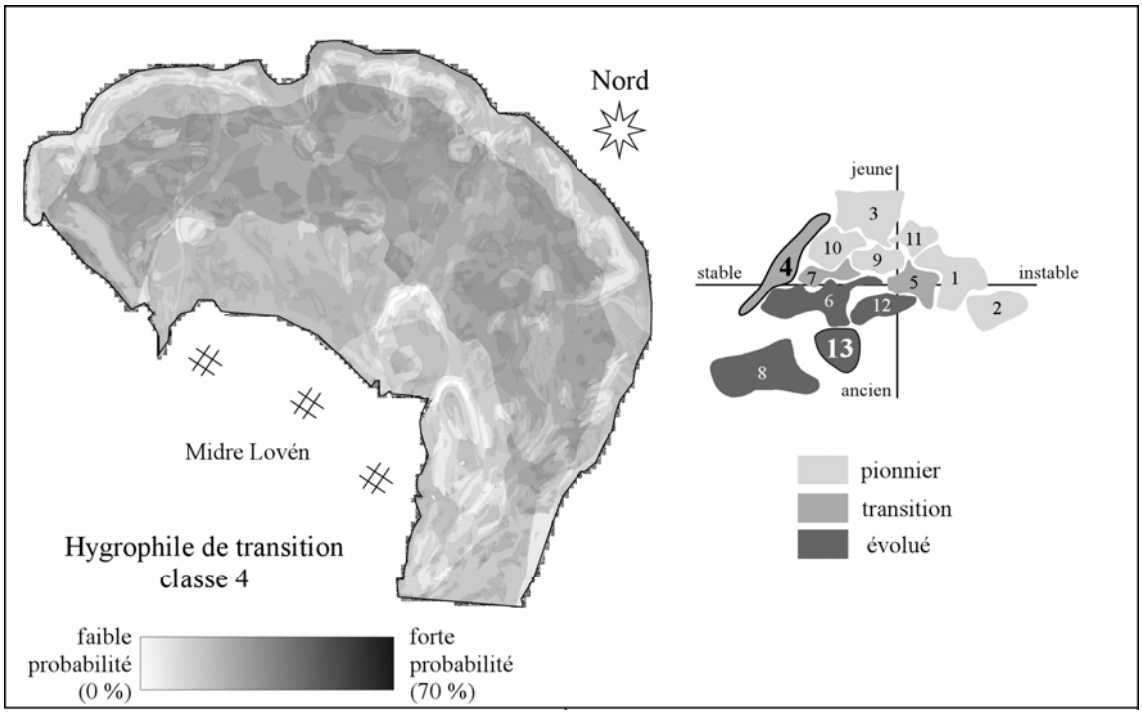


Fig. 145 – Carte de probabilités des faciès associés à la durée de déglaciation *d'après le calcul des probabilités conditionnelles pondérées.*

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

Annexe 5

Cartes de probabilités conditionnelles des espèces dans la marge du glacier Midre Lovén

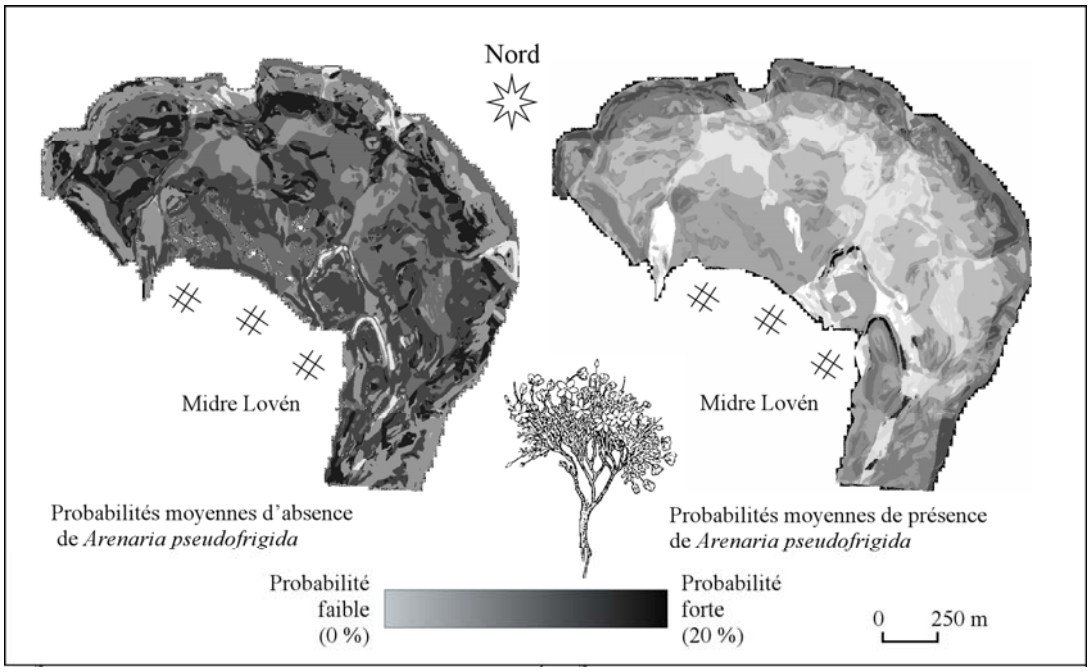


Fig. 146 – Cartes de probabilités d'absence et de présence de* Arenaria pseudofrigida *sur la marge du glacier Midre Lovén. *D'après les probabilités conditionnelles moyennes calculées à partir des 13 valeurs données pour chacune des classes (dessin de O.I. Rønning, 1996).*

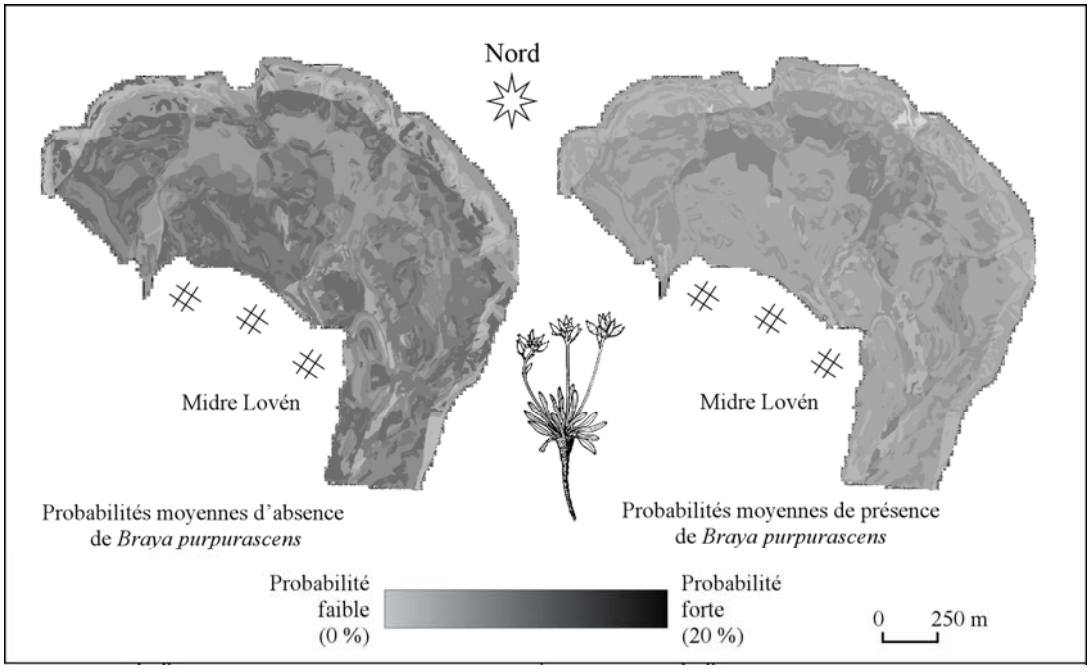


Fig. 147 – Cartes de probabilités d'absence et de présence de* Braya purpurascens *sur la marge du glacier Midre Lovén. *D'après les probabilités conditionnelles moyennes calculées à partir des 13 valeurs données pour chacune des classes (dessin de O.I. Rønning, 1996).*

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

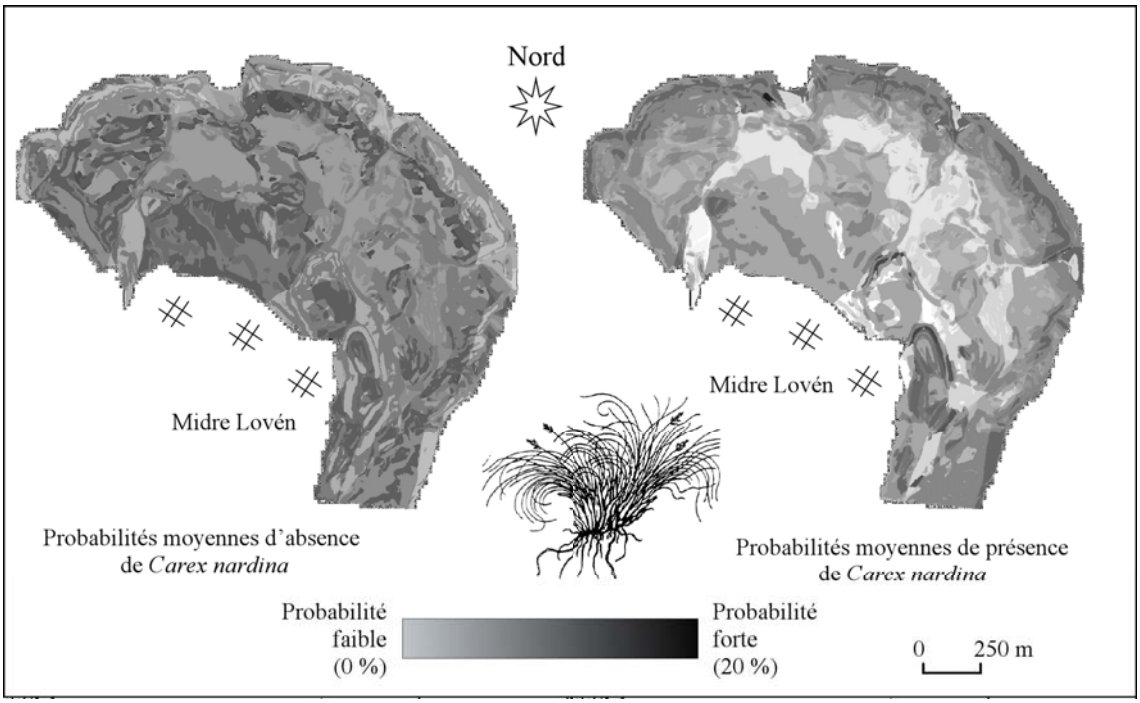


Fig. 148 – Cartes de probabilités d'absence et de présence de* Carex nardina *sur la marge du glacier Midre Lovén. *D'après les probabilités conditionnelles moyennes calculées à partir des 13 valeurs données pour chacune des classes (dessin de O.I. Rønning, 1996).*

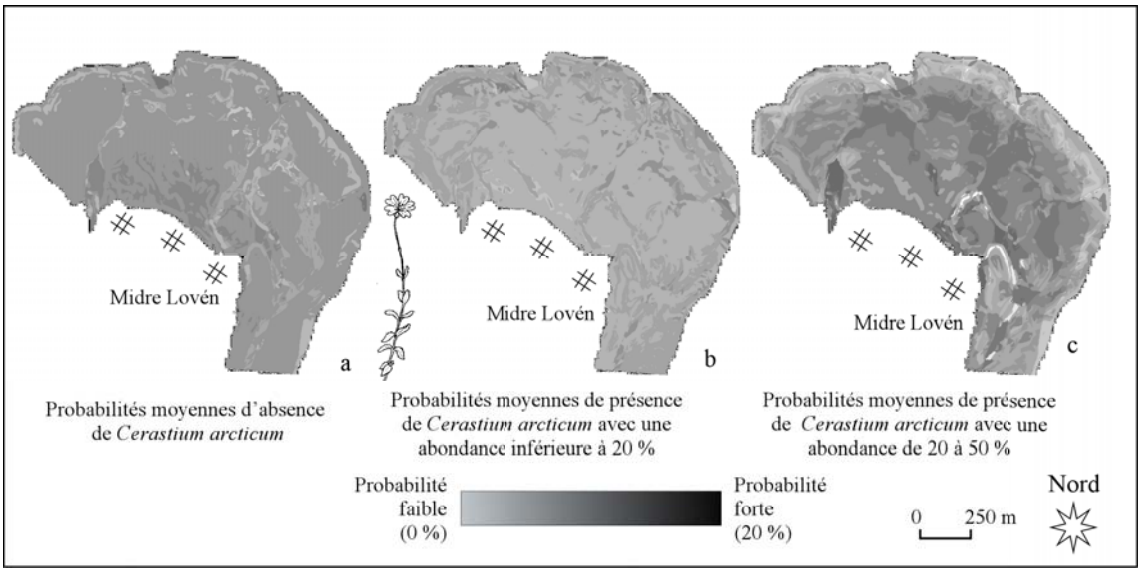


Fig. 149 – Cartes de probabilités d'absence et de présence de* Cerastium arcticum *sur la marge du glacier Midre Lovén. *D'après les probabilités conditionnelles moyennes calculées à partir des 13 valeurs données pour chacune des classes (dessin de O.I. Rønning, 1996).*

