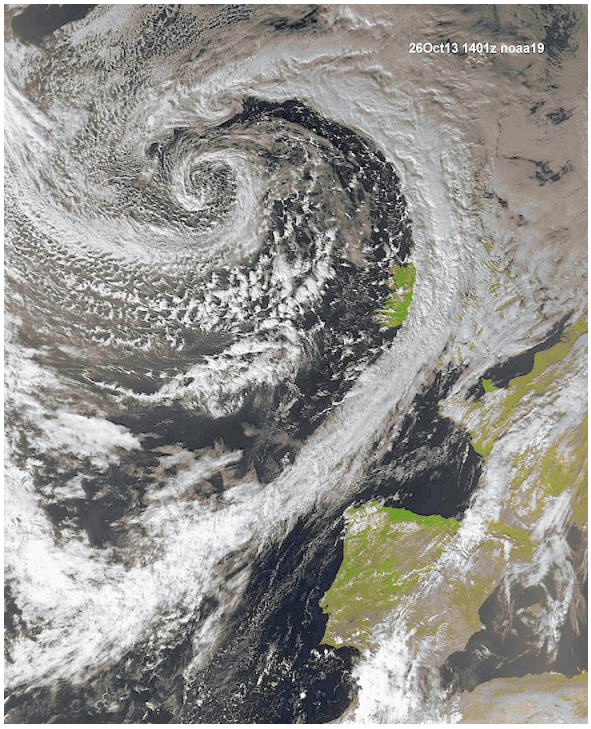
Unité de Géographie, Département des Géosciences, Université de Fribourg

Analyse comparative des tempêtes Kyrill (2007) et Niklas (2015)



TRP

Fribourg, le 24.06.2016

Killian SALZMANN

Route d'Orny 3

1372 Bavois

Killian.salzmann@unifr.ch

Superviseur :

Christian HAUCK

Résumé:

Ce travail compare l'évolution et les impacts des tempêtes extra-tropicales Kyrill (2007) et Niklas (2015) qui ont respectivement causés 11,41 et 1,44 milliards de dollars de dégâts et provoqués 54 et 11 victimes. Le but de cette comparaison est de déterminer ce qui a causé cette énorme différence en terme de dégâts et de victimes en Europe afin de mieux comprendre le développement des tempêtes hivernales et leurs impacts sur la société. Dans une première partie, les comparaisons des facteurs météorologiques sont effectuées grâce à des données issues de réanalyses provenant des mesures de plusieurs modèles. Dans une deuxième partie, axée sur les facteurs humains, le but est d'analyser la perception des tempêtes avant et après leurs passages grâce aux prévisions ainsi qu'aux différentes publications des médias.

Les tempêtes Kyrill et Niklas se sont formées au-dessus du continent nord-américain suite à un fort contraste de température et ont été influencée par un intense jet stream polaire jusqu'à atteindre les côtes Britanniques les 18.01.2007 et 30.03.2015. La supériorité en termes de dégâts et de victimes lors de la tempête Kyrill s'explique principalement du fait de l'organisation zonale du jet stream comportant une séparation en plusieurs branches s'étendant jusqu'en Russie. Cela a eu pour conséquence le maintien de la basse pression de la tempête jusqu'en Europe de l'Est alors que Niklas a commencé à se dissiper au dessus du Danemark. Le rapport entre la société et les tempêtes a évolué, ces dernières sont de plus en plus médiatisées, car l'homme a pris conscience des effets de son activité sur le climat. Les médias jouent également un rôle dans la perception des tempêtes par la population en leurs donnant une signification et en les comparant à d'autres.

Mots clés: Tempête, comparaison, météorologie, perception

Table des matières

Résumé:....2
1. Introduction....4
    1.1 Introduction générale....4
    1.2 Problématique....5
2. Bases théoriques....6
    2.1 Tempête....6
    2.2 Front polaire....6
    2.3 Jet stream....7
    2.4 NAO....8
    2.5 Systèmes dépressionnaires....9
    2.6 Rôle des conditions météorologiques en altitude....11
3. Résumés des tempêtes....15
    3.1 Tempête Kyrill....15
    3.2 Tempête Niklas....16
4. Analyse météorologique....19
    4.1 Situation globale 19
    4.2 Processus de formations 24
    4.3 Développement au-dessus de l'Atlantique Nord....29
    4.4 Développement au-dessus de l'Europe....32
5. Impacts....38
    5.1 Dégâts et pertes économiques....38
    5.2 Victimes....41
6. Prévisions....42
7. Perceptions....45
8. Discussion....47
    8.1 Résultats....47
    8.2 L'avenir des tempêtes....47
9. Conclusion....49
10. Références....50

1. Introduction

1.1 Introduction générale

Les tempêtes de moyennes latitudes sont les catastrophes naturelles les plus dévastatrices en termes de pertes économiques juste après les tremblements de terre et les tempêtes tropicales (Swiss RE, 2000). De plus, ces dernières balayent fréquemment le continent européen en se suivant les unes après les autres et en parcourant une trajectoire commune appelée stormtrack. L'activité ainsi que les pertes liées aux tempêtes ne cessent d'augmenter ces dernières années, ce qui est plus dû à la croissance démographique et économique qu'à l'intensité des tempêtes (Déroche, 2014). Plusieurs évènements majeurs ayant causés d'énormes pertes se sont déroulés en Europe dont le plus connu, Lothar qui a balayé l'Europe en décembre 1999 et qui a causé des pertes avoisinnant les 17 milliards de dollars. Selon (Swiss RE, 2000), des évènements provoquant des pertes de l'ordre de 7 milliards de dollars peuvent se reproduire une fois tous les 10 ans. Ces catastrophes naturelles météorologiques sont imprévisibles et constituent un enjeu majeur pour la société actuelle ainsi que pour les compagnies d'assurances afin de pouvoir limiter au mieux les pertes humaines et économiques. La clé de cet enjeu réside dans une meilleure compréhension des tempêtes rendue possible grâce à des modèles de plus en plus performants et ayant une meilleure résolution spatio-temporelle (Déroche, 2014).

Durant l'hiver 2006 – 2007, une série de tempêtes s'est abatue sur l'Europe dont une surpassant les autres nommée Kyrill. Cette dernière a balayé l'Europe le 18 janvier et a provoqué la mort de 54 personnes et causé 11,41 milliards de dollars de pertes. En Europe, cette tempête est considérée encore maintenant comme "la tempête du siècle" et il s'agit d'une tempête d'une magnitude importante rivalisant avec Lothar. En 2015, juste après le début du printemps, la tempête Niklas a balayé le Nord de l'Europe le 31 Mars. Cette tempête printanière n' a causé que relativement peu de pertes comparée à Kyrill qui s'élèvent tout de même à 1,44 milliard de dollars et a tué 11 personnes (Swiss RE, 2016).

1.2 Problématique

Ce travail aura pour objectif de mieux comprendre les raisons de telles différences au niveau des dégâts et des victimes engendrées par les tempêtes Kyrill (2007) et Niklas (2015). Pour ce faire, une analyse comparative entre ces deux évènements sera effectuée. Dans un premier temps, plusieurs facteurs météorologiques seront comparés tels que leurs processus de formations, leurs développements ainsi que leurs caractéristiques physiques comme la vitesse du vent, la pression centrale, etc. Dans un deuxième temps, l'analyse portera sur les perceptions des tempêtes Kyrill et Niklas que se soit avant leurs passages par les services météorologiques, ou après, par l'interprétation de la population et des médias. Le but de cette deuxième partie est de déterminer le rapport de la société vis-à-vis des tempêtes.

Le travail se basera sur d'autres travaux, des publications, des documents officiels ainsi que des analyses de cartes météorologiques issues de réanalyses par différents modèles tels que les modèles GFS et ETA. Afin de déterminer la perception de la population pendant et après le passage des tempêtes, plusieurs articles de presses et publications de médias seront analysés dans une optique qualitative. Ce travail est donc un mélange de nombreuses sources afin de pouvoir comparer ces deux évènements en ayant une vue globale et devrait permettre de mieux comprendre les interactions entre les tempêtes de moyennes latitudes et la société ainsi que leurs évolutions dans l'avenir.

2. Bases théoriques

Ce chapitre théorique se basant sur les références suivantes : (Ahrens, 2009 ; Malardel, 2009) a pour but l'introduction aux concepts de base afin de comprendre les mécanismes relatifs à l'évolution d'une dépression et de son intensification jusqu'au stade de tempête. Pour ce faire, plusieurs modèles conceptuels ssont utilisés dans le but de simplifier la compréhension de ces phénomènes météorologiques complexes. L'utilisation de modèles conceptuels à dimensions verticales et horizontales permet d'expliquer le phénomène des tempêtes en trois dimensions.

2.1 Tempête

"En météorologie, une tempête peut être décrite comme une zone étendue de vents violents générés par un système de bassses pressions (dépression)" (Météo France, 2016:1). Cette définition décrit une tempête selon le paramètre de vitesse du vent provoqué par une dépression. La variation de la vitesse du vent selon l'intensité de la zone de basses pressions est ensuite reportée sur une échelle, celle de Beaufort (Météo France, 2016). En météo marine, cette échelle variant de 0 à 12 était à la base utilisée par les marins afin d'estimer la force du vent en se basant sur les conséquences de celui-ci sur les voiliers et le paysage marin. Cette échelle est toujours d'actualité en météorologie et permet de classifier la vitesse du vent qui devient tempétueux à partir de la force 10. En vitesse de vent, cela correspond à des vents moyens de 88 à 117 km/h et des rafales de 110 à 150 km/h (Nautischool, 2015).

2.2 Front polaire

Le front polaire est le résultat de la rencontre entre deux masses d'air aux propriétés différentes. Dans l'hémisphère Nord, à une latitude moyenne de 60° N, l'air chaud provenant de la ceinture de haute pression des tropiques est mis en contact avec l'air froid de pression plus basse provenant du pôle. Or, comme l'air ne se mélange pas facilement cela va provoquer une discontinuité délimitant la frontière entre l'air chaud des tropiques et l'air froid polaire. Le front polaire forme une ondulation et est

caractérisé par un important gradient horizontal de température, il est l'élément déclencheur de la cyclogenèse dans les moyennes latitudes et est lié à l'évolution du jet stream polaire.

2.3 Jet stream

Le jet stream est un puissant courant d'air d'Ouest en Est variant de 180 km/h à 370 km/h situé au niveau de la tropopause. Dans l'hémisphère Nord, deux principaux jet stream sont présents, le jet stream subtropical qui se situe aux environs de 30° N à environ 13'000 m d'altitude et le jet stream polaire à environ 10'000 m d'altitude. Ce dernier est fortement lié au front polaire car, il est formé grâce au contact de masses d'air de température fortement différentes. Plus le gradient de température entre les deux masses d'air est important, plus la vitesse du jet stream est forte. Son intensité varie avec les saisons, il est plus fort en hiver qu'en été car, le gradient de température et de pression entre l'équateur et les pôles est beaucoup plus important. Tout comme le front polaire, le jet stream forme une onde et peut donc avoir une portée importante en latitude avec des directions du flux Sud et Nord. Une branche particulière du jet stream contenant des vents particulièrement forts est responsable du caractère explosif des cyclones de moyennes latitudes. Cette dernière, nommée jet streak peut être longue de quelques centaines à plus de 3'000 km et comporte une zone de forte divergence située en sortie gauche ainsi qu'une zone de forte convergence en entrée gauche (*Illustration 1*). Les jet streak sont repérables dans les zones d'altitude où les isobares se resserrent.

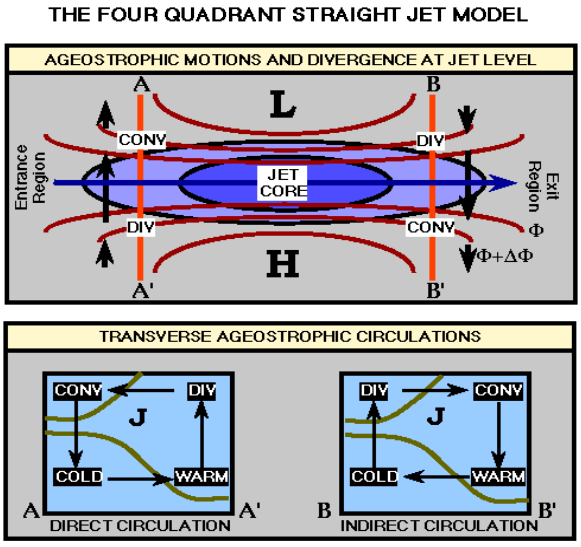


Illustration 1: Jet streak, zones de convergences et divergences et coupes transversales : isobares (traits bordeaux), vitesse du vent (dégradé bleu) Source: North Carolina State University http://www4.ncsu.edu/~nwsfo/storage/training/jets/straightjet.html[Consulté le 06 juin 2016]

2.4 NAO

La North Atlantic Oscillation régule la circulation des courants atmosphériques dans l'Atlantique Nord et joue un rôle déterminant dans l'évolution des tempêtes en Europe en changeant la localisation et l'intensité du jet stream polaire. La NAO est basée sur la différence de pression au niveau de la mer entre l'anticyclone tropical Bermudes-Açores et la zone de basse pression située dans les environs de l'Islande (basse pression islandaise). La NAO se quantifie par un indice variant de -5 à +5 obtenu de la façon suivante:

1. $A' = (A - \bar{A}) / \sigma$ A, D : moyennes de pression mensuelles
2. $NAO = A' - D'$ σ : écart type du mois de référence

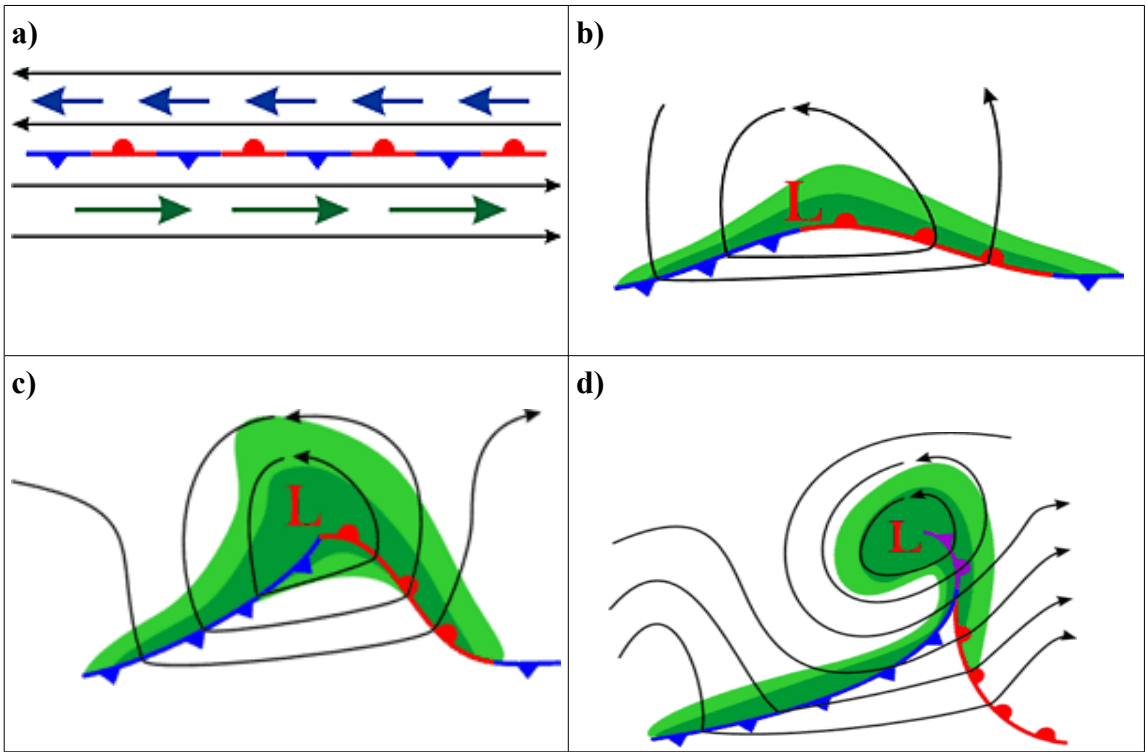
1. Calcul de la pression mensuelle normalisée pour l'anticyclone A et la dépression D en soustrayant la moyenne de référence mensuelle à la valeure mensuelle mesurée et en divisant par l'écart type. La moyenne de référence mensuelle est une moyenne de pression pour chaque mois établie sur plusieurs années.

2. La NAO est obtenue en soustrayant la pression normalisée de l'anticyclone par celle de la dépression. Celle-ci est positive lorsque la valeure normalisée de l'anticyclone est plus élevée que la dépression (La climatologie, 2016)

Lors d'une phase positive, la pression de l'anticyclone Bermudes-Açores est supérieure à la moyenne alors que la dépression de l'Islande est inférieure. En phase positive, la différence de pression plus marquée provoque une intensification des courants d'Ouest ainsi qu'une déviation de la storm track en direction du pôle. Les tempêtes sont donc plus intenses et ont tendance a suivre une trajectoire déviée vers le Nord de l'Europe. Lors d'une phase négative, la pression de l'anticyclone Bermudes-Açores est inférieure à la moyenne alors que la dépression islandaise est supérieure. Cela se traduit par une baisse d'intensité des courants d'Ouest et des tempêtes qui voient leurs trajectoires dévier vers le Sud de l'Europe et la mer Méditerranée. Cet indice de NAO varie généralement annuellement, mais peut aussi varier mensuellement.

