

L'Arctique en mutation

Daniel Joly, Madeleine Griselin, Christelle Marlin, Jean Michel Friedt, Eric Bernard, Florian Tolle, Samuel Etienne, Jim Hansom, Donald Forbes, Denis Mercier, et al.

► **To cite this version:**

Daniel Joly, Madeleine Griselin, Christelle Marlin, Jean Michel Friedt, Eric Bernard, et al.. L'Arctique en mutation. Daniel Joly. Ecole Pratique des Hautes Etudes, 46, pp.184, 2016, Les mémoires du laboratoire de Géomorphologie, Samuel Etienne, 978-2-900111-23-9. hal-01425238

HAL Id: hal-01425238

<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01425238>

Submitted on 12 Jan 2017

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.



L'ARCTIQUE EN MUTATION

Collection *Les mémoires du laboratoire de Géomorphologie*
VOLUME 46

Dépôt légal : 1^{er} semestre 2016
ISBN 978-2-900111-23-9
ISSN 0750-6066
EAN 9782900111239
Dinard - Paris, 2016

Mise en page : Hélène GLORIA

ECOLE PRATIQUE DES HAUTES ETUDES
Laboratoire de Géomorphologie et
Environnement littoral
15, boulevard de la Mer - 35800 Dinard

geomorphologie.dinard@ephe.sorbonne.fr
www.ephe.fr



École Pratique
des Hautes Études

SOMMAIRE

AVANT-PROPOS	7
<i>Daniel JOLY</i>	
CHAPITRE I	9
Fluctuations climatiques récentes en Arctique : l'exemple du Spitsberg occidental	
<i>Madeleine GRISELIN, Christelle MARLIN et Jean-Michel FRIEDT</i>	
CHAPITRE II	25
Évolution contemporaine des glaciers arctiques ; exemple de l'Austre Lovénbreen (79°N)	
<i>Eric BERNARD et Florian TOLLE</i>	
CHAPITRE III	39
Géomorphologie des côtes rocheuses arctiques	
<i>SAMUEL ETIENNE, Jim HANSOM et Donald L. FORBES</i>	
CHAPITRE IV	65
L'Arctique face aux crises géomorphologiques paraglaciaires	
<i>Denis MERCIER</i>	
CHAPITRE V	79
Distribution multi-scalaire de la végétation en Arctique	
<i>Martha RAYNOLD</i>	
CHAPITRE VI	95
Distribution de la végétation au Svalbard	
<i>Daniel JOLY, Geir ARNESEN et Lennart NILSEN</i>	
CHAPITRE VII	105
Les mouvements de masse comme risques majeurs aux hautes latitudes atlantiques européennes (exemples islandais et norvégien)	
<i>Armelle DECAULNE</i>	

CHAPITRE VIII.....	127
Les formes et les enjeux de l'urbanisation en Arctique	
<i>Yvette VAGUET</i>	
CHAPITRE IX.....	137
Les routes maritimes de l'Arctique	
<i>Jacques GUILLAUME</i>	
CHAPITRE X.....	151
Les peuples traditionnels et la modernité	
<i>Eric NAVET</i>	
CHAPITRE XI.....	165
Le læstadianisme, syncrétisme culturel entre chamanisme et luthéranisme chez les Sâmes d'Europe du Nord	
<i>Karen HOFFMANN-SCHICKEL</i>	
TITRES DES TABLEAUX.....	177
TITRES DES FIGURES.....	178

AVANT-PROPOS

Il y a de toute évidence des liens étroits entre l'environnement et les sociétés ; liens complexes, rétroactifs. Sans forcément adhérer sans retenue à Montesquieu et à son déterminisme climatique expliquant les régimes politiques, il est loisible de poser la question de savoir quelle est la part d'influence apportée par l'un dans la construction ou la modification de l'autre. Les sociétés de l'Arctique donnent à cet égard bon nombre d'arguments à ceux qui pensent qu'il faut du génie à l'Homme pour avoir colonisé puis survécu dans un milieu on ne saurait plus répulsif. A la suite du géographe Jared Diamond (« *Le Monde jusqu'à hier. Ce que nous apprennent les sociétés traditionnelles* », Gallimard, 2013), il ne faut toutefois pas voir dans la nature, aussi contraignante qu'elle puisse être, la principale menace à laquelle les peuples autochtones doivent faire face.

Les hommes du Nord ont été confrontés de force à la « civilisation » occidentale dont les impacts destructeurs ont, en moins d'un siècle, profondément modifié des civilisations multimillénaires et contribué à la disparition de très nombreuses langues. Mais ces sociétés se restructurent, s'adaptant au monde moderne après avoir plus ou moins intégré leur récente immersion dans la « mondialité » (Gérard Dussouy, *Traité de relations internationales*, tome III : *Les théories de la mondialité*, L'harmattan, 2009). Mais aujourd'hui, un nouvel obstacle apparaît sous la forme du changement climatique dont les effets, amorcés à la fin du XIX^e siècle, ont déjà commencé à se faire sentir. Les experts du GIEC (Groupement intergouvernemental sur l'évolution du climat) ont, dans leur dernier rapport de 2013, confirmé la responsabilité, sinon en totalité, du moins en grande part, de l'homme dans un processus qui a vu les températures mondiales croître de 1°C depuis cent ans, processus qui se poursuivra en s'amplifiant. Suite à ces profondes mutations, une partie du patrimoine culturel de l'humanité a déjà disparu ; ce qu'il en reste résistera-t-il à la modification des conditions « naturelles » qui ne permettent plus aux rennes de se nourrir convenablement l'hiver par exemple ? Sans parler de la banquise d'été qui pourrait disparaître dans moins de vingt ans.

Les membres du GDR/CNRS 3062 « mutations polaires » se sont donné comme objectif de décrypter les enjeux de ces bouleversements politiques, économiques et climatiques auxquels doivent faire face les peuples du Nord. Les textes réunis dans ce recueil ne visent pas à faire le tour de la question des mutations actuelles précédemment citées. Mais le dénominateur commun entre toutes les contributions est de montrer que l'Arctique bouge. La première partie aborde quelques uns des processus physiques les plus éminents : fluctuations récentes du climat et des glaciers, dynamiques géomorphologiques des littoraux, géomorphologie. Une seconde partie est consacrée à la structure de la végétation à deux niveaux d'échelle : en Arctique tout entier et au Spitsberg. Enfin, l'homme, tout à la fois acteur actif et acteur subissant les mutations, apparaît dans la troisième partie. Avec les risques d'avalanches et de glissements de terrain qui entraînent des dizaines de morts chaque année, on est bien à l'interface de la nature et de la société. Il en va de même avec le transport maritime qui trouve un regain d'intérêt et suscite la convoitise des marchands suite à la fréquence de plus en plus faible de la glace dans les passages du nord-ouest et du nord-est. L'exploitation des ressources naturelles a entraîné l'Arctique dans un processus d'urbanisation, traditionnellement inconnu des populations autochtones nomades. Enfin deux chapitres, l'un consacré au peuple Ojibwé, l'autre au peuple Sâme, montrent l'assimilation culturelle et la dépossession économique suite à la colonisation et à l'évangélisation. Écoutez les sociétés traditionnelles ; nous autres « modernes » avons beaucoup à en apprendre : sur les liens qui unissent les hommes au sein de la société, mais aussi, grâce à un regard humain, sur l'interprétation qui est faite de la nature, du monde, de l'univers.

