

Intrusions d'air froid et *Polar Lows* en mers nordiques

Maxence Rojo

Cultures, Environnements, Arctique,
Représentations, Climat – Observatoire de Versailles
Saint-Quentin et Laboratoire de Météorologie
Dynamique (France)

Chantal Claud

Laboratoire de Météorologie Dynamique (France)

Pierre Ridon

Laboratoire de Météorologie Dynamique (France)

Gunnar Noer

The Norwegian Meteorological Institute (Norvège)

Résumé – Pendant l'hiver, des intrusions d'air glacé et sec provenant du pôle peuvent provoquer la formation de violents cyclones de méso-échelle lorsqu'elles circulent au-dessus des mers libres de glace de l'Arctique. La différence de température entre la basse atmosphère et la surface de la mer est à l'origine du déclenchement de phénomènes météorologiques extrêmes appelés *Polar Lows* (PLs). Ces PLs ont été observés dans les mers nordiques sur une période de quatorze ans à l'aide d'imagerie satellitaire afin d'en établir les principales caractéristiques. Ces systèmes sont complexes à prévoir et sont associés à des conditions météorologiques très difficiles qui peuvent mettre en péril les activités maritimes et côtières nordiques.

Au cours de l'hiver, des cyclones de méso-échelle (typiquement de 200 à 500 km) se développent sur les mers ouvertes de l'Arctique. Les plus intenses d'entre eux sont appelés *Polar Lows* (PLs). Ces violents systèmes dépressionnaires se forment généralement dans des zones d'instabilité barocline en bordure de la glace de mer, le long des courants océaniques chauds, à la suite d'intrusions de

masses d'air polaire¹. En effet, l'air glacial et sec provenant du pôle, soit de la banquise soit des continents couverts de glace, déstabilise les basses couches de la troposphère lorsqu'il circule au-dessus des mers ouvertes relativement chaudes².

Les PLs, caractérisés par une faible extension spatiale et temporelle, peuvent se déclencher extrêmement rapidement, ce qui les rend particulièrement difficiles à prévoir. Ces systèmes sont associés à des vents de surface forts avec bien souvent des rafales qui peuvent être très violentes³. Les conditions en mer lors du passage d'un PL peuvent s'avérer dangereuses avec des vagues atteignant parfois dix mètres, des précipitations neigeuses brutales et du blizzard. Ces événements météorologiques extrêmes représentent un véritable risque pour les activités maritimes et côtières de la région, notamment pour le transport maritime, la pêche et les plateformes pétrolières et gazières en mer (*offshore*). En effet, les nouvelles zones libres de glace offrent de multiples possibilités économiques dans ces régions, en particulier en mer de Barents. Or dans le même temps, le recul de la banquise élargit mécaniquement les régions de formation des PLs. Le danger que ces systèmes représentent pour les hommes et les infrastructures doit être pris en compte dans les processus décisionnels, actuels et à venir, concernant le développement des activités industrielles des mers nordiques.

Les trajectoires des PLs et leurs principales caractéristiques ont été déterminées manuellement sur une période de quatorze hivers à partir d'une base de données fournie par l'Institut météorologique norvégien (MET Norway) et d'images satellites TIR (infrarouge thermique) AVHRR (radiomètre avancé à très haute résolution). Ce travail a permis d'établir une climatologie des PLs de la région afin d'aider à l'évaluation des risques qui y sont associés pour les côtes de la Norvège et de la péninsule de Kola.

¹ S. Businger, «The synoptic climatology of polar low outbreaks», *Tellus, Polar Low Special Issue*, vol. 37A, 1985, p. 419-432.

² C. Claud, K. B. Katsaros, G. W. Petty, A. Chedin et N. A. Scott, «A cold air outbreak over the Norwegian Sea observed with the TIROS-N Operational Vertical Sounder (TOVS) and the Special Sensor Microwave Imager (SSM/I)», *Tellus*, vol. 44A, 1992, p. 100-118.

³ G. Heinemann et C. Claud, «Report of a workshop on "Theoretical and observational studies of polar lows" of the European Geophysical Society Polar Lows Working Group», *Bulletin of the American Meteorological Society*, vol. 78, 1997, p. 2643-2658.

Cet article s'articulera de la façon suivante. Tout d'abord, nous présenterons les données et les méthodes utilisées. Puis, nous illustrerons au travers d'une étude de cas les conséquences d'une intrusion d'air polaire au-dessus des mers du Groenland et de Norvège libres de glace. Nous présenterons ensuite une climatologie des PLs en mers nordiques pour la période de septembre 1999 à mai 2013. Enfin, dans la dernière partie, nous exposerons les risques potentiels qui sont associés aux PLs.