2.5 Systèmes dépressionnaires

Selon le modèle norvégien mis au point au 20e siècle dans les années 20, les systèmes dépressionnaires des moyennes latitudes se forment le long du front polaire et le parcourent en direction de l'Est. Les cyclones se déplacent et se comportent comme une onde et ont une évolution plus ou moins similaire du début de leurs formations jusqu'à leurs dissipations. Cet ancien modèle reste simpliste et ne s'applique pas forcément à tous les cas de formations de systèmes dépressionnaires, mais il reste néanmoins très utilisé de nos jours pour expliquer ce phénomène. Cette évolution est appelée cyclogenèse et peut être divisée en plusieurs stades.



e)

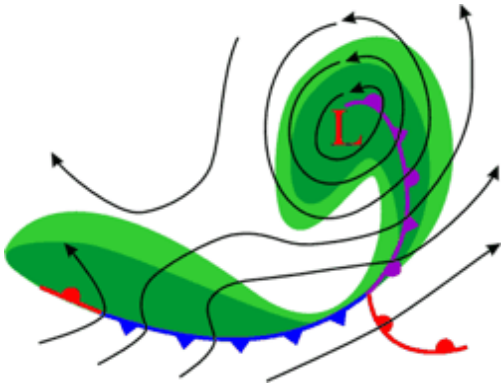


Illustration 2: Cyclogenèse selon le modèle norvégien: a) Front stationnaire, b) Onde frontale, c) Onde ouverte, d) Maturité , e) Occlusion avancée. Front chaud (ligne rouge), front froid (ligne bleue), front occlus (ligne violette), courant froid (flèches bleues), courant chaud (flèches vertes), isobares (lignes noires), et précipitations (dégradé vert). Source: http://meteo-villabe.amys.fr/index.php?option=com_content&view=article&id=91:la-cyclogenese-la-formation-des-depressions&catid=45:divers-meteo&Itemid=98 [Consulté le 03 avril 2016]

Front stationnaire : (Illustration *2a*) Le front stationnaire, situé dans un creux de basses pressions en altitude est cerné de hautes pressions au Nord et au Sud. Les vents froids du Nord et chauds du Sud circulant parallèlement au front dans des directions opposées forment un cisaillement au niveau de ce dernier. Ce cisaillement va provoquer une rotation du système dans le sens anti-horaire.

Onde frontale : (*Illustration 2b*) A ce moment deux fronts se distinguent, le front froid à l'Ouest se déplaçant en direction du Sud et le front chaud à l'Est se déplaçant en direction du Nord. A l'intersection des deux fronts au centre du système se trouve la pression la plus basse.

Onde ouverte : (*Illustration 2c*) La pression du centre continue a chuter et la zone située entre les deux fronts (secteur chaud) a s'amincir à mesure que le front froid rattrape le front chaud. Le vent souffle de plus en plus fort dans le sens inverse des aiguilles d'une montre à cause de la baisse de pression du centre.

Maturité : (*Illustration 2d*) Le secteur chaud est devenu une zone très fine et près du centre du cyclone un début d'occlusion commence a faire son apparition. A ce moment-là, le cyclone est à son stade le plus intense. Ce dernier se nourrit de l'énergie fournie par l'air humide et chaud provenant du secteur chaud forcé à s'élever.

Occlusion avancée : (*Illustration 2e*) Le cyclone commence à se dissiper, car son centre est à présent coupé de sa source d'énergie à cause de l'occlusion.

Dissipation : (*Pas montrée*) Finalement, le cyclone se retrouve déconnecté du front polaire et se dissipe.

2.6 Rôle des conditions météorologiques en altitude

Les cyclones, bien que décrits à la surface selon le modèle norvégien, ont une expansion verticale importante. Ces derniers sont donc dépendants des conditions météorologiques en altitude jusqu'à la tropopause, et pour comprendre leurs développements, il est nécessaire d'analyser la relation entre les conditions des différentes altitudes. Pour ces analyses, des cartes et des schémas sont présentés à différentes altitudes, ces dernières sont réparties en hauteurs de géopotentiels, c'est-à-dire la hauteur normalisée d'un niveau de pression donné (ex: 500 hPa, 300 hPa).

Ondes de Rossby:

Comme vu précédemment, la pression n'est pas répartie égalitairement autour du globe dû aux différences de températures et à la rotation de la terre. La rotation terrestre et le réchauffement différentiel de l'atmosphère donnent lieu à une ondulation des isobares et c'est pour cela que le front polaire se comporte comme une onde.

A 500 hPa, les ondes au nombre 3 à 6 sont bien visibles. Une longueur d'onde se situe entre deux creux caractérisés par des zones de basses pressions et comporte une crête anticyclonique. Ces ondes sont appelées "longues ondes" et ne bougent que très peu vers l'Est (environ 4° par jour) (*Illustration 3*). De plus petites ondes nommées "ondes courtes" parcourent les "longues ondes" se déplaçant vers l'Est beaucoup plus rapidement et proportionnellement au vent à environ 3'000m au-dessus du niveau de la mer. Les ondes courtes ont tendance à s'agrandir lorsqu'elles atteignent un creux et à s'affaiblir près d'une crête.

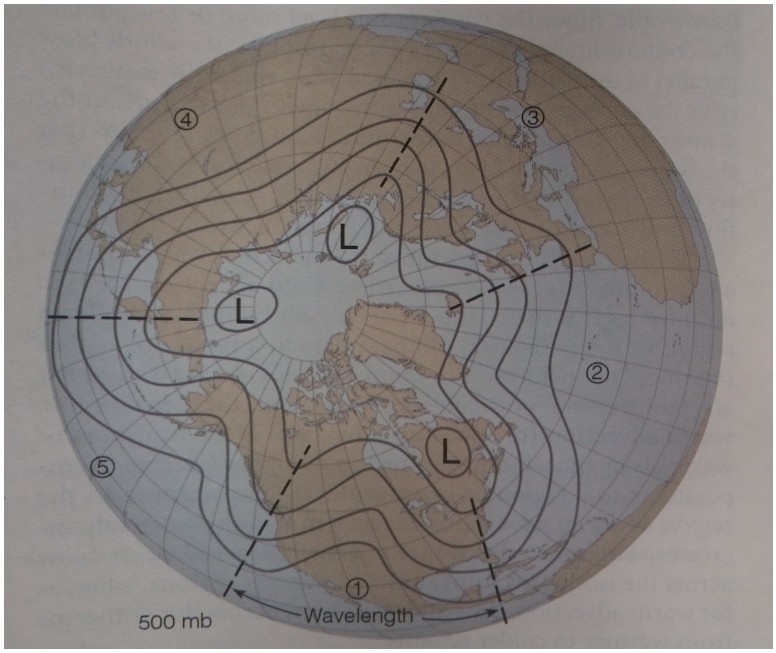


Illustration 3: Carte de l'hénisphère Nord à 500 hPa montrant les longues ondes encerclant le pôle avec les creux en traitillés. Source: (Ahrens, 2009)

Instabilité barocline:

L'atmosphère est dite barocline si le flux d'air et les isothermes se croisent, c'est à dire que le vent ne souffle pas parallèlement aux isothermes. Au contraire, si le vent souffle parallèlement aux isothermes, l'atmosphère est dite barotrope. Cette instabilité barocline provoque des advections de températures, par exemple de l'air froid du Nord est dévié vers le Sud où de l'air chaud est présent. Ce phénomène est appelé advection froide et l'inverse advection chaude. Ce phénomène d'advection qui est présent au niveau des creux provoqués par les ondes planétaires provoque un échange entre l'air de surface et d'altitude et contribue ainsi à une connexion entre ces deux couches. De plus, ce phénomène est le principal moteur des cyclones et permet leurs intensifications.

Convergences / Divergences:

Ces interactions entre les différentes couches d'altitude vues précédemment sont une des clés du développement d'un cyclone. A proximité des creux se trouvent des zones de convergences et de divergences provoquées respectivement par la compression et la dispersion du flux d'air en altitude (*Illustration 4*). En plus du mouvement d'air vertical dû à l'advection, la convergence provoque la descente de l'air, comprimé par son entrée dans le creux, jusqu'à la surface et la divergence provoque l'inverse à la sortie du creux. Pour le développement des cyclones, ici représenté par la basse pression, la zone de divergence est très importante, car sans celle-ci, le cyclone se dissiperait. En effet, la divergence aspire l'air de la dépression en surface et si ce phénomène n'était pas présent, la pression au sol serait directement égalisée et la dépression se dissiperait. Au contraire, lorsque la zone de divergence en altitude surpasse la convergence au sol de la dépression, par exemple lorsque le vent en altitude est renforcé, la pression continue de baisser, car l'aspiration est plus forte. Ce phénomène couplé avec l'advection joue un rôle important dans le développement des cyclones.

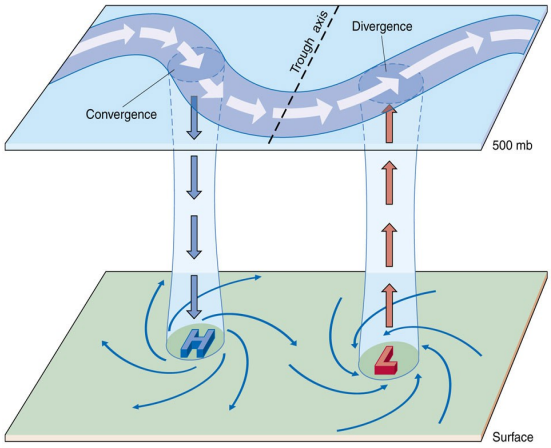


Illustration 4: Interactions entre l'air à la surface et un creux à 500 mb avec zones de convergences et de divergences: air chaud (flèches rouges) et air froid (flèches bleues). Source : University of California, Santa Barbara http://www.geog.ucsb.edu/~joel/g110_w08/lecture_notes/midlat_upper/agburt10_07.jpg *[Consulté le 03 avril 2016*

Vorticité:

En météorologie, la vorticité absolue est la mesure du taux de rotation des particules d'air autour d'un axe vertical. Si le sens de rotation se fait dans le sens cyclonique (anti-horaire), la vorticité est positive et si les particules tournent dans l'autre sens, celle-ci est négative. La vorticité absolue possède deux composantes : la vorticité terrestre et la vorticité relative.

La vorticité terrestre est causée par la rotation de la terre, ce qui induit une rotation des particules de l'atmosphère. Etant donné que, dans la mesure de la vorticité l'axe de rotation est vertical, la vorticité terrestre est nulle à l'équateur et maximale aux pôles.
La vorticité relative est causée par deux facteurs, le changement de vitesse du flux d'air et sa courbure sur une surface horizontale. L'addition de ces deux composantes donne la vorticité absolue.

Lorsque le flux d'air forme un creux en altitude, la vorticité évolue tout au long du trajet. A partir de l'entrée du creux, les particules tournent de plus en plus vite dans le sens de la déviation (cycloniquement) et cela augmente la vorticité jusque dans l'axe du creux où la vorticité est maximale. Puis, les particules ressortant à l'Est du creux tournent de moins en moins et diminuent la vorticité. Par assimilation aux phénomènes de convergences/divergences expliqués précédemment, ceux-ci sont liés respectivement à la variation positive et négative de la vorticité. De plus, il est beaucoup plus aisé de repérer des zones de vorticité que des zones de divergences et de convergences sur des cartes météorologiques par exemple en relevant les vortex de vapeur d'eau sur une image infrarouge. Lorsqu'une zone de vorticité maximale en altitude survole un front stationnaire en surface, il y a de fortes chance de développement de cyclones.

Avec ces différents concepts, il est maintenant possible de comprendre le fonctionnement d'un cyclone en trois dimensions. C'est-à-dire comment les différentes couches de la troposphère interagissent pour donner lieu à un cyclone et le faire évoluer en surface.

3. Résumés des tempêtes

Avant de mettre en comparaison les différents aspects des deux tempêtes, le chapitre suivant a pour but de saisir le contexte spatio-temporel de chaque tempête afin d'avoir en tête le déroulement global des deux évènements. Pour une meilleure compréhension, les événements sont relatés de manière chronologique et l'évolution des tempêtes est reportée sur l'illustration 5 (*voir p.18*). Ce dernier comportant les trajectoires des deux tempêtes et leurs valeurs de pression centrale a intervalles de 6h a été effectué manuellement à partir de différentes sources en fonction de la tempête et de sa localisation.

3.1 Tempête Kyrill

La tempête Kyrill qui balaya le Nord de l'Europe les 18 et 19 janvier 2007 a été premièrement aperçue le 14 janvier entre 18:00 et 24:00 UTC sur le Nord-Est de l'Arkansas. A ce moment-là, la dépression naissante avec une pression centrale de 1013 hPa avait le stade d'une onde frontale récemment formée par un creux dans la couche supérieure de la troposphère. Le système dépressionnaire a ensuite dérivé en direction du Nord-Est jusqu'en Nouvelle-Ecosse. Arrivé à ce stade, la dépression a subit une explosion dans sa cyclogenèse faisant fortement chuter la pression en son centre. La raison de ceci est le croisement d'un fort jet stream polaire situé à un niveau de pression de 250 hPa. Le 17 janvier à 12:00 UTC, le cyclone a débuté son stade d'occlusion, et sa pression centrale s'est stabilisée à 970 hPa. Le 18 janvier à 00:00 UTC, un deuxième cyclone, nommé Kyrill II, s'est formé à l'Est le long de l'occlusion. Ce dernier s'est ensuite propagé jusque dans l'Est de l'Europe pour atteindre une pression minimale de 961,7 hPa au-dessus de la mer Baltique. Cette intensification du second cyclone a été en partie causée par sa localisation au Nord de la sortie gauche d'un fort jet streak polaire jusqu'au Danemark. A cet endroit en altitude, la divergence y est maximale provoquant une baisse de pression du cyclone (*voir p.7 et 13)*. De plus, une intrusion d'air sec au dessus de l'occlusion et du front froid a donné un délai au cyclone, ce qui lui a permis d'évoluer aussi loin à l'Est. Le 18 janvier aux alentours de 18:00 UTC, le passage du

front froid du cyclone au dessus de l'Allemagne a provoqué de fortes précipitations ainsi que des orages accompagnés de puissantes rafales de vent dont la plus forte au niveau du sol a été mesurée à 144 km/h à Düsseldorf (Fink et al, 2009; KNMI, 2016). Le passage de la tempête a causé des dégâts importants dont les pertes économiques touchant les infrastructures, l'agriculture, les forêts et la marine s'élèvent à 11,41 milliards de dollars. Les pertes assurées d'élèvent à 6,96 milliards de dollars soit un peu plus de la moitié des pertes et les victimes sont au nombre de 54 personnes (Swiss RE, 2016).

3.2 Tempête Niklas

Le 28 mars 2015 à 12:00 UTC, la dépression Niklas s'est formée au Sud de la Nouvelle-Ecosse (Weather Unisys, 2016). La dépression avait déjà atteint son stade d'occlusion avec un centre de pression à 990 hPa lors du début de sa traversée de l'Atlantique en direction de l'Ouest le 29 mars à 18:00 UTC. Le 30 mars à 18:00, la dépression a atteint le Nord de l'Ecosse avec un centre de moins de 980 hPa (KNMI, 2016). Bien qu'ayant atteint son stade d'occlusion assez tôt dans sa traversée de l'Atlantique, la tempête a continué a s'intensifier. Cela montre la différence entre le modèle conceptuel norvégien et la réalité, ce qui signifie que ce modèle ne convient pas à tous les cyclones. L'intensification de Niklas s'est effectué jusque dans la mer du Nord et la tempête a atteint son point culminant le 31 mars à 04:00 UTC au large des côtes du Danemark avec un minimum de pression en son centre de 971,4 hPa. Les vents provoqués par la tempête ont été mesurés aux alentours de 150 km/h dans plusieurs stations en Allemagne et la rafale maximale a été enregistrée à 192 km/h sur le sommet du Zugspitze. Niklas s'est peu à peu dissipée en déviant légèrement sa trajectoire en direction du Nord-Est jusqu'à disparaître au-dessus de la Lituanie. Le même jour de la formation de la dépression Niklas, Mike, un système de basses pressions était déjà actif dans le Nord de l'Europe en amenant de forts vents et des précipitations continues particulièrement en Allemagne. Les vents les plus forts ont été enregistrés à 151 km/h sur la station du sommet du Brocken en Bass-Saxe. Mike fut moins intense que Niklas au niveau des rafales de vent, par contre, les précipitations engendrées ont été bien

supérieures (Haesler, 2015). Les deux tempêtes ont causé des problèmes aux voies de communications ferroviaires, aériennes et fluviales dans le Nord de l'Europe. Des dégâts aux bâtiments ont été reportés dans plusieurs pays comme la Suisse et l'Autriche. Le nombre de victimes s'élève à 11 décès en Europe et les pertes économiques à 1,44 milliard de dollars dont 1 milliard est assuré (Swiss RE, 2016).