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

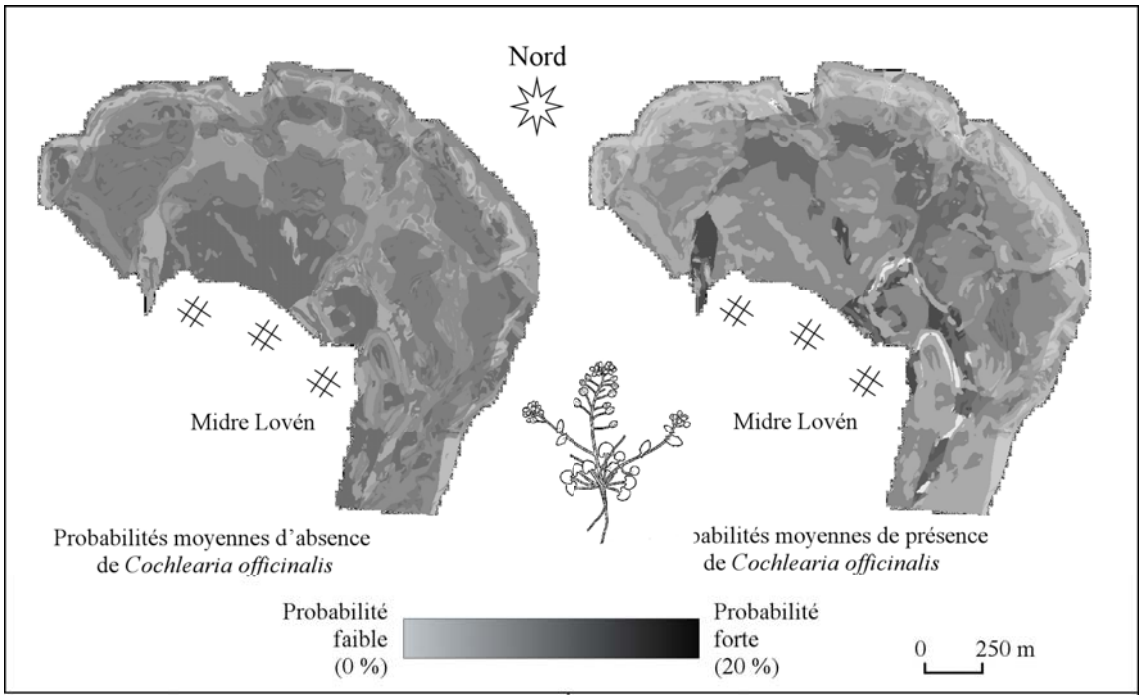


Fig. 150 – Cartes de probabilités d'absence et de présence de* Cochlearia officinalis *sur la marge du glacier Midre Lovén. *D'après les probabilités conditionnelles moyennes calculées à partir des 13 valeurs données pour chacune des classes (dessin de N. Polunin, 1959).*

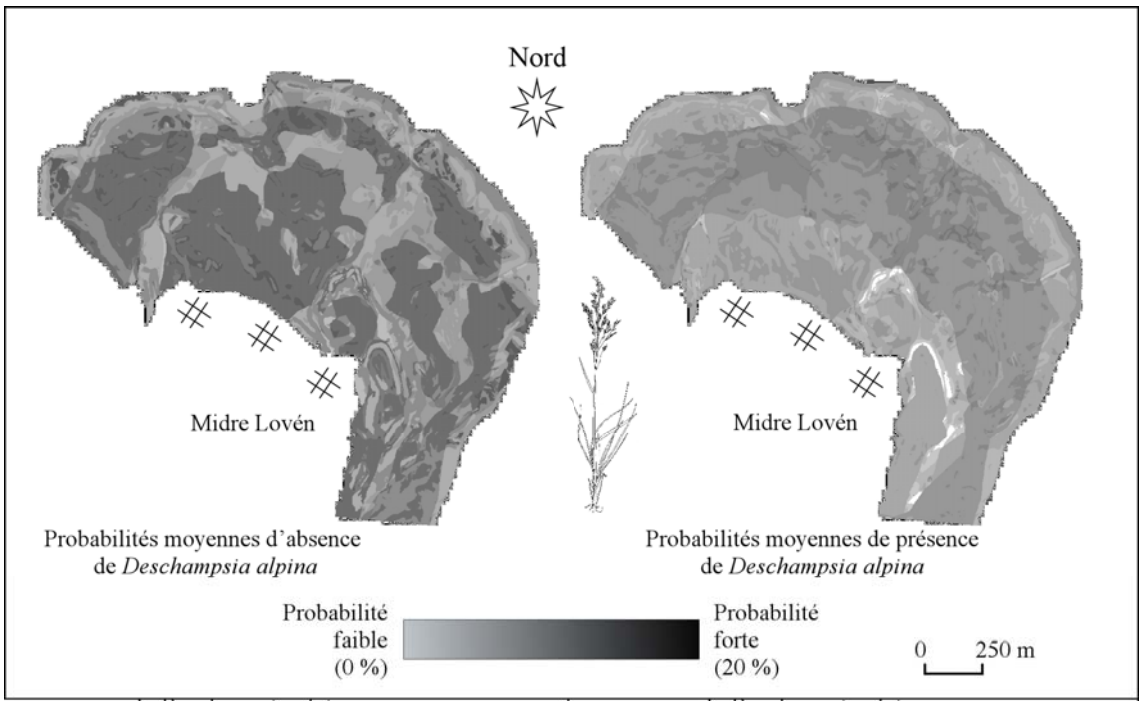


Fig. 151 – Cartes de probabilités d'absence et de présence de* Deschampsia alpina *sur la marge du glacier Midre Lovén. *D'après les probabilités conditionnelles moyennes calculées à partir des 13 valeurs données pour chacune des classes (dessin de O.I. Rønning, 1996).*

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

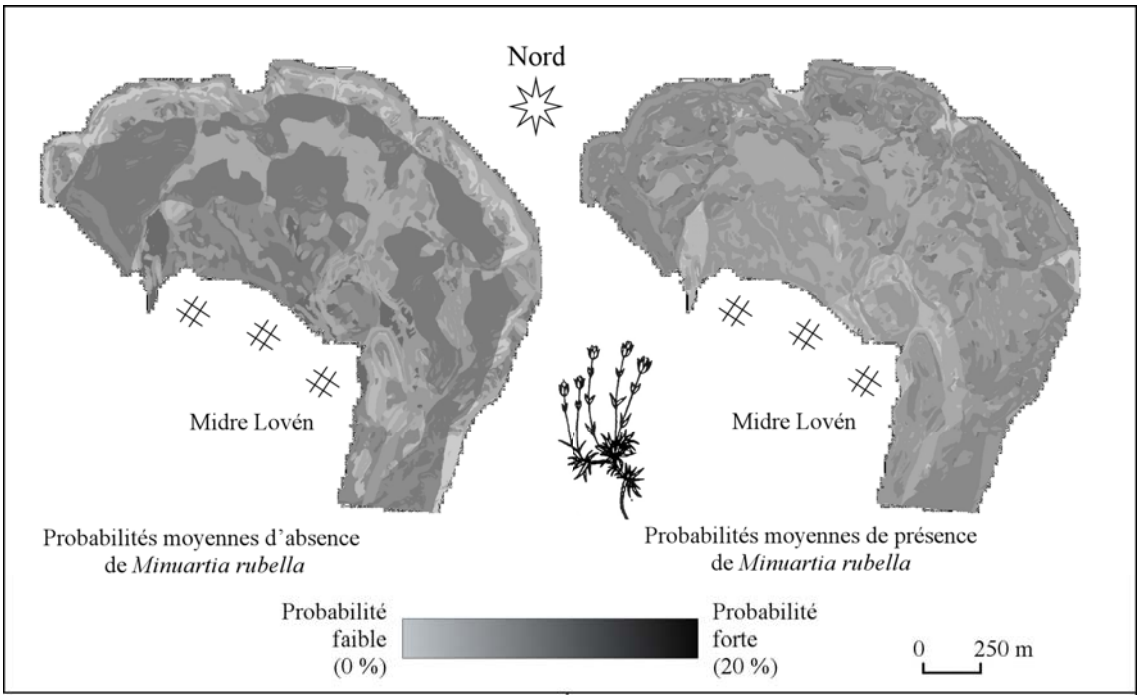


Fig. 152 – Cartes de probabilités d'absence et de présence de* Minuartia rubella *sur la marge du glacier Midre Lovén. *D'après les probabilités conditionnelles moyennes calculées à partir des 13 valeurs données pour chacune des classes (dessin de O.I. Rønning, 1996).*

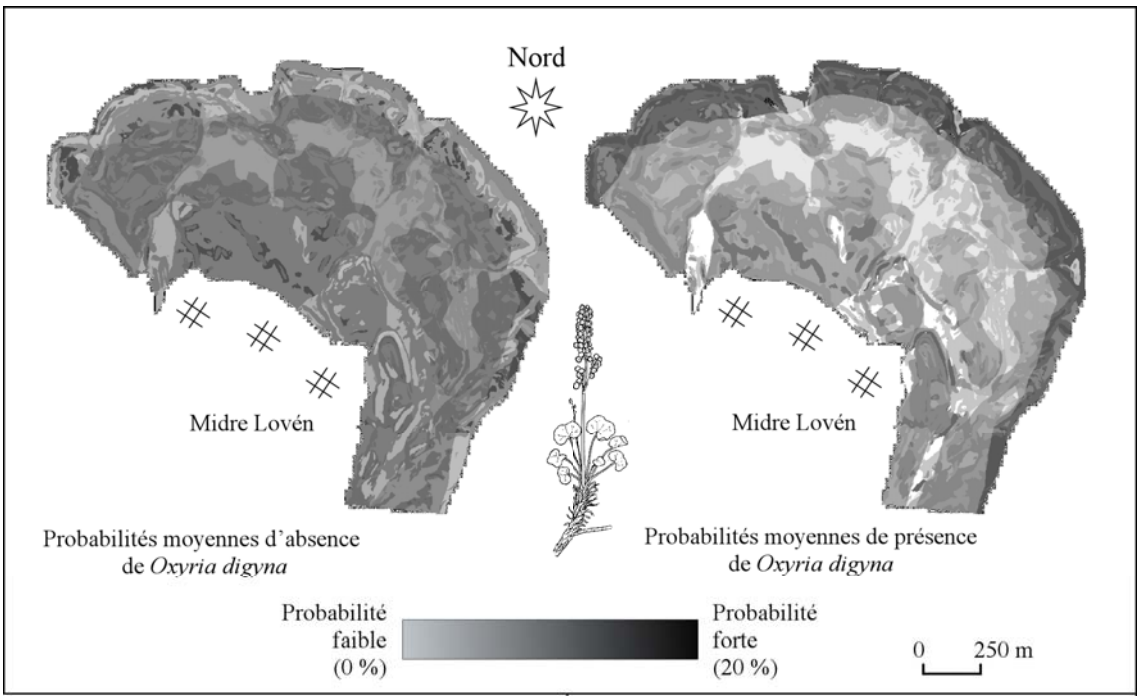


Fig. 153 – Cartes de probabilités d'absence et de présence de* Oxyria digyna *sur la marge du glacier Midre Lovén. *D'après les probabilités conditionnelles moyennes calculées à partir des 13 valeurs données pour chacune des (dessin de O.I. Rønning, 1996).*

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

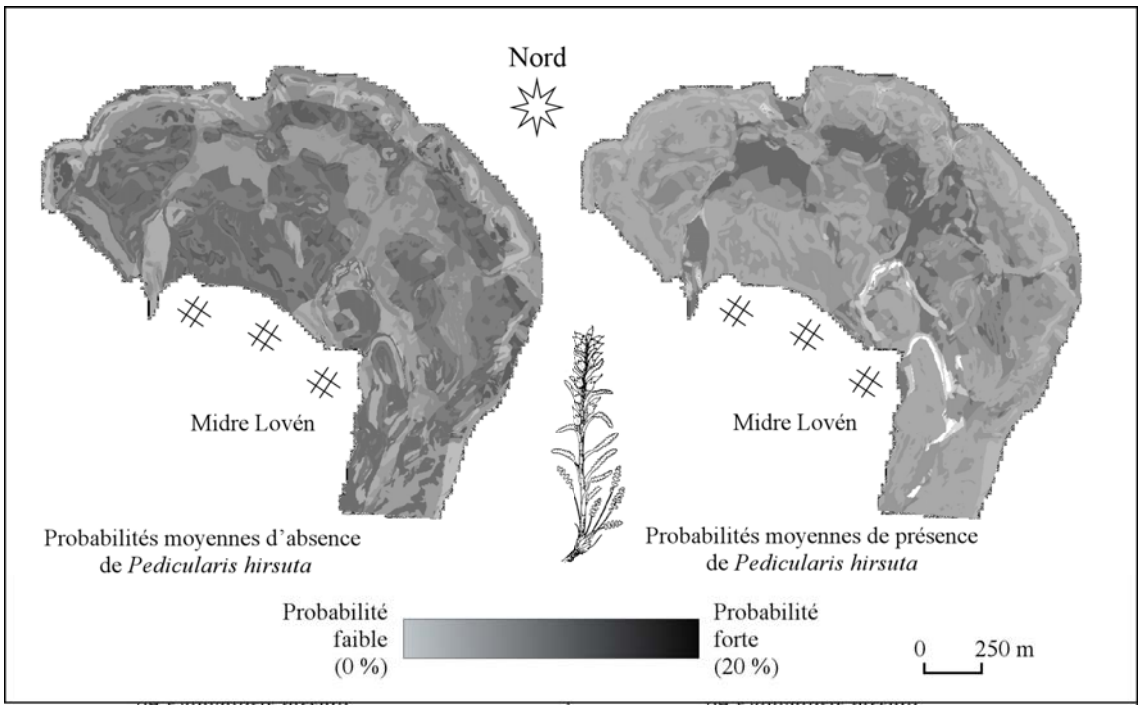


Fig. 154 – Cartes de probabilités d'absence et de présence de* Pedicularis hirsuta *sur la marge du glacier Midre Lovén. *D'après les probabilités conditionnelles moyennes calculées à partir des 13 valeurs données pour chacune des classes (dessin de O.I. Rønning, 1996).*