Données et méthodes

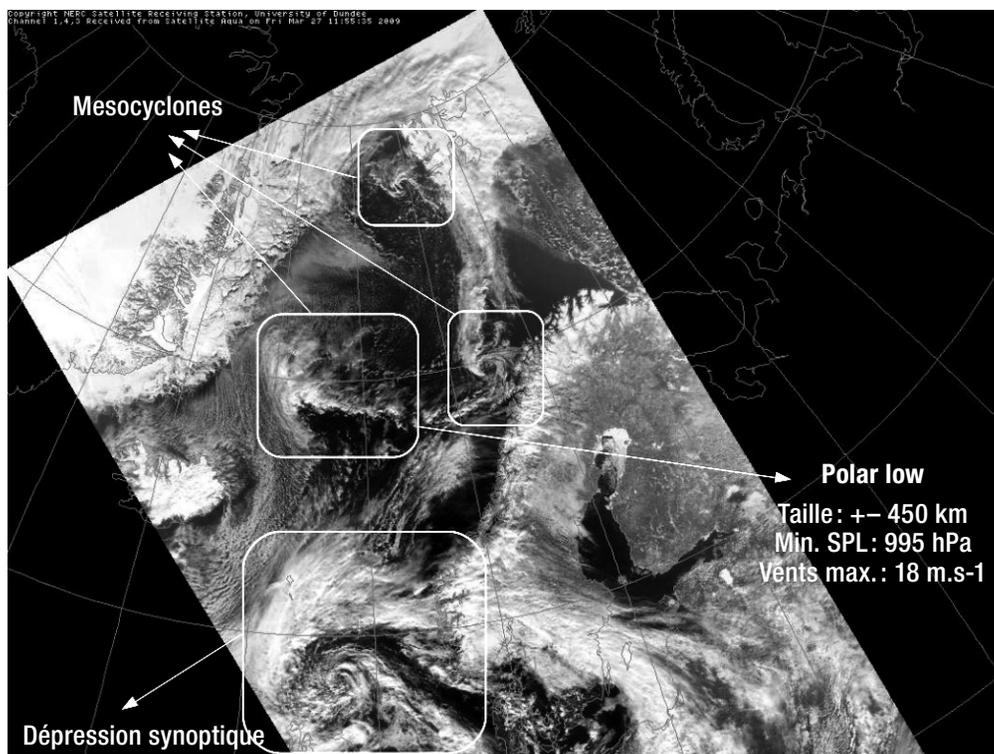
Les principales caractéristiques des PLs et leurs trajectoires ont été déterminées par une liste de PLs fournie par MET Norway; l'identification et l'observation de la couverture nuageuse associée aux PLs ont été réalisées grâce aux images TIR AVHRR et à des données des modèles atmosphériques.

Depuis 2000, les services météorologiques norvégiens produisent un rapport annuel sur les PLs qui se forment au niveau des mers nordiques. Ce rapport publié par MET Norway est une référence pour la recherche sur ces phénomènes et sert de base à cette étude⁴. Les données sur les PLs sont collectées de façon systématique en utilisant l'imagerie satellitaire (TIR AVHRR), la vitesse des vents à la surface de la mer fournie par les scatteromètres *Advanced SCATterometer* (ASCAT) et *Quick Scatterometer* (QUIKSCAT), et à l'aide de données radar et du modèle climatique régional *High Resolution Limited Area Model* (HIRLAM). La plupart des PLs qui se sont développés entre le Groenland et la Nouvelle-Zemble et entre le 65° N et la banquise y sont répertoriés. Il est possible que certains événements n'y soient pas inscrits, mais l'ensemble des PLs qui figurent sur la liste respectent la définition du Groupe de travail européen sur les Polar Lows (EPLWG): « Une dépression maritime petite mais intense qui apparaît à la suite d'une intrusion d'air froid, avec une structure cyclonique et un diamètre compris entre 100 et 500 km⁵ » (figure 1).

⁴ G. Noer, O. Saetra, T. Lien et Y. Gusdal, « A climatological study of polar lows in the Nordic Seas », *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, vol. 137, 2011, p. 1762-1772.

⁵ G. Noer, « Dates and positions of developed polar lows in the Norwegian and Barents Sea, December 1999 – June 2012 », 16 août 2012.

Figure 1. 27/03/2009, image satellite Modis Aqua montrant différents types de dépression, soit trois mésocyclones, dont un assez intense pour être considéré comme *Polar Low*, et une dépression synoptique



Source: Station de réception satellite de l'Université de Dundee – NERC Satellite Receiving Station, University of Dundee (<<http://www.sat.dundee.ac.uk/>>, consulté le 20 août 2015).

Les dates et coordonnées des PLs en phase mature, ainsi que le minimum de pression à la surface de la mer et le maximum de vent associés sont disponibles pour la période allant de septembre 1999 à mai 2013. Pour les cas où plusieurs systèmes de basse pression se développent quasi simultanément sur une même zone, ce qui arrive assez fréquemment, seules les données concernant le centre le plus creusé sont enregistrées; cependant, ces systèmes sont indiqués sur la liste comme des systèmes à circulations multiples⁶.

Pour la période de septembre 1999 à mai 2013, nous avons pu étudier 190 cas de PLs, dont 80 sont duaux ou multiples. Seuls les principaux centres sont comptabilisés dans nos statistiques concernant la distribution

⁶ G. Noer, «Dates and positions of developed polar lows in the Norwegian and Barents Sea, December 1999 – June 2013», 2013.

spatiale et temporelle, la taille, la durée de vie, la distance parcourue, la vitesse de propagation et la direction. Cependant les centres secondaires des systèmes multiples sont inclus dans la figure représentant les trajectoires des PLs.

En prenant la liste du MET Norway comme point de départ, les trajectoires et les caractéristiques des PLs ont été déterminées manuellement (figure 2) à l'aide des archives d'images TIR AVHRR en libre accès fournies par le Conseil de Recherche pour l'Environnement Naturel (NERC). La résolution spatiale est d'environ 1 km au nadir⁷. La station de réception au sol du NERC à l'Université de Dundee corrige les effets de la courbure de la terre sur les images et y intègre une grille de 10° de latitude sur 10° de longitude ainsi que la délimitation des côtes.

Si nécessaire (pour les cas les plus à l'est), les images satellites pour les mers de Barents et de Kara ont été obtenues à partir du site de l'Institut de la recherche spatiale de l'Académie des sciences de Russie⁸.

Les images TIR AVHRR permettent également d'estimer la durée de vie et le diamètre des PLs en fonction des couvertures nuageuses qui y sont associées.

Quelques images à très haute résolution spatiale du radiomètre spectral pour imagerie de résolution moyenne (MODIS) provenant du satellite Aqua et issues du programme *Earth Observing System* de la NASA⁹ ont permis de compléter l'étude.

Les images satellitaires montrent que les PLs peuvent prendre différentes formes telles que les cyclones en spirale ou bien en virgule¹⁰ (figure 3). Ils sont traités globalement dans cette étude.

⁷ <<http://www.sat.dundee.ac.uk/freeimages.html>>, consulté le 20 août 2015.