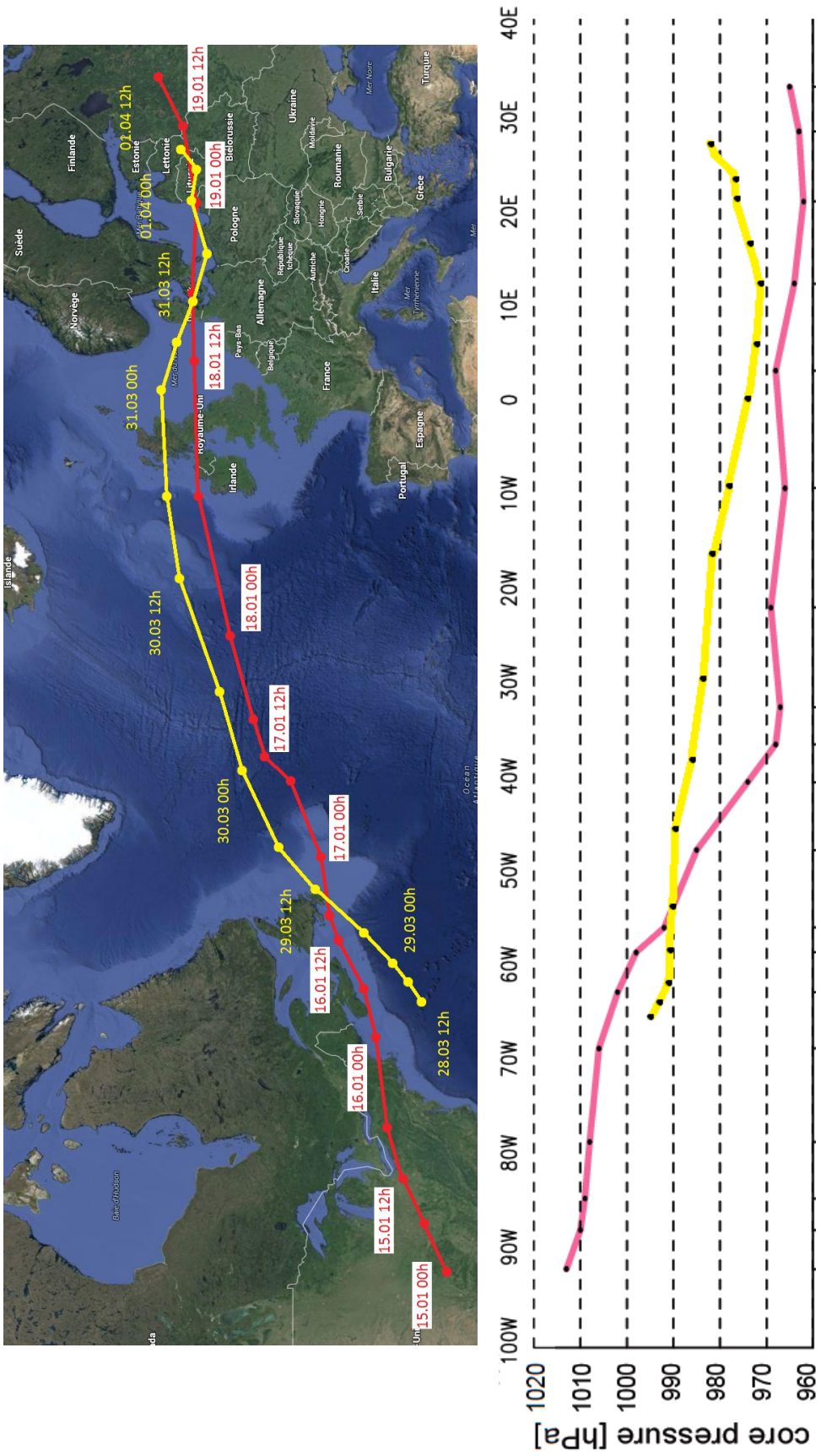


Illustration 5: Trajectoires des tempêtes par intervalles de 6h : Kyrill (rouge) Source: (Fink et al., 2009). Niklas (jaune) Sources: (KNMI, 2016; Weather Unisys, 2016).
Evolution des centres de pression : Kyrill (rouge), Source du graphique: (Fink et al., 2009). Niklas (jaune), (ajouté manuellement) Sources: (KNMI, 2016; Weather Unisys, 2016)

4. Analyse météorologique

Ce chapitre qui est la partie principale du travail aura pour objectif de comparer les différents facteurs météorologiques ayant participé aux développements des tempêtes Kyrill et Niklas depuis leurs formations jusqu'à leurs dissipations. Cette comparaison sera effectuée dans l'ordre chronologique des évènements et divisée en trois parties reflétant les trois zones principales parcourues par les deux perturbations : l'Amérique du Nord, l'Océan Atlantique et l'Europe. Le but de ce chapitre est de déterminer les facteurs météorologiques caractérisant chacune des tempêtes et si ces derniers ont été déterminants dans leurs impacts sur le continent européen.

4.1 Situation globale

Avant d'analyser en détails les différents facteurs météorologiques actifs durant le développement des tempêtes, la mise en situation à l'échelle hémisphérique est importante, car les mécanismes régulant certaines variables liées aux tempêtes, comme leurs trajectoires, sont régulés à ce niveau. Dans ce chapitre analysant le climat de l'hémisphère Nord, les variables seront représentées sous forme de moyennes mensuelles ou pluri-mensuelles englobant les deux évènements.

Saisons

Un élément important à prendre en compte lorsqu'une tempête a lieu est sa situation dans le calendrier annuel. Cela influe sur un paramètre global important qui est le degré d'inclinaison de la terre. Ce dernier n'est pas le même en hiver qu'au printemps et cela a un effet sur l'évolution des systèmes de basses pressions en régulant plusieurs phénomènes. Ceux-ci sont, l'intensité des courants d'Ouest, la localisation et l'intensité du jet stream polaire ainsi que des différentes ceintures de pression globales comme l'anticyclone Açores-Bermudes dans l'Atlantique Nord qui remonte jusqu'en Europe en été, ce qui empêche la propagation des tempêtes. Les conditions pour le développement des tempêtes ne sont donc pas les mêmes durant les saisons, car leurs trajectoires sont

plus polaires et leurs intensités plus faibles qu'en hiver. Lors du passage de Kyrill durant le mois de janvier 2007, les conditions saisonnières étaient propices au développement et au passage de tempêtes en Europe. Par contre, la tempête Niklas qui a eu lieu fin mars-début avril, aurait eu, théoriquement, plutôt tendance a passer plus au Nord et avoir une intensité plus faible. Or, les trajectoires de ces deux tempêtes sont presque identiques lors de leurs passages en Europe (*voir p.18*). Cela implique que plusieurs autres facteurs sont à prendre en compte notamment la NAO et l'ondulation du système de pression et de température au niveau des moyennes latitudes.

NAO

Comme vu précédemment, l'Oscillation Nord Atlantique joue un rôle déterminant dans la propagation des tempêtes en Europe. L'illustration 6 montre que la moyenne hivernale mesurée à + 1,83 entre décembre 2006 et mars 2007 était fortement positive. En effet, il s'agit de la plus importante moyenne depuis l'hiver 1999-2000 (+ 1,85), durant lequel 3 fortes tempêtes, dont la célèbre Lothar, sont venues toucher l'Europe en affligeant des dégâts s'élevant à 17,05 milliards de dollars et 110 victimes. La valeur du mois de janvier 2007, lors de la tempête Kyrill, mesurée à + 1,77 est légèrement plus basse que la moyenne hivernale. Cet indice élevé durant l'hiver 2006-2007 a favorisé le développement et l'intensification de la tempête Kyrill. De plus, une NAO positive tend a augmenter la durée de vie des cyclones hivernaux (Fink et al, 2009). Pour ce qui est de la même période de la saison durant laquelle la tempête Niklas a eu lieu, la moyenne de la NAO a été mesurée à + 2,04. La tempête a donc aussi eu lieu lors d'une NAO hivernale fortement positive dépassant l'indice mesuré lors de la tempête Kyrill. Par contre, étant donné que la tempête Niklas a eu lieu au début du printemps, les valeurs de NAO doivent correspondre à cette période. Le mois de mars 2015 a eu une valeur de + 1,99 qui correspond à la moyenne de l'hiver 2014 – 2015. La NAO a donc été légèrement plus élevée pour Niklas. Il est donc compréhensible que la tempête Niklas ait aussi été largement favorisée par une NAO fortement positive. Cet indice seul ne permet pas de définir l'intensité d'une tempête qui est le fruit d'un grand nombre de facteurs à plus petites échelles mais donne une tendance globale.

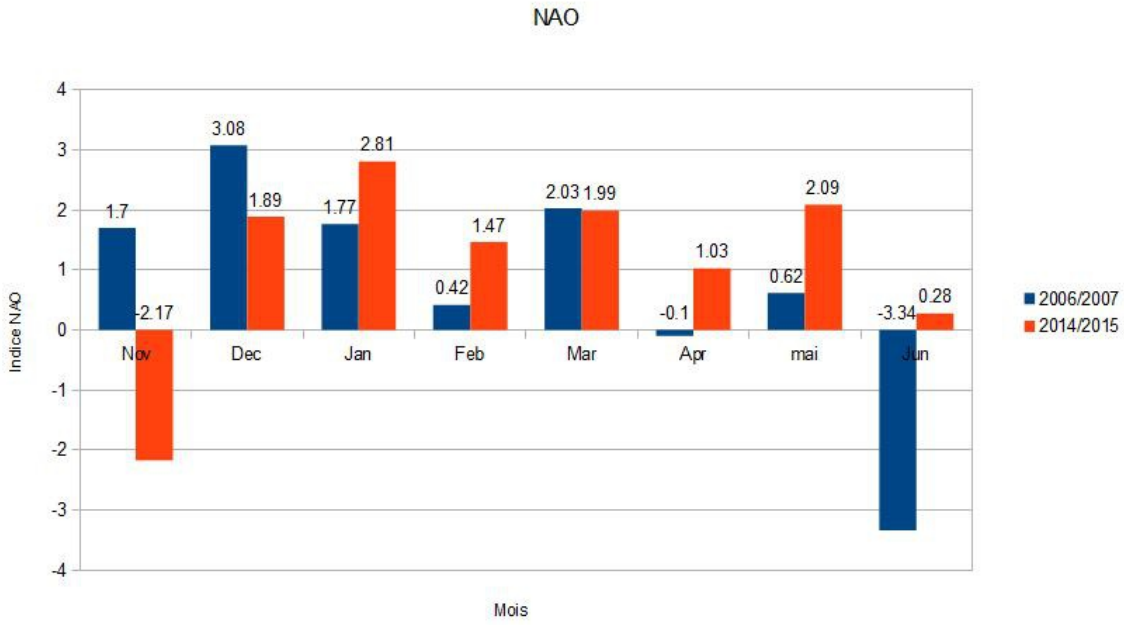


Illustration 6: Indices de NAO mensuels de novembre à juin pour les saisons 2006/2007 et 2014/2015. Source des données: UEA (2016)

Pression mensuelle au niveau de la mer

Grâce aux cartes de pression mensuelle, il est possible d'avoir un aperçu de la localisation effective des systèmes de pression comme l'anticyclone des Açores en rouge et la dépression islandaise en bleu. Lors du mois de janvier 2007, l'illustration 7 indique la position de l'anticyclone des Açores localisé à l'Ouest de la péninsule Ibérique. La zone maximale de gradient de pression se situe depuis l'Irlande jusque dans l'Europe de l'Est. La carte des anomalies de pression (*Illustrations 9 et 10)* indique les différences de pression entre une moyenne établie de 1981 à 2010 et la moyenne mensuelle mesurée. Celle-ci montre un fort gradient anomalitique notamment dans la Mer du Nord provoqué par un anticyclone des Açores et une basse pression d'intensités supérieures à la moyenne, cette dernière étant située à l'Ouest des pays scandinaves. Cette zone de gradient anomalitique indique un gradient de pression supérieure à la moyenne et joue un rôle important dans l'évolution des tempêtes dans l'étendue et l'intensité des vents qu'elle provoque (Fink et al. 2009). En mars 2015, l'anticyclone des Açores était décalé plus à l'Ouest par rapport à la position de celui de janvier 2007 (*Illustration 8*). Il est état d'un gradient anomalitique important entre l'anticyclone des

Açores et la basse pression islandaise. Cela implique que ces deux systèmes de pression ont été respectivement bien supérieurs et inférieurs qu'en moyenne durant ce mois reflétant l'indice positif de la NAO et la raison de l'intensification de la tempête. Contrairement à janvier 2007, l'Europe n'est pas sous l'effet d'un important gradient anomalitique car celui-ci est situé au-dessus de l'Islande.

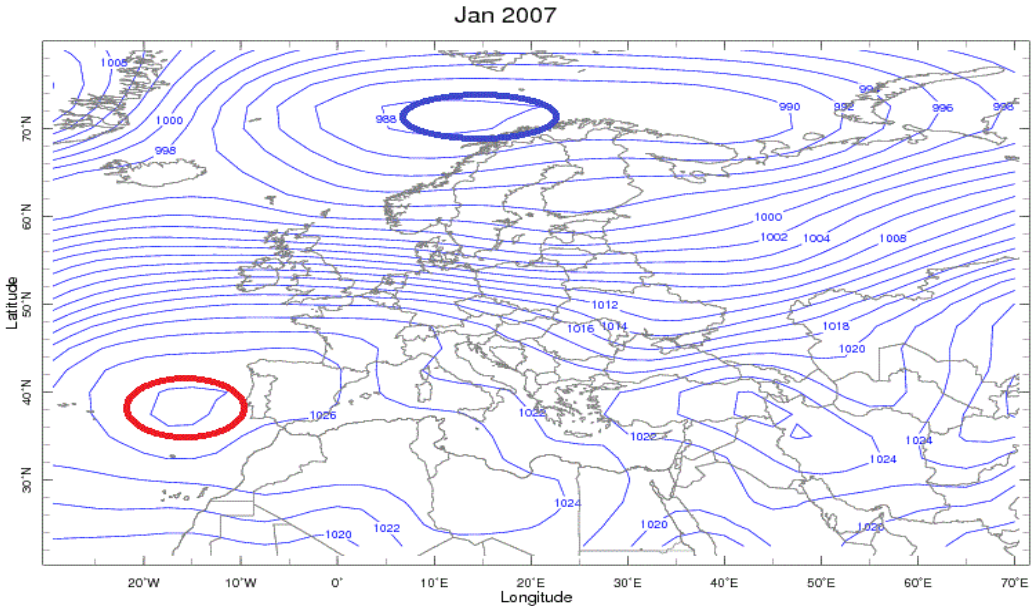


Illustration 7: Carte de la pression moyenne au niveau de la mer du mois de Janvier 2007 avec basse pression (cercle bleu), anticyclone des Açores (cercle rouge), espacement des isobares = 2 hPa. Source: (IRI, 2016)

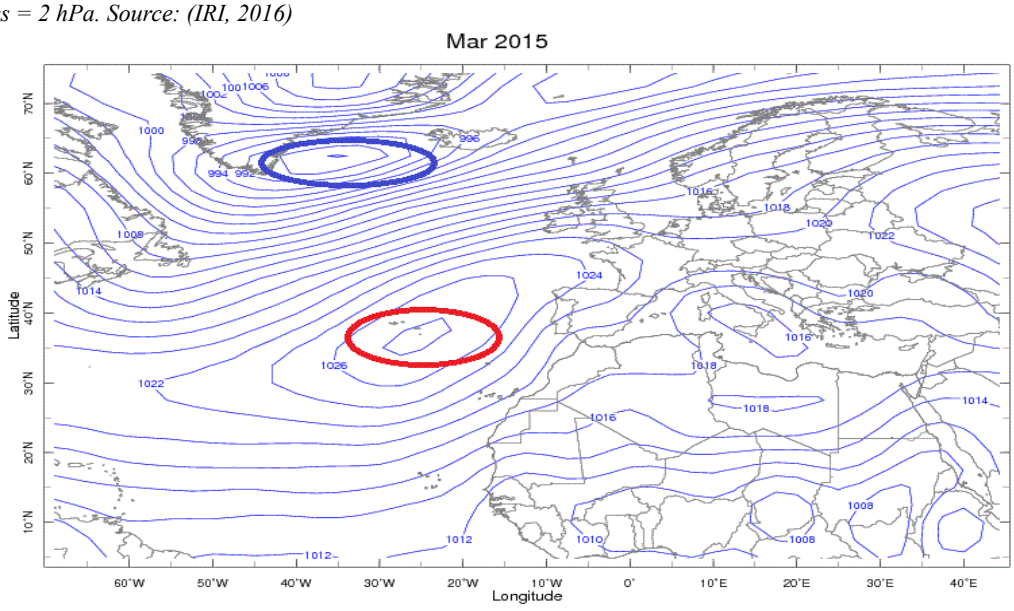


Illustration 8: Carte de la pression moyenne au niveau de la mer du mois de Mars 2015 avec basse pression Islandaise (cercle bleu), anticyclone des Açores (cercle rouge), espacement des isobares = 2 hPa. Source: (IRI, 2016)