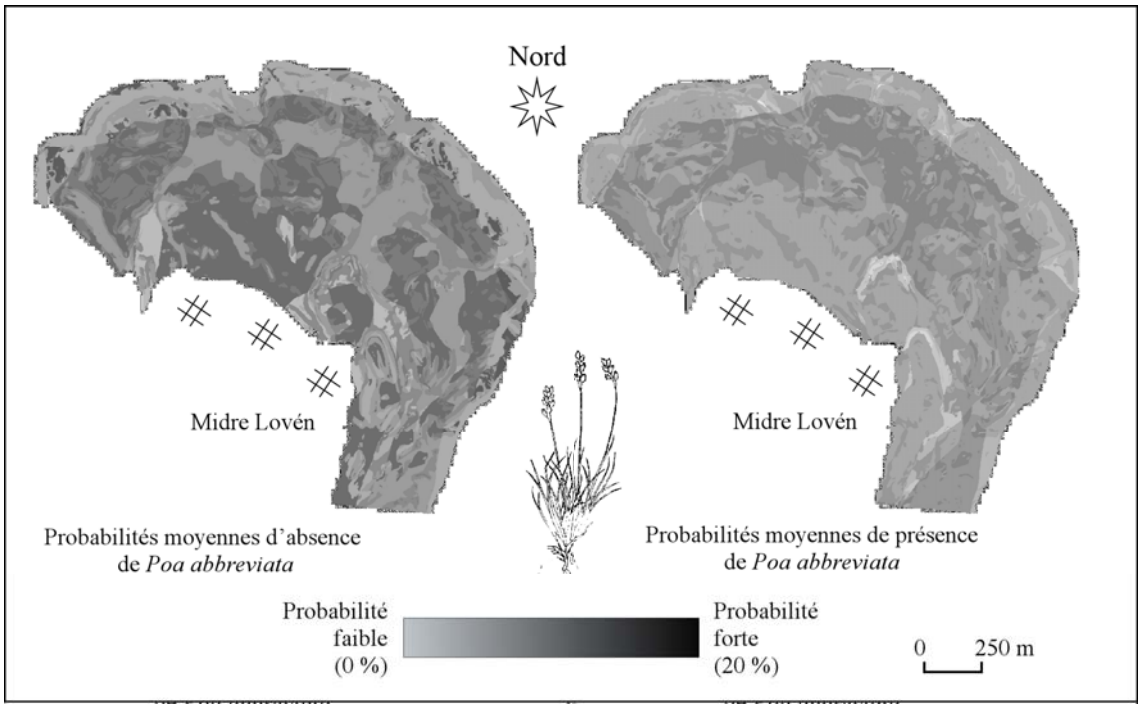


Fig. 155 – Cartes de probabilités d'absence et de présence de* Poa abbreviata *sur la marge du glacier Midre Lovén. *D'après les probabilités conditionnelles moyennes calculées à partir des 13 valeurs données pour chacune des classes (dessin de O.I. Rønning, 1996).*

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

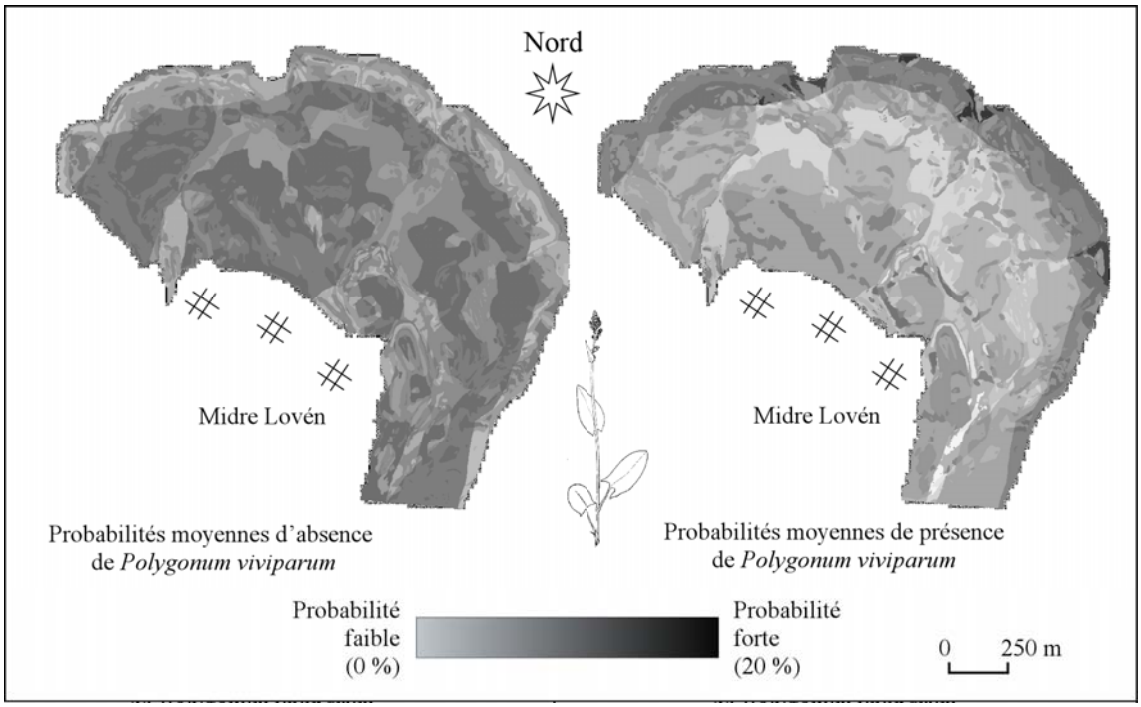


Fig. 156 – Cartes de probabilités d'absence et de présence de* Polygonum viviparum *sur la marge du glacier Midre Lovén. *D'après les probabilités conditionnelles moyennes calculées à partir des 13 valeurs données pour chacune des classes (dessin de O.I. Rønning, 1996).*

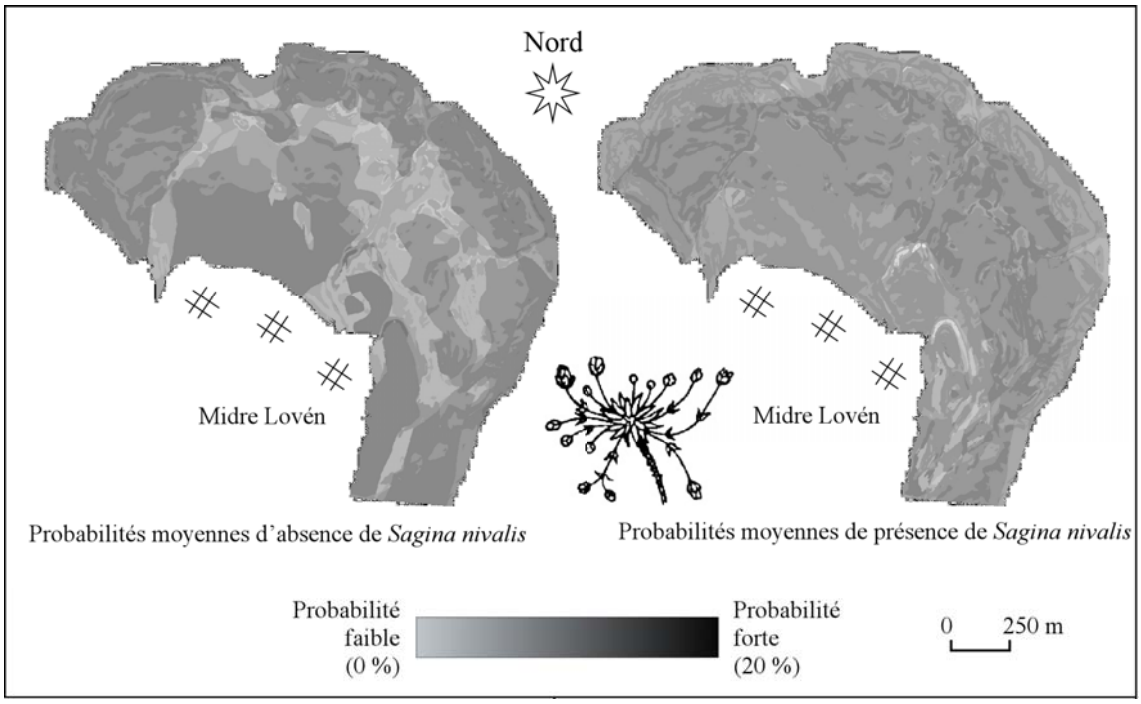


Fig. 157 – Cartes de probabilités d'absence et de présence de* Sagina nivalis *sur la marge du glacier Midre Lovén. *D'après les probabilités conditionnelles moyennes calculées à partir des 13 valeurs données pour chacune des classes (dessin de O.I. Rønning, 1996).*

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

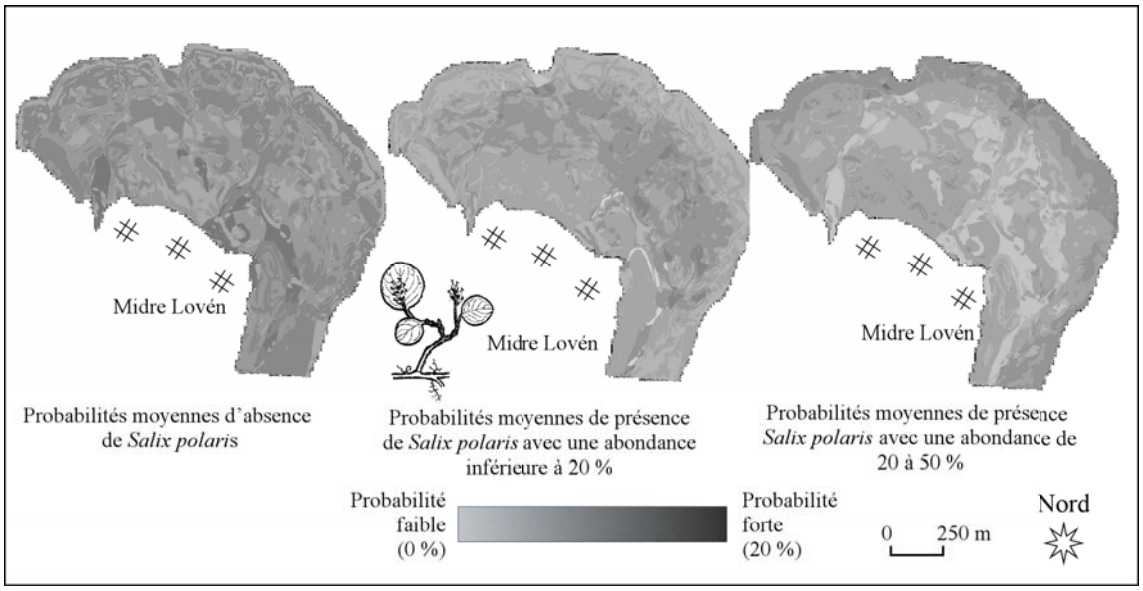


Fig. 158 – Cartes de probabilités d'absence et de présence de* Salix polaris *sur la marge du glacier Midre Lovén. *D'après les probabilités conditionnelles moyennes calculées à partir des 13 valeurs données pour chacune des classes (dessin de O.I. Rønning, 1996).*