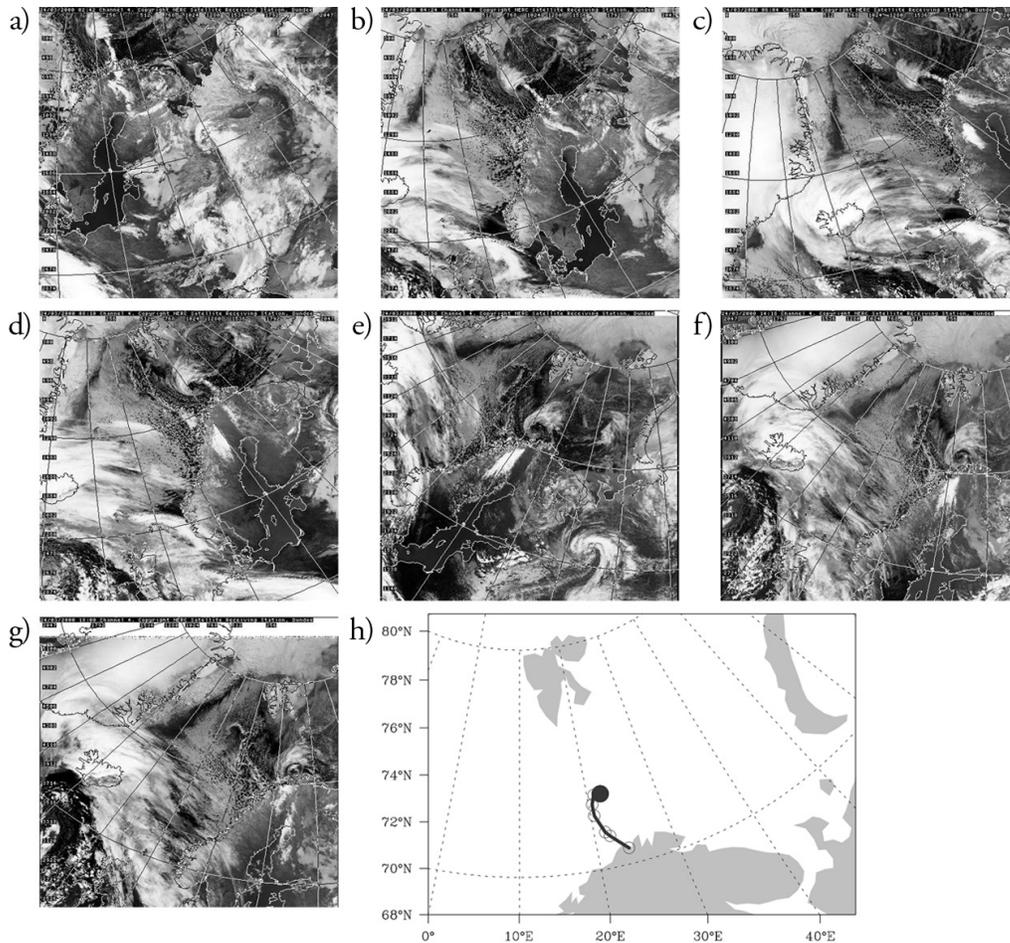
⁸ <http://smisdata.iki.rssi.ru/data/noaa/html/cat_tlm.shtml>, consulté le 20 août 2015.

⁹ <<https://earthdata.nasa.gov/data/near-real-time-data/rapid-response>>, consulté le 20 août 2015.

¹⁰ A. Carleton, « Satellite climatological aspects of the "polar low" and "instant occlusion" », *Tellus, Polar Low Special Issue*, vol. 37A, 1985, p. 433-450; A. Carleton, « Satellite-derived attributes of cloud vortex systems and their application to climate studies », *Remote Sensing of Environment*, vol. 22, 1987, p. 271-296; A. M. Carleton, « On the interpretation and classification of mesoscale cyclones from satellite IR imagery », *International Journal of Remote Sensing*, vol. 16, 1995, p. 2457-2485; A. M. Carleton, « Satellite climatological aspects of cold air mesocyclones in the Arctic and Antarctic », *Global Atmosphere-Ocean System (formerly Air-Sea Interactions)*, vol. 5, 1996, p. 1-42.

LE FROID

Figure 2. Exemple de trajectoire manuellement déterminée à l'aide d'images TIR AVHRR pour l'événement du 24/03/2000



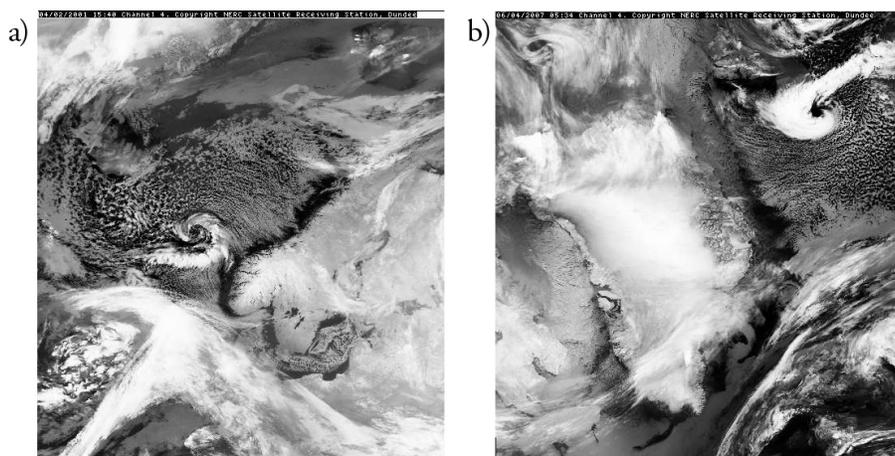
Note: a) à 02:42, b) à 04:24, c) à 06:04, d) à 08:10, e) à 12:38, f) à 14:18 et g) à 18:00 en Temps universel coordonné (UTC);
h) trajectoire approximative correspondant à cette séquence d'images;
le point de départ est représenté par le point plein.

Source: Station de réception satellite de l'Université de Dundee;
figure avec la trajectoire tracée par les auteurs.