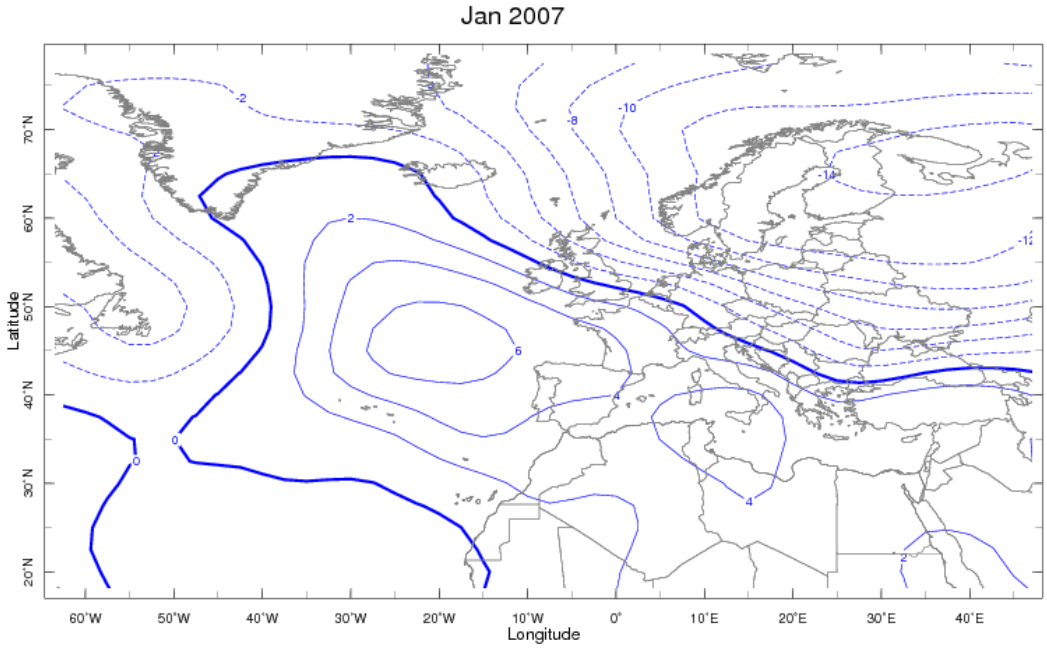


Illustration 9: Carte de l'anomalie de pression au niveau de la mer du mois de janvier 2007 par rapport à la référence de 1981 - 2010, espacement des isobares = 2 hPa. Source: (IRI, 2016)

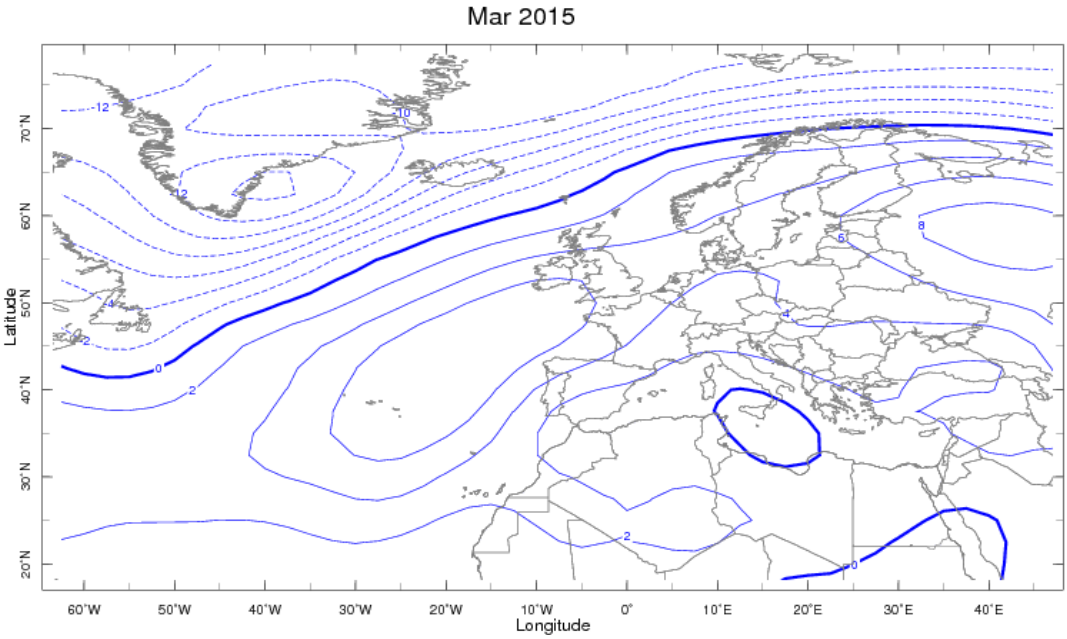


Illustration 10: Carte de l'anomalie de pression au niveau de la mer du mois de mars 2015 par rapport à la référence de 1981 - 2010, espacement des isobares = 2 hPa. Source: (IRI, 2016)

4.2 Processus de formations

Ce sous-chapitre analysera les différents processus liés à la formation des tempêtes Niklas et Kyrill au-dessus du continent nord-américain jusqu'à leurs entrées dans l'Atlantique Nord.

Situation météorologique

Durant la période qui a précédé Kyrill, la carte de géopotentiel de l'hémisphère Nord (*Illustration 11*) montre un creux d'altitude en provenance du Pacifique Nord qui dérive vers l'Est. Le 14 janvier, ce creux arrive au-dessus des Etats-Unis et se superpose à un important gradient de température. Selon Fink et al., (2009), la dépression naissante nommée Kyrill s'est formée à l'emplacement d'un front froid stationnaire situé au-dessous du côté Est d'un creux d'altitude.

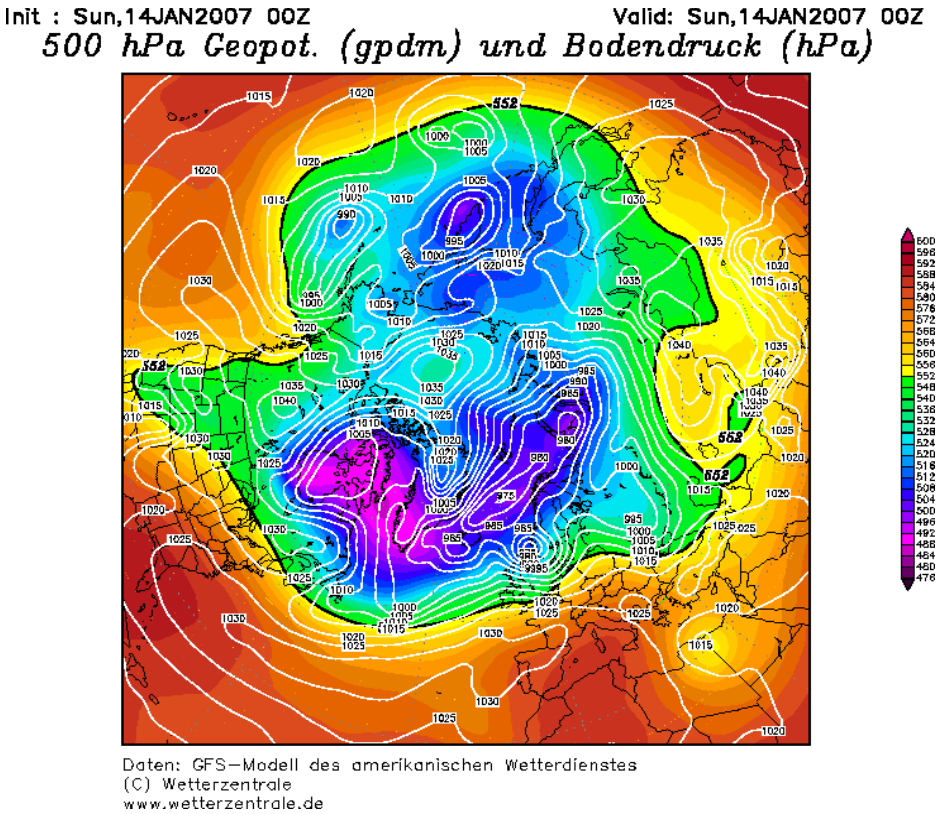


Illustration 11: Carte de géopotentiel de l'hémisphère Nord à 500 hPa du 14.01.07 à 00:00 UTC : Hauteur de géopotentiel gpdm (dégradé), pression au niveau de la mer hPa (isobares blanches) Source : Wetterzentrale (2016)

Les cartes de l'Amérique du Nord (*Illustration 13*) corroborent cette affirmation, en effet, ce front froid stationnaire est visible sur la carte de température par un fort gradient Nord-Sud. Ce gradient est renforcé par une masse d'air froide polaire descendant vers le Sud jusqu'au Texas avec un anticyclone centré sur le Sud-Est du Canada. Les Illustrations (*13 a et c*) montrent une ondulation stationnaire au-dessus du Colorado créant un important gradiant de pression et de température. Ceux-ci se situent au-dessus des Rocheuses, chaîne de montagnes traversant les Etats-Unis dans un axe Nord-Sud. Ce creux de faible amplitude peut être causé par le passage d'un front froid au-dessus de l'obstacle imposé par la chaîne de montagnes, ce qui crée une déformation de ce dernier sur le versant sous le vent. Ce phénomène nommé leeside cyclogenesis peut être une des causes de la naissance de Kyrill car il crée une zone barocline située à l'Est des Rocheuses (Lin, 2007). Le 26 mars lors de la formation de Niklas, le continent nord-américain est sous l'influance d'un vaste anticyclone centré sur les grands lacs amenant de l'air froid polaire (*Illustrations 14 a et c)*. En altitude, il est état d'un creux provoqué par cette masse d'air froide anticyclonique provenant du pôle (*illustration 14b*). Cette situation induit un fort gradient de température situé sur la côte Est du pays s'étendant de la Floride au Labrador.

Gradient de température

La période aux alentours du 14 janvier 2007, jour durant lequel la perturbation a l'origine de la tempête Kyrill a été premièrement aperçue, a été représentative d'un important gradient de température horizontal situé au Nord des Etats-Unis s'étendant des Rocheuses au Sud du Labrador. Ce gradient est la cause de la rencontre entre une masse d'air polaire avec un minimum de température situé sur le Québec et de l'air chaud tropical. Sur la carte des températures (*Illustration 13a),* la zone de fort gradient est bien visible avec les isothermes très resserrés au Sud du Québec et s'étendant d'Ouest en Est. L'air est donc très instable au niveau de cette discontinuité et cette instabilité a permis à la dépression de se renforcer rapidement en étant alimenté par le fort contraste de températures.

Lors de la formation de la dépression Niklas, le gradient de température total entre le

minimum polaire et l'air tropical bien qu'étant important est moins fort que lors de la formation de Kyrill selon les cartes de l'hémisphère Nord (*Illustration 12*). La situation saisonnière implique aussi des différences de températures plus faibles qu'en plein hiver, notamment aux pôles où la différence entre le mois de janvier et celui de mars est conséquente. La situation du front froid stationnaire le long de la côte implique une contraste de température causé par la limite entre l'air continental plutôt froid et l'air océanique plutôt chaud. Sur les cartes de l'Amérique du Nord (*Illustrations 13a et 14a*), le gradient de température au-dessus de la côte Est est localement plus fort que celui de Kyrill dû aux isothermes particulièrement resserrées. Etant donné l'importance du gradient horizontal de température et de l'instabilité barocline présents, la rapide intensification des deux tempêtes est compréhensible.

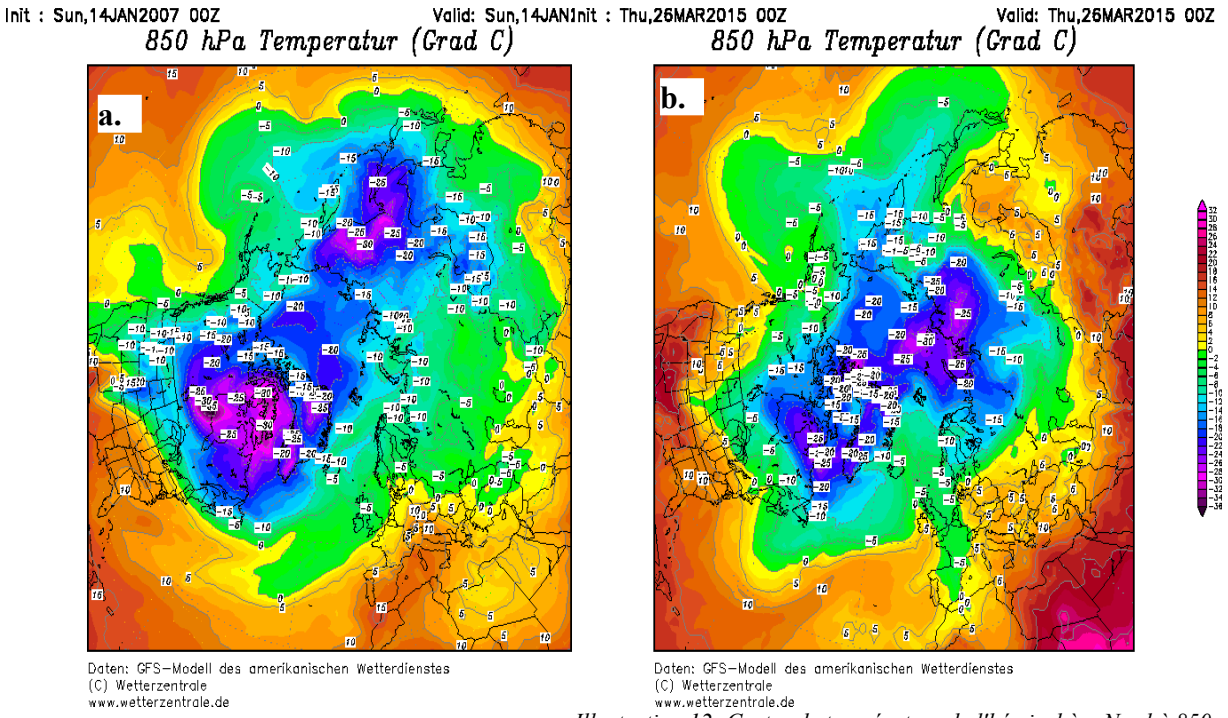


*Illustration 12: Cartes de température de l'hémisphère Nord à 850 hPa, **a.** du 14.01.07 à 00:00 UTC, **b.** du 26.03.15 à 00:00 UTC : Température °C (dégradé) Source: Wetterzentrale (2016)*

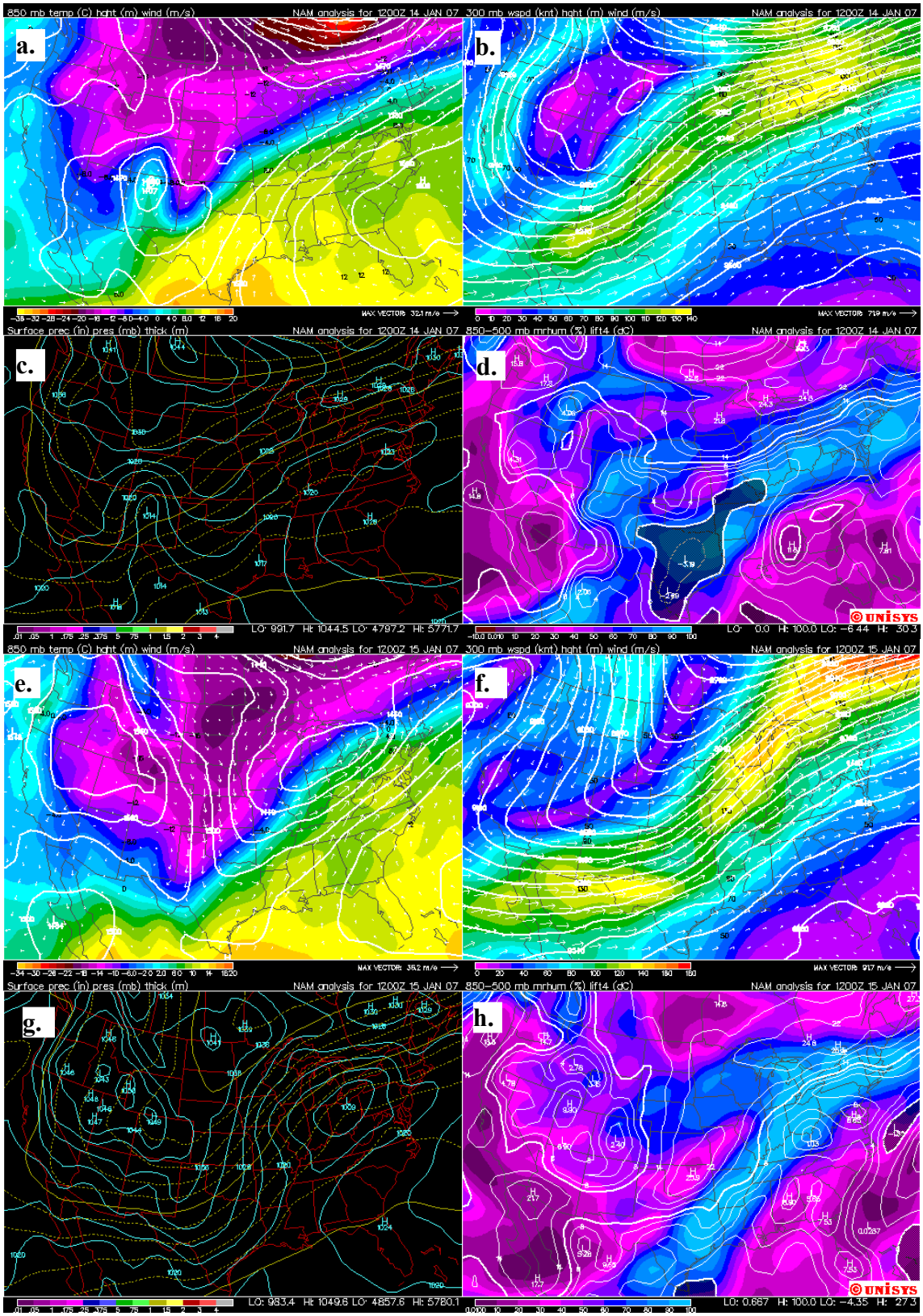


*Illustration 13: Cartes de l'Amérique du Nord, 14.01.07 12:00 UTC **(a,b,c,d),** 15.01.07 12:00 UTC **(e,f,g,h)**: **(a,e)**850 hPa, Température °C (dégradé de couleurs), Vitesse (m/s) et direction du vent (flèches blanches), Pression (hPa) (isobares). **(b,f)** 300 hPa, Vitesse du vent (noeud) (dégradé), Direction du vent (flèches). **(c,g)**: Pression de surface (hPa) (isobares). **(d,h)**: 850-500 hPa, Humidité relative (%) (dégradé), Champs d'ascendances (dC) (lignes blanches). Source: (Weather Unisys, 2016)*