Daniel Joly

CHAPITRE 1

FLUCTUATIONS CLIMATIQUES RÉCENTES EN ARCTIQUE : L'EXEMPLE DU SPITSBERG OCCIDENTAL

Madeleine Griselin^a, Christelle Marlin^b et Jean-Michel Friedt^c

^a CNRS UMR6049 ThéMA, Université de Franche-Comté, Besançon

^b CNRS UMR8148 GEOPS, Université Paris-Sud, Orsay

^c CNRS UMR6174 FEMTO-ST, Université Franche-Comté, Besançon

L'Arctique est indiscutablement reconnu comme la région du globe la plus affectée par le réchauffement climatique récent (IPCC, 2013). Si l'impact de ce changement est visible dans les différents systèmes et écosystèmes de l'Arctique (Hagen *et al.*, 2003 ; Kholer *et al.*, 2007), les rétroactions sur le climat des hautes latitudes de l'hémisphère nord nécessitent d'être prises en compte pour comprendre plus globalement le climat mondial. Même si des différences existent entre les projections issues des différents modèles climatiques, ces dernières s'accordent toutes sur une augmentation de la température de l'air et des hauteurs de précipitations dans l'Arctique (IPCC, 2013). Le lien entre le système arctique et le climat mondial implique le cycle hydrologique, y compris la partie atmosphérique, et la cryosphère. Toutefois, la faible densité de stations associée à des problèmes de mesures entrave l'analyse fine qui peut être faite des changements climatiques dans l'Arctique (Førland et Hanssen-Bauer, 2003). Parmi les paramètres climatiques, les séries de température de l'air et des hauteurs de précipitations sont les plus longues.

Au Spitsberg occidental, île faisant partie de l'archipel du Svalbard dans l'Arctique, les données de température et de précipitations ont débuté à Longyearbyen quelques années avant la Première Guerre mondiale, ce qui autorise une analyse de la température de l'air sur les cent dernières années. Les données discontinues des hauteurs de précipitations ne permettent une analyse de ce paramètre que sur les soixante dernières années. En parallèle, la station de Ny-Ålesund, une centaine de kilomètres au nord de Longyearbyen, a démarré en 1969 et sert de référence aux nombreux travaux scientifiques se déroulant en baie du Roi. En particulier, les travaux hydro-glaciologiques conduits dans le cadre de deux programmes ANR – Hydro-Sensor-Flows (2007-2010) et Cryo-Sensors (2011-2014) – ont nécessité une analyse fine des données climatiques pour comprendre le lien entre l'évolution du glacier Lovén Est (Austre Lovénbreen) et le climat depuis les quarante dernières années.

STATIONS CLIMATIQUES DANS L'ARCTIQUE

Pour très réactif qu'il soit aux fluctuations climatiques, le haut Arctique possède peu de séries climatiques longues, d'une durée supérieure à cent ans. Dans les bases de données facilement accessibles en ligne (comme la base de données Météo-climat ou celle d'Eklima du Norwegian meteorological Institute par exemple), on observe que les premières données climatiques dans l'Arctique proviennent de mesures effectuées par quelques stations éparses installées progressivement au nord du cercle polaire dès la fin du XIX^e ou au début du XX^e siècle. Parmi ces premières stations, citons celle d'Ilulissat au Groenland (69,22°N, 51,05°O et altitude de 39 m) qui démarre en 1873, celle de Barrow en Alaska (71,03°N, 156,78°O et altitude de 9 m) avec une chronique qui débute en 1901 ou encore deux stations au Svalbard dont l'une aurait démarré en 1908 (Svalbard Airport/Longyearbyen) et en 1910 (l'île aux Ours). Avant la Seconde Guerre mondiale, l'Arctique possède un réseau d'une dizaine de sta-

tions, réseau qui va considérablement s'étoffer après la guerre (par exemple : Mould Bay dans les Territoires du Nord-Ouest au Canada en 1948 ; Alert dans le Nunavut au Canada en 1951 ; Station Nord au Groenland en 1952 ou Danmarkshavn au Groenland en 1973). Aujourd'hui, l'Arctique continental est suivi par une trentaine de stations (Fig. 1.1). Si les premières d'entre elles possèdent des chroniques longues, les données ne sont pas toujours utilisables en raison des interruptions des relevés ou d'un manque de fiabilité dans l'instrumentation donc dans celle des données produites (Tolle *et al.*, 2013). Les auteurs considèrent que ce n'est qu'après les années 1940-1950 que les chroniques de températures et précipitations deviennent plus fiables pour rendre compte du changement climatique dans l'Arctique : cela donne un recul d'à peine un demi-siècle de mesures directes du climat dans cette région. Avec moins de cinquante stations au-delà du cercle polaire sur un territoire de terres émergées d'environ 7 millions de km² sur les 24 millions que compte l'Arctique, cela représente une densité faible de stations (< 7 stations par million de km²). Notons que la disponibilité des données est variable de même que leur homogénéité : elles n'ont pas toujours été corrigées au sens entendu par les climatologues (par exemple Tabaud, 2008 ; Godard et Tabaud, 2009 ; site web de l'organisation mondiale de la météorologie). Il est également à noter que, jusqu'à très récemment, les stations météorologiques arctiques étaient toutes en bordure de la mer et donc à des altitudes très faibles. La très complète station américaine Summit, établie en avril 1989 au cœur de l'inlandsis groenlandais, est une exception (72,6°N ; 38,5°O ; altitude de 3 225 m).

STATIONS MÉTÉOROLOGIQUES AU SVALBARD

Le Svalbard (74,81°N, 10,35°E) est l'un des bastions de l'océan Arctique à présenter les plus longues séries enregistrées. La chronique continue la plus longue est celle de Longyearbyen au sud de l'Isfjord, le fjord le plus important du Spitsberg (Kohler *et al.*, 2003 ; Nordli, 2010). Entre le Svalbard et la Scandinavie, la station de l'île aux Ours fonctionne depuis 1910. Ny-Ålesund, au nord-ouest du Spitsberg, possède une station depuis 1969, tandis que la station polonaise de Hornsund, au sud, fonctionne depuis 1976. Les stations météorologiques terrestres sont toutes proches du niveau de la mer. Les programmes de recherche actuels ont vu fleurir au Svalbard des stations d'enregistrement de quelques paramètres climatiques sur les glaciers et les calottes polaires (Kongsvegen (520 m), (Karner *et al.*, 2013) ; Glacier Lovén Est (400 m), (Xu *et al.*, 2010) ainsi que sur des sommets ou épaulements rocheux (Lovén Est, 450 m ; Zeppelin Fjellet, 474 m).

LONGYEARBYEN ET L'ISFJORD

Bien que représentatives du climat de la partie centrale du Spitsberg, les chroniques de Longyearbyen permettent d'appréhender les fluctuations climatiques des cent dernières années au Svalbard. Il est important de noter que la station a été sensiblement déplacée deux fois après son implantation :

- période 1916-1977 : station de Longyearbyen ; à 37 m d'altitude (78,22°N et 15,62°E) ;
- période 1964-1969 : station de l'aéroport du Svalbard à 20 m d'altitude (78,25°N et 15,55°E) ;
- depuis 1974 : station de l'aéroport du Svalbard à 28 m d'altitude (78,25°N et 15,45°E).

Pour des questions pratiques, et en raison de la faible distance séparant les trois emplacements, l'ensemble de ces deux stations sera, dans le reste du texte, désigné sous le nom unique de «Longyearbyen».