Nous avons également utilisé la réanalyse atmosphérique Interim (ERA-I), développée par le Centre européen pour les prévisions météorologiques à moyen terme (CEPMMT), pour observer les champs de vents (vitesse et direction) de la basse atmosphère (à 925 hPa ou environ 750 m) associés à chacune des trajectoires de PLs, ainsi que la température au niveau de la mer (SST), la température à 500 hPa – environ

5 km – (T500) et le tourbillon potentiel à 300 hPa – vers 9 km – (PV300), qui renseigne sur les conditions d'altitude. ERA-I est la réanalyse atmosphérique globale la plus récente du CEPMMT, couvrant une période allant de 1979 à nos jours sur 37 niveaux verticaux avec une grille de résolution de 0,75° de latitude sur 0,75° de longitude¹¹.

Figure 3: Images TIR AVHRR illustrant deux types de *Polar Lows* régulièrement observés au cours de cette étude



Note: a) PL spiraliforme proche de la côte sud-norvégienne (04/02/2001 à 15:40 UTC), b) PL en forme de virgule en mer de Norvège au sud du Svalbard (07/04/2006 à 05:34 UTC).

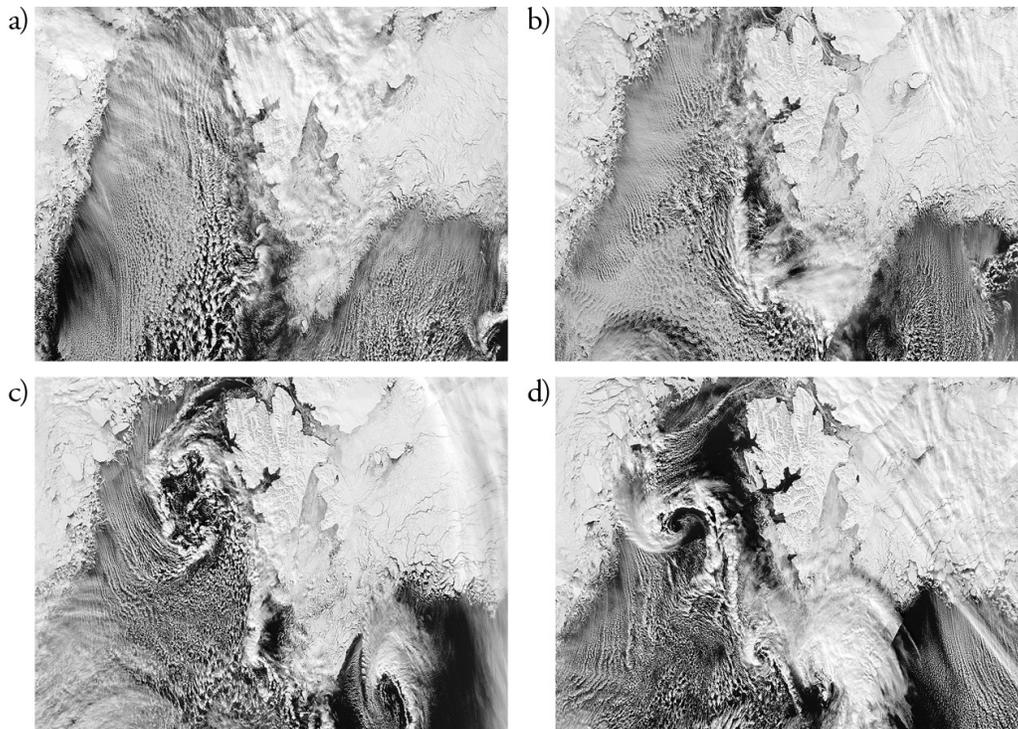
Source: Station de réception satellite de l'Université de Dundee.

Intrusion d'air polaire et cyclogénèse

Les PLs se développent à la suite d'une intrusion d'air extrêmement froid provenant des continents glacés ou de la banquise au niveau des mers ouvertes de l'Arctique. La différence particulièrement élevée entre les températures de l'air et de la surface de la mer crée de l'instabilité, provoque une importante convection et des mouvements verticaux.

¹¹ D. P. Dee *et al.*, «The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system», *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, vol. 137, 2011, p. 553-597.

Figure 4. Séquence d'images Modis Aqua montrant la formation d'un *Polar Low* entre l'archipel du Svalbard et la banquise du Groenland à la suite d'une intrusion d'air polaire glacial