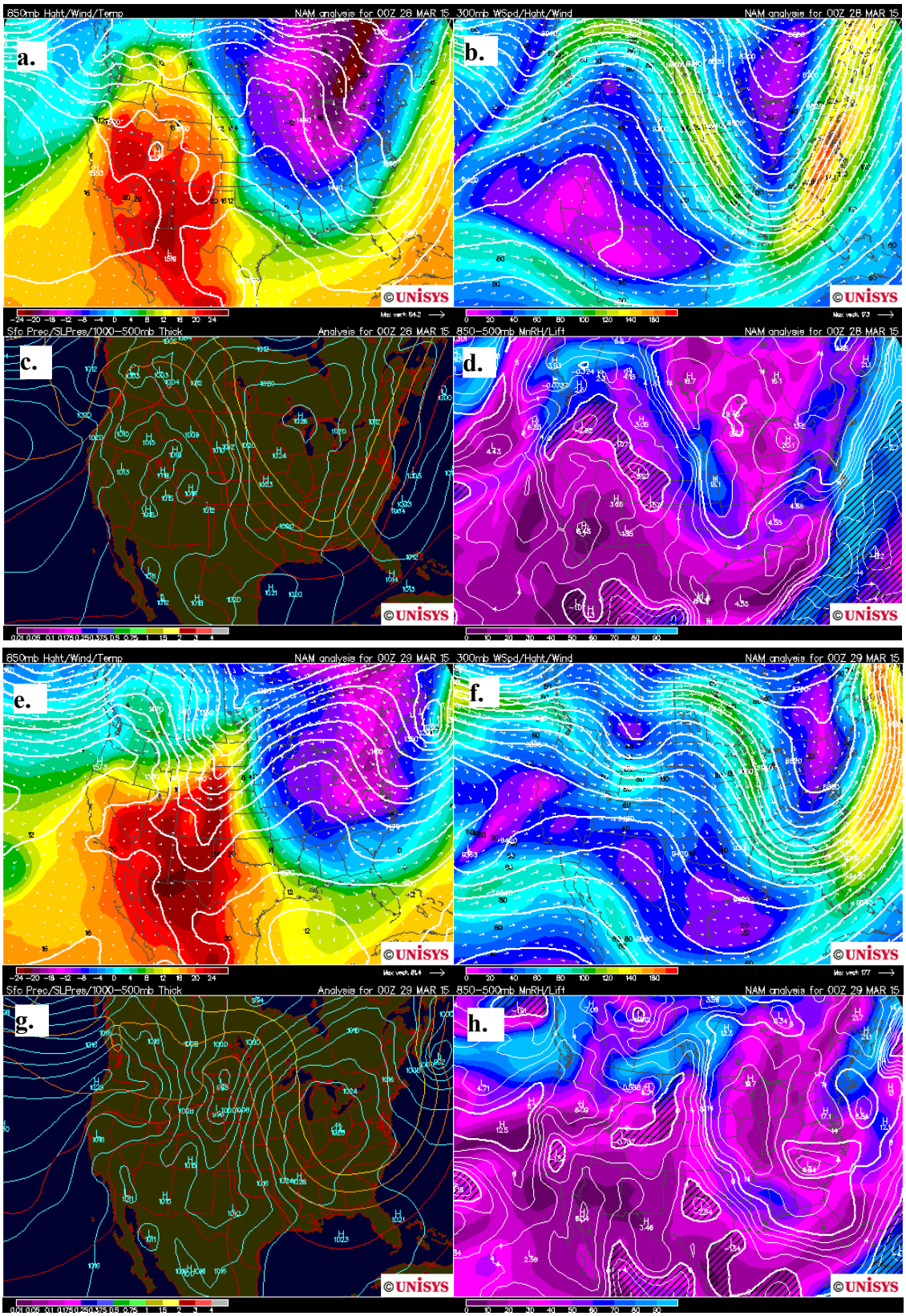


Illustration 14: Cartes de l'Amérique du Nord, 26.03.15 00:00 UTC (haut), 27.03.15 00:00 UTC Source: (Weather Unisys, 2016)

4.3 Développement au-dessus de l'Atlantique Nord

Dans ce sous-chapitre, il sera question de l'évolution des tempêtes Niklas et Kyrill depuis leur entrée dans l'Atlantique Nord après avoir quitté les côtes de Terre-Neuve jusqu'à leur passage du méridien 10° Ouest.

Croisement du jet stream polaire

Lors de sa formation, la dépression Kyrill est sous l'influence d'un jet stream zonal et prends donc une importante vitesse en direction de l'Est (*Illustration 15a*). Lors de son entrée dans l'Océan Atlantique au large de la Nouvelle-Ecosse, la dépression subit une explosion de sa cyclogenèse alors qu'elle vient de se placer au-dessous de la sortie gauche d'un jet streak qu'elle va suivre jusqu'en Europe. Le jet stream avec des vents maximum d'environ 342 km/h est localement plus fort que celui emprunté par Niklas avec que des vents de 288 km/h (*Illustration 15b).* Ce qui explique la forte accélération de la dépression Kyrill en direction de l'Est le 18.01.2007. Cela s'est traduit par une chute de pression rapide de son centre étiré par la force du jet stream. Puis, Kyrill est resté proche de la partie Nord de ce dernier jusqu'à atteindre les côtes britanniques (Fink et al., 2009). Dès la formation de la dépression Niklas, le jet stream circulant en direction du Nord-Est au-dessus de la côte Est des Etats-Unis est visible sur les cartes de l'Amérique du Nord (*Illustrations 14 b et f*). Ce jet stream est causé par le fort gradient de température qui est présent à ce moment-là. Deux jours plus tard, ce dernier se renforce et s'oriente en direction du Nord impliquant une trajectoire courbe du rail des dépressions. Lors de sa traversée de l'Atlantique, Niklas se place en-dessous de la région polaire du jet stream comportant une forte divergence, ce qui va accélérer sa cyclogenèse.

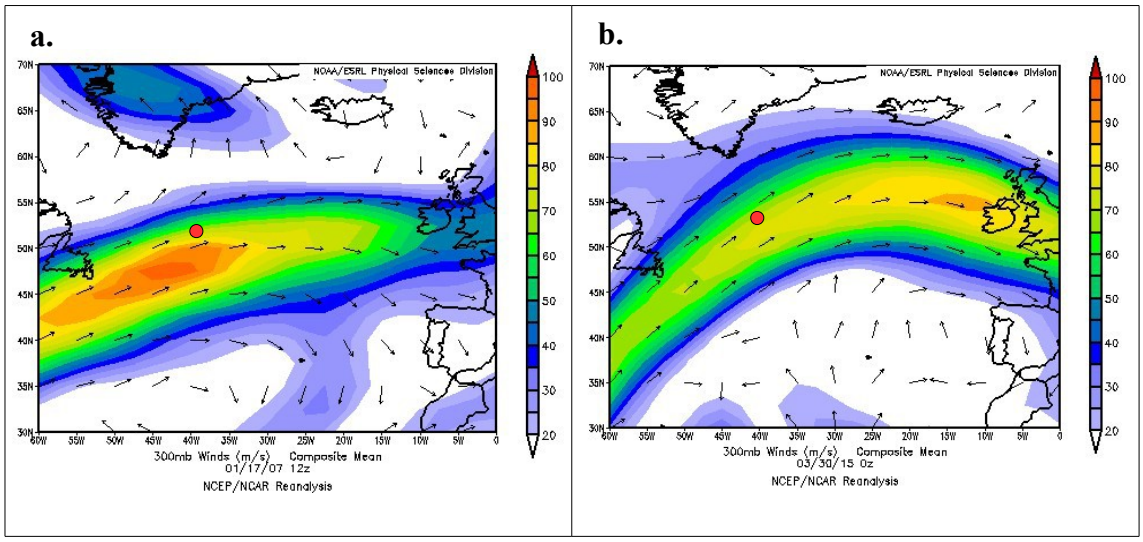


*Illustration 15: Cartes de l'Atlantique Nord lors des tempêtes **a.** Kyrill, **b.** Niklas (droite) avec leurs localisations (point rouge): Vitesse du vent à 300 hPa: Vitesse du vent m/s (dégradé), Direction et intensité du vent (flèches. Sources : NOAA (2016) http://esrl.noaa.gov/psd/data/composites/hour/*

Trajectoires et centres de pression

La carte des trajectoires et de l'évolution des centres de pression (*Illustration 5*) montre que Niklas a eu une trajectoire parabolique causée par la direction azonale du jet stream alors que celle de Kyrill a été plus directe. Au niveau de la pression centrale, Kyrill s'est brutalement creusée lors de son entrée dans les eaux de l'Atlantique alors que Niklas a subi une baisse de pression relativement constante. Vers la côte Est des Etats-Unis, la direction du jet stream a donné la trajectoire aux deux dépressions et comme expliqué auparavant, la direction et l'intensité de ce dernier étaient différentes entre les deux cas. Dans un premier temps, Niklas et Kyrill après avoir croisé un fort jet stream, subissent une accélération lors de leur entrée dans l'Atlantique due à l'important contraste de température présent dans la région de la Nouvelle-Ecosse. Au milieu de l'Atlantique, Niklas continue encore a accélérer légèrement jusqu' aux côtes du Nord de la Grande-Bretagne, alors que Kyrill perd de la vitesse et commence à s'affaiblir, car la pression se stabilise. Kyrill atteint son stade d'occlusion le 17.01 à 12:00 UTC et commence à se dissiper. La dépression Niklas est occluse depuis son entrée dans l'Atlantique, mais continue de s'intensifier. Alors que la tempête Kyrill perd en intensité, une autre perturbation se développe à l'Est le long de son occlusion (*Illustration 16).* Cette dernière se retrouve sous une sortie gauche d'un jet streak, ce qui provoque une subite

intensification de la tempête lui permettant d'accélérer vers les côtes de la Grande-Bretagne. Ce phénomène est assez fréquent lors de cyclones dans l'Atlantique Nord, mais le stage de développement de cyclones secondaires n'est pas encore très bien compris (Fink et al. 2009). Le cyclone secondaire de Kyrill appelé Kyrill II se trouve être le responsable de la tempête qui a eu lieu dans le Nord de l'Europe, car son aînée s'est peu à peu dissipée au large de la Grande-Bretagne.

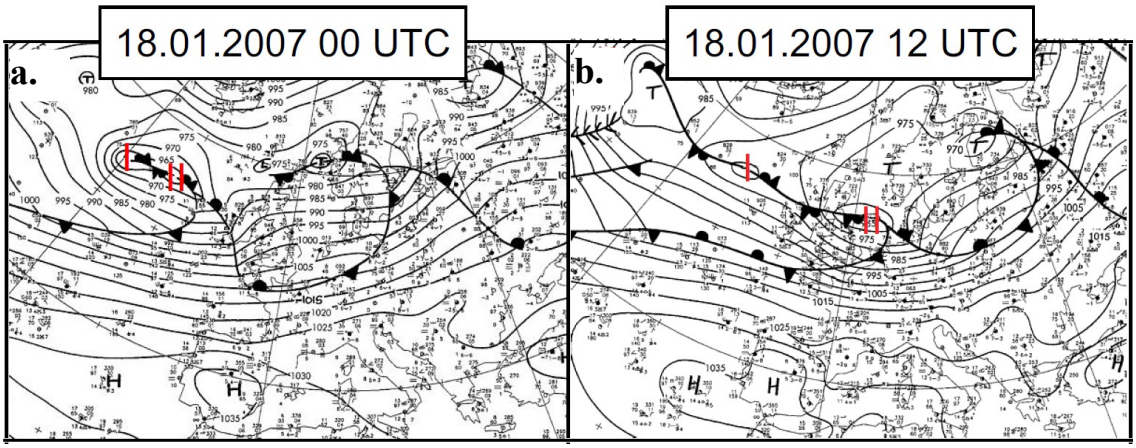


*Illustration 16: Cartes de pression au niveau de la mer: **a.** le 18.01.07 à 00 UTC, **b.** le 18.01.07 à 12 UTC, I (Kyrill I), II (Kyrill II). Source: (Fink et al., 2009)*

4.4 Développement au-dessus de l'Europe

Ce chapitre analysera le développement des tempêtes Kyrill et Niklas au-dessus de l'Europe grâce à des cartes météorologiques et des observations en surface.

Trajectoire et centres de pression

Sur le diagramme de l'évolution des centres de pression (*Illustration 5)*, le centre de la tempête Niklas atteint son minimum de 971,4 hPa au dessus-du Danemark pour ensuite se dissiper et dériver en direction de l'Est. Pour le cas de Kyrill, le minimum de pression de 962 hPa est atteint bien au-delà en Europe de l'Est au-dessus de la Lituanie.

Lors du passage de Kyrill au-dessus du Danemark, le gradient de pression entre son centre et l'anticyclone des Açores est de 71 hPa sur une distance de 2'000 km. Le gradient maximal avec des isobares se resserrant au centre de l'Allemagne donne un gradient de pression Nord/Sud de 6,3 hPa/100km. Lors du passage de Niklas au-dessus du Danemark, l'anticyclone des Açores est localisé légèrement à l'Ouest de la péninsule Ibérique, cela signifie donc un gradient moins marqué avec un centre de pression plus élevé. La différence de pression est de 64 hPa sur une distance de 2'000 km avec des isobares se resserrant cette fois-ci sur le Luxembourg. Le gradient moyen sur l'Allemagne est de 3,6 hPa/100km orienté Nord-Est/Sud-Ouest causé par la localisation plus à l'Ouest de l'anticyclone (KNMI, 2016).

Selon Fink et al. (2009), les causes du maintien de Kyrill et de sa basse pression centrale jusqu'en Europe de l'Est sont : a) la présence d'un creux d'onde courte d'altitude en retrait du centre de pression, b) la présence d'un jet stream comportant une séparation en deux branches, c) une intrusion d'air sec de haute altitude au-dessus des fronts et d) la présence d'une masse d'air chaude et humide située dans le secteur chaud.

Localisation du jet stream

Les cartes de l'Europe à 500 hPa (*Illustration 17*) montrent un comportement différent du front polaire au-dessus de l'Europe entre les deux tempêtes. Premièrement, lors du passage de Niklas en mars 2015, le front polaire semble plus perturbé et présente de fortes ondulations. L'axe de ce dernier est orienté Nord/Sud et s'étend du Luxembourg jusqu'en Grèce. Alors qu'en janvier 2007, ce dernier est beaucoup plus stable et rectiligne. Deuxièmement, le jet stream lors du passage de Kyrill est plus intense, comporte une trajectoire zonale et présente une séparation au-dessus du Nord de l'Allemagne provoquant ainsi de fortes divergences (*Illustrations 18 a et b*). Cette branche du jet stream se prolonge jusqu'en Russie permettant ainsi l'étirement de Kyrill jusqu'en Europe de l'Est. Lors du passage de Niklas, le jet stream forme un crochet de 90° au-dessus de l'Autriche déviant de la trajectoire du cyclone, ce qui amorce sa dissipation au-dessus du Danemark.