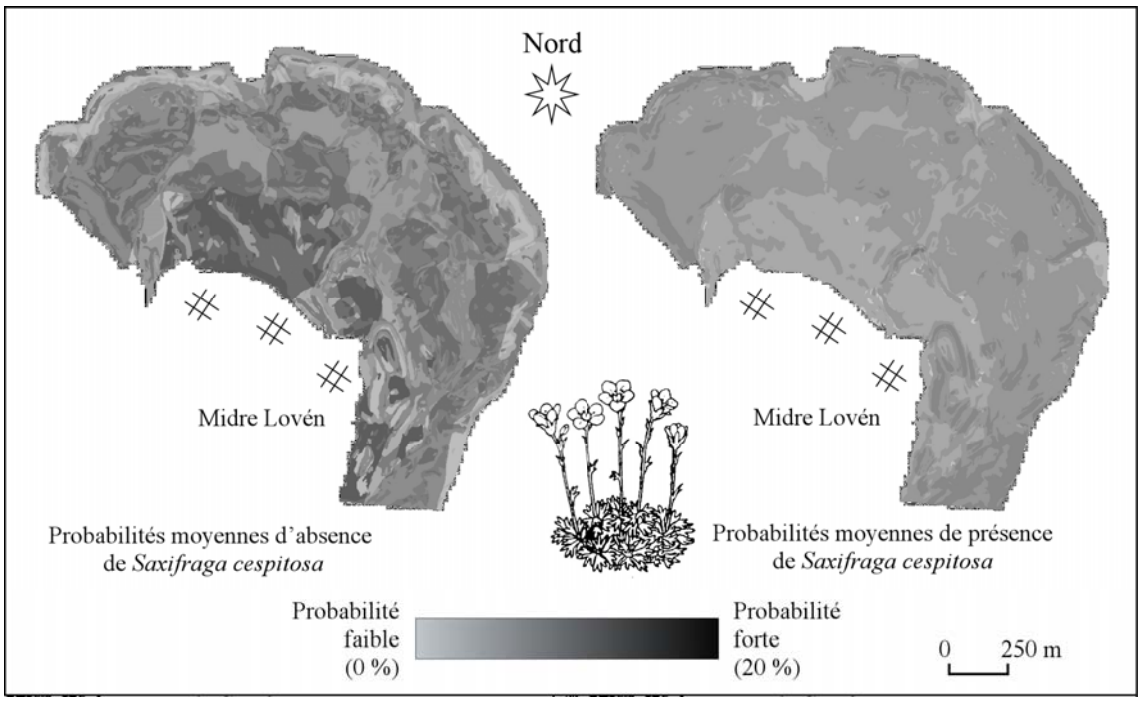


Fig. 159 – Cartes de probabilités d'absence et de présence de* Saxifraga cespitosa *sur la marge du glacier Midre Lovén. *D'après les probabilités conditionnelles moyennes calculées à partir des 13 valeurs données pour chacune des classes (dessin de O.I. Rønning, 1996).*

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

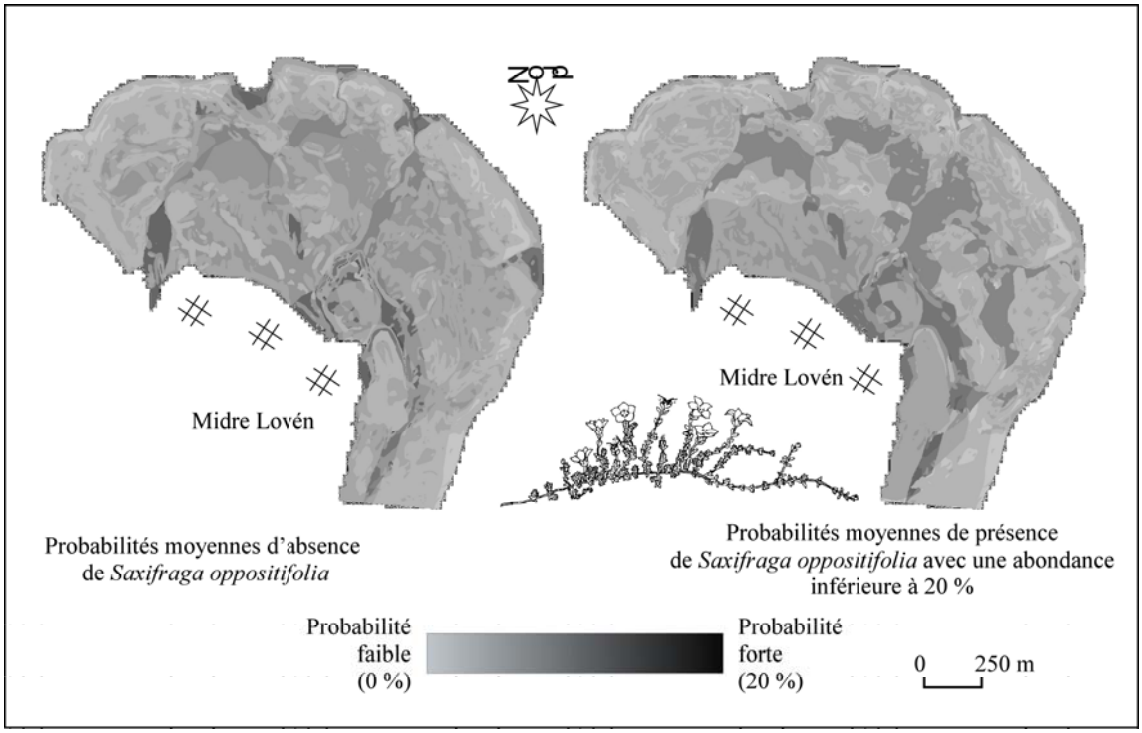


Fig. 160 – Cartes de probabilités d'absence et de présence de* Saxifraga oppositifolia *sur la marge du glacier Midre Lovén. *D'après les probabilités conditionnelles moyennes calculées à partir des 13 valeurs données pour chacune des classes (dessin de O.I. Rønning, 1996).*

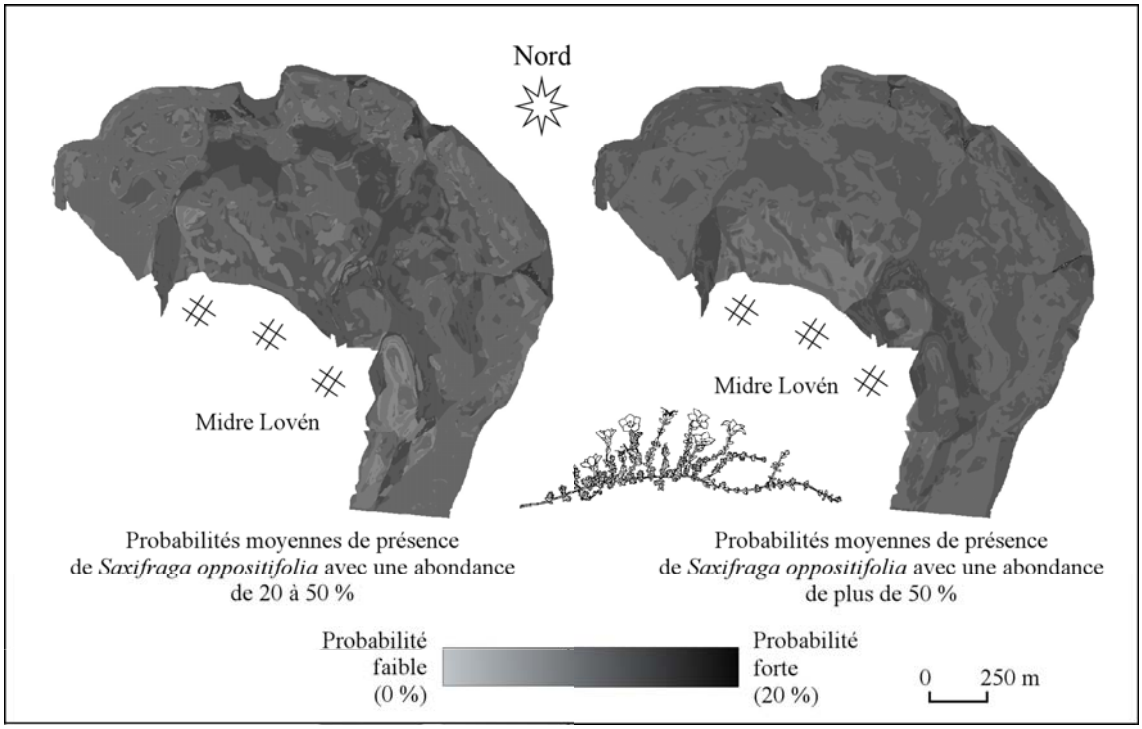


Fig. 161 – Cartes de probabilités de présence de* Saxifraga oppositifolia *sur la marge du glacier Midre Lovén. *D'après les probabilités conditionnelles moyennes calculées à partir des 13 valeurs données pour chacune des classes (dessin de O.I. Rønning, 1996).*

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

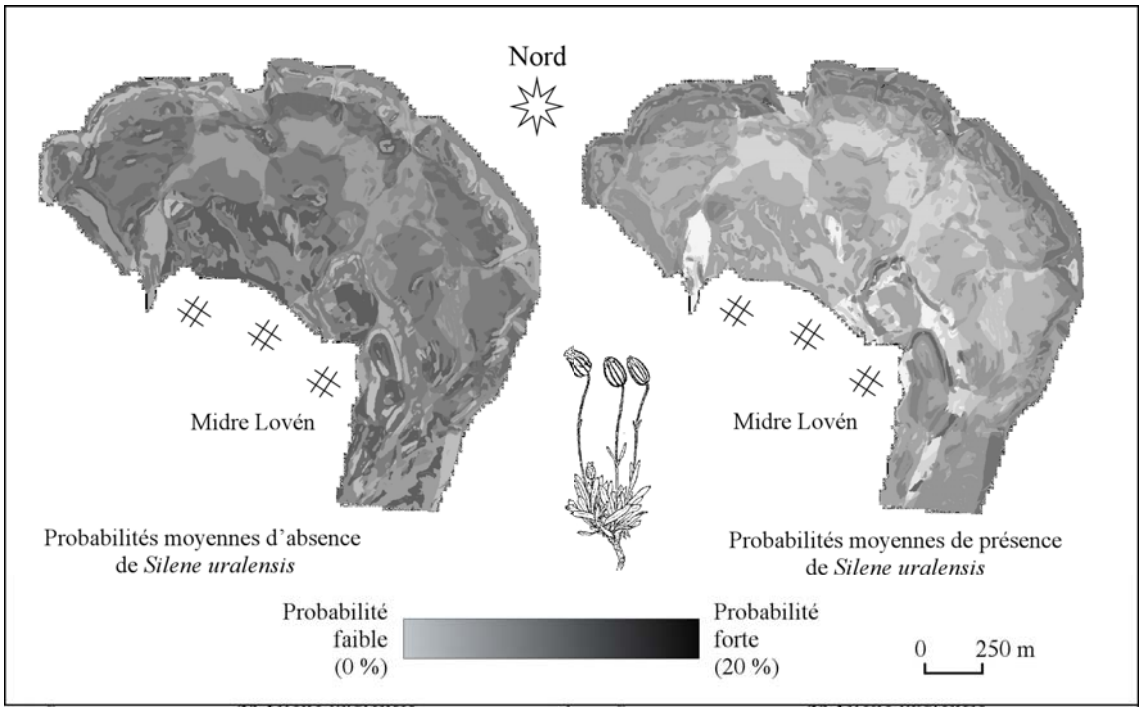


Fig. 162 – Cartes de probabilités d'absence et de présence de* Silene uralensis *sur la marge du glacier Midre Lovén. *D'après les probabilités conditionnelles moyennes calculées à partir des 13 valeurs données pour chacune des classes (dessin de O.I. Rønning, 1996).*

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

Annexe 6

Fiches de relevés de terrain

2002 Spitsberg	Relevé N° : Date : Lieu :	Photo : Moraine: Coordonnées Lat : Long :	Contexte géomorpho:	

	1*1 m	2*2 m	4*4 m	8*8 m	16*16 m	32*32 m	64*64 m	
Arenaria pseudofrigida								
Braya purpurascens								
Carex misandra								
Carex nardina								
Carex rupestris								
Cassiope tetragona								
Cerastium arcticum								
Cerastium regelii								
Cetraria nivalis								
Cochlearia officinalis								
Draba species								
Dryas octopetala								
Minuartia ribella								
Mousses								
Oxyria digyna								
Papaver dahlianum								
Pedicularis hirsuta								
Polygonum viviparum								
Polytricum species								
Sagina nivalis								
Salix polaris								
Sanyonia uncinata								
Saxifraga cernua								
Saxifraga cespitosa								
Saxifraga nivalis								
Saxifraga oppositifolia								
Silene acaulis								
Silene uralensis								
Croûte biotique								
Recouvrement végétal								
< 2 mm								
2 - 6 mm								
6 mm - 5 cm								
5 - 25 cm								
> 25 cm								

Fig. 163 – Fiche de relevés de terrain pour le calcul de l'aire minimale.

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

2002	Relevé N° :	Photo :	remarques
Spitsberg	Date :	Moraine:	
	Lieu :	Coordonnées Lat :	
		Long :	

Grille	1	2	3	4	5	6	7	8
Arenaria pseudofrigida								
Braya purpurascens								
Carex misandra								
Carex nardina								
Carex rupestris								
Cassiope tetragona								
Cerastium arcticum								
Cerastium regelii								
Cetraria delisei								
Cetraria nivalis								
Cochlearia officinalis								
Deschampsia alpina								
Draba species								
Dryas octopetala								
Juncus biglumis								
Luzula confusa								
Minuartia ribella								
Oxyria digyna								
Papaver dahlianum								
Pedicularis hirsuta								
Phippsie concinna								
Poa abbreviata								
Poa arctica								
Poa pratensis								
Polygonum viviparum								
Polytricum species								
Puccinelia angustata								
Puccinelia valhiana								
Sagina nivalis								
Salix polaris								
Sanyonia uncinata								
Saxifraga aizoïdes								
Saxifraga cernua								
Saxifraga cespitosa								
Saxifraga nivalis								
Saxifraga oppositifolia								
Silene acaulis								
Silene uralensis								
Stellaria longipes								
Stellaria loongipes								
Trisetum spicatum								
Lichens								
Mousses								
Croûte biotique								
Recouvrement végétal								
< 2 mm								
2 - 6 mm								
6 mm - 5 cm								
5 - 25 cm								
> 25 cm								

Fig. 164 – Fiche de relevés de terrain utilisée pour les relevés surfaciques de végétation.

