

STAGE DE RECHERCHE

réalisé par Stéphane Beck

encadré par Gwendal Rivière et Philippe Arbogast

Etude de cas de transition rapide vers les 2 phases de l'Oscillation Nord Atlantique

au Centre National de Recherches Météorologiques de Toulouse

du 1^{er} février 2011 au 15 juin 2011

Master OASC à l'université Paul Sabatier de Toulouse



REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier tout particulièrement Gwendal Rivière et Philippe Arbogast qui m'ont beaucoup guidé, conseillé et encadré tout au long de ce stage. Je dois aussi beaucoup à Karine Maynard, toujours présente au bon moment. Je remercie aussi l'équipe RECYF pour son accueil et sa convivialité. Enfin, je souhaite remercier à la fois l'université Paul Sabatier et Météo-France, sans qui ce stage n'aurait pas eu lieu. Les encadrants du M2 OASC (Claire Doubremelle et Sylvain Coquillat) ont quant à eux très bien organisés les cours et les stages de ce master.

RESUME

L'oscillation nord atlantique est un phénomène atmosphérique et océanique qui a encore bien des secrets à révéler aux chercheurs. Son étude pourrait s'avérer utile dans des domaines aussi variés que les prévisions météo à 15 jours, les tendances saisonnières, le phénomène El Niño, ou les courants océaniques. Au cours de ce stage de master, je me suis intéressé à poursuivre certaines recherches scientifiques ayant déjà été réalisées sur ce sujet. En 4 mois et demi, j'ai étudié les transitions rapides vers les 2 phases de la NAO, à savoir la NAO+ et la NAO-. L'objectif était de comprendre ce qui provoque les basculements vers ces 2 phases. J'ai vite compris que c'était lié aux déferlements des ondes de Rossby. Un déferlement cyclonique est associé à des flux de quantité de mouvement négatifs et provoque un basculement vers la NAO-. C'est tout le contraire pour un déferlement anticyclonique. Afin de trouver des situations intéressantes, j'ai regardé l'évolution de l'indice NAO au cours de nombreux mois hivernaux. L'hiver a été choisi afin de trouver de fortes variations de l'indice NAO. Par manque de temps, seules 2 situations de basculement vers la NAO- ont été étudiées. Il s'agit de décembre 2009 et de novembre 2010. Sous Ferret, plusieurs cartes représentant différents paramètres météorologiques ont été créées. Ceci dans le but de les comparer et de trouver les causes à l'origine d'un début de NAO-. Les déferlements cycloniques ont ainsi été matérialisés sur différentes cartes.

Par la suite, l'inversion du tourbillon potentiel (PV) a été utilisée pour réaliser des expériences montrant l'influence de tel ou tel système en amont sur la situation météorologique générale des jours suivants. Ces expériences étaient réalisées grâce au super-calculateur de Météo-France. Elles ne concernaient que décembre 2009. Tout d'abord, c'est un paquet d'ondes de Rossby sur le Pacifique qui a été étudié. L'objectif était d'atténuer l'anomalie de PV qui lui est associée à une date fixée (le 03/12/09 à 0h00), puis de lancer la prévision Arpège à partir de cet état initial virtuel. Ensuite, le résultat obtenu était comparé aux analyses Arpèges (réalité) ou au run de contrôle (prévision Arpège lancée à partir de la vraie situation du 03/12/09). Parfois les différences étaient minces. D'autres fois, cela provoquait des retards dans le début du basculement vers la NAO-. Ce dernier se déclenchait avec 24 heures de retard par exemple. Cela prouvait donc l'influence du paquet d'ondes en question.

Pour une autre expérience d'inversion du PV, c'est le filtre passe-bas qui a été changé. Ce dernier a été rendu plus sélectif en basse fréquence. Au départ, la période de coupure était de 8 jours. Pour cette expérience, elle a été augmentée à 12 jours. Il a alors été montré que les phénomènes d'une durée de vie de 8 à 12 jours influencent le déclenchement d'une phase NAO-. En effet, l'indice NAO de cette nouvelle expérience descendait moins vite vers les valeurs négatives de la NAO-.

Enfin, une expérience dans la stratosphère a été réalisée. En effet, des recherches ont montré que les changements de phase de la NAM (mode annulaire de l'hémisphère nord) démarrent en haut de la stratosphère avant de gagner la troposphère puis le sol. L'objectif de cette dernière expérience d'inversion du PV était de voir s'il en est de même pour la NAO. Un nouvel état initial a alors été créé dans la stratosphère. Cet état initial de la stratosphère était celui du début de basculement vers la NAO- (le 07/12/09). Dans la troposphère, on gardait la situation présente 4 jours auparavant. On pensait voir l'indice NAO plonger vers les valeurs négatives plus rapidement. Cela n'a pas été le cas. Ceci résultait du fait qu'il faut un certain temps à la stratosphère pour influencer la troposphère. Par ailleurs, modifier la stratosphère n'est pas une condition suffisante pour créer un basculement. Il aurait été