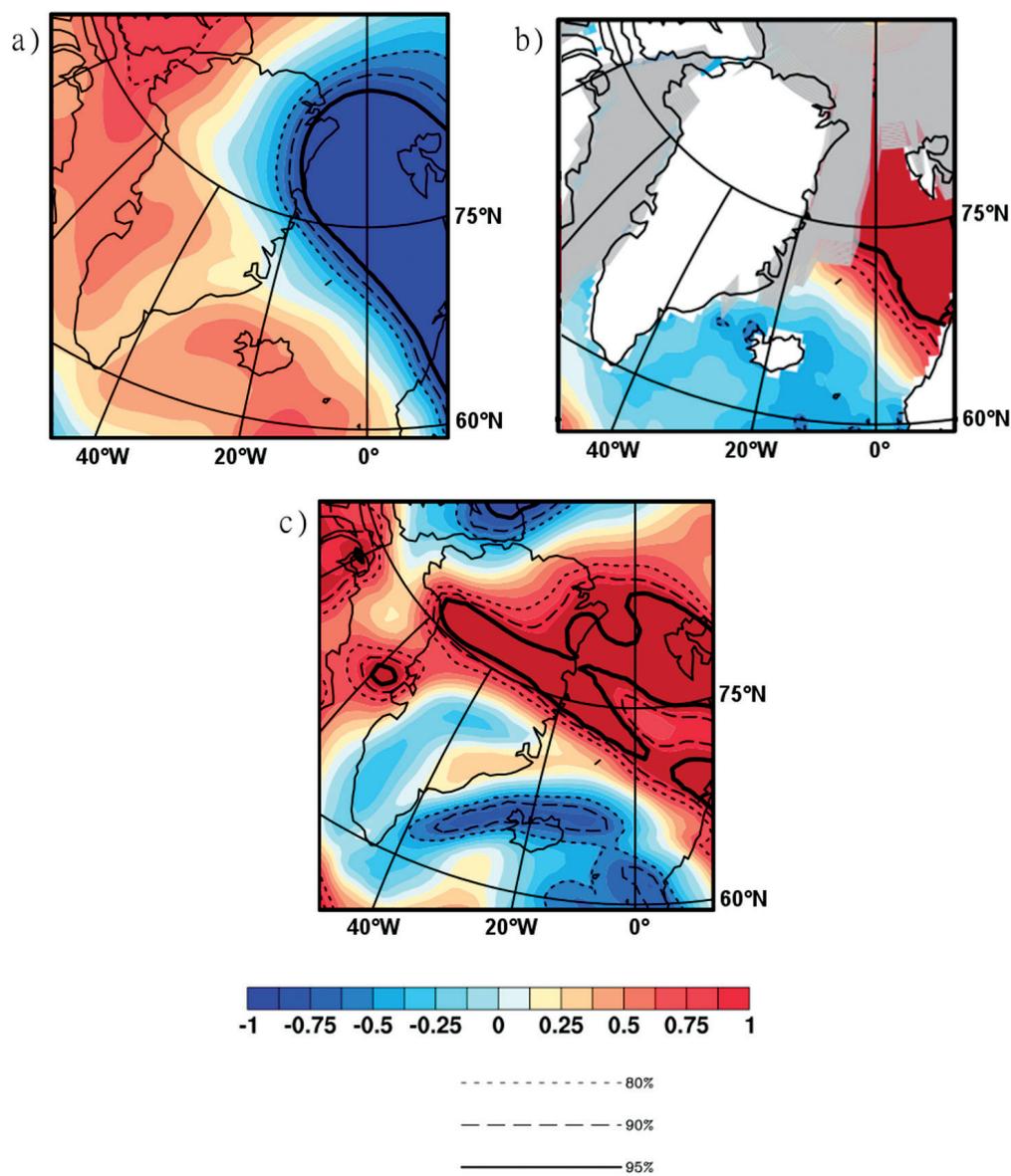
Note: a) 16/03/2010, b) 17/03/2010, c) 18/03/2010 et d) 19/03/2010.

Source: LANCE Rapid Response MODIS images (<http://lance-modis.eosdis.nasa.gov/imagery/subsets/?project=arctic&subset=AERONET_Hornsund>, consulté le 20 août 2015).

Les cellules convectives associées à l'intrusion d'air froid et sec venant du pôle sont particulièrement visibles sur les images satellitaires MODIS prises en exemple (figure 4). On distingue clairement des *cloud streets* (rues parallèles de nuage) qui se forment au-dessus des mers du Groenland et de Norvège libres de glace et qui suivent le mouvement des masses d'air les 16 et 17 mars 2010. Sur les figures 5a et 5b, on voit que ces nuages convectifs correspondent à une anomalie négative très marquée de la température de la basse atmosphère (T500), ce qui provoque mécaniquement une très grande différence entre la température à la surface de la mer (SST) et T500.

INTRUSIONS D'AIR FROID ET *POLAR LOWS* EN MERS NORDIQUES

Figure 5. Conditions atmosphériques associées aux *Polar Lows* du 19 mars 2010



Note: Composites pour les jours 16, 17, 18 et 19 mars 2010.
Anomalies standardisées pour les champs a) T500, b) SST-T500 et c) PV300.

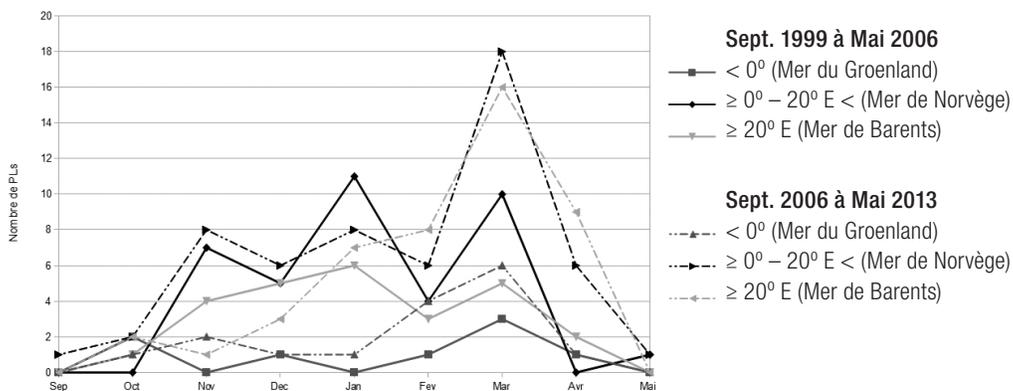
Source: Figure générée par les auteurs à l'aide des données fournies
par la réanalyse ERA-Interim.

Le 18 mars (figure 4c), on peut apercevoir les nuages s'organiser à l'ouest et au sud de l'archipel du Svalbard après trois jours d'intrusion d'air polaire, puis on voit se former deux PLs le lendemain (figure 4d). Comme très souvent, la circulation verticale est renforcée par une anomalie d'altitude, au niveau de la tropopause, qui contribue au déclenchement et au creusement des deux mésocyclones. Ici, l'anomalie du tourbillon potentiel (PV300) (figure 5c), très significative sur la zone et la période, favorise clairement la cyclogénèse.

Climatologie des PLs en mers nordiques

Au niveau des mers nordiques, les PLs se forment d'octobre à avril avec un pic au mois de mars (figure 6). Dans cette étude, seuls trois événements se sont produits en dehors de cette période. Le plus précoce a eu lieu le long de la côte norvégienne le 3 septembre 2007 et les plus tardifs ont eu lieu en mer de Norvège les 20 mai 2002 et 31 mai 2010. Le nombre de PLs est particulièrement important au milieu de l'hiver entre les mois de janvier et mars.