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

Spitsberg	**Relevé pétrographique** **Date :**		**Photo :** **Moraine:** **Coordonnées :**	
N° Transect				
Calcaire				
Chert				
Conglomérat				
Granite				
Grès				
Gneiss				
Marbre				
Mica-schiste				
Quartz				
Quartzite				
Schiste				

Fig. 165 – Fiche de relevés pétrographiques.

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

Annexe 7

Liste des documents

Photographies aériennes

Norsk Polarinstitutt, 1936 - S 36 1115, vue oblique en noir et blanc, glacier Ebba.

Norsk Polarinstitutt, 1936 - S 36 1552, vue oblique en noir et blanc, glacier Austre Lovén.

Norsk Polarinstitutt, 1936 - S 36 1553, vue oblique en noir et blanc, glacier Midre Lovén.

Norsk Polarinstitutt, 1956 - S 56 079, vue oblique en noir et blanc, glacier Edith

Norsk Polarinstitutt, 22 août 1961 - S 61 3103, vue verticale en noir et blanc, 1/40 000 , glacier Ebba.

Norsk Polarinstitutt, 28 juillet 1966 - S 66 4452, vue verticale en noir et blanc, 1/50 000, glacier Blomstrand.

Norsk Polarinstitutt, 28 juillet 1966 - S 66 4454, vue verticale en noir et blanc, 1/50 000, glacier Midre Lovén.

Norsk Polarinstitutt, 28 juillet 1966 - S 66 4455, vue verticale en noir et blanc, 1/50 000, glacier Austre Lovén.

Norsk Polarinstitutt, 28 juillet 1969 - S 69 1400, vue verticale en noir et blanc, 1/50 000, glacier Edith.

Norsk Polarinstitutt, 16 août 1990 - S 90 5810, date, vue verticale infrarouge, 1/50 000, glacier Blomstrand.

Norsk Polarinstitutt, 16 août 1990 - S 90 5789, vue verticale infrarouge, 1/50 000, glacier Austre Lovén.

Norsk Polarinstitutt, 16 août 1990 - S 90 57 88, vue verticale infrarouge, 1/50 000, glacier Midre Lovén.

Norsk Polarinstitutt, 22 juillet 1990 - S 90 1905, vue verticale infrarouge, 1/50 000, glacier Ebba.

Image satellite

SPOT XS, 27 juillet 1988.

ASTER, 3 août 2002.

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

Cartes topographiques

Isachsen, G., 1907 - Côte nord-ouest du Spitsberg (1/200 000).

Norsk Polarinstitutt, 1961 - A7 Kongsfjorden (1/100 000).

Norsk Polarinstitutt, 1982 - Spitsbergen Nordre del, Blad 3 (1/500 000).

Norsk Polarinstitutt, 1987 - A6 Krossfjord (1/100 000).

Norsk Polarinstitutt, 1990 - A7 Kongsfjord (1/100 000).

Norsk Polarinstitutt, 1988 - C7 Dicksonfjorden (1/100 000).

Norsk Polarinstitutt, 2004 - A7 Kongsfjorden (1/100 000).

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

Annexe 8

Flore phanérogamique morainique

Espèces	Marge proglaciaire	Période de colonisation	Type de ruissellement	Condition édaphique	Présence	Type espèce	Index
Arenaria pseudofrigida	ML, AL	70	inactif	X	1	édificatrice	48,**49**,212,229,270-1,280, 286-7,296,304-5,307,318,**382**
Braya purpurascens	ML, AL, Ed, B	30	local	M	1	ultrapionnière	212,221,223,228,237,**239**, 248,265,279,294,296,**382**
Carex nardina	*	30	inactif	X	1	édificatrice	**50**,51,226,230,232,248,249, 266,270,279-80,287,294,296, 304,305,307,318,**383**
Carex rupestris	ML, AL, Bl	70			R	édificatrice	39,221,212,**223**,265
Cassiope tetragona	Bl	100			R	édificatrice	**31**,38,**57**,59,116,212,236,266
Cerastium arcticum	*	30	actif	M/H	F	pionnière ub.	210,213,216,218,221,224,226 228,232-33,235,240,248,265, 268,271,276,279,286,294, 297,300,304,307,**383**
Cerastium regelii	ML, AL, Eb	30			R	ultrapionnière	221,**223**,228,237
Cochlearia officinalis	ML, Bl	70	actif	H	R	pionnière spé.	**46**,47,212,217,232,268,271, 275,280,287,283,287,294, 296,302,**384**
Deschampsia alpina	Eb	30	inactif	H	R	pionnière spé.	38,212,220,**223**,228,265,268, 271,279,294,296,304,311, 384
Draba species	*	30	actif	M/X	F	pionnière ub.	210,213,221,224,226-8, 232-3,240,248,265,268,270, 281,285,294,296-7,300,304, 311,321-**2**
Dryas octopetala	*	30			1	édificatrice	**31**,**45**,47-8,**52**,**57**-8,80,116,212, 226,230,235,243,**245**,248,254
Juncus biglumis	Bl	70			R	édificatrice	217,232,249,265
Luzula confusa	Ed	30			1	pionnière spé.	221,226,230-**1**,265
Minuartia rubella	*	30	local		1	pionnière spé.	228,230-**1**,235,248-9,265,279, 280,**385**
Oxyria digyna	ML, AL, Ed, El	30		M	R	pionnière spé.	47,221,**229**,**385**
Papaver dahlianum	*	30			R	pionnière spé.	48,**57**,58,116
Pedicularis hirsuta	ML, AL, Bl, Eb	100	inactif		R	édificatrice	248,265,280,296,304,307,**386**
Phippsia concinna	Bl	30			R	pionnière spé.	212,215,227-8,**234**,236,248
Poa abbreviata	ML, Eb	30	actif	H	R	pionnière spé.	220,**223**,265,268,271,275,276, **283**,294,296,302,304,307, 386
Poa arctica	Bl, Eb	30			1	ultrapionnière	215,217,220,228,248
Poa pratensis	Bl	30			1	pionnière spé.	215,**223**,227,235,212
Polygonum viviparum	*	70	local		1	édificatrice	39,**50**-1,226,228,233,236,243 248,294,296,304,307,318,**387**
Puccinellia angustata	Eb	30			R	pionnière spé.	220,228
Puccinellia vahliana	Ed, Eb	30			R	pionnière spé.	

ML : Midre Lovén; AL : Austre Lovén
Bl : Blomstrand; Ed : Edith; Eb : Ebba
* : les 5 sites

H : hygrophile R : rare spé. : spécialisée
M : mésique 1 : 10-30 % ub : ubiquiste
X : xérique F : fréquente

Tableau 10 – Flore phanérogamique morainique du Spitsberg (de a à p). *En gras sont indiquées les pages où l'espèce est illustrée ou cartographiée.*

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

Espèces	Marge proglaciaire	Période de colonisation	Type de ruissellement	Condition édaphique	Présence	Type espèce	Index
Sagina nivalis	ML, AL, Ed, B	30	actif	M	1	pionnière spé.	48,**49**,210,213,215,217,227-8 233,248,265,279,294,300, 302-4,311,**387**
Salix polaris	*	30	actif	M	1	pionnière ub.	47-**9**,58,116,**169**,212-3,221,226 228,232,236,265,276,279,**282**-4 286-7,296,307,311,318,**388**
Salix reticulata	Ed	30		X	R	édificatrice	**223**,226
Saxifraga aizoïdes	Bl	70			R	pionnière spé.	**205**,217,232
Saxifraga cernua	*	30			1	ultrapionnière	47,51,224,248
Saxifraga cespitosa	*	30	inactif	M	1	ultrapionnière	**50**-1,210,213,224,240,248,279 294,304,307,**388**
Saxifraga nivalis	AL, Bl, Eb	30			R	pionnière spé.	47,212,218
Saxifraga oppositifolia	*	30	actif	M	F	pionnière ub.	39,47-**9**,**52**,58,138,208,**210** 213,224,226,**242,265-6,** 275,279,**284**,294,300,311, 318,**389**
Silene acaulis	*	30	actif	M	1	édificatrice	47-**9**,**52**,212,226,228,230,232 235,243,248,276,279,294 296,304,307,311
Silene uralensis	*	30	inactif	X	1	pionnière spé.	**223**,228,248,249,266,279,287, 296,304-5,307,390
Stellaria longipes	Ed, Bl, Eb	30			R	ultrapionnière	220,237,248,212
Trisetum spicatum	Bl	70			R	pionnière spé.	212,215,**223**,232,236,

ML : Midre Lovén; AL : Austre Lovén — H : hygrophile — R : rare — spé. : spécialisée
Bl : Blomstrand; Ed : Edith; Eb : Ebba — M : mésique — 1 : 10-30 % — ub : ubiquiste
* : les 5 sites — X : xérique — F : fréquente

Tableau 11 - Flore phanérogamique morainique du Spitsberg (de s à t). *En gras sont indiquées les pages où l'espèce est illustrée ou cartographiée.*

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

Glossaire

Les définitions sont extraites du dictionnaire de biogéographie de A. Da Lage et G. Métailié (2000), du dictionnaire de botanique de B. Boullard (1988) et du dictionnaire des sciences de la terre de M. Moureau et G. Brace (2000).

ANNUELLE : se dit d'une plante qui accomplit son cycle biologique dans une période inférieure ou égale à un an.

AXILLAIRE (bourgeon) : qui se localise à l'aisselle d'une feuille. Il pourra engendrer une ramification en se développant.

BARREN : surfaces rocheuses ou pierreuses périglaciaires ne portant qu'une végétation éparse, très claire, floristiquement pauvre et homogène.

BIOCÈNOSE : communauté de végétaux et d'animaux d'un biotope donné, constituant un système biologique régi par des relations d'interdépendance.

BIOME : ensemble des milieux semblables à l'échelle de la planète. Pour certains auteurs, entité écologique d'échelle continentale, caractérisée par un type dominant de formation végétale, qui correspond, avec les animaux qui leur sont inféodés, à l'aire bioclimatique (ex : savane, forêt tempérée…).

BP : abréviation de l'anglais *Before Present* (avant le présent). Le présent est défini par convention comme étant l'année 1950.

BRYOPHYTE : plante chlorophyllienne sans fleurs à tige feuillée. Ce sont les plantes non vasculaires rassemblant en majeure partie les mousses.

BULBE : organe souterrain, lieu d'accumulation de réserves pour le végétal.

BULBILLES : organes de propagation très efficace chez certains végétaux dont ils assurent le bouturage naturel.

CALCICOLE : se dit d'un groupement localisé principalement ou uniquement sur substrat à forte teneur en calcium.

CALCIFUGE : se dit d'un groupement qui ne supporte pas les substrats à forte teneur en calcium

CESPITEUX : se dit d'une plante formant une touffe compacte à sa base, par resserrement des bourgeons.

CHIONOPHILE : se dit d'une espèce ou d'un groupement qui supporte un enneigement prolongé ou qui en profite.

CHIONOPHOBE : se dit d'un groupement qui craint l'enneigement.

CLIMACIQUE : relatif au climax soit type de végétation qui correspond à un état d'équilibre stable entre les différents éléments du complexe « climat-sol-flore-faune » résultant d'une évolution dynamique en un lieu et un temps donnés.

CRYPTOGAME : nomenclature qui désigne l'ensemble des végétaux sans fleurs dont la dissémination est assurée par les spores (champignons, fougères).

CYANOBACTÉRIES : bactéries anciennement appelées algues bleues.

DESSICCATION : perte importante de l'eau constitutive d'un organisme. Une dessiccation excessive peut conduire un végétal à son flétrissement ou à sa mort.

DIASPORE : désigne tout fragment d'un végétal susceptible, après isolement du pied mère, de reconstituer un individu entier.

ÉCOSYSTÈME : ensemble constitué d'une biocénose, de son biotope et leurs interrelations et interactions.

ÉCOTONE : lieu de contact et de transition entre deux communautés biologiques différentes. Un écotone

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

est peuplé d'espèces présentes dans les communautés voisines auxquelles s'ajoutent des éléments originaux liés aux conditions mésologiques locales.

ÉCOTYPE : au sein d'une espèce, individu légèrement différencié dans ses caractéristiques physiologiques et morphologiques considérées comme « normale » pour l'espèce à laquelle il appartient.

ÉCOPHYSIOLOGIQUE : variation physiologique que peut présenter une espèce végétale selon les influences du milieu dans lequel elle vit.

ÉDAPHIQUE : on entend par facteurs édaphiques, des facteurs écologiques uniquement liés au sol.

FLORE : ensemble des espèces végétales relevés sur un territoire déterminé.

FRUTICULEUX : se dit d'un lichen dont le port buisonnant évoque une structure frutescente.

GÉOPHYTE : terme désignant les plantes dont les bourgeons sont dans le sol, comme les plantes à rhizomes et à bulbes.

GRAMINOÏDE : se dit d'une formation dominée par les graminées (Poacées, Cypéracées, Joncacée…).

HÉMICRYPTOPHYTE : type biologique (au sens de Carl Rankiaër) des plantes dont les bourgeons, au niveau du sol, sont dissimulés par des feuilles ou des écailles à la mauvaise saison.