En dehors de la capitale, le sud de l'Isfjord a été équipé de trois autres stations, permettant de compléter les données manquantes sur Longyearbyen (après corrections). Parmi ces stations, seule celle de Barentsburg fonctionne encore :

– Green Harbour (78,05°N, 14,25°E ; altitude 4 m). Avec la station de l'île aux Ours au sud de l'archipel, cette station a été l'une des premières (1911) à fonctionner au Svalbard mais elle

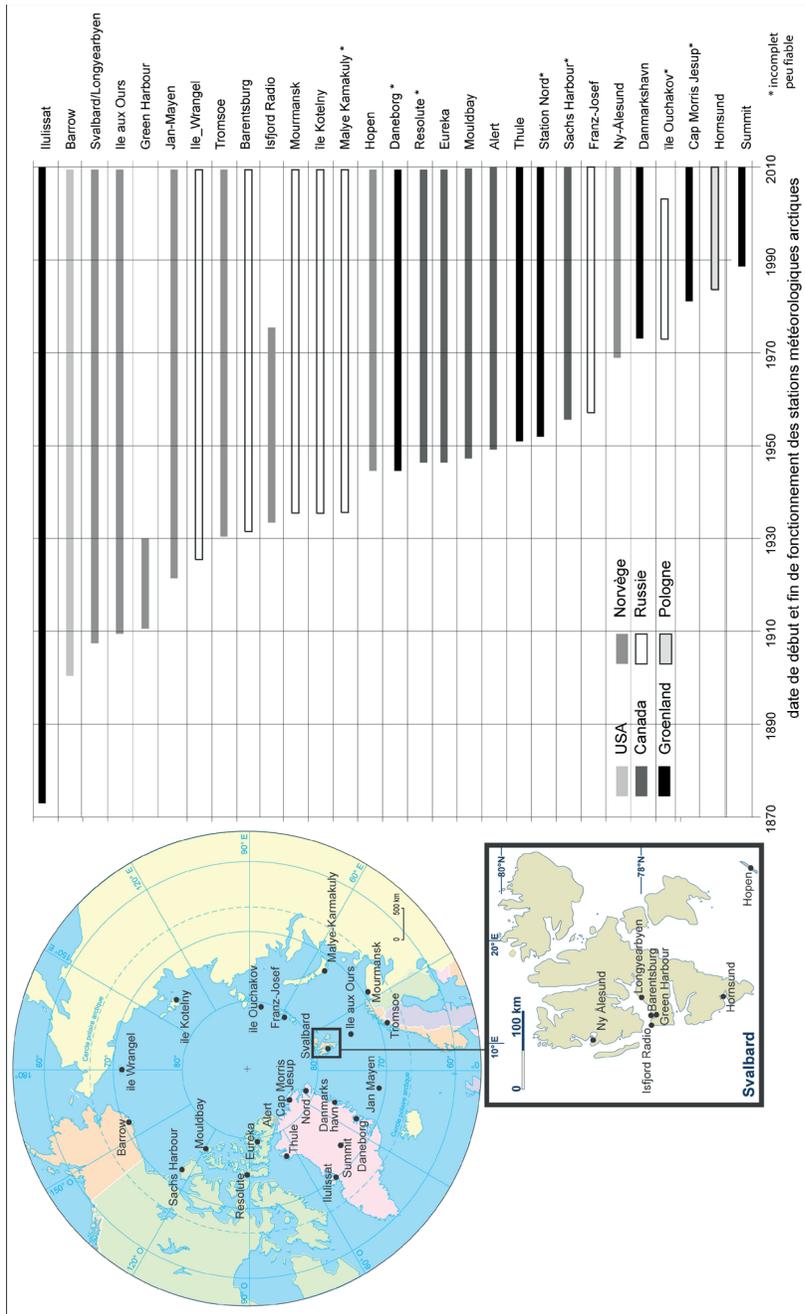


Figure 1.1 : Carte des stations météorologiques en Arctique et périodes de fonctionnement (d'après les données de Meteo-Climat : <http://meteo-climat-bzh.dyndns.org/>)

a été arrêtée assez rapidement, en 1930 ;

– Barentsburg (78,30°N, 14,30°E ; altitude 49 m). Cette station russe, à 2 km seulement de Green Harbour, qui a été mise en place en 1933, est toujours en activité ;

– Isfjord Radio (78,07°N, 13,6°E ; altitude 7 m). Cette station a fonctionné pendant une quarantaine d'années, entre 1934 et 1976. Située sur un emplacement stratégique à Cap Linné, à l'entrée de l'Isfjord, dans un contexte plus océanique que Longyearbyen, la station a été arrêtée après la mise en fonction de l'aéroport international du Svalbard à Longyearbyen.

NY-ÅLESUND

La station de Ny-Ålesund, 100 km plus au nord et en façade maritime, est opérationnelle depuis 1951 d'après le site web du service météorologique norvégien, mais seules les données à partir de 1969 sont disponibles en ligne. L'emplacement de la station a changé une fois en juillet 1974 :

– période 1951-1974 : 78,92°N et 11,93°E ; altitude 42 m ;

– période 1974 à l'actuel : 78,92°N et 11,93°E, altitude 8 m.

Cette station a fait l'objet de plusieurs articles récents (par exemple : Førland et *al.*, 2011 ; Killingtveit et *al.*, 2003 ; Kohler et *al.*, 2003 ; Forland et Hanssen-Bauer 2003), en raison des nombreux travaux scientifiques menés dans le secteur de la baie du Roi près du village scientifique de Ny-Ålesund.

ANALYSES DES DONNÉES CLIMATIQUES AU SVALBARD

Les informations climatiques présentées ici proviennent de calculs effectués à partir des données journalières ou bi-journalières fournies par le service météorologique norvégien (site Internet met.no). Les données moyennes annuelles et les gradients sont présentés ici en années hydrologiques commençant le 1^{er} octobre et se terminant le 30 septembre de l'année suivante¹.

LONGYEARBYEN

La température moyenne annuelle de l'air à Longyearbyen sur la période 1918-2012 est de -5,75°C (écart-type $\sigma = 1,57^\circ\text{C}$; nombre de valeurs $n = 95$). Elle est sensiblement plus basse pour la normale 1970-1999 – choisie comme référence à 30 ans sur une période commune avec la chronique de Ny-Ålesund –, avec une moyenne de -6,04°C ($\sigma = 1,17^\circ\text{C}$, $n = 30$). Pour se rendre compte de l'augmentation de la température de l'air sur les années récentes, les gradients décennaux ont été déterminés sur la période 1918-2012, séparée en deux intervalles 1919-1999 et 1999-2012 (Fig. 1.2). Le gradient obtenu pour l'ensemble de la chronique est faible, +1,62°C pour 95 ans (+0,17°C par décennie) et cache une forte disparité entre les deux sous-périodes considérées : seule la période récente (2000-2012) présente une augmentation importante de la température de l'air avec une augmentation apparente de 1,94°C, soit un gradient de +1,49°C par décennie alors que la première partie de la chronique 1918-1999 ne montre pas de gradient significatif (-0,30°C pour 82 ans, soit -0,04°C/décennie).

Si les premières mesures des hauteurs de précipitations ont été obtenues en 1917 (base de données Eklima du Norwegian meteorological Institute) – voire antérieurement (1908) si on se réfère à la base de données de Meteo-climat – les données deviennent exploitables à partir de 1957 car les valeurs sont trop sporadiques avant cette date. La moyenne 1958-

1. Pour ne pas alourdir le texte, une moyenne entre deux périodes, année n / année $n+1$ et année m / année $m+1$, sera indiquée comme la moyenne année $n+1$ -année $m+1$: par exemple, moyenne 1969-1970 / 1998-1999 sera indiquée 1970-1999.

2012 s'établit à 190 mm ($\sigma = 50$ mm, $n = 55$) et est tout à fait similaire à celle obtenue pour la période de 30 ans 1970-1999 (195 mm ; $\sigma = 45$ mm, $n = 30$) suggérant aucun changement important dans les hauteurs de précipitations sur cette partie du Spitzberg. Ces hauteurs sont les plus faibles enregistrées par le service météorologique norvégien (Forland et Hanssen-Bauer, 2003). Le gradient décennal 1958-2012 est faible (-29,2 mm sur 55 ans, soit -5,3 mm par décennie) et représente moins de 4 % de la hauteur des précipitations moyennes (Fig. 1.3). Si l'on prend l'ensemble de la chronique à partir de 1917, on obtient un gradient légèrement positif mais peu fiable vu l'absence de données (Fig. 1.3). Il est difficile, en ce cas, d'établir un gradient temporel à long terme de l'évolution des hauteurs de précipitation à Longyearbyen.