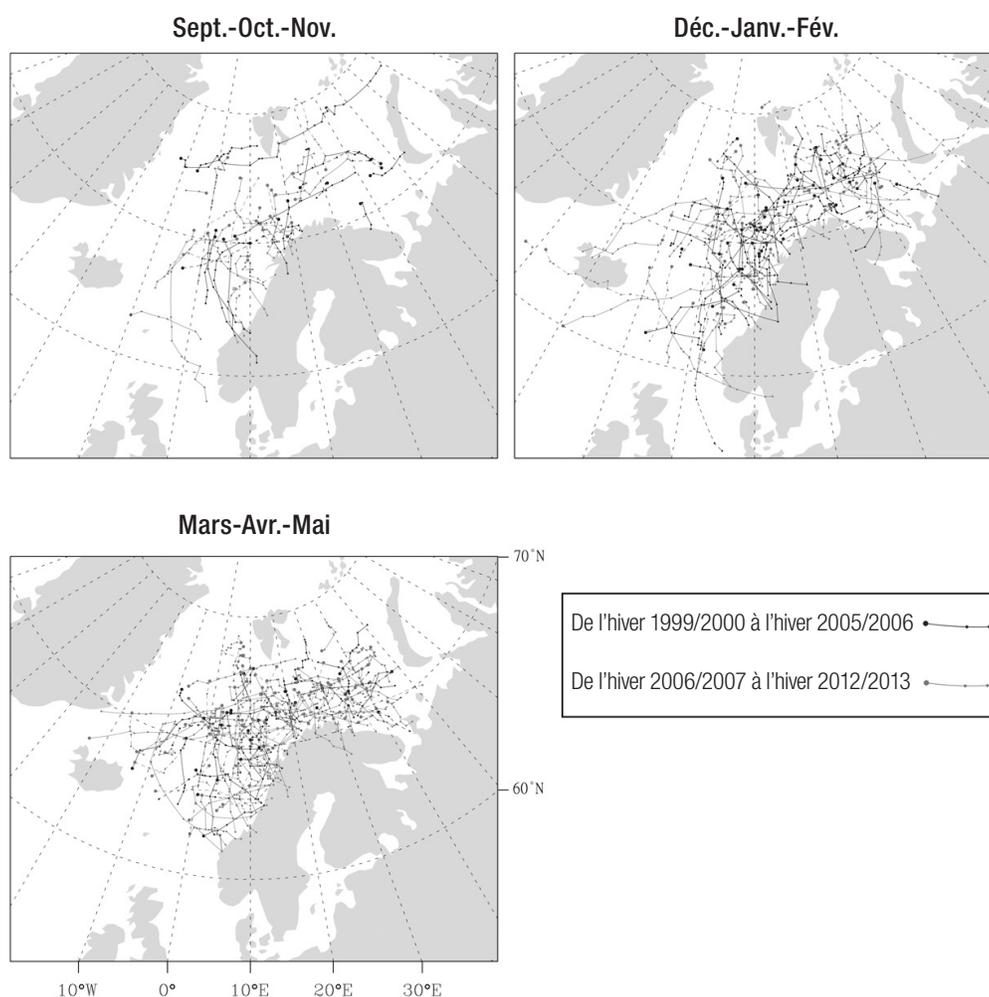
Figure 6. Distribution mensuelle des *Polar Lows* en mers nordiques en fonction des zones de formation pour les périodes septembre 1999-mai 2006 et septembre 2006-mai 2013



Source: Figure générée par les auteurs; voir M. Rojo, C. Claud, P. Mallet, G. Noer, A. Carleton et M. Vicomte, « Polar low tracks over the Nordic Seas: a 14-winter climatic analysis », *Tellus A*, vol. 67, avril 2015, <<http://www.tellusa.net/index.php/tellusa/article/view/24660>>, consulté le 20 août 2015.

La répartition spatiale semble varier pendant l'hiver. En début d'hiver, les PLs ont tendance à se former au niveau des mers du Groenland et de Norvège, puis en avançant dans la saison, le nombre de PLs qui se forment en mer de Barents augmente progressivement (figures 6 et 7). La plupart des PLs qui se développent au-dessus de la mer de Barents ont lieu en fin d'hiver, entre janvier et avril. D'ailleurs, en avril, la plus grande partie des PLs se forment en mer de Barents.

Figure 7. Trajectoires des *Polar Lows* en mers nordiques pour les périodes 1999-2006 et 2006-2013

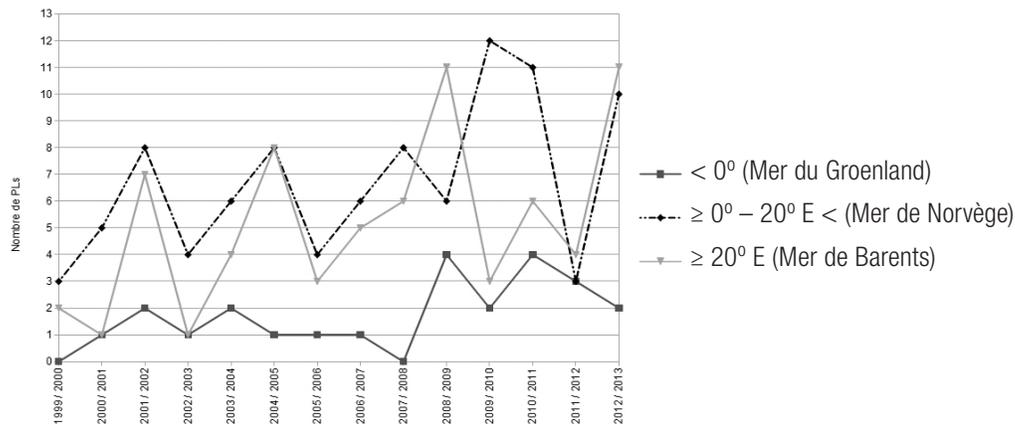


Note: Dans les cas d'événements multiples, les *Polar Lows* secondaires sont représentés par des lignes en pointillé.