HÉPATIQUE : classe de plantes cryptogames, à reproduction sexuée, intermédiaires entre les lichens et les mousses.

HYGROPHILE : plante ou groupement vivant dans des conditions d'humidité, atmosphérique ou édaphique, voisines de la saturation.

LITHOPHYTES : végétaux capables de croître en milieu rocheux ou rocailleux.

MARGE PROGLACIAIRE : espace récemment déglacé qui se trouve au front d'un glacier en recul.

MÉSIQUE : se dit d'un habitat ou d'une station dont les conditions d'humidité atmosphérique ou édaphiques sont modérées.

MÉSOCLIMAT : au sens n°1, l'échelle du mésoclimat se situe entre celle du climat local et celle du climat stationnel ; le préfixe méso- signifie, ici, moyen.

MÉSOLOGIQUE : relatif au milieu (à l'échelle stationnelle ou locale).

MÉSOPHILE : se dit d'un groupement ou d'une espèce ne tolérant pas les valeurs extrêmes d'un facteur écologique quelconque.

MULTIPLICATION VÉGÉTATIVE : mode de reproduction d'un végétal à partir de certains tissus ou organe, sans intervention de la sexualité.

NUNATAK : pointe rocheuse émergeant à la surface d'une calotte glaciaire.

PARAGLACIAIRE : terme introduit par J.M. Ryder (1971) et plus tard défini par M. Church et J.M. Ryder (1972) comme englobant « les processus non glaciaires qui sont directement conditionnés par la glaciation ». L'activité paraglaciaire est distinguée des processus périglaciaires, qui sont caractéristiques du froid et de l'action du gel, d'environnements non glaciaires indifféremment à la présence actuelle ou passée de glacier.

PÉRENNE : se dit d'une plante pluriannuelle.

PERGÉLISOL : est défini comme le sol dans lequel les températures restent au-dessous de 0°C durant au moins deux années consécutives (Benn et Evans, 1998).

PEUPLEMENT : ensemble des êtres vivants, des plantes d'un même aspect physionomique occupant en commun un milieu ou un espace donné.

PHANÉROGAME : plante dont les organes reproducteurs, visibles, sont les fleurs.

PHÉNOLOGIE : ensemble des différentes étapes et des manifestations physionomiques qui marquent le cycle du développement d'une plante, selon un rythme en général saisonnier et en

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

relation, directe ou non, avec le climat (feuil-laison, floraison, fructification…).

PHOTOPÉRIODE : durée journalière d'éclairement à laquelle sont soumis les organismes vivants.

PIONNIÈRE : plante s'installant parmi les premières sur un terrain sans végétation. Dans une succession progressive, stade initial de constitution d'une végétation sur un terrain qui en était dépourvu.

PROPAGULE : organe ou fragment qui, par multiplication végétative, peut donner naissance à un nouvel individu.

PROSTRÉ : se dit d'une plante appliquée au sol et rampant.

RHIZOME : tige souterraine sub-horizontale émettant saisonnièrement des racines et tiges feuillées.

ROSETTE : ensemble formé par les feuilles basales d'une herbacée, insérées au niveau du collet et étalées tout autour de la tige.

STOLON : tige à entre-nœuds rampant sur le sol.

SURGE : est le mot anglais repris en français pour désigner une avancée brutale et rapide du front glaciaire suivi d'une période d'arrêt durant laquelle les vitesses sont généralement faibles.

TAXON : (taxa : pluriel courant préféré à taxons) : appellation générale pour désigner toute unité systématique, à quelque rang que ce soit, jusque et y compris la famille. Les plus usuels sont : le genre, le sous-genre, l'espèce, la sous-espèce, la variété et la forme.

THERMO-ÉROSION : processus d'érosion thermique dû à la fonte de la glace contenue dans les dépôts en milieu périglaciaire.

THERMOPHILE : se dit d'une espèce ou d'un groupement dont la présence est liée à des températures atmosphériques ou édaphiques élevées, du moins durant la période de végétation.

TYPE BIOLOGIQUE : catégorie morphologique de plantes, définie selon la position des organes de survie à la mauvaise saison.

UBIQUISTE : [se dit d'un] taxon qui vit dans les milieux les plus divers au sein d'une région, en raison de sa forte plasticité écologique.

XÉRIQUE : se dit d'un milieu caractérisé par la sécheresse.

XÉROPHILE : se dit d'un groupement supportant une certaine sécheresse atmosphérique ou édaphique.

VASCULAIRES : végétaux supérieurs à tiges, racines et feuilles.

VALLUM : accumulation morainique qui marque l'extension maximale du glacier.

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

Table des illustrations

Liste des figures

1 - Variations de la température à la surface de la Terre au cours des 140 dernières années. 14
2 - Variations des températures de surface en Arctique depuis 1900 pour les régions comprises entre 60° et 90°N. 14
3 - Dynamiques paysagères en relation avec le changement climatique sur les marges proglaciaires de l'Arctique. 15
4 - Carte de l'archipel du Svalbard et localisation des principales villes. 18
5 - Carte des limites de la zone Arctique. 19
6 - Carte de la végétation arctique circumpolaire au 1/7 500 000. 19
7 - origine et répartition de la population en Arctique. 23
8 - Secteurs de l'île affectés par les déplacements en véhicules. 23
9 - Secteurs protégés du Svalbard. 25
10 - Démarche suivie pour observer l'évolution du paysage intramorainique depuis la fin du Petit Âge Glaciaire. 27
11 - Localisation des deux régions étudiées au Spitsberg. 31
12 - Chronologies climatique, glaciaire et littorale holocène du Spitsberg. 37
13 - Distribution de quatre habitats majeurs selon la topographie et la durée du manteau neigeux. 41
14 - Températures et précipitations moyennes mensuelles à Ny-Ålesund (1969-2000). 42
15 – Stratégies adaptatives de quelques phanérogames du Spitsberg. 51
16 - Exemples d'espèces aux types biologiques différents. 52
17- Circulation des courants marins et distribution thermique des eaux de mer. 55
18 - Répartition des précipitations au Svalbard. 58
19- Répartition des lignes d'équilibre glaciaire au Svalbard. 58
20 - Carte des zones bioclimatiques du Svalbard. 59
21 - Températures moyennes annuelles à Ny-Ålesund de 1912 à 2000. 63
22 - Fractions annuelles des précipitations liquides, mixtes et solides à Longyearbyen de 1964 à 1997. 63

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

23 - Englacement régional contrasté au Spitsberg. 65
24 - Modèle d'incorporation de débris et de formation de moraines par chevauchement intraglaciaire à la marge d'un glacier polythermique. 68
25 - Schéma de la formation d'une *hummocky moraine.* 72
26 - Modèle de système proglaciaire à la marge d'un glacier polythermique terrestre du Svalbard. 77
27 - Localisation des sites d'étude de la colonisation végétale des marges proglaciaires dans le monde. 80
28 - Principaux axes de recherches développés pour l'étude de la colonisation végétale sur les marges proglaciaires. 84
29 - Localisation des marges proglaciaires étudiées au Spitsberg. 86
30 - Marges proglaciaires des glaciers de vallée en presqu'île de Brøgger. 89
31 - Coupe topographique des versants nord et sud de la presqu'île de Brøgger au niveau des glaciers Austre Lovén et Edith. 90
32 - Marge proglaciaire du glacier Ebba émissaire du glacier de plateau Lomonosov. 92
33 - Marge proglaciaire du glacier Blomstrand émissaire du glacier de plateau Isachsen. 93
34 - Schéma de la démarche méthodologique suivie pour l'observation des modalités régionales et locales de la reconquête végétale. 101
35 - Carte du recul des fronts glaciaires du Kongsfjord. 103
36 - Cartes topographiques de la presqu'île de Brøgger du Norsk Polarinstitutt. 105
37 - Extraits des photographies aériennes du Norsk Polarinstitutt. 108
38 - Limites de l'utilisation de l'image SPOT comme support cartographique dans les secteurs récemment déglacés. 110
39 - Données exogènes utilisées pour reconstituer la chronologie du recul glaciaire et la datation relative des dépôts morainiques. 111
40 - Extraits des cartes géomorphologiques et géologiques du Svalbard. 113
41 - Modèles Numériques de Terrain à différents niveaux de résolution. 115
42 - Types de cartes thématiques dérivées des données du MNT pour la marge du glacier Midre Lovén. 117
43 - Carte de la végétation du Svalbard et de Jan Mayen. 118
44 - Extraits des cartes détaillées de la végétation couvrant les secteurs à l'aval du glacier Midre Lovén. 121

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

45 - Distribution des postes de relevés pétrographiques à l'intérieur des marges proglaciaires. 124
46 - Méthode d'échantillonnage des faciès pétrographiques à l'intérieur de la marge du glacier Midre Lovén. 125
47 - Schémas théoriques de plans d'échantillonnage appliqués à l'espace intramorainique. 127
48 - Comparaison de la distribution de 100 points selon les méthodes aléatoire simple et systématique non-aligné. 129
49 - Schémas des plans d'échantillonnage suivis sur les marges proglaciaires. 131
50 - Exemple du calcul d'une aire minimale dans un groupement prairial de la région de Mödling en Basse-Autriche. 133
51 - Détermination des aires minimales sur la marge du glacier Austre Lovén. 135
52 - Exemples de relevés surfaciques et linéaires. 137
53 - Répartition des relevés surfaciques (1×1 m) à l'intérieur d'un poste d'observation (16×16 m) sur la marge du glacier Midre Lovén. 138
54 - Méthode de réalisation d'un relevé surfacique. 138
55 - Schéma théorique du rôle joué par la topographie dans les conditions environnementales contrôlant la dynamique végétale. 144
56 - Plan d'échantillonnage stratifié systématique non-aligné mis en place sur la marge du glacier Midre Lovén. 147
57 - Technique de comptage des espèces pour estimer l'abondance dans les relevés de la marge du glacier Midre Lovén. 148
58 - Relevés tests de végétation réalisés avec des comptages dans 100 carrés et dans six carrés. 149
59 - Exemples de secteurs du plan d'échantillonnage caractérisés par un contexte géomorphologique particulier sur la marge du glacier Midre Lovén. 152
60 - Constitution des tableaux de données. 156
61 - Démarche de tri et de classement des données. 158
62 - Méthode de codage booléen d'un tableau de contingence. 160
63 - Méthodes d'analyses multivariées. 162
64 - Exemple d'un profil de classe issu de la classification hiérarchique ascendante. 163
65 - Rappel méthodologique de l'observation de la reconquête végétale au Spitsberg à l'échelle de cinq marges proglaciaires. 174

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

66 - Documents de la mission au Spitsberg de G. Isachsen de 1906 et éléments de comparaison de 2004. 179
67 - Limites d'extension maximale des cinq glaciers au cours du Petit Âge Glaciaire. 180
68 - Reculs cumulés des glaciers depuis la fin du Petit Âge Glaciaire. 183
69 - Auréoles morainiques datées des cinq marges proglaciaires. 186
70 - Spectres pétrographiques des sites proglaciaires du Kongsfjord. 190
71 - Pourcentage de recouvrement de chaque classe granulométrique sur les cinq marges proglaciaires. 193
72 - Croquis géomorphologique de la marge du glacier Ebba. 197
73- Complexes morainiques partiellement englacés des marges des glaciers Lovén. 199
74 - Faible emprise spatiale du ruissellement sur la marge du glacier Edith. 201
75 - Disposition en versant de la marge du glacier Blomstrand. 203
76 - Fréquence des espèces végétales dans la toundra et à l'intérieur des cinq marges proglaciaires. 211
77 - Pourcentage de présence des espèces végétales communes aux cinq marges proglaciaires. 215
78 - Espèces végétales recensées parmi les cinq sites proglaciaires. 216
79 - Cartes de localisation de la marge du glacier Conway et des postes d'observation de la végétation. 218
80 - Cortèges floristiques recensés sur les dépôts des marges des glaciers Conway et Blomstrand. 219
81 - Nombre d'espèces végétales recensées par poste d'observation sur les cinq marges proglaciaires. 221
82 - Pourcentage de recouvrement végétal pour chaque poste d'observation sur les cinq marges proglaciaires. 222
83 - Schéma récapitulatif de la diversité spécifique recensée par secteur géographique. 225
84 - Espèces pionnières ubiquistes colonisant les dépôts déglacés depuis 30 ans. 227
85 - Espèces végétales recensées sur les dépôts déglacés depuis 30 ans parmi les cinq sites proglaciaires. 229
86 - Espèces végétales recensées sur les dépôts déglacés depuis 70 ans. 232
87 - Espèces végétales recensées sur les dépôts déglacés depuis 70 ans parmi les cinq marges proglaciaires. 233