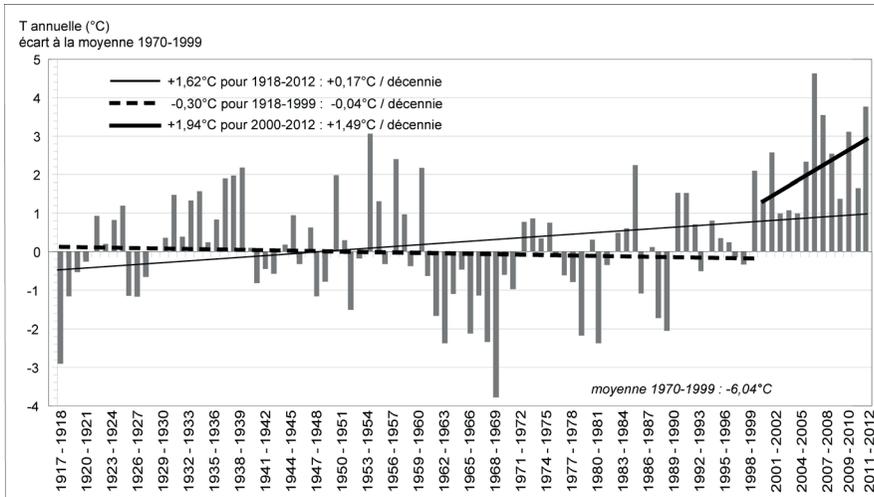


Figure 1.2 : Températures moyennes annuelles à Longyearbyen 1917-2010 : écart à la moyenne 1969-1998 (données MeteoNorsk)

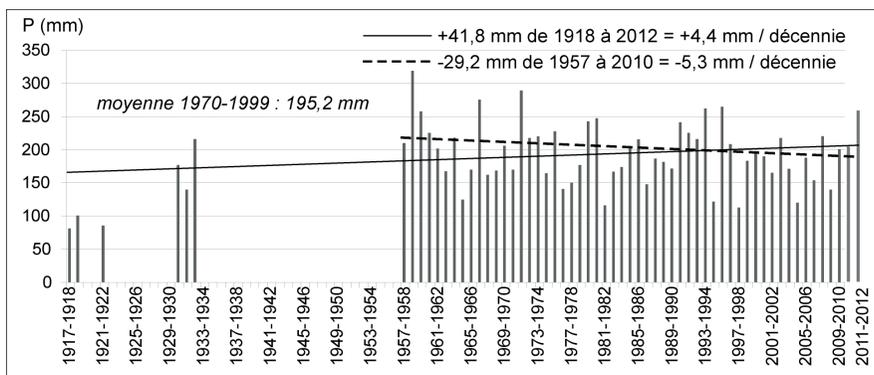


Figure 1.3 : Précipitations annuelles à Longyearbyen (données MeteoNorsk)

NY-ÅLESUND

La température moyenne annuelle sur toute la chronique disponible (1970-2012) donne une tendance générale à plus court terme que celle de Longyearbyen, puisque cette chronique couvre 43 années contre 93 ans pour Longyearbyen. La température moyenne annuelle de l'air sur la période est de $-5,26^{\circ}\text{C}$ ($\sigma = 1,26^{\circ}\text{C}$, $n = 43$). La moyenne à 30 ans (1970-1999) est de $-5,77^{\circ}\text{C}$ ($\sigma = 1,03^{\circ}\text{C}$, $n = 30$). Comme pour Longyearbyen, la moyenne intégrant les années récentes est plus élevée que celle des premières décennies de la chronique, montrant aussi une tendance au réchauffement dans le secteur de Ny-Ålesund. Les quatorze dernières années affichent toutes des températures moyennes annuelles supérieures à la moyenne de la normale 1970-1999 (Fig. 1.4A).

Une analyse plus fine des données montre que depuis 1969, cet accroissement de la température moyenne annuelle est concentré sur la dernière décennie. Pour mettre en évidence ce changement, la technique de régression linéaire segmentée expliquée par Oosterbaan (1994) a été appliquée pour trouver des points potentiels d'inflexion dans les séries chronologiques. Avec cette technique, la chronique de la température de l'air peut être statistiquement décomposée en deux parties : un segment horizontal de pente nulle suivi d'une droite de pente positive avec un point de rupture entre 1994 et 1995 (limite de confiance de 98 %). Cela indique qu'un changement significatif de la température de l'air s'est produit dans le milieu des années 90. Le réchauffement est ainsi visible de façon spectaculaire dans le gradient de la température en fonction du temps (Fig. 1.4A). Sur l'ensemble de la chronique disponible 1970-2012, une augmentation apparente de $+2,42^{\circ}\text{C}$ (soit un gradient de $+0,56^{\circ}\text{C}/\text{décennie}$) peut être calculée mais ces gradients globaux masquent, comme pour Longyearbyen, des disparités à l'échelle des 43 dernières années pour Ny-Ålesund : avant 1994-1995, la pente de la température de l'air en fonction du temps est donc quasi-nulle à $+0,12^{\circ}\text{C}$ ($+0,5^{\circ}\text{C}/\text{décennie}$) alors qu'elle est de $+2,67^{\circ}\text{C}$ (soit $1,48^{\circ}\text{C}/\text{décennie}$) après 1994-1995. Dans le détail, nous avons cherché à comprendre si le réchauffement concernait toutes les saisons, l'été comme l'hiver, ou concernait plutôt une saison en particulier. Les données des températures positives (été) et des températures négatives (hiver) indiquées dans la fig. 1.4C montrent que l'accroissement récent des températures en Arctique serait davantage dû à un manque de froid en hiver qu'à un excès de chaleur en été. En effet, le gradient des températures négatives est plus élevé que celui des températures positives, très faible ($+0,08^{\circ}\text{C}$ contre $+0,48^{\circ}\text{C}/\text{décennie}$) sur la période 1970-2012.

La hauteur moyenne de précipitations (pluie et neige) pour la période 1970-2012 est de 405 mm ($\sigma = 108$ mm, $n = 43$) alors qu'elle est sensiblement plus faible pour la période 1969-1998 (moyenne = 391 mm, $\sigma = 112$ mm, $n = 30$). Depuis un peu plus de quarante ans, les hauteurs de précipitation augmentent de $+22,2$ mm par décennie à Ny-Ålesund (Fig. 1.4D). Cependant au-delà de ce chiffre global, on observe que les précipitations neigeuses restent quasi-constantes ($+0,4$ mm de neige par décennie) et que l'accroissement global n'est exclusivement dû qu'à une augmentation significative des précipitations liquides, et ce, en toutes saisons (gradient de $+22,6$ mm de pluie par décennie). Ce gradient correspond à une augmentation d'environ 5 à 6 % des précipitations par décennie, ce qui serait l'indicateur d'un sérieux changement de la quantité d'eau précipitée dans le secteur de Ny-Ålesund, peut-être même aussi sur la partie nord-ouest du Spitsberg, au moins en milieu côtier. L'absence d'autres stations côtières au Spitsberg occidental ne permet pas de corroborer avec certitude cette observation.

Le suivi journalier des données climatiques de Ny-Ålesund montre un accroissement des épisodes « chauds » en saison froide dans les dix dernières années. Ce qui peut être désigné comme événements « chauds » correspond à des incursions d'air « chaud » conduisant à des températures de l'air positives au sol au cœur de l'hiver, période durant laquelle la température est habituellement nettement négative.