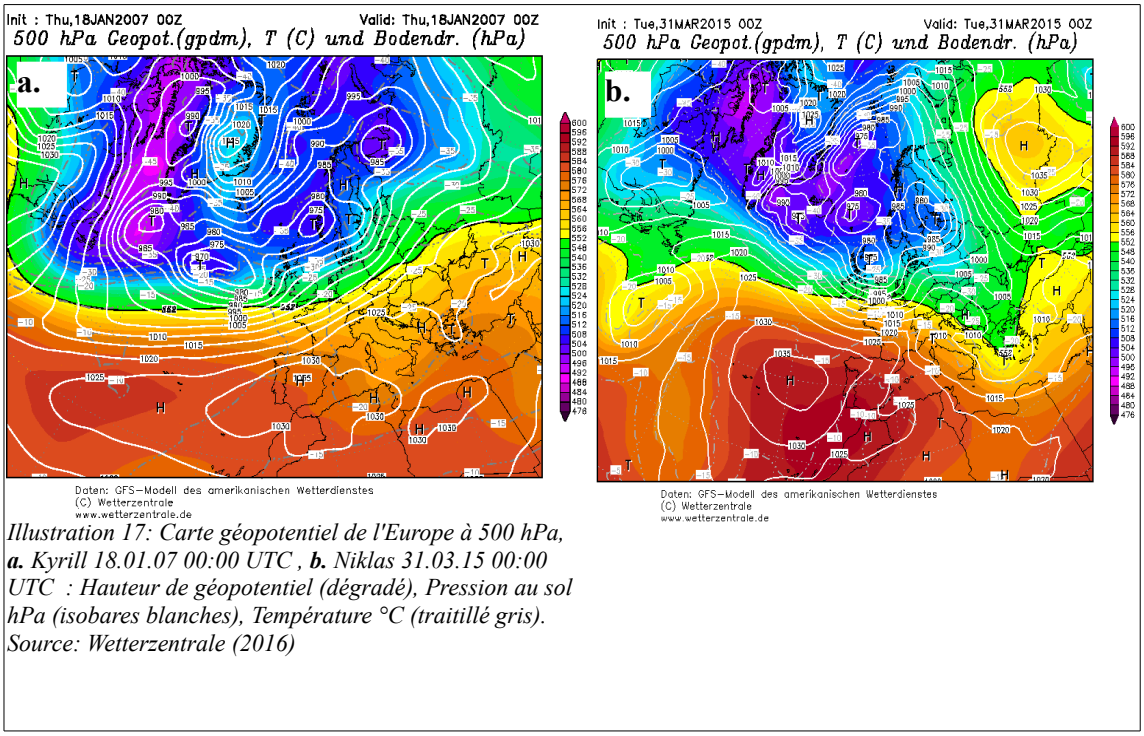
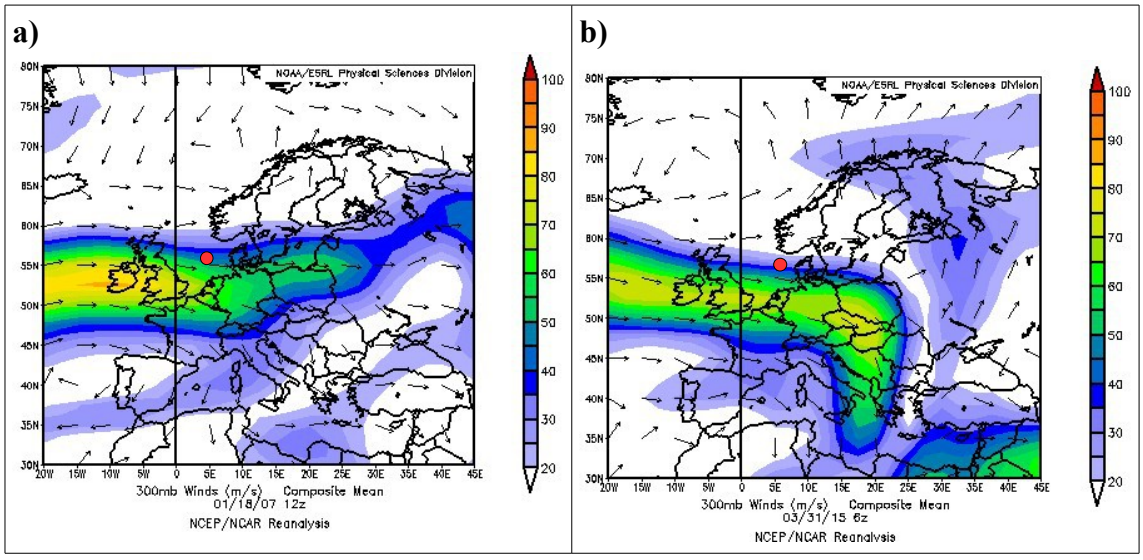


*Illustration 17: Carte géopotentiel de l'Europe à 500 hPa, **a.** Kyrill 18.01.07 00:00 UTC , **b.** Niklas 31.03.15 00:00 UTC : Hauteur de géopotentiel (dégradé), Pression au sol hPa (isobares blanches), Température °C (traitillé gris). Source: Wetterzentrale (2016)*

La présence d'une séparation du jet stream à partir des côtes de l'Irlande a provoqué des zones de fortes divergences à l'Est de l'Irlande et dans la mer du Nord traversées par le cyclone Kyrill, ce qui a favorisé l'étirement et l'intensification de celui-ci après avoir touché terre. Ce phénomène est aussi responsable de l'intensification de la tempête Lothar en décembre 1999 qui avait aussi bénéficié de la présence d'un jet stream avec une séparation d'entrées en delta (Fink et al. 2009).

Composition de l'air

Les cartes de températures de l'Europe montrent un gradient de température plus élevé lors du passage de Kyrill dû à la présence d'une masse d'air chaud amenée par le fort courant d'Ouest (*Illustrations 18 c et d*). Ce gradient méridional est bien visible dans la région située à l'Ouest de l'Angleterre comportant un resserrement des isothermes. De plus, cet air maritime présent dans le secteur chaud de Kyrill comporte beaucoup d'humidité (7g/kg), ce qui lui confère un important réservoir d'énergie (*Illustrations 18 e et f*). Selon Fink et al. (2009), il s'agit d'une masse d'air maritime tropicale, et donc très humide. Cette masse d'air lors de son advection a libéré une grande quantité d'énergie sous forme de chaleur latente et provoqué de fortes précipitations ainsi que des orages le long du front froid (Ahrens, 2009). Le secteur chaud de Niklas est moins prononcé dû à un gradient de température plus faible ce qui rend le jet stream également moins intense. De l'air humide est aussi présent, mais il possède une teneur inférieure en vapeur d'eau (5g/kg), ce qui constitue une réserve d'énergie moins importante.



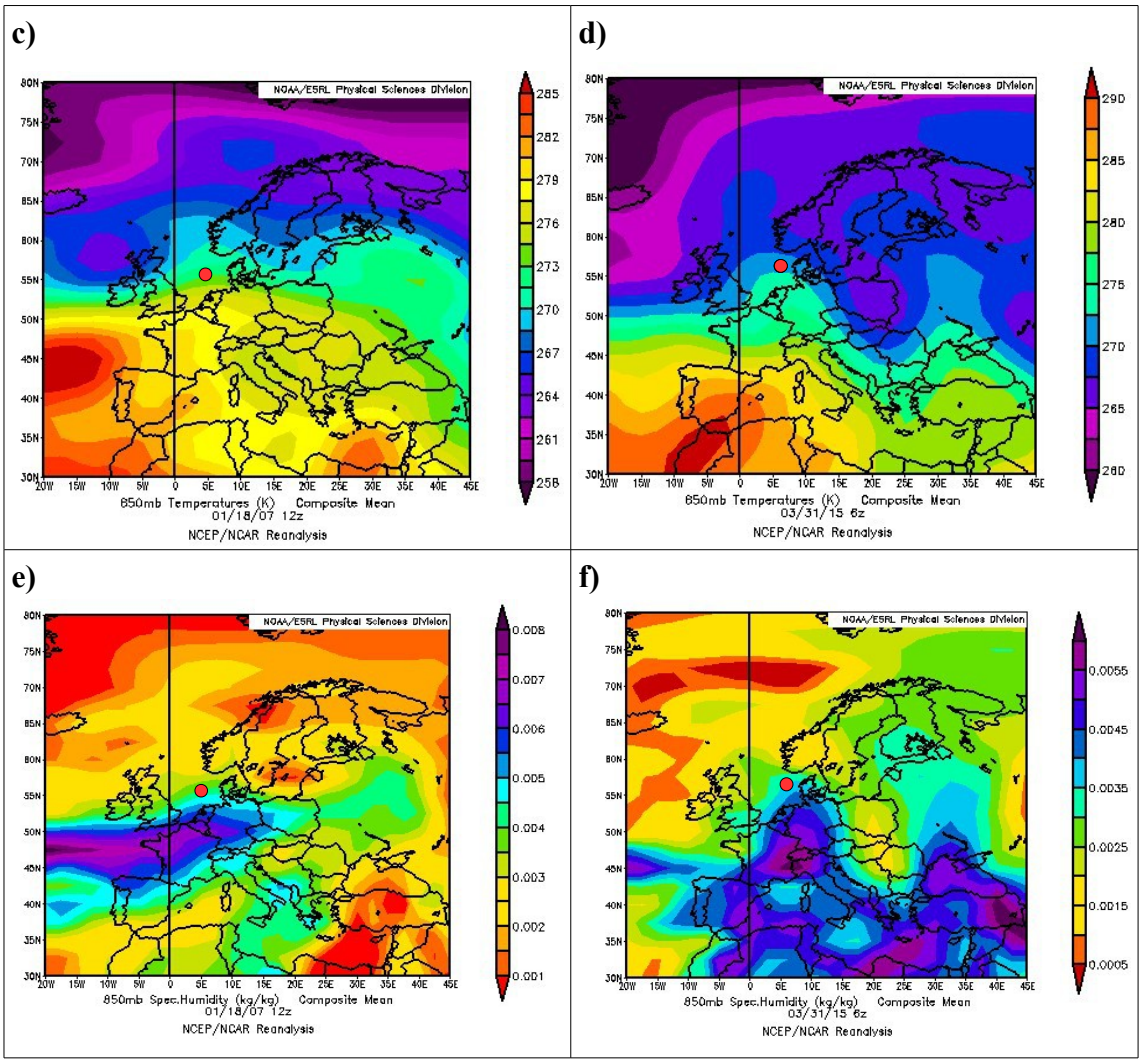


*Illustration 18: Cartes de l'Europe lors des tempêtes Kyrill (gauche) et Niklas (droite) avec leurs localisations (point rouge): (**a** et **b**) Vitesse du vent à 300 hPa: Vitesse du vent m/s (dégradé), Direction et intensité du vent (flèches). (**c** et **d**) Température de l'air à 850 hPa: °K (dégradé). (**e** et **f**) Humidité spécifique à 850 hPa: kg/kg (dégradé). Source: NOAA (2016) http://esrl.noaa.gov/psd/data/composites/hour/*

Observations en surface

Lors du passage de Kyrill en Allemagne, la rafale maximale a dépassé les 200 km/h dans les régions alpines. Ces dernières sont apparues peu avant le passage du front froid qui a survolé la station de Lindenberg en Allemagne le 18 janvier entre 18:00 UTC et 19:00 UTC. Cela s'est traduit par une baisse de pression progressive et une forte augmentation de la vitesse du vent jusqu'au passage du front. De plus, dans le Nord de l'Allemagne, une masse d'air sèche descendante provenant d'une altitude supérieure et précédée par le passage du front froid a provoqué de puissantes rafales en surface (Fink

et al., 2009). Ce phénomène appelé dry conveyor belt est inhérent aux cyclones de moyennes latitudes et, selon le modèle général, ces conveyor belts sont au nombre de trois : dry, warm et cold. Ces dernières ont un mouvement rotatif autour du centre de pression et font partie de la circulation agéostrophique d'un cyclone (Ahrens, 2009). Le 31 mars 2015, lors du point culminant de la tempête Niklas, des rafales de vent jusqu'à 140 km/h ont été mesurées sur la Mer du Nord. En Allemagne, la rafale maximale s'est élevée à 192 km/h sur la Zugspitze (Haesler, 2015).

Les valeurs de vent maximales mesurées en Allemagne le 31 mars 2015 lors de la tempête Niklas coïncident également avec le passage du front froid. Les valeurs mesurées dans les différentes stations réparties dans toute l'Allemagne montrent une différence de la vitesse maximale du vent et des rafales entre Kyrill et Niklas notamment dans les régions alpines où l'intensité du vent a été supérieure lors de la tempête Kyrill (*Illustrations 20 et 21*). La carte de surface (*Illustration 19*) montre des apparitions d'orages dans le quart Nord-Est de l'Allemagne entre 16:00 UTC et 20:00 UTC le 18 janvier 2007. Le passage du front froid peut être localisé par le changement de direction du vent qui passe d'un flux Sud-Ouest à un flux Ouest. Lors du passage du front froid de Niklas sur l'Allemagne, aucun orage n'est à signaler.

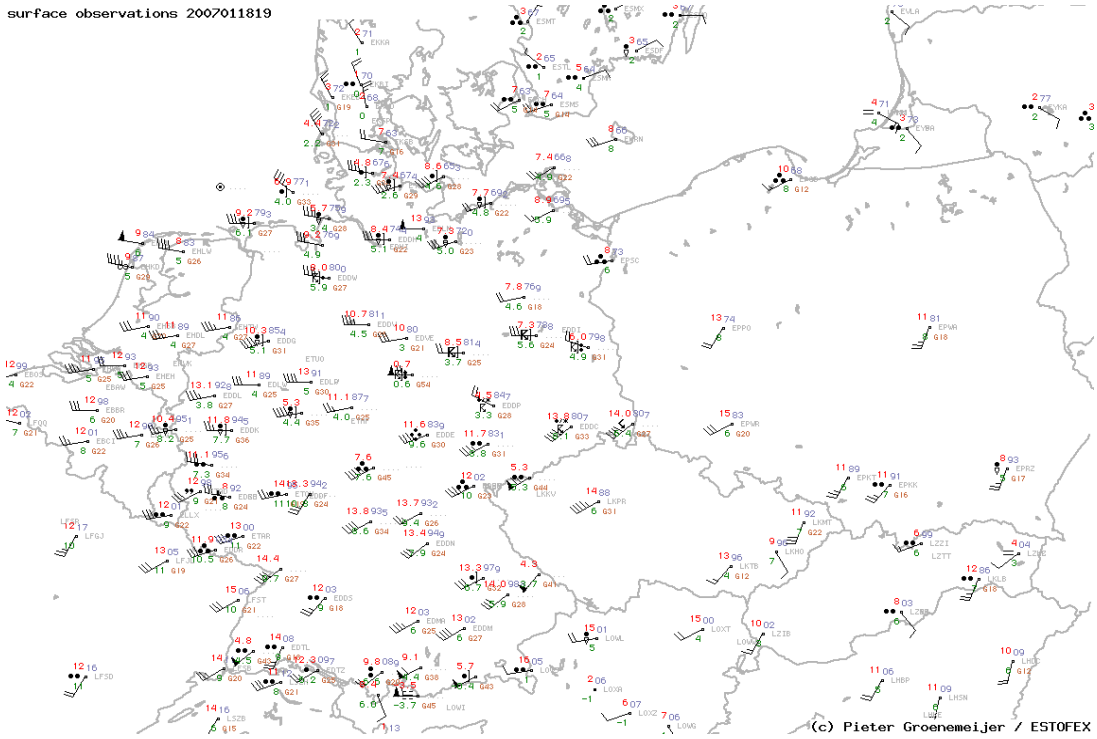
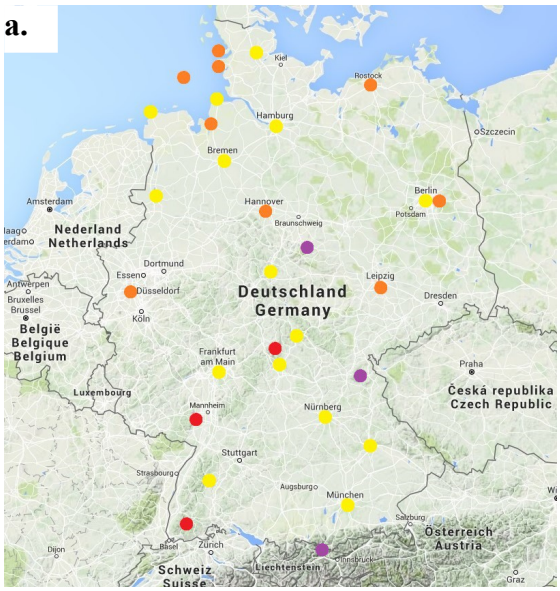


Illustration 19: Carte des observations de surface du 18.01.07 à 20:00 UTC. Source: Estofex (2016)



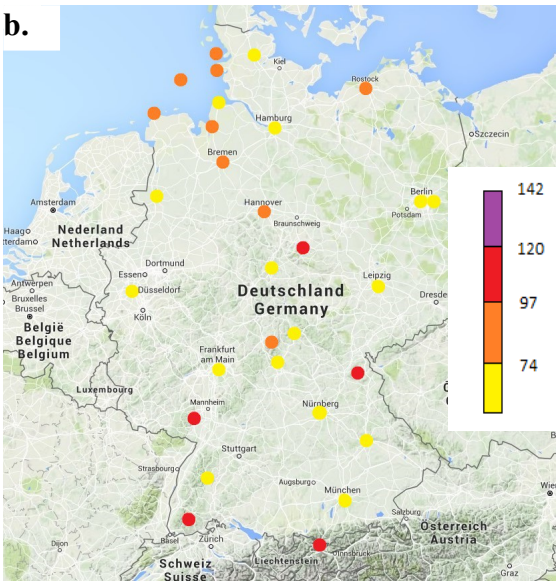
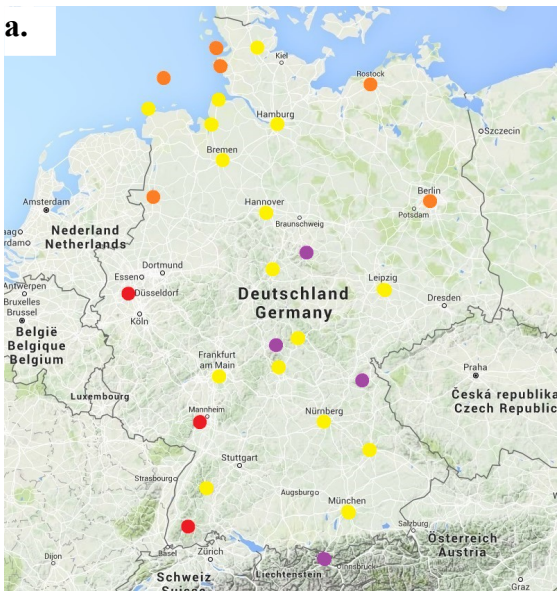


Illustration 20: Moyennes maximales sur 10 min de vitesse de vent en km/h ***a.*** *18/19 janvier 2007 pour Kyrill,* ***b.*** *31 mars 2015 pour Niklas. Source des données: (Haesler, 2015)*



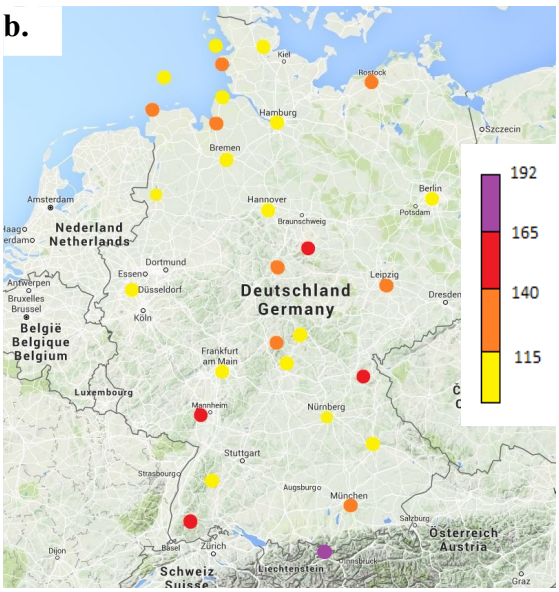


Illustration 21: Rafales maximales en km/h ***a.*** *18/19 janvier 2007 pour Kyrill,* ***b.*** *31 mars 2015 pour Niklas Source des données: (Haesler, 2015)*

5. Impacts

Ce chapitre comparera les impacts sur la population et l'économie liés au passage des tempêtes Kyrill et Niklas au-dessus de l'Europe en faisant le lien entre facteurs météorologiques, dégâts, victimes et pertes économiques. De plus, le rôle des compagnies d'assurances ainsi que l'enjeu des prévisions et du calcul des dégâts et des pertes économiques seront ensuite expliqués. Le but de ce chapitre est de déterminer les causes principales du nombre de victimes et des pertes importantes liées au passage de Kyrill.