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

88 - Espèces végétales recensées sur les dépôts déglacés depuis 100 ans. 235
89 - Espèces végétales recensées sur les dépôts déglacés depuis 100 ans parmi les cinq marges proglaciaires. 236
90 - Évolution de la fréquence des espèces végétales ultra-pionnières en relation avec la durée de déglaciation des moraines et dans la toundra. 240
91 - Répartition spatiale de *Braya purpurascens* sur les cinq marges proglaciaires. 241
92 - Évolution de la fréquence des espèces végétales pionnières ubiquistes en relation avec la durée de déglaciation des moraines et dans la toundra. 243
93 - Répartition spatiale de *Saxifraga oppositifolia* sur les cinq marges proglaciaires. 244
94 - Évolution de la fréquence des espèces végétales édificatrices en relation avec la durée de déglaciation des moraines et dans la toundra. 246
95 - Répartition spatiale de *Dryas octopetala* sur les cinq marges proglaciaires. 247
96 - Analyse factorielle des correspondances des classes granulométriques et des espèces végétales des cinq marges proglaciaires. 249
97 - Schéma du calendrier de la reconquête végétale. 252
98 - Impact des paramètres environnementaux sur la reconquête végétale. 255
99 - La marge proglaciaire en tant qu'écotone entre toundra et secteurs peu ou pas colonisés par la végétation au Spitsberg. 258
100 - Schéma de la démarche d'analyse des modalités locales de la reconquête sur la marge du glacier Midre Lovén. 262
101 - Comparaison des deux plans d'échantillonnage réalisés sur la marge du glacier Midre Lovén. 266
102 - Comparaison des cortèges floristiques recensés par les deux méthodes d'échantillonnage sur la marge du glacier Midre Lovén. 266
103 - Cartographie des valeurs de pente de la marge du glacier Midre Lovén. 271
104 - Cortèges floristiques des trois classes de pente. 271
105 - Espèces végétales recensées dans les zones affectées par la gélifluxion. 273
106 - Cartographies des différents types de plaines intramorainiques sur la marge du glacier Midre Lovén. 276
107 - Différenciation des cortèges floristiques selon les trois types de plaines. 278
108 - Localisation de *Salix polaris* sur la marge du glacier Midre Lovén. 284
109 - Localisation de *Poa abbreviata* sur la marge du glacier Midre Lovén. 285
110 - Localisation de *Saxifraga oppositifolia* sur la marge du glacier Midre Lovén. 286

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

111 – Cortège floristique des trois classes de rayonnement. 287
112 - Cortèges floristiques selon les expositions. 288
113 - Distribution des cortèges floristiques selon les situations par rapport au vent. 289
114 - Le ruissellement au centre du système paysager de la marge du glacier Midre Lovén. 291
115 - Vue en trois dimensions de la marge du glacier Midre Lovén à partir du MNT. 293
116 - Graphes factoriels des caractères de végétation et paramètres environnementaux. 297
117 - Schéma de synthèse des groupements floristiques pionniers et évolués en fonction des conditions mésologiques. 299
118 - Résultats de la classification ascendante hiérarchique présentée dans l'espace factoriel de l'AFC. 301
119 - Profils des classes au faciès minéral. 303
120 - Profils des classes aux faciès pionniers hygrophiles. 304
121 - Profils des classes aux faciès pionniers mésophile et mixte. 305
122 - Profil de la classe au faciès hygrophile de transition. 307
123 - Profils des classes aux faciès mésophile et xérophile de transition. 308
124 - Profils thématiques des classes de faciès évolués hygrophile et mésophile. 310
125 - Profils des classes aux faciès évolués mixte et xérophile. 311
126 - Représentation des faciès paysagers sur la marge du glacier Midre Lovén. 313
127 - Répartition spatiale des 13 classes de faciès paysagers. 314
128 - Cartes de probabilités de faciès associés au ruissellement. 316
129 - Cartes de probabilités de faciès associés à la durée de déglaciation des moraines. 317
130 - Cartes de probabilités des faciès associés à la pente. 318
131 - Cartes de probabilités des faciès faiblement rattachés à des paramètres environnementaux. 319
132 - Cartes de probabilités des faciès paysagers dans la marge du glacier Midre Lovén. 321
133 - Cartes de probabilités d'absence et de présence de *Draba species* sur la marge du glacier Midre Lovén. 324
134 - Schéma théorique des modalités locales de la reconquête végétale sur la marge du glacier Midre Lovén. 327

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

135 – Schéma des facteurs environnementaux intervenant dans la reconquête végétale selon les niveaux d'observation. 331

136 - Évolution des cortèges floristiques sur la marge du glacier Midre Lovén en relation avec la durée de déglaciation des dépôts d'après l'échantillonnage stratifié. 374

137 - Profil des classes au faciès minéral à partir des probabilités pondérées par l'effectif de la classe. 375

138 - Profil des classes au faciès pionnier hygrophile à partir des probabilités pondérées par l'effectif de la classe. 376

139 - Profil des classes au faciès pionnier mésophile et mixte à partir des probabilités pondérées par l'effectif de la classe. 377

140 - Profil des classes au faciès hygrophile de transition à partir des probabilités pondérées par l'effectif de la classe. 378

141 - Profil des classes au faciès mésophile et xérophile de transition à partir des probabilités pondérées par l'effectif de la classe. 379

142 - Profil des classes au faciès évolué hygrophile et mésophile à partir des probabilités pondérées par l'effectif de la classe. 380

143 - Profil des classes au faciès évolué mixte et xérophile à partir des probabilités pondérées par l'effectif de la classe. 381

144 - Cartes de probabilités des faciès faiblement associés aux conditions mésologiques (3, 5) et associés à la pente (12, 13). 382

145 - Carte de probabilités des faciès associés à la durée de déglaciation. 383

146 - Cartes de probabilités d'absence et de présence de *Arenaria pseudofrigida* sur la marge du glacier Midre Lovén. 384

147 - Cartes de probabilités d'absence et de présence de *Braya purpurascens* sur la marge du glacier Midre Lovén. 384

148 - Cartes de probabilités d'absence et de présence de *Carex nardina* sur la marge du glacier Midre Lovén. 385

149 - Cartes de probabilités d'absence et de présence de *Cerastium arcticum* sur la marge du glacier Midre Lovén. 385

150 - Cartes de probabilités d'absence et de présence de *Cochlearia officinalis* sur la marge du glacier Midre Lovén. 386

151 - Cartes de probabilités d'absence et de présence de *Deschampsia alpina* sur la marge du glacier Midre Lovén. 386

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

152 - Cartes de probabilités d'absence et de présence de *Minuartia rubella* sur la marge du glacier Midre Lovén. 387
153 - Cartes de probabilités d'absence et de présence de *Oxyria digyna* sur la marge du glacier Midre Lovén. 387
154 – Cartes de probabilités d'absence et de présence de *Pedicularis hirsuta* sur la marge du glacier Midre Lovén. 388
155 - Cartes de probabilités d'absence et de présence de *Poa abbreviata* sur la marge du glacier Midre Lovén. 388
156 - Cartes de probabilités d'absence et de présence de *Polygonum viviparum* sur la marge du glacier Midre Lovén. 389
157 - Cartes de probabilités d'absence et de présence de *Sagina nivalis* sur la marge du glacier Midre Lovén. 389
158 - Cartes de probabilités d'absence et de présence de *Salix polaris* sur la marge du glacier Midre Lovén. 390
159 - Cartes de probabilités d'absence et de présence de *Saxifraga cespitosa* sur la marge du glacier Midre Lovén. 390
160 - Cartes de probabilités présence et d'absence de *Saxifraga oppositifolia* sur la marge du glacier Midre Lovén. 391
161 - Cartes de probabilités présence de *Saxifraga oppositifolia* sur la marge du glacier Midre Lovén. 391
162 - Cartes de probabilités d'absence et de présence de *Silene uralensis* sur la marge du glacier Midre Lovén. 392
163 - Fiche de relevés de terrain pour le calcul de l'aire minimale. 393
164 - Fiche de relevés de terrain utilisée pour les relevés surfaciques de végétation. 394
165 - Fiche de relevés pétrographiques. 395

Liste des tableaux

1 - Récapitulatif des caractéristiques des cinq glaciers et sites proglaciaires étudiés au Spitsberg. 95
2 - Synthèse des données exogènes disponibles consultées pour le Svalbard. 122
3 - Répartition des relevés réalisés sur l'ensemble des sites proglaciaires. 142

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

4 - Synthèse des techniques de relevés utilisées pour échantillonner les marges proglaciaires. 154
5 - Probabilités conditionnelles d'une modalité connaissant les classes. 166
6 - Probabilités conditionnelles pondérées d'une classe connaissant les modalités. 166
7 - Synthèse des caractéristiques environnementales des différentes marges proglaciaires. 205
8 - Espèces végétales de la marge du glacier Midre Lovén recensées par les échantillonnages conduits le long de transects et par I.D. Hodkinson *et al.* 269
9 - Période de colonisation des espèces en relation avec la durée de déglaciation et le type de plaine intramorainique. 279
10 - Flore phanérogamique morainique du Spitsberg (de a à p). 398
11 - Flore phanérogamique morainique du Spitsberg (de s à t). 399

Table des photos

La plupart des clichés sont de l'auteur. Sinon le nom du photographe est précisé entre parenthèses. Pour les clichés photographiques, nous indiquons la date complète (voire l'heure) lorsque les sujets sont les dynamiques d'écoulement et les éléments floristiques. En effet, les régimes hydrologiques et les cycles phénologiques variant en fonction des jours (de l'heure pour les écoulements) et des saisons, il a nous semblé pertinent de le préciser.

1 - Le peuplement du Spitsberg. 22
2 - La base J. Corbel. 25
3 - Les glaciers Lovén. 29
4 - Toundra à *Dryas octopetala* avec *Cassiope tetragona.* 33
5 - *Pedicularis dasyantha,* espèce endémique du Spitsberg. 36
6 - Processus périglaciaires actifs au Spitsberg. 45
7 - Morphodynamiques actives au Spitsberg. 46
8 - Le renne du Svalbard *Rangifer tarandus ss. Platyrhinchus.* 47
9 - Espèces pâturées par les rennes du Spitsberg. 47
10 - Colonies de mouettes tridactyles nichant en falaise. 48
11 - Falaise à oiseaux accompagnées de végétation nitrophile. 48

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

12 – Espèces caractéristiques des formations végétales de falaises à oiseaux. 48
13 - Toundra discontinue dans le Kongsfjord. 54
14 - Contraste paysager entre secteurs morainiques et niveaux glacio-marins. 67
15 - Apport de débris à la surface du glacier Edith. 67
16 - Transport et dépôt de débris de tailles variées par le glacier Conway. 69
17 - Dépôt de débris superposés par le glacier Conway. 69
18 - Limites de la marge proglaciaire du glacier Steen. 71
19 - Complexe de collines morainiques de la marge du glacier Midre Lovén. 71
20 - Concentration de la couche de débris au front du glacier Austre Lovén. 71
21 - Modelé morainique en colline lié à la forme du lit rocheux. 74
22 - Lacs proglaciaires dans la marge du glacier Midre Lovén. 74
23 - Lac proglaciaire en contact avec le front du glacier Ragnart. 74
24 - Moraine médiane du glacier Ebba en 1990. 75
25 - Traces de véhicules dans la baie de Pétunia. 87
26 - Le front du glacier Austre Lovén et sa marge proglaciaire. 90
27 - Le glacier Ebba logé dans le fond de la vallée Ebba. 92
28 - Le glacier Blomstrand relié à l'île du même nom par un pédoncule de glace. 94
29 - La marge du glacier Blomstrand séparée du front du glacier par les eaux du fjord. 94
30 - Station de base pour le traitement différentiel du signal GPS. 99
31 - Cliché de 1907 du glacier Vestre Lovén. 106
32 - *Salix polaris* aux couleurs de l'automne. 171
33 - Front du glacier Blomstrand. 175
34 - Photographies aériennes en vues obliques des glaciers Lovén et Ebba en 1936. 181
35 - Photographies aériennes verticales des cinq glaciers dans les années 60. 182
36 - Vue de profil de la moraine de *surge* du glacier Blomstrand de 1960. 184
37 - Photographies aériennes des glaciers Blomstrand, Ebba et Lovén en 1990. 185
38 - Zone d'affleurement de la roche en place à la marge du glacier Austre Lovén. 185
39 - La partie supérieure du bassin versant du glacier Ebba est constituée de roches sédimentaires. 188
40 - Le site proglaciaire du glacier Ebba est dominé par les faciès sédimentaires. 189

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

41 - Amygdale de quartz d'exsudation dans un bloc de micaschiste de la marge du glacier Austre Lovén. 189
42 - Barre calcaire à l'intérieur de la marge proglaciaire du glacier Austre Lovén. 189
43 - Bloc erratique de la marge du glacier Blomstrand. 192
44 - Affleurement du glacier Ebba sous la couverture de débris morainiques. 196
45 - Loupe de foirage liée à la fonte de la glace. 196
46 - Complexe de collines morainiques dans lequel alternent bosses et creux, sur la marge du glacier Midre Lovén. 199
47 et 48 - Exemple de mise au jour d'un noyau de glace, provoquée par le ruissellement. 200
49 - Loupe de solifluxion dans la marge du glacier Blomstrand. 203
50 - *Saxifraga aizoïdes* à la marge du glacier Conway. 207
51 - *Saxifraga oppositifolia* est l'espèce ubiquiste du Spitsberg. 212
52 - Recouvrement végétal quasi-continu de la toundra. 213
53 - Recouvrement végétal fragmenté sur la marge du glacier Midre Lovén. 213
54 - Perchoir à oiseaux sur la marge du glacier Blomstrand. 218
55 - La mousse peut atteindre jusqu'à 30 % de recouvrement à proximité du front glaciaire. 227
56 - Colonisateur végétal tardif : *Oxyria digyna.* 231
57 - Espèces végétales des milieux secs : *Luzula confusa* et *Minuartia rubella*. 233
58 - La présence de *Phippsia concinna* est associée au littoral. 236
59 - Front d'une ancienne loupe de gélifluxion végétalisée. 259
60 - Le front du glacier Midre Lovén et sa marge proglaciaire. 263
61 - Plaine intramorainique de la marge du glacier Midre Lovén. 275
62 - Chenal entaillant une colline morainique sur la marge du glacier Midre Lovén. 275
63 - Chenal de type actif utilisé par les eaux de fonte de la neige et du glacier. 280
64 - Chenal de type local utilisé par un ruissellement de fonte nivale. 280
65 - Chenal de type inactif, abandonné par les écoulements. 282