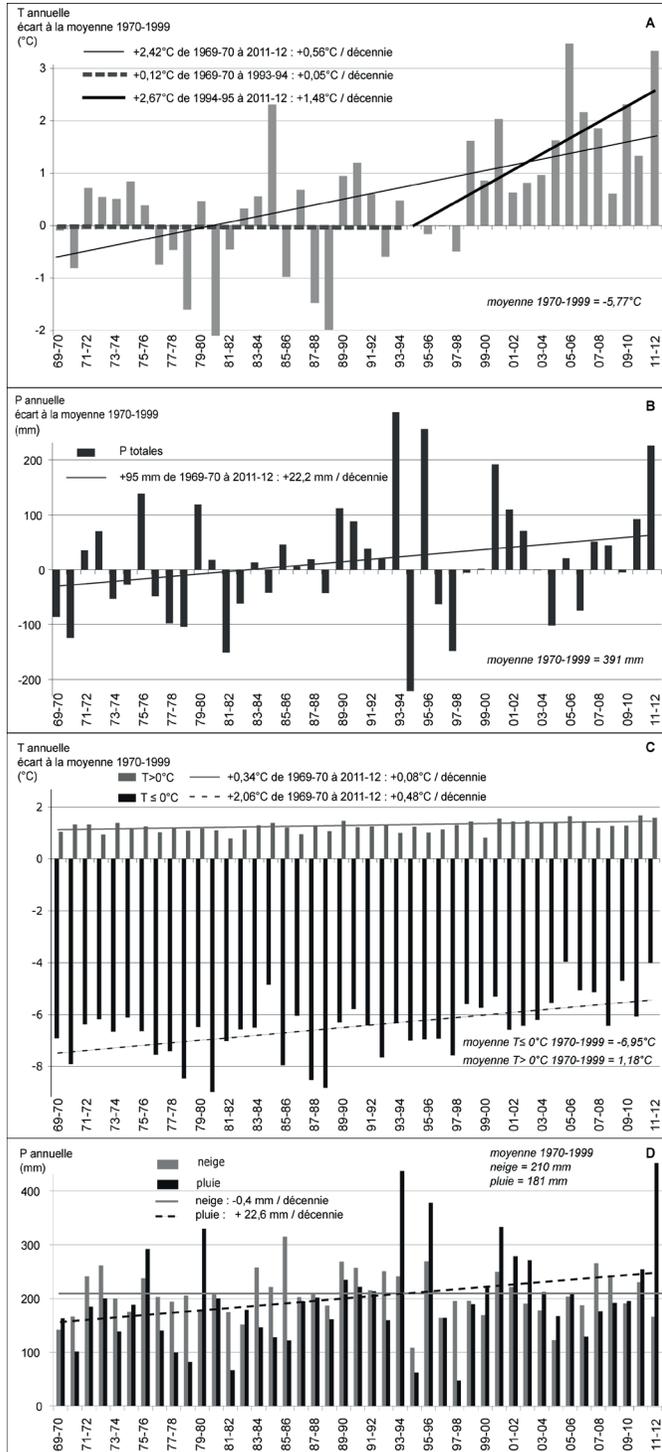


Figure 1.4 : Températures de l'air et précipitations annuelles à Ny-Ålesund (d'après MeteoNorsk)

Le nombre moyen de ces événements est passé de 5,2 durant la période 1970-1999 à 8,9 événements par décennie durant 1999-2012 (Fig. 1.5A). On note également que si, en moyenne, deux tiers des années avant 1998 n'avaient pas plus de 5 événements « chauds » par an, les 14 dernières années ont toutes eu plus de 5 événements « chauds ». Ces événements « chauds » enregistrés au niveau de la mer sont importants à prendre en compte en glaciologie, puisqu'ils peuvent affecter les glaciers jusqu'à des altitudes importantes. S'ils sont accompagnés de précipitations, ces dernières sont pluvieuses : ces épisodes chauds et pluvieux survenant en hiver sont extrêmement destructeurs pour le manteau neigeux et donc pour les glaciers. A titre d'exemple, la fig. 1.5B présente les chroniques journalières de la température de l'air et les hauteurs de précipitations (distinction pluie et neige). L'accroissement significatif du nombre d'événements « chauds » est sans doute ce qu'il y a de plus marquant dans les modifications climatiques actuelles du haut Arctique et vraisemblablement ce qui est le plus fatal aux glaciers.

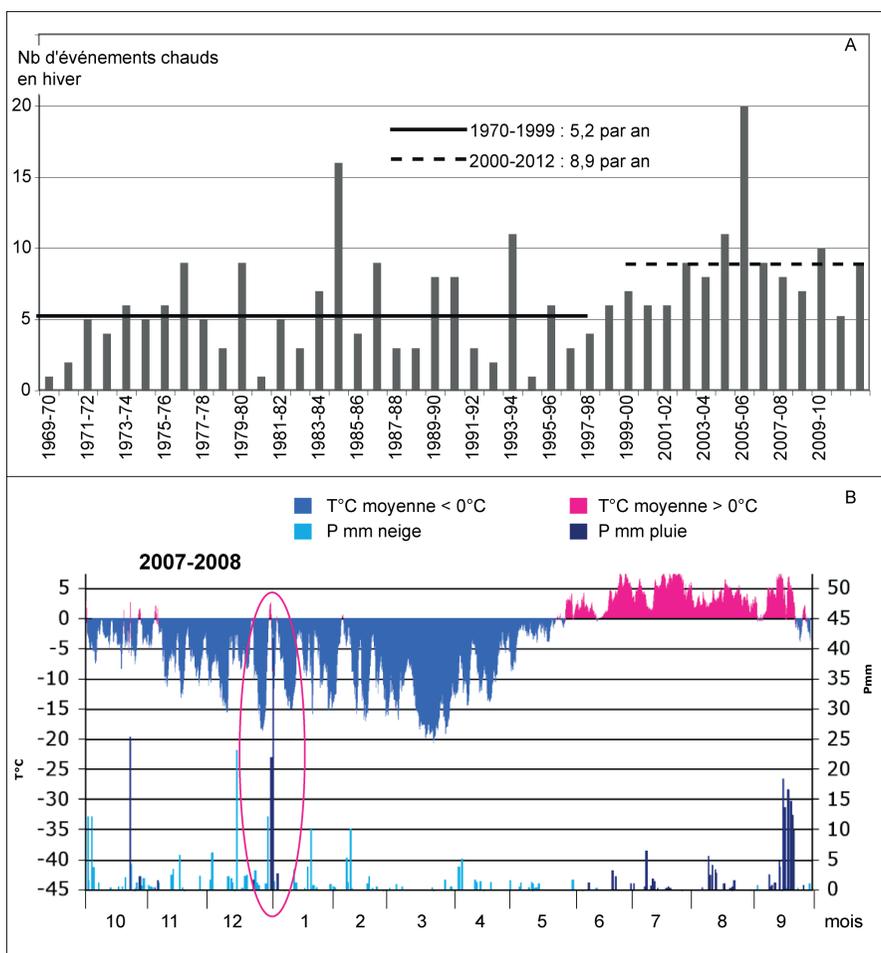


Figure 1.5 : A : Nombre d'événements « chauds » en hiver à Ny-Ålesund (d'après les données de Meteo-Norsk). Ce nombre a augmenté de façon sensible dans les quatorze dernières années.

B : Un événement chaud et très pluvieux particulièrement marquant en fin d'année 2007 début 2008.