Source: Figure générée par les auteurs; voir M. Rojo, C. Claud, P. Mallet, G. Noer, A. Carleton et M. Vicomte, *op. cit.*

La figure 8 montre que la variabilité interannuelle est également très importante, pouvant passer de 5 à 23 PLs observés par hiver pour l'ensemble des mers nordiques. En moyenne, on trouve un peu moins de deux événements par hiver en mer du Groenland, presque sept événements par hiver en mer de Norvège et cinq événements par hiver en mer de Barents. Cette variabilité est particulièrement importante en mer de Barents, avec un écart type de 3, le nombre de PLs observés par hiver pouvant passer de 1 à 11. On constate également une variation importante du nombre de PLs suivant les années considérées (figures 7 et 8). Le nombre de PLs est de 72 événements pour la période de septembre 1999 à mai 2006 et de 118 événements pour la période de septembre 2006 à mai 2013, soit une variation de plus de 60 %. Cette augmentation n'est pas répartie spatialement et temporellement de façon homogène. Bien que cette hausse soit observée sur l'ensemble des régions, c'est en mer de Barents qu'elle semble la plus importante. Cette augmentation est également différemment répartie au cours de la saison. On observe une forte hausse de PLs en fin d'hiver entre les mois de février et d'avril.

Figure 8. Variabilité interannuelle pour les mers du Groenland, de Norvège et de Barents pour la période allant de l'hiver 1999-2000 à l'hiver 2012-2013



Source: Figure générée par les auteurs; voir M. Rojo, C. Claud, P. Mallet, G. Noer, A. Carleton et M. Vicomte, *op. cit.*

Les zones les plus traversées par les PLs se situent au niveau des courants marins chauds, notamment le long du courant norvégien et du courant de la mer de Barents. C'est à l'intersection de ces deux courants marins que nous avons observé le plus de PLs.

En moyenne, les PLs observés ont un diamètre de 350 km en phase mature. La majorité des PLs ont une taille comprise entre 250 km et 450 km, même si certains ne mesurent que 150 km et que d'autres peuvent dépasser 800 km (figure 9a). Le diamètre des PLs varie également tout au long de leur vie. Quelques différences peuvent être observées en fonction du lieu de formation des PLs. Il semble que les PLs qui se forment en mer du Groenland soient de plus grande taille que la moyenne, et qu'au contraire, les PLs qui naissent en mer de Barents soient légèrement plus petits que la moyenne.

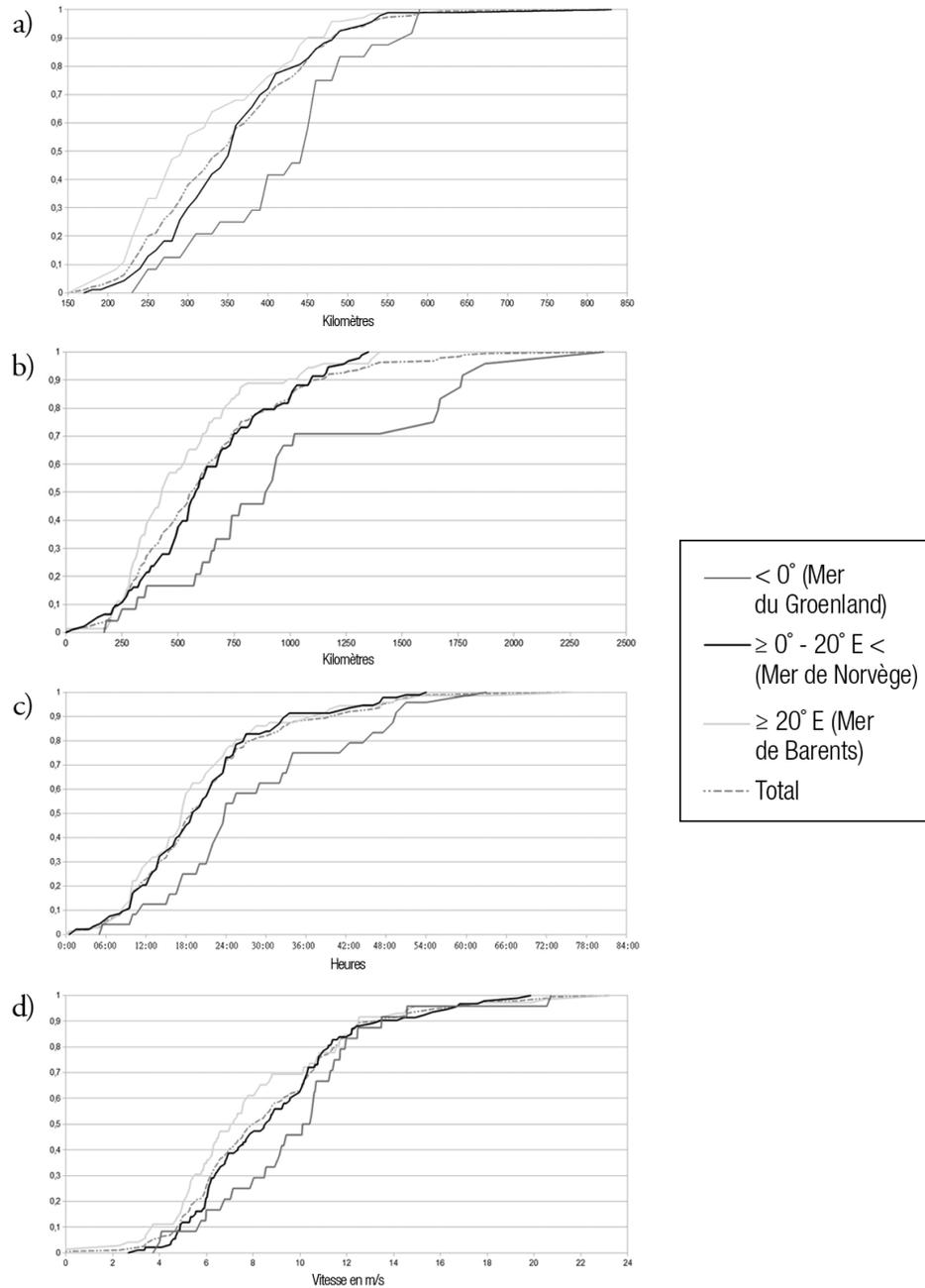
Les PLs parcourent près de 600 km en moyenne entre leurs lieux de formation et de dissipation (figure 9b). Bien que la très grande majorité des PLs se déplacent entre 250 km et 1 100 km, certains ont traversé plus de 2 000 km. Les PLs qui naissent en mer du Groenland ont tendance à parcourir une plus grande distance que la moyenne. En revanche, les PLs qui se forment en mer de Barents se déplacent en général sur des distances plus courtes.