5.1 Dégâts et pertes économiques

Bien que ces deux tempêtes aient toutes deux causé de sérieux dégâts, la différence au niveau des pertes économiques est importante. D'après le réassureur mondial (Swiss RE, 2016), les pertes économiques totales des deux tempêtes s'élèvent respectivement à 11,41 et 1,44 milliards de dollars pour Kyrill et Niklas. Les pertes engendrées par la tempête Kyrill sont près de huit fois supérieures à celles de Niklas. Or, compte rendu du chapitre précédant, en comparant les vitesses de vent observées, il est difficile de concevoir une telle différence. Les rapports de Swiss Re (2008, 2015) donnent des précisions sur l'événement Kyrill en y ajoutant les pertes liées aux inondations ainsi que les différents secteurs ayant subis des pertes comme l'infrastructure, l'agriculture, les forêts et la marine. Il s'agit aussi de la catastrophe ayant causé l'assurance de pertes la plus coûteuse de l'année 2007 dans le monde avec 6,96 milliards de dollars. Le rapport de Niklas quant à lui ne donne pas plus d'informations sur les secteurs d'impacts, ce qui est peut-être dû à son apparition encore récente il y a une année. Si ce n'est que les pertes assurées s'élèvent à 0,99 milliard de dollars et se situent à la troisième place mondiale des catastrophes pour l'année 2015.

Il est intéressant de constater que les pertes localisées uniquement en Allemagne s'élèvent respectivement pour Kyrill et Niklas à 2,4 milliards d'euros et 750 millions

d'euros soit un rapport de 3.2, ce qui est nettement moins marquant que celui des pertes totales qui est de 7. Cela signifie que les pertes économiques ne reflètent pas directement l'intensité de la tempête en terme de vitesse de vent ou de pression centrale. Le calcul des pertes prend aussi en compte l'étendue géographique de la tempête, la force du vent, son temps d'action ainsi que l'exposition (GDV, 2015).

Le calcul des pertes ainsi que leurs prévisions est un enjeu capital pour les compagnies d'assurances. Leur but étant d'estimer les pertes liées à des catastrophes naturelles comme les tempêtes afin de les combler au mieux. Pour ce faire, les compagnies d'assurances utilisent en général un modèle de prévision des pertes prenant un compte le vent, car ce dernier est facile à mesurer et est assez proche des dégâts. Ce modèle aussi utilisé en Suisse prend tout d'abord les mesures maximales journalières de vent à 10 m du sol par des stations météos. Ensuite, cette mesure est normalisée par un seuil de vitesse de vent appelé le 98e pourcentile. Il s'agit d'une valeur de vitesse maximale journalière de vent établie sur la moyenne de plusieurs mois pendant plusieurs dizaines d'années. Le modèle prend aussi en compte l'exposition caractérisée par la densité de population présente à l'endroit de mesure. (Etienne et Benninston, 2012)
L'image suivante montre le rapport entre le gradient de pression pré-existant au niveau de la mer, c'est-à-dire la moyenne calculée pour les 9 jours avant le passage de la longitude 10° Ouest de la tempête, la trajectoire du centre de pression et le taux d'excédence du 98ème pourcentile ainsi que son étendue (*Illustration 22*). Selon (Fink et al. 2009), la comparaison des dommages causés par les tempêtes illustrées dans le tableau des caractéristiques des tempêtes historiques (*Tableau 1*) montre la nette supériorité de Kyrill. Celle-ci est due directement au fort taux d'excédance du 98e pourcentile de la vitesse du vent et à son étendue qui se propage dans une grande partie de l'Europe. Ce fait est lié au fort gradient de pression pré-existant au niveau de la mer dont la zone maximale coïncide avec la trajectoire du centre de pression de la tempête ainsi que son étendue au Sud et à l'Est. Il s'agit là d'une indication claire du rôle du gradient de pression pré-existant dans le développement de Kyrill et de ses impacts en Europe.

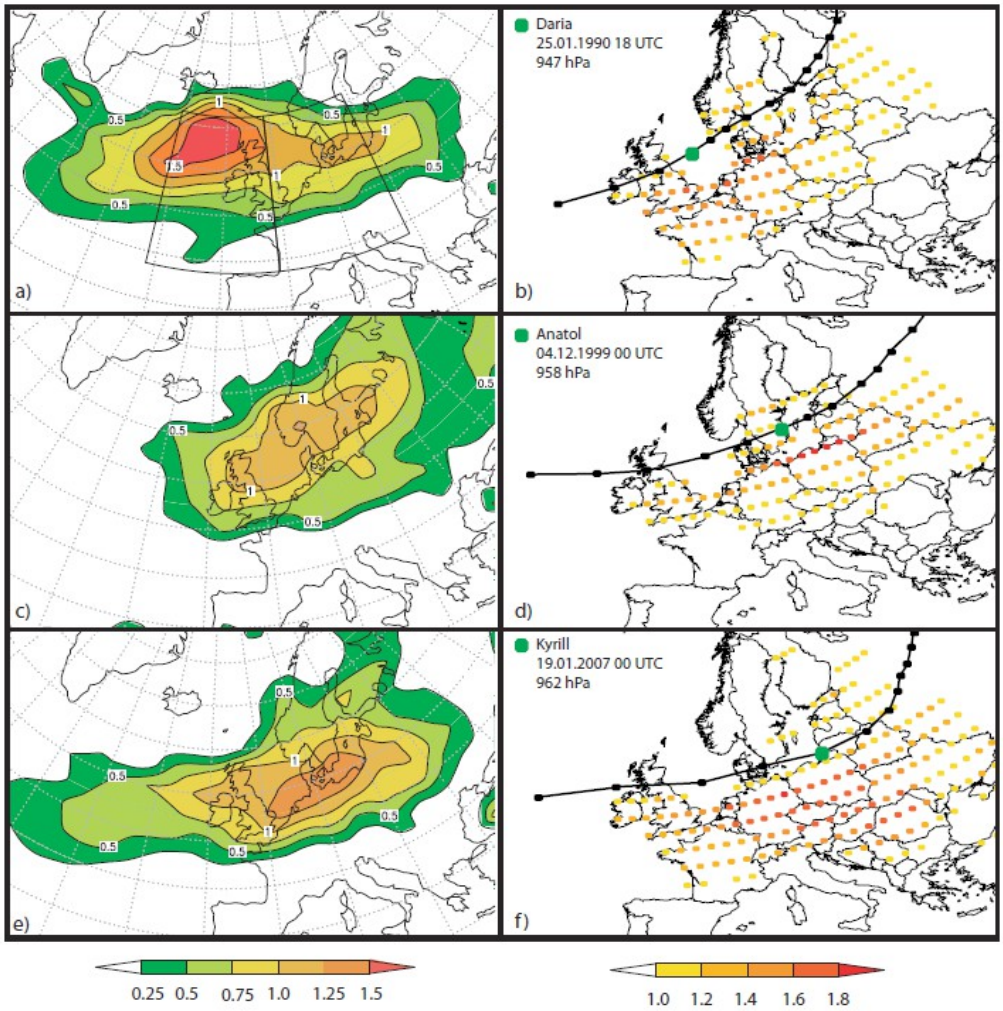


Illustration 22: (gauche) Gradient de pression au niveau de la mer pré-existant: Gradient de pression hPa/100km (dégradé) .(droite) Trajectoire du centre de pression (point vert = minimum de pression), taux d'excédance du 98ème pourcentile pour Décembre à Février 1958-2005 par le vent de surface (points de couleur) .Tempêtes: Daria (a,b), Anatol (c,d) et Kyrill (e,f). Source: (Fink et al. 2009)

Tempête	Date	gradPmax	Pmin	PG	Dommages
Daria	25.01.90	1.73	947	96	1890.3
Herta	03.02.90	1.72	992.1	52	249
Judith	08.02.90	1.48	977.4	83	347.8
Vivian	26.02.90	1.45	947.7	107	1386.1
Wiebke	01.03.90	1.65	975.3	84	810.2
Anatol	04.12.99	1.3	957.7	87	1209.6
Lothar	26.12.99	1	961	73	1163.9
Martin	26.12.99	0.95	971.6	89	2036.1
Jeanette	27.10.02	1.32	972.9	87	1503.9
Kyrill	18.01.07	1.49	961.7	127	4811.4

Tableau 1: Caractéristiques des tempêtes historiques : Tempête : nom de la tempête, Date : date d'occurance, gradPmax : gradient maximum de pression moyenne au niveau de la mer hPa/100km, Pmin : pression minimale hPa, PG : nombre de points de grille montrant l'excédance du 98e pourcentile de la moyenne journalière de vitesse de vent (voir ill. 13), Dommages : dommages bruts. Source : (Fink et al. 2009)

5.2 Victimes

Le nombre de victimes ayant perdu la vie suit la logique du rapport des pertes économiques entre les deux tempêtes. Pour Kyrill, 54 victimes sont à déplorer dont 11 au Royaume-Uni et 13 en Allemagne (TAZ, 2007; BBC, 2007). Pour Niklas, celles-ci sont au nombre de 11 dont 9 en Allemagne ainsi qu'une en Suisse et en Autriche (Merkur, 2015).

Finalement, le degré d'exposition est aussi très influencé par le moment du passage de la tempête et plus précisément l'heure à laquelle les conditions sont les plus mauvaises. Lors des tempêtes, le passage du front froid correspond à une augmentation de l'intensité des rafales et l'apparition d'orages comme pour le cas de Kyrill. En plein jour, notamment aux heures de pointe, la population est plus exposée qu'en pleine nuit lorsque celle-ci est à l'abris. Dans les pays les plus touchés qui sont le Royaume-Uni et l'Allemagne, le front froid de la tempête Kyrill est passé en plein jour alors que celui de Niklas a traversé le Royaume-Uni la nuit en atteignant l'Allemagne en matinée. Cela explique, d'une part le nombre important de victimes en Allemagne (9 sur 11) lors de la tempête Niklas, et d'autre part, la supériorité de Kyrill en terme de pertes économiques et de victimes.

6. Prévisions

Le chapitre portera son regard sur la période précédant l'arrivée des tempêtes Kyrill et Niklas et plus particulièrement leurs prévisions par les services météorologiques. Le but est de comparer non seulement les différentes prévisions entre les deux tempêtes, mais aussi les écarts entre les prévisions et la réalité. Ce chapitre analysera les facteurs humains relatifs aux passages des deux tempêtes. C'est-à-dire, comment ces dernières ont-elles été perçues avant leur passage par la population et si des mesures d'alerte adaptées ont été prises.

Pour ce qui est des prévisions, le 30 mars 2015 soit 1 jour avant le passage de Niklas au-dessus de l'Allemagne, le DWD (Deutscher Wetterdienst) a annoncé l'arrivée de la perturbation Niklas qui se situait au Nord-Ouest du Royaume-Uni (Leyser, 2015). L'évolution de la tempête donnée par les prévisions montrent la trajectoire avec ses incertitudes jusqu'au passage de son centre au-dessus du Danemark prévu le mardi 31 mars entre 06:00 UTC et 18:00 UTC. Les prévisions mettent un point particulier sur cette date en affichant la carte des dangers dont les vents sont prévus de force 10 – 11 sur l'échelle de Beaufort dans le Nord et les Alpes et de 9 – 10 dans le reste du pays. Les précipitations maximales sont prévues dans les régions montagneuses au Sud-Est du pays ainsi qu'en Forêt-Noire. Pour le reste de la semaine, la force du vent est annoncée en diminution à partir du mercredi 1er avril, mais les précipitations continueront jusqu'en fin de semaine. D'autres annonces ont été faites ce jour-ci, notamment par Wetter.info qui par sa publication du 30 mars annonce que Niklas sera plus fort que son prédécesseur Mike et sera d'un aussi gros calibre que Kyrill (Flor, 2015). Cette même source a publié un autre article un jour plus tard affirmant que Niklas alors considérée comme une tempête était en train de prendre l'inertie d'un ouragan, c'est-à-dire avec une intensité de 12 sur l'échelle de Beaufort. Les prévisions bien que données un jour avant la tempête par le DWD donnent de bonnes indications très précises et permettent à la majorité de la population de se préparer au mieux aux différents dangers qui sont, dans le cas de Niklas, le vent et la pluie.

Kyrill a été premièrement détectée 5 jours avant son évolution en tempête par le modèle britannique UKMO. 3 à 4 jours avant, l'Unwetterzentrale a donné des informations relatant la tempête imminente et 30 à 36 heures avant, l'alarme concernant un danger de tempête à caractère d'ouragan. L'Unwetterzentrale est une centrale d'alerte privée appartenant à l'entreprise de prévisions météorologiques européene MeteoGroup. A ce moment, les différents modèles de prévisions n'étaient pas encore très précis et donnaient des informations différentes concernant la réele intensité de la perturbation. Environ 12 à 8 heures avant le passage de la tempête, l'Allemagne était en état d'alerte rouge et quelques régions montagneuses et côtières étaient passées en violet (Unwetterzentrale, 2016).

Les prévisions annoncées le 17 janvier 2007 issues de la chaîne nationale allemande "Das Erste" prévoient des rafales de 150-180 km/h en montagne et pouvant aller jusqu'à 200 km/h localement. Pour le moyen pays, le Nord sera le plus touché avec des rafales de 110-140 km/h voir même jusqu'à 150 km/h dues au passage du front froid accompagné de fortes circulations verticales. La majeure partie du pays que sont le centre et le Sud-Est seront touchés par des vents de 100-130 km/h et le Sud-Ouest de 90-120 km/h. La carte des alertes issue de l'Unwetterzentrale montre que tout le pays est en alerte "rouge" qui signifie et que quelques régions côtières du Nord et dans les montagnes sont passées au "violet". Des orages sont à prévoir dans l'après-midi avec l'arivée du front froid dans le Nord du pays. Des dangers d'inondations sont aussi annoncés en montagne au centre du pays. Les précipitations persisteront jusqu'au samedi avec encore des risques d'inondations (Kachelmann, 2007). Ces prévisions reflètent bien ce qui c'est passé avec des vents plus forts dans le Nord ainsi qu'en montagne. Pour la tempête Kyrill, l'alarme s'est faite progressivement à mesure que les informations devenaient précises à partir du 17 janvier et s'est prolongée le 18 janvier jusqu'en fin de journée en faisant passer certains comtés au "violet" (*voir l'animation sur le site : http://www.unwetterzentrale.de/uwz/356.html).* Les niveaux d'alertes sont les suivants : Jaune : Préaletre qui signifie que les services météorologiques prévoient un évènement de mauvais temps dont la durée et l'intensité est incertaine. Orange : Alerte d'intempéries modérées. Rouge : Alerte de fortes intempéries. Violet : Alerte d'intempéries extrêmes (Unwetterzentrale). Kyrill fut l'évènement le plus marquant

depuis la création de l'Unwetterzentrale en 2003 avec 1084 comtés alarmés en même temps pour des dangers de tempêtes, fortes pluies et orages (Unwetterzentrale, 2016).
Du côté des prévisions et des alarmes, la gestion de celles-ci ne semblent pas avoir joué un rôle déterminant dans l'importante différence de dégâts occasionnés entre les tempêtes Kyrill et Niklas du fait que l'efficacité des prévisions et de l'alerte à la population étaient similaires dans les deux cas avec des prévisions précises et une alarme 1 jour à l'avance. Dans le domaine des tempêtes hivernales, il est très difficile de prévoir exactement l' intensité des tempêtes plus de deux jours avant leur arrivée. Ceci est dû aux multiples paramètres imprévisibles dont sont régies les tempêtes. La météorologie reste un ensemble de phénomènes au comportement chaotique impossibles à prédire avec exactitude.