COMPARAISON ENTRE LONGYEARBYEN ET NY-ÅLESUND

Ny-Ålesund est une station plus océanique et plus septentrionale que la station de l'Aéroport de Longyearbyen. Elle possède un climat plus humide mais la température moyenne de l'air y est similaire. La température moyenne annuelle de l'air est respectivement de $-5,26^{\circ}\text{C}$ à Ny-Ålesund contre $-5,33^{\circ}\text{C}$ à Longyearbyen pour la même période 1970-2012. Les tempé-

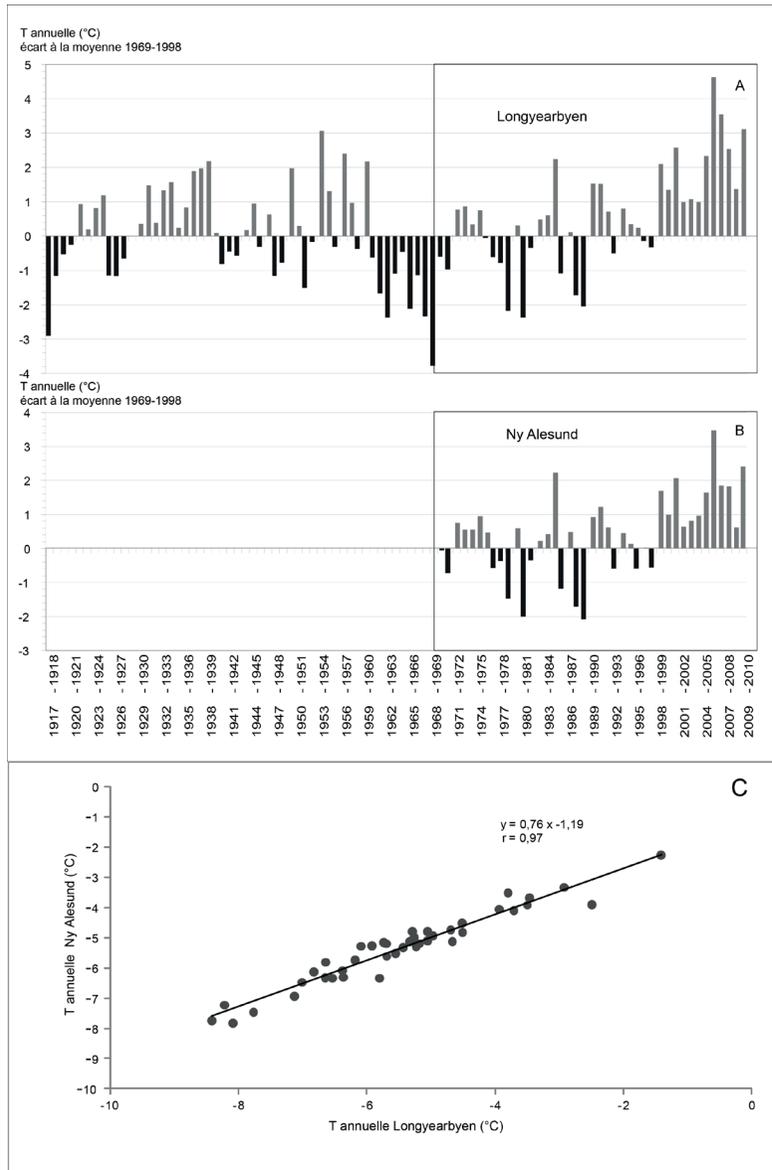


Figure 1.6 : Températures moyennes annuelles de Longyearbyen (A) et Ny-Ålesund (B) et corrélation entre les données des deux stations (C). D'après les données de MeteoNorsk.

ratures annuelles sont bien corrélées entre les deux stations (coefficient de corrélation r de 0,97 pour $n = 42$; fig. 1.6). Cela indique une similarité et un synchronisme des conditions thermiques entre les deux stations, séparées d'une centaine de kilomètres. La relation reliant les températures annuelles des deux stations est la suivante :

$$T_{\text{Ny-Ålesund}} = 0,76 T_{\text{Longyearbyen}} - 1,19 \text{ (Fig. 1.6).}$$

Elle indique un décalage moyen apparent entre les deux chroniques de $1,2^{\circ}\text{C}$, écart peu significatif car la pente entre les deux séries est de 0,76, significativement inférieure à 1. Cette pente différente de 1 est à relier à la différence de continentalité entre les deux stations.

Si des similarités existent entre les stations de Ny-Ålesund et Longyearbyen concernant la température de l'air, les ressemblances ne peuvent pas être étendues aux données de précipitations. En effet, les hauteurs moyennes annuelles de précipitations diffèrent entre les deux stations d'un facteur 2, soit 193 mm à Longyearbyen qui est donc beaucoup plus sec que Ny-Ålesund avec 403 mm de précipitations annuelles entre 1970 et 2012. Cela reflète les différences de positions entre les deux stations, par ailleurs à des altitudes assez similaires (pas d'effet orographique à prendre en compte), mais pas aux mêmes latitudes et longitudes : station plus humide, largement ouverte sur la façade océanique pour Ny-Ålesund à l'ouest du Svalbard et station plus continentale et sèche pour Longyearbyen. Contrairement aux températures de l'air, aucune corrélation significative de précipitations annuelles ne peut être établie entre les stations de Longyearbyen et de Ny-Ålesund montrant que la dynamique des masses d'air humide ne peut être généralisée au Spitsberg occidental. Le gradient temporel des hauteurs de précipitations est nettement moins visible et serait plutôt négatif sur Longyearbyen alors qu'il est net et positif dans la chronique de Ny-Ålesund ($-3,2$ mm/décennie pour Longyearbyen et $+22,2$ mm pour Ny-Ålesund). Cela constitue un autre argument montrant le caractère spécifique des précipitations mesurées à Ny-Ålesund et à Longyearbyen et ne permettant pas la généralisation des données de précipitations à l'échelle du Spitsberg occidental à partir de ces stations.

TEMPÉRATURE, PRÉCIPITATION ET FONTE DE LA GLACE

Les données climatiques de Ny-Ålesund constituent une source d'information riche qui offre une chronique acquise dans les conditions préconisées par l'Organisation météorologique mondiale. Pour autant, elles ne sont représentatives que de ce site particulier, à une altitude de 8 m. Pour confronter les données climatiques aux processus de fonte de neige et de glace, il importe d'observer les paramètres climatiques à une échelle beaucoup plus fine. Certains programmes de recherche ont installé des stations météorologiques automatiques moins sophistiquées que les stations OMM car souvent dans des conditions plus difficiles (surface instable comme la glace), (Xu et al., 2010 ; Karner et al., 2013). Elles offrent cependant la possibilité de confronter des données climatiques in situ aux mesures de bilan glaciaire effectuées en de nombreux points d'un même glacier (Hansen, 1999 ; Marlin et al., 2014).

Si les mesures effectuées sont moins rigoureuses que dans les stations labellisées OMM, notamment à cause de la variation de la distance capteur-surface de la glace, elles n'en sont pas moins très pertinentes pour une approche spatialisée de la fonte. Dans le cadre des programmes ANR Hydro-Sensor-Flows et Cryo-Sensors, le glacier Lovén Est ($4,5 \text{ km}^2$ pour un bassin versant de $10,5 \text{ km}^2$), à 6 km à l'est de Ny-Ålesund, a été équipé de 20 capteurs de température de l'air. Les mesures saisonnières d'accumulation de neige (fin avril) et de bilan glaciaire (fin septembre) sont conduites en 42 points à la surface du glacier, dont les 20 points de relevés de température de l'air. Il est donc possible de confronter en ces points la température de l'air et la fonte, en sachant que, notamment à cause des différences d'albédo, il faut plus d'énergie pour fondre la neige que pour fondre la glace. Le suivi trois fois par jour de l'état de surface du glacier, à partir d'un réseau de six stations photos automatiques, permet d'établir très précisément l'état de surface du glacier et de définir jour après jour, en chaque point du

glacier, si la fonte intervient sur la neige ou sur la glace (Bernard *et al.*, 2013).