La plupart des PLs ont une durée de vie inférieure à vingt-quatre heures. Néanmoins, quelques PLs ont été observés pendant plus de trois jours au cours de cette étude (figure 9c). À nouveau, nous observons des différences spatiales importantes. Les PLs se formant en mer du Groenland durent généralement plus longtemps que les autres.

Les PLs ont en moyenne une vitesse de propagation de 8 m/s même si certains restent quasiment stationnaires tout au long de leur vie et que d'autres peuvent atteindre une vitesse de propagation moyenne de 22 m/s (figure 9d). Cette vitesse est très variable entre les PLs et elle peut également varier de façon extrêmement importante au cours d'un même événement. Ici, les différences spatiales sont moins évidentes.

LE FROID

Figure 9. Caractéristiques des *Polar Lows* observés en mers nordiques pour la période septembre 1999-mai 2013



Note: Courbes de fréquences cumulées pour les a) diamètres des PLs en phase mature, b) distances parcourues par les PLs, c) durées de vie des PLs et d) vitesses de propagation des PLs.

Source: Figure générée par les auteurs; voir M. Rojo, C. Claud, P. Mallet, G. Noer, A. Carleton et M. Vicomte, *op. cit.*

***Polar Lows* et risques côtiers**

Les PLs peuvent représenter un risque pour les activités maritimes. En effet, ces violentes dépressions maritimes sont associées à des conditions météorologiques dangereuses pour la navigation, notamment à cause de la faible visibilité (blizzard, grêle, précipitations intenses) et des fortes vagues qui peuvent atteindre jusqu'à dix mètres. De plus, le risque de givrage est élevé. Les violentes vagues associées à une importante chute de température projettent des embruns verglacés qui, lorsqu'ils s'accumulent de façon trop importante, déstabilisent la structure des bateaux et peuvent même les faire chavirer. Les bateaux de plaisance et les petits bateaux de pêche sont les plus vulnérables¹² face aux PLs. Sur la côte, ces systèmes peuvent paralyser les aéroports et les héliports. Bien que ces puissants cyclones de méso-échelle se dissipent ou perdent en intensité après avoir frappé le continent, ils restent encore associés à des chutes de neige importantes et à des conditions de blizzard. Or les activités maritimes et côtières sont vitales pour les économies groenlandaise et norvégienne ainsi que pour certaines régions russes. Les routes maritimes et aériennes sont des voies de communication très importantes pour les petites villes des côtes groenlandaises et norvégiennes.

La diminution de l'extension de la banquise permet d'envisager l'exploration et l'exploitation des ressources pétrolières et gazières de la région ainsi que l'accès à de nouvelles zones de pêche. S'inspirant de la plateforme marine Prirazlomnoye installée en mer de Pechora, les gouvernements et industriels russes et norvégiens sont particulièrement intéressés par le développement des activités maritimes en mer de Barents, où le recul de la glace de mer est particulièrement marqué. La zone va devenir très active avec l'ouverture une bonne partie de l'année de la route maritime du nord, reliant Mourmansk au détroit de Béring en longeant la côte arctique russe. Dans un futur proche, les zones comme les périodes de navigation et de pêche pourraient s'étendre. Or les nouvelles zones maritimes libres de glace sont également favorables au développement des cyclones de méso-échelle. La main-d'œuvre et les infrastructures associées à ces activités économiques peuvent être touchés par les PLs. Ces nouvelles possibilités s'accompagnent donc de nouveaux risques

¹² J. J. West et G. K. Hovelsrud, « Cross-scale adaptation challenges in the coastal fisheries: Findings from Lebesby, Northern Norway », *Arctic*, vol. 63, n° 3, septembre 2010, p. 338-354.

(humains, environnementaux, financiers, etc.) et augmentent les facteurs de vulnérabilité des littoraux norvégiens, russes et groenlandais face aux aléas météorologiques. Notons que, malheureusement, un *Polar Low* a emporté la vie d'un pêcheur près de la côte norvégienne en mai 2010.

En conclusion, les intrusions d'air polaire au-dessus des mers nordiques libres de glace peuvent contribuer à la formation de systèmes dépressionnaires maritimes très violents et difficiles à prévoir à cause de leur déclenchement rapide, de leur courte durée de vie, de leur petite taille et du manque d'observations conventionnelles. Ces violents cyclones de méso-échelle se développent sur l'ensemble des mers nordiques entre les mois d'octobre et d'avril et sont particulièrement nombreux au milieu de l'hiver entre janvier et mars. Le recul de la banquise semble favoriser l'extension spatiale des zones de formation des PLs, en particulier en mer de Barents. Les caractéristiques des PLs peuvent légèrement différer selon leurs lieux de formation.

Les conditions météorologiques associées à ces phénomènes représentent un danger pour les activités maritimes et côtières du Groenland, de la Norvège et de la péninsule de Kola. Or les activités industrielles sont amenées à s'y développer dans les prochaines années. Le recul de la banquise offre des possibilités pour le transport maritime, la pêche et l'extraction pétrolière. Ces activités devraient s'intensifier progressivement dans un futur proche, en particulier en mer de Barents. L'augmentation de la main-d'œuvre et des infrastructures augmente mécaniquement les risques face aux aléas météorologiques dans les mers nordiques. Il est important d'essayer de comprendre au mieux ces phénomènes météorologiques extrêmes afin d'éviter des catastrophes humaines et environnementales.