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

Table des matières

Avant-propos 5

Sommaire 9

Avertissement 11

Introduction générale 13

Première partie - Biogéographique du terrain d'étude, méthodologie d'observation et d'analyse de la reconquête végétale 29

Introduction de la première partie 31

Chapitre 1 – Le contexte biogéographique de l'étude 33

Introduction 35
1. Particularités de la toundra du Spitsberg 35
  1.1. Une végétation jeune 36
    1.1.1. Déglaciation holocène, libération des secteurs côtiers et des vallées intérieures du Spitsberg 37
    1.1.2. Développement de la végétation pendant le réchauffement holocène 38
  1.2. Capacité d'adaptation des espèces végétales aux contraintes environnementales arctiques 40
    1.2.1. Contraintes mésologiques locales 40
    1.2.2. Adaptations végétales 50
  1.3. Richesse floristique du Spitsberg 55
  1.4. Variations régionales 56
    1.4.1. Contrastes climatiques 56
    1.4.2. Zonage bioclimatique au Spitsberg 59
2. Contexte morphoclimatique récent : les marges proglaciaires 62
  2.1. Retrait glaciaire contemporain 62
    2.1.1. Le retrait glaciaire 62
    2.1.2. Glaciers actuels 64
  2.2. Les marges proglaciaires, un potentiel spatial pour la colonisation végétale 66
    2.2.1. Source, incorporation et transport des débris morainiques 66
    2.2.2. Les limites des marges proglaciaires 70
    2.2.3. Les moraines de retrait 70
    2.2.4. Les dynamiques de remaniement intramorainique 76
  2.3. La colonisation végétale des marges proglaciaires 78
    2.3.1. Processus de colonisation végétale 78
    2.3.2. Un objet de recherche dynamique 79
3. Terrains d'étude 85
  3.1. Deux contextes régionaux pour l'observation de la reconquête végétale 85
  3.2. Les marges proglaciaires 87
    3.2.1. Marges proglaciaires des glaciers de vallée 88

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

3.2.2. Marges proglaciaires des glaciers émissaires de glacier de plateaux 91
Conclusion 96

Chapitre 2 - Méthodologie 99

Introduction 101
1. Données exogènes : constitution d'une base d'informations géographiques 102
1.1. Les documents généraux : cartes et images 103
1.1.1. Les cartes topographiques 104
1.1.2. Les photographies aériennes : principal support pour la cartographie du recul glaciaire 106
1.1.3. Les images satellites 109
1.2. Les données thématiques 110
1.2.1. Cartes géomorphologiques 112
1.2.2. Cartes géologiques 114
1.2.3. Modèles Numériques de Terrain 114
1.2.4. Données topoclimatiques dérivées du MNT 116
1.3. Cartes de la végétation 116
1.3.1. Cartographie générale de la végétation du Svalbard 117
1.3.2. Cartes détaillées de la végétation 119
2. Collecte des données endogènes 123
2.1. Les modalités régionales de la reconquête : protocole d'observation sur cinq sites 123
2.1.1. Nature pétrographique des marges proglaciaires 124
2.1.2. Collecte des données floristiques 126
2.1.2.1. Types d'échantillonnage 126
2.1.2.2. Aménagement d'un plan d'échantillonnage systématique semi-dirigé 130
2.1.2.3. Quelle surface échantillonner ? La délimitation des aires minimales 132
2.1.2.4. Le relevé botanique 134
2.2. Les modalités locales de la reconquête : protocole d'observation sur les micromilieux du glacier Midre Lovén 142
2.2.1. Plan d'échantillonnage 142
2.2.2. Mise en place du plan d'échantillonnage sur la marge proglaciaire à partir du GPS 145
2.2.3. Technique de relevés 146
3. Analyse des données 155
3.1. Tableaux de données 155
3.2. Analyse statistique descriptive des tendances générales : les cortèges floristiques au fil du temps 157
3.3. À la recherche des structures fortes : l'analyse exploratoire des données 157
3.4. Modélisation probabiliste 164
3.4.1. Théorème de Bayes 164
3.4.2. Expérimentation probabiliste sur la marge du glacier Midre Lovén 165
Conclusion 167

Conclusion de la première partie 169

Deuxième partie – Les modalités régionales de la reconquête végétale au Spitsberg 171

Introduction de la deuxième partie 173

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

Chapitre 3 – Le contexte des cinq marges proglaciaires étudiées 175

Introduction 177
1. Datation des surfaces morainiques déglacées 177
  1.1. Fin du Petit Âge Glaciaire et amorce du recul des glaciers : les plus anciens dépôts morainiques 177
  1.2. Le grand retrait glaciaire : 1918 à nos jours 182
2. Hétérogénéité des secteurs intramorainiques 187
  2.1. Composantes pétrographiques 187
    2.1.1. Domination des roches sédimentaires dans la marge du glacier Ebba 187
    2.1.2. Domination des roches métamorphiques dans le Kongsfjord 189
  2.2. Caractéristiques granulométriques des moraines 191
3. Modelés morainiques 195
  3.1. Moraines à cœur de glace 195
    3.1.1. Moraines englacées du glacier Ebba 195
    3.1.2. Moraines à noyaux de glace des glaciers Midre et Austre Lovén 198
  3.2. Moraines « déglacées » 200
    3.2.1. Moraines de chevauchement du glacier Edith 201
    3.2.2. Moraines en position de versant du glacier Blomstrand 202
Conclusion 204

Chapitre 4 - Les rythmes et les modalités de la reconquête végétale des marges proglaciaires 207

Introduction 209
1. Spécificités biogéographiques des marges proglaciaires 209
  1.1. Les marges proglaciaires, réservoir d'espèces pionnières 210
  1.2. Particularités floristiques de chaque marge proglaciaire 215
    1.2.1. Expression floristique de la proximité du fjord sur la marge du glacier Blomstrand 217
    1.2.2. Contrainte de la glace sur le développement végétal sur la marge du glacier Ebba 220
    1.2.3. Similarité spécifique sur les marges des glaciers Midre et Austre Lovén 222
    1.2.4. Spécificité xérophile de la marge du glacier Edith 223
2. Les rythmes de la reconquête végétale 226
  2.1. Stade initial de la reconquête végétale : les premières espèces colonisatrices 226
    2.1.1. Colonisateurs pionniers ubiquistes 226
    2.1.2. Développement floristique plus rapide sur les marges des glaciers Lovén et Edith 228
    2.1.3. La marge du glacier Blomstrand : une reconquête sous l'influence du fjord 228
    2.1.4. La marge du glacier Ebba : une reconquête ralentie par la glace 230
  2.2. Deuxième stade de la reconquête végétale : le relais entre espèces pionnières et édificatrices 230
    2.2.1. Occupation croissante des espèces pionnières et édificatrices 230
    2.2.2. Affirmation d'une maturité avancée sur les marges des glaciers Lovén et Edith 232
    2.2.3. Accélération de la reconquête sur la marge du glacier Blomstrand 233
    2.2.4. La marge du glacier Ebba : la glace en cause dans le retard de la reconquête 234
  2.3. Stade 3 : stabilisation de la reconquête végétale 234
3. Modalités spatio-temporelles de la reconquête végétale 239

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

3.1. Les espèces ultra-pionnières 239
3.2. Les espèces ubiquistes 242
3.3. Les espèces édificatrices 245
4. Mise en perspective synthétique 248
Conclusion 253

Conclusion de la deuxième partie 257

Troisième partie - Le rôle de la microtopographie dans l'évolution du paysage intramorainique 259

Introduction de la troisième partie 261

Chapitre 5 – Le rôle des facteurs environnementaux sur le couvert végétal et sa structuration 263

Introduction 265
1. Remarques préliminaires concernant les résultats des échantillonnages sur la marge du glacier Midre Lovén 265
2. Rôle des formes et des processus géomorphologiques 269
2.1. La pente 270
2.2. Les morphodynamiques 272
2.2.1. Impact spatial très limité de la gélifluxion 273
2.2.2. Forte emprise spatiale du ruissellement 274
2.3. Comportements différenciés des espèces en fonction des contextes mésologiques 283
3. Le rôle des paramètres climatiques locaux 287
3.1. Le rayonnement global 287
3.2. L'exposition 288
3.3. Le vent 289
Conclusion 290

Chapitre 6 - Organisation paysagère de l'espace intramorainique 293

Introduction 295
1. Étude des liens entre végétation et conditions mésologiques 295
1.1. Le rôle du contexte morainique 295
1.2. Influence des conditions édaphiques 298
2. Identification des faciès paysagers intramorainiques 300
2.1. Faciès minéral 302
2.2. Faciès pionnier 302
2.3. Faciès de transition 306
2.4. Faciès évolué 309
3. Essai de diagnostic spatial de la reconquête végétale 315
3.1. Recherche des liens unissant les faciès paysagers et les paramètres environnementaux : la cartographie des classes 315
3.1.1. Faciès associés au ruissellement 315
3.1.2. Faciès associés à la durée de déglaciation 316
3.1.3. Faciès associés à la pente 317
3.1.4. Faciès faiblement associés aux paramètres environnementaux 318
3.2. Répartition spatiale des 13 classes de faciès : cartographie de synthèse 319
Conclusion 323

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

Conclusion de la troisième partie 327

Conclusion générale 329

Références bibliographiques 337

Annexes 371

Glossaire 401

Tables des illustrations 405

Liste des figures 405
Liste des tableaux 412
Liste des photos 413

Table des matières 417

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

tel-00011178, version 1 - 21 Dec 2005

Résumé

Sous l'effet du réchauffement climatique postérieur au Petit Âge Glaciaire, la fonte des glaciers arctiques a libéré de nouveaux espaces conquis ensuite par la végétation. Le phénomène est bien marqué au Spitsberg où la présente étude est conduite. Celle-ci concerne les marges de cinq glaciers, localisées sur la façade nord occidentale et dans le centre de l'île. Une première analyse a été conduite par relevés floristiques systématiques permettant de mettre en relation les phases successives de retrait glaciaire et de colonisation végétale. Le temps gouverne l'évolution de la végétation tant dans sa physionomie que dans sa composition. Ainsi, la séquence temporelle des cortèges floristiques s'ordonne partout de la même façon, depuis les stades pionniers jusqu'à des stades plus évolués. Cependant, la dynamique végétale n'est pas uniforme et n'opère pas sous la seule commande temporelle. Les configurations environnementales jouent aussi un rôle important qui se décline selon les échelles. C'est ce qui ressort de notre étude où les contextes environnementaux de chaque site sont mis en évidence comme facteur de différenciation de la végétation entre les cinq marges. Une deuxième approche a été conduite à échelle fine, à l'intérieur d'une marge proglaciaire pour préciser les termes de différenciation locale des milieux. Sur ce secteur, nous disposons d'un modèle numérique de terrain (MNT, 2 mètres de résolution) autorisant une étude intégrée de nombreux paramètres stationnels associés à la microtopographie. Cette approche a permis de relier les changements floristiques aux changements de contexte environnemental et d'identifier les conditions locales structurant le couvert végétal. Enfin, cette étude a débouché sur la mise en place d'une nomenclature de faciès paysagers dont la cartographie précise a été réalisée grâce à l'utilisation d'un modèle de probabilités conditionnelles.

Mots clefs: marge proglaciaire, colonisation végétale, stratégies d'échantillonnage, SIG, MNT, Spitsberg.

Dynamics of vegetated landscapes since the end of the Little Ice Age: Analysis of plant colonization in proglacial areas.

As a result of global climatic changes that followed the Little Ice Age, most Arctic glaciers are retreating and more areas are becoming available for plant colonization. Such a process can be observed on Svalbard in the frontal areas of five glaciers, located on the north western coastline and in the central part of the island. To determine the relationship between retreating glacial fronts and plant colonization processes, systematic releves are normally utilized. The resulting data usually indicate that time since glacial retreat is the primarily determining of vegetation evolution in terms of physiognomy and floristic composition. Although the floristic sequence is the same from the early pioneer stages to later mature ones, we found that this process is neither homogeneous nor explicitly time dependent. For example, environmental position, such as changes in micro-topographic relief, may also be an important factor in determining variation in the colonization process and can interfere with the normal time dependent colonization process. Within one proglacial area we observed floristic variation between different micro-topographic environments utilizing releves and a digital elevation model with a 2m spatial resolution. This allowed us to examine floristic changes along both temporal (time from glacial retreat) and spatial (micro-topographic relief) scales. Using a probabilistic model, we were able to map the temporal and spatial effects on plant colonization in these glacial forelands and produce new landscape nomenclature to describe them

Key words: proglacial area, plant colonization, sampling strategies, GIS, DEM, Spitsbergen.

UMR 6042 - Géodynamique des milieux naturels et anthropisés