Le paramètre climatique le plus simple à utiliser est la température de l'air, dans un modèle degrés-jour dans lequel la fonte est fonction de la température positive selon un coefficient k variable, sur lequel les auteurs ne sont pas d'accord, mais qui est toujours donné comme plus important pour la glace que pour la neige (Lliboutry, 1964). Autrement dit, une même quantité d'énergie (donc de chaleur) fera fondre (en équivalent eau) plus de glace que de neige. La littérature donne pour le Spitsberg les valeurs du facteur de fonte k de 3 pour la neige et 4,6 pour la glace (Vincent, 2002).

A partir des chroniques des enregistreurs de température, l'état thermique du glacier a été reconstitué jour après jour et permet de montrer, pour cinq étés consécutifs (2008 à 2012), la fonte potentielle sur le glacier Lovén Est (Fig. 1.7). Sur cette figure sont mises en regard les données brutes de la station de Ny-Ålesund, et les états thermiques journaliers avec les lames de fonte potentielles (Marlin *et al.*, 2014). A cette fonte potentielle peuvent être confrontées les valeurs moyennes réelles d'enneigement et de bilan de masse à la surface du glacier. La moyenne des températures positives de Ny-Ålesund permet de caractériser très globalement l'été considéré : été le plus froid en 2008 (1,19°C) et le plus chaud en 2011 (1,68°C). Les étés 2009 et 2010 sont très similaires à Ny-Ålesund avec des valeurs de 1,27 et 1,28°C, tandis que 2012 apparaît comme un été relativement chaud (1,59°C).

Qu'en est-il au niveau de l'état thermique et des degrés-jours positifs dévolus à la fonte de la neige et de la glace ? Il y a chaque année croisement de deux paramètres climatiques capitaux : l'énergie reçue à la surface du glacier (approximée par la température de l'air) et l'épaisseur du manteau neigeux à la fin de l'hiver qui protège d'autant plus le glacier qu'il est plus important.

Sur les chroniques de Ny-Ålesund, les valeurs annuelles de précipitations solides et liquides sont un paramètre majeur mais dont le rapport pluie-neige ne vaut que pour Ny-Ålesund (altitude 8 m) et pas du tout pour le glacier dont le front est à 150 m d'altitude. On le constate en confrontant les valeurs de neige tombée à Ny-Ålesund et le manteau neigeux moyen sur le glacier. Certaines années, comme l'hiver 2011-2012, sont très pluvieuses au niveau de la mer mais, vu les températures et le gradient altitudinal, les précipitations sont neigeuses sur tout le glacier. C'est ainsi que l'année la moins neigeuse à Ny-Ålesund (165 mm en 2011-2012) se traduit par le manteau le plus conséquent sur le glacier Lovén Est avec 839 mm équivalent eau (mm.weq).

Sur le plan de la fonte sur le glacier, plus le manteau neigeux sera mince, plus il disparaîtra vite, et plus la glace vive sera alors exposée à la fonte. C'est l'exemple caricatural de l'été 2011 : un très faible manteau neigeux (539 mm.weq) qui fond très vite et libère le glacier sur toute la surface très tôt dans l'année. Tout cela se déroulant dans le cadre d'un été particulièrement chaud, notamment en fin de saison, alors que le glacier est entièrement dégagé de neige : la lame potentielle atteint 1 056 mm et la fonte réelle donne 1 053 mm.weq de perte de glace.

L'été 2008, au contraire, avec un manteau neigeux important en fin d'hiver (826 mm.weq) et un été frais, affiche les fontes les plus faibles (557 mm.weq pour la neige et 132 mm.weq pour la glace), soit moins de la moitié de la lame totale de 2011 (1 481 mm.weq), et quasiment rien pour la glace, puisque la fin d'été est fraîche. Les deux étés similaires en températures moyennes à Ny-Ålesund (2009 et 2010) montrent des conséquences différentes sur la fonte. L'été 2009 avec une lame de 1 093 mm.weq a été plus pénalisant pour la glace (417 mm.weq) que 2010 dont la lame totale est moindre (847 mm.weq) avec seulement 338 mm.weq de fonte potentielle de glace. Pour ces deux étés thermiquement proches à Ny-Ålesund, l'état thermique du glacier est très différent et va influencer sur la fonte. Les manteaux neigeux diffèrent également (respectivement 824 mm en 2009 et 691mm en 2010)

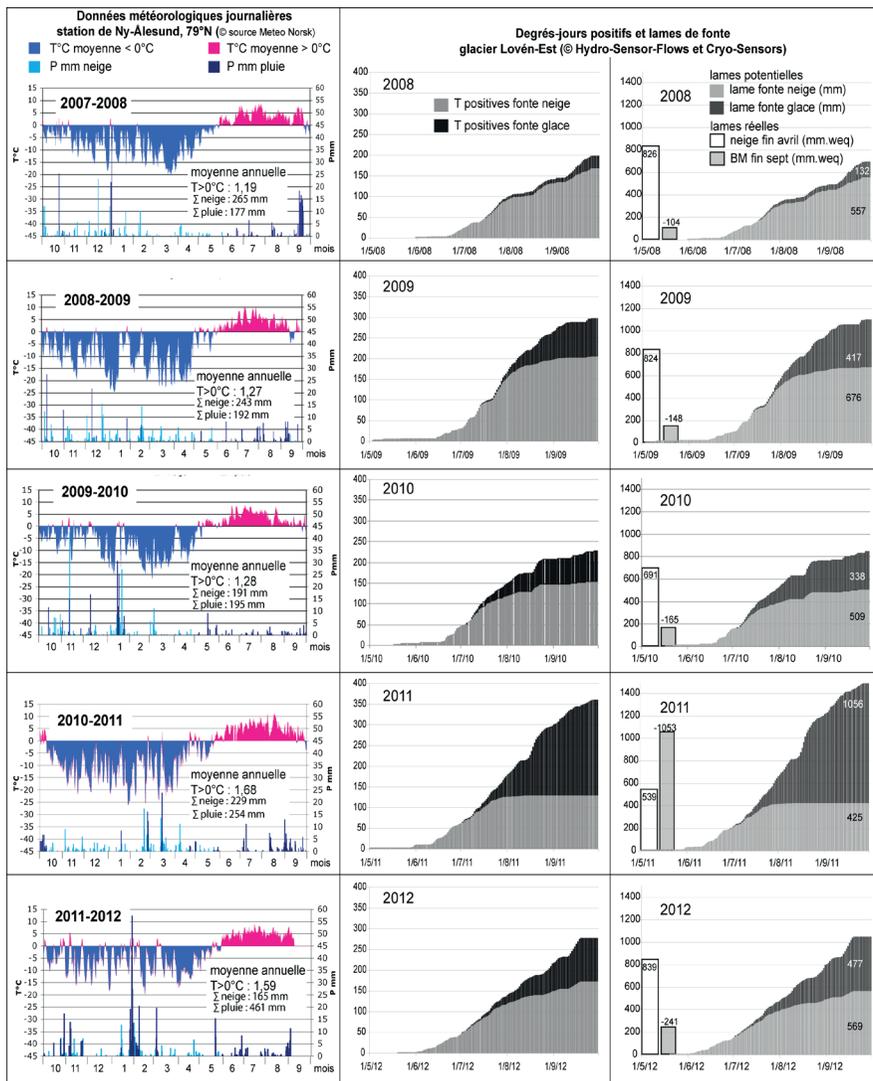


Figure 1.7 : Cinq étés successifs de fonte sur le glacier Lovén Est. Degrès-jours positifs et lame de fonte, obtenus à partir d'un réseau de 20 capteurs sur le glacier [source HSF], en regard des données météorologiques de Ny-Ålesund (6 km plus à l'ouest), [source MeteoNorsk]. Aux lames de fonte potentielle déduite de l'état thermique sont confrontés les mesures réelles d'accumulation de neige (fin avril) et de bilan de masse (gain ou perte en glace) fin septembre.

mais contrariant l'effet de l'état thermique. L'été 2012, quant à lui, est relativement chaud à Ny-Ålesund comme sur l'ensemble du glacier par rapport aux autres années étudiées, mais le manteau neigeux record protège la glace qui, potentiellement, ne procure qu'une lame de fonte de 477 mm.weq.