7. Perceptions

Ce chapitre portera son regard sur les perceptions post-évènement notamment véhiculées par les médias. Plusieurs articles et publications sont analysés afin de déterminer la marque laissée par les tempêtes Kyrill et Niklas et le point de vue de la société sur les menaces que représentent les tempêtes extra-tropicales.

Selon un article de la RTS du 01.03.07, la tempête Kyrill a été perçue par les Britanniques comme la pire depuis 17 ans mais bien inférieure à Lothar. Par ces déclarations contradictoires, il faut bien comprendre que chaque tempête a des impacts différents entre les pays qu'elle touche selon son évolution et sa trajectoire. Lothar n'a pas eu la même trajectoire que Kyrill et a donc affecté les pays différemment comme la Grande-Bretagne qui a été plus marquée par la tempête Kyrill. En Allemagne, la tempête Kyrill est la plus grosse tempête depuis Lothar selon un article du journal "Der Spiegel" publié le 18.01.2007. Après avoir fait 11 victimes au Royaume-Uni, Kyrill est même qualifiée de "killer" par la publication du 19.01.2007 par le journal Britannique "The Sun". La tempête Niklas est, quant à elle, souvent comparée avec la tempête Kyrill, notamment par le journal Allemand "Der Spiegel" qui lors d'une publication du 1er Avril 2015 qualifie Niklas commefaisant partie des tempêtes les plus fortes depuis trois décennies et comme étant presque aussi forte que Kyrill. En Angleterre, la BBC et les médias parlent en premier lieu des victimes en Allemagne où la tempête a été la plus intense. Lors de catastrophes naturelles comme les tempêtes Kyrill et Niklas, les médias abordent en premier le sujet des victimes dont ce dernier fait le titre de nombreux articles. Puis, vient le sujet des rafales maximales, des dégâts et des pertes économiques. Les tempêtes sont donc perçues par la population via les médias au travers du nombre de victimes qu'elles engendrent ainsi que les dégâts qu'elles provoquent. Kyrill a eu beaucoup plus d'impact médiatique que Niklas, car en plus d'avoir provoqué plus de dégâts et de victimes, ses vents tempétueux se sont répandus dans une plus grande partie de l'Europe. Les tempêtes sont souvent comparées à d'autres épisodes tempétueux

récents dont l'intensité est plus élevée comme Kyrill comparée à Lothar et Niklas comparée à Kyrill. Le fait que les dépressions et les tempêtes portent toutes un prénom leur donne une sorte d'identité à laquelle la société et les médias peuvent même aller jusqu'à donner un sens à leurs effets dévastateurs. Par exemple dans le titre de l'article du journal "The Sun" qui ont joué sur les mots avec l'alliteration "*Kyrill's a killer*" qui se traduit en français "Kyrill est un tueur".

Depuis Lothar en 1999, l'image des tempêtes a évolué dans la société. La dangerosité de celles-ci a pris une grande place dans leur perception par la population d'aujourd'hui. "*Ce jour-là, dans notre région, nous avions eu de la chance bien plus probablement que nous ne nous l'imaginions alors.*" (Kaufmann, 2007: 1) Les jours précédant le passage de Lothar, les médias n'en avaient porté que peu d'intéret. Il se peut que cette dernière ait été sous-estimée car la société n'avait peut-être pas conscience du danger que représentaient les tempêtes. 7 ans plus tard, la tempête Kyrill a été médiatisée les jours précédents son arrivée ainsi que les jours suivants (Kaufmann, 2007). Il est donc probable que la société du 21e siècle ait pris conscience des dangers que représentent de tels évènements. Cette prise de conscience et cet intéret de plus en plus marqué par les tempêtes s'inscrit dans une société qui a pris en considération le réchauffement climatique et ses conscéquences sur la planète.

8. Discussion

8.1 Résultats

Le travail de comparaison des facteurs météorologiques a été effectué à partir de données sous formes de réanalyses publiées par différentes sources. Par exemple, l'analyse comparative de la phase de formation des tempêtes au dessus-des Etats-Unis a été effectuée avec des sources provenant de Weather Unisys utilisant le modèle ETA alors que les analyses lors du passage au-dessus de l'Europe proviennent des sources KNMI (Royal Netherlands Meteorological Institute) et NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) utilisant le modèle GFS. Ces différentes sources n'utilisent pas le même modèle pour leurs cartes météorologiques et cela peut induire un biais par rapport au suivi des tempêtes lorsque les analyses basculent d'un modèle à un autre. Dans l'idéal, on aurait utilisé un modèle pour toutes les analyses afin de diminuer la marge d'erreur. Le problème réside dans les dates et l'écart de temps entre Kyrill et Niklas qui ne correspondent pas dans le cas de Kyrill aux archives de certaines sources. Il est donc difficile de trouver une source contenant dans ses archives des données sur les deux tempêtes. Néanmoins, un point essentiel dans l'analyse a été conservé en comparant chaque type de données avec la même source. Certaines données comme la divergence n'ont pas pu être comparées du à l'absence d'archives analysant cette donnée. Cette dernière a été déterminée par la vitesse, l'emplacement et l'organisation du jet streak qui provoque une zone de forte divergence dans sa sortie gauche.

8.2 L'avenir des tempêtes

Le début du 21e siècle a vu naître un changement dans les relations entre l'homme et la planète. La société a largement pris en compte les causes anthropiques du réchauffement global et son impact sur le climat. En se souciant de plus en plus de l'avenir du climat, les institutions se tournent vers une politique de développement durable, car un fait s'est avéré, l'humanité est insignifiante face à la planète. Les violentes catastrophes naturelles telles que les tempêtes le prouvent. Ces dernières sont au coeur de diverses questions

concernant le changement climatique. Leur nombre ainsi que leur puissance dévastatrice vont-ils augmenter ? Plusieurs études concernant l'avenir des tempêtes dans un futur réchauffement climatique ont été rendues possibles dues à l'accessibilité à des données homogènes concernant la période du siècle passé. Ces données permettent de quantifier l'activité cyclonique durant les précédentes décennies afin de créer des prédictions mises en commun avec les différents scénarios climatiques. Néanmoins, les résultats de ces études, sensibles à la résolution spatiale et temporelle des différents modèles utilisés montrent une certaine variabilité. Les études donnent tout de même une réduction du nombre de cyclones en hiver ainsi qu'une augmentation d'évènements extrêmes notamment sur le Nord-Est de l'Atlantique et les îles britanniques (Ulbrich et al., 2009).

9. Conclusion

Le but de ce travail était de comparer les deux tempêtes Kyrill (2007) et Niklas (2015) depuis leur formation jusqu'à leur passage au-dessus de l'Europe afin de déterminer les causes de l'importance des dégâts engendrés par Kyrill. L'analyse comparative des tempêtes montre que les deux dépressions se sont formées suite à un important gradient de température étendu au-dessus des Etats-Unis. Elles ont ensuite subi une explosion dans leur cyclogenèse dès leur entrée dans l'Atlantique Nord causée par leur croisement avec le jet stream polaire. Niklas a pris une trajectoire courbe en direction du pôle alors que celle de Kyrill était zonale et donc plus directe. De plus, le cyclone secondaire Kyrill II a bénéficié d'une intensification importante grâce au fort jet stream présent dans l'Atlantique, ce qui l'a fait accélérer avant son entrée en Europe. Les impacts dévastateurs de Kyrill peuvent être expliqués en bonne partie par la vaste étendue de ses vents tempétueux causés par le maintien de sa basse pression centrale jusque dans l'Est de l'Europe. Le maintien de la pression basse de Kyrill a été favorisé par la présence d'un jet stream zonal comportant une séparation en trois branches. Le gradient de pression entre le centre de Kyrill et l'anticyclone des Açores était supérieur dû au rapprochement de ceux-ci ainsi que le minimum de pression atteint par Kyrill (961,7 hPa) plus faible que celui de Niklas (971,4 hPa). Le fait que Kyrill ait traversé l'Ouest de l'Europe en pleine journée a fortement augmenté ses impacts sur la population alors que Niklas est arrivé en Europe durant la nuit. Du côté de l'alerte, dans les deux cas, les services de prévisions ont pu prévenir correctement la population au minimum 1 jour à l'avance. Les tempêtes d'hiver deviennent de plus en plus médiatisées et sont souvent le fruit de comparaisons du nombre de dégâts et de victimes qu'elles provoquent. Par la signification que les médias attribuent aux tempêtes, ces derniers jouent un rôle important dans leurs perceptions par la population.

10. Références

- Ahrens, C. D. (2009) : *Meteorology Today : An Introduction to Weather, Climate and the Environment*. Belmont, CA, Brooks/Cole Cengage Learning.

- Déroche, M. S. (2014) : Detection a court-terme et long-terme des tempêtes hivernales a fort potentiel d'impact. Climatologie. Universite Pierre et Marie Curie – Paris VI, 2014. Francais. <NNT : 2014PA066578>. <tel- 01139979>.

- Estofex European Storm Forecast Experiment (2016). Estofex GFS Modelmaps. Surface maps: http://www.estofex.org/cgi-bin/sfcmaps/browse_maps.pl [Consulté le 04 avril 2016]

- Etienne, C. & Benniston, M. (2012) : Wind storm loss estimation in the Canton of Vaud, *Natural Hazards and Earth System Sciences*. Sci., 12, 3789,-3798, 2012.

- Fink, A. H., Brücher, T., Ermert, V., Krüger, A. & Pinto, J. G. (2009) : The European storm Kyrill in January 2007 : synoptic evolution, meteorological impacts and some considerations with respect to climate change, *Natural Hazards and Earth System Sciences.* Sci., 9, 405-423, 2009.

- Haeseler, S. & Lefebvre, C. (2015): Orkantief NIKLAS wütet am 31. März 2015 über Deutschland, *Deutscher Wetterdienst: https://www.dwd.de/DE/presse/hintergrundberichte/2015/Orkantief_NIKLAS_PDF.pdf?__blob=publicationFile&v=2* [Consulté le 03 avril 2016]

- IRI International Research Institute for Climate and Society (2016). Atmospheric Circulation : http://iridl.ldeo.columbia.edu/maproom/Global/Atm_Circulation/?bbox=bb%3A-58.46%3A21.106%3A61.56%3A77.227%3Abb [Consulté le 22 mars 2016]

- KNMI Royal Netherlands Meteorological Institute (2016). Archives de cartes météo européennes : http://www.knmi.nl/nederland nu/klimatologie/daggegevens/weerkaarten [Consulté le 06 février 2016]

- La climatologie (2016). NAO: http://la.climatologie.free.fr/nao/NAO.htm [Consulté le 07 juin 2016]

- Lin, Y-L. (2007) : *Mesoscale Dynamics.* 5.5 Flows over larger mesoscale mountains. Cambridge, Cambridge University Press.

- Malardel, S. (2009): *Fondamentaux de Météorologie, à l'école du temps, 2e édition*. Toulouse, Cépaduès-Editions.

- Météo France (2016). Phénomènes météo. Les tempêtes: http://www.meteofrance.fr/prevoir-le-temps/phenomenes-meteo/les-tempetes [Consulté le 06 février 2016]

- Nautischool (2015). Echelle de Beaufort : http://2015.nautischool.ch/pdf/Echelle_Beaufort2.pdf [Consulté le 06 février 2016]

- NOAA, National Oceanic and Atmospheric Administration, (2016). North Atlantic Oscillation (NAO): https://www.ncdc.noaa.gov/teleconnections/nao/ [Consulté le 22 mars 2016]

- NOAA, National Oceanic and Atmospheric Administration (2016). Earth System Research Laboratory, Physical Sciences Division. 6-Hourly NCEP/NCAR Reanalysis Data Composites: http://esrl.noaa.gov/psd/data/composites/hour/ [Consulté le 04 avril 2016]

- Swiss RE (2000). Storm over Europe – an underestimated risk : http://www.swissre.com/publications/Storm_over_Europe__An_underestimated_risk_.html [Consulté le 06 juin 2016]

- Swiss RE (2008). New Swiss Re sigma study: Catastrophe losses in 2007 were highest in Europe. : http://www.swissre.com/media/news_releases/Catastrophe_losses_in_2007_were_highest_in_Europe.html [Consulté le 11 mars 2016]

- Swiss RE (2015). Preliminary sigma estimates for firsthalf 2015: global catastrophes cause economic losses of USD 37 billion; number of victimes rises. :http://www.swissre.com/media/news_releases/Preliminary_sigma_estimates_for_first-half_2015.html [Consulté le 11 mars 2016]

- Swiss RE, (2016). Sigma-explorer: http://www.sigma-explorer.com/index.html [Consulté le 03 avril 2016]

- UEA University of East Anglia. Climatic Research Unit (2016). Tim Osborn: North Atlantic Oscillation idex data : https://crudata.uea.ac.uk/~timo/datapages/naoi.htm [Consulté le 22 mars 2016]

- Ulbrich, U., Leckebusch G. C. & Pinto, J. G. (2009) : Extra-tropical cyclones in the present and future climate: a review, *Theorical and Applied Climatology* (2009) 96:117–131 DOI 10.1007/s00704-008-0083-8.

- Unisys Weather (2016). Image and Map Archive. Upper Air Charts: http://weather.unisys.com/archive/eta_init/ [Consulté le 03 avril 2016]

- Wetterzentrale (2016). Top Karten. GFS Archiv: http://www.wetterzentrale.de/topkarten/fsavneur.html [Consulté le 24 juin 2016]

Articles de presse et médias :

- BBC News (2007). In full: Weather-related deaths: http://news.bbc.co.uk/2/hi/uk_news/england/6278139.stm [Consulté le 29 mars 2016]

- Berg, O. (2015). Elf Tote während Orkan "Niklas", *Merkur.de*, 01.04.2015: http://www.merkur.de/welt/mindestens-neun-tote-durch-sturm-niklas-zr-4873344.html [Consulté le 29 mars 2016]

- Flor, R. (2015). Neues Sturmtief "Niklas" noch stärker als "Mike" :http://www.t-online.de/wetter/unwetterwarnung-sturmtief-niklas-wird-noch-schlimmer/73456564 [Consulté le 29 mars 2016]

- GDV, die deutschen versicherer (2015). Sturm "Niklas" verursacht Schäden in Höhe von 750 Millionen Euro :http://www.gdv.de/2015/04/sturm-niklas-verursacht-schaeden-in-hoehe-von-750-millionen-euro/ [Consulté le 11 mars 2016]

- Kachelmann, J. (2009). *Tagesthemen Wetter 17.01.2007 Orkan Kyrill.* Kanal von germanstorms, 3'22": https://www.youtube.com/watch?v=OH1syR3sQPo [Consulté le 29 mars 2016]

- Kaufmann, L. (2007). Lothar en 1999 – Kyrill en 2007: http://www.politis.ch/carnets/2007/01/19/lothar-en-1999-kyrill-en-2007/ [Consulté le 29 mars 2016]

- Leyser, A. (2015). *30.03.2015 Unwetterwarnung – Deutscher Wetterdienst (DWD).* DWD. Deutscher Wetterdienst, 2'51": https://www.youtube.com/watch?v=__D1h0_91b8 [Consulté le 29 mars 2016]

- O'Shea, G. Scott, J. & Parker, A. (2007). 90mph storm Kyrill's a killer, *The Sun*, 19.01.2007:http://www.thesun.co.uk/sol/homepage/news/28921/90mph-storm-Kyrills-a-killer.html [Consulté le 29 mars 2016]

- RTS info (2007). La tempête Kyrill fait au moins 45 morts : http://www.rts.ch/info/monde/1128255-la-tempete-kyrill-fait-au-moins-45-morts.html [Consulté le 29 mars 2016]

- Spiegel Online (2007). Panorama, Nachrichtenüberblick: Das war der Orkan "Kyrill": http://www.spiegel.de/panorama/nachrichtenueberblick-das-war-der-orkan-kyrill-a-460572.html [Consulté le 29 mars 2016]

- Spiegel Online (2015). Panorama, Sturm-Bilanz: Das grosse Aufräumen nach Orkan "Niklas": http://www.spiegel.de/panorama/orkan-niklas-richtet-grosse-schaeden-an-a-1026729.html [Consulté le 29 mars 2016]

- TAZ. Die tagezeitung (2007). Orkan "Kyrill" hält Helfer weiter auf Trab: http://www.taz.de/1/archiv/?dig=2007/01/22/a0108 [Consulté le 29 mars 2016]

- Unwetterzentrale (2016). Orkantief KYRILL: Vorhersagbarkeit des Ereignisses und Warnmanagement der Unwetterzentrale: http://www.unwetterzentrale.de/uwz/356.html [Consulté le 29 mars 2016]

- Wetter.info (2015). Unwetterwarnung, Sturmtief "Niklas" wird zum Orkan: http://www.wetter.info/unwetterwarnung-orkan-niklas-erreicht-jetzt-hoehepunkt/73474574 [Consulté le 29 mars 2016]