Notons qu'en l'état actuel des recherches, il existe parfois un décalage entre les valeurs potentielles de fonte de la glace et le bilan de masse qui donne la fonte réelle. C'est l'approximation du coefficient de fonte k qui explique ce décalage. Mais, la précision des mesures de température et de bilan permettra d'affiner cette donnée. De plus, les calculs de fonte potentielle ne prennent pas en compte l'effet de la pluie à la fois vecteur moteur de la neige sur le glacier et caloporteur accélérant la fonte de la glace et encore plus de la neige. Les épisodes pluvieux très violents de mi-septembre 2008 et de début octobre 2010 ont montré la capacité de la pluie à remettre totalement en cause en quelques jours le bilan de masse d'une année en fin de saison estivale.

CONCLUSION

L'observation, à différentes échelles, des fluctuations climatiques récentes en a montré le faible recul temporel faute de longues chroniques dans le haut Arctique. Les séries les plus longues montrent certes un accroissement global des températures depuis un siècle mais qui est presque totalement dû à celui des quinze dernières années. Le changement majeur réside certainement, au moins en Arctique océanique, dans un accroissement conséquent des précipitations, exclusivement dû à l'augmentation de la pluie, tandis que, au niveau de la mer au moins, les lames de neige ne changent pas. Tous les auteurs s'accordent à dire que les mesures de précipitations sont très mauvaises en Arctique dans les stations officielles. Elles sont quasi inexistantes hors de ces stations en ce qui concerne la pluie. Les observations sur le manteau neigeux sont tout de même fréquentes et donnent une bonne idée de la neige reçue et de sa distribution.

Le changement concernant les précipitations est important à suivre localement car un hiver très pluvieux au niveau de la mer va donner des records d'enneigement sur les glaciers et calottes et être favorable à un accroissement de ces derniers, particulièrement en altitude. Un article en cours d'évaluation démontre certes que les glaciers arctiques contribuent de plus en plus à un apport en eau douce vers les océans mais que cette augmentation de la fonte est moitié moins importante que l'augmentation des précipitations pluvieuses.

REMERCIEMENTS

Que soient remerciés les organismes ayant permis le bon déroulement des programmes au Spitsberg de 2006 à 2013 : ANR, GDR Mutations polaires, IPEV et AWIPEV

BIBLIOGRAPHIE

BERNARD E., TOLLE F., GRISELIN M., LAFFLY D., et MARLIN Ch., Quantification des hauteurs de neige et des températures de l'air à la surface d'un glacier : du terrain à l'interpolation, confrontation de méthodes, Actes des IX^{es} Rencontres de ThéoQuant, Besançon (France), 4-6 mars 2009, 2009.

BERNARD E., FRIEDT J.-M., TOLLE F., GRISELIN M., MARTIN G., LAFFLY D., et MARLIN C., Monitoring seasonal snow dynamics using ground based high resolution photography (Austre Lovénbreen, Svalbard, 79°N), *J. of Photogrammetry and Remote Sensing*, n°75, 2013, p.92-100.

Eklima. Base de données du Norwegian meteorological institute accessible à l'adresse <http://sharki.oslo.dnmi.no>

FØRLAND E.-J., et HANSEN-BAUER I., Past and future climate variations in the Norwegian Arctic: overview and novel analyses , *Polar Research*, vol.22 (n°2), 2003, p.113-124

FØRLAND E.J., BENESTAD R., HANSEN-BAUER I., HAUGEN J.E. et SKAUGEN T.E., Temperature and Precipitation Development at Svalbard 1900–2100, *Advances in Meteorology*, ID 893790, 2011, 14 p. doi:10.1155/2011/893790.

GODARD A. et TABAUD M., Les climats : mécanismes, variabilités, répartition, ed Armand Colin, Paris, 2009.

HAGEN J.O., MELVOLD K., PINGLOT F. et DOWDESWEI J. A., On the net mass balance of the glaciers and ice caps in Svalbard, Norwegian Arctic, Arctic, Antarctic, and Alpine Research, vol.35 (n°2), 2003, p.264-270.

HANSEN S., A photogrammetry, climate-statistical and geomorphological approach to the post Little Ice Age changes of the Midtre Lovénbreen glacier, Svalbard, Master thesis, University of Tromsø and University of Copenhagen, 92 p., 1999

IPCC, IPCC Fifth Assessment Report (AR5), Climate change 2013, the Physical science basis, 2216 p., 2013.

KARNER F., OBLEITNER F., KRISMER T. ET GREUEL W., A decade of energy and mass balance investigations on the glacier Kongsvegen, Svalbard, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, vol.118 (n°10), 2013, p.3986-4000.

KILLINGTVEIT Å., PETERSSON L.E. et SAND K., Water balance investigations in Svalbard, *Polar Research*, vol.22 (n°2), 2003, p.161-174.

KOHLER J., NORDLI Ø., BRANDT O., ISAKSSON E., POHJOLA V., MARTMA T., et AAS H.F., Svalbard temperature and precipitation, late 19th century to the present, Final report on ACIA-funded project, 21 p., 2003.

KOHLER J., JAMES T.D., MURRAY T., NUTH C., BRANDT O., BARRAND N.E., AASH.F. et LUCKMAN A., Accelerating in thinning rate on western Svalbard glaciers, *Geophysical Research Letters*, 24, 2007, L18502, doi: 1029/2007GL030681.

LLIBOUTRY L., *Traité de Glaciologie*, 1964, 1040 p., 2 tomes, Editions Masson, Paris.

MARLIN CH., TOLLE F., GRISELIN M., BERNARD E., SAINTENOY A., QUENET M., DELANGLE E. ET FRIEDT J.M., Estimate of freshwater flux inferred from the change in geometry of a high Arctic glacier since the 60s (Austre Lovénbreen, Svalbard), 2014, Sousmis à *Geografiska annaler series A*, physical geography.

METEO-CLIMAT. Base de données disponible sur le site web <http://meteo-climat-bzh.dyndns.org>

NORDLI, Ø., The Svalbard airport temperature series, *Bulletin of Geography, Physical geography series n°3*, 2010, p.5-25.

OOSTERBAAN R.J., « Frequency and regression analysis of hydrologic data », Chapter 6 dans H.P. RITZEMA (Ed.), *Drainage Principles and Applications*, Publication 16, second revised edition, 1994, International Institute for Land Reclamation and Improvement (ILRI), Wageningen, The Netherlands. ISBN 90 70754, 1994, p.3-39.

ORGANISATION MÉTÉOROLOGIQUE MONDIALE. <http://www.wmo.int>

TABAUD M., *La climatologie générale*, 2008, Editions Armand Colin, Paris.

TOLLE F., GRISELIN M. et COLLIGNON B., *Polar Worlds International Conference 2011*, *Polar Record* vol.49 (n°250), p.209, 2013, doi:10.1017/S003224741300020X

VINCENT C., Influence of climate change over the 20th Century on four French glacier mass balances, *Journal of Geophysical Research*, vol.107, n°D19 4375, 2002, p.1-12, doi : 10.1029/2001JD000832.

XU M., YAN M., REN J., AI S., KANG J. et DONGCHEN E., Surface mass balance and ice flow of the glaciers Austre Lovénbreen and Pedersenbreen, Svalbard, Arctic, *Chinese Journal of Polar Science*, vol.21 (n°2), 2010, p.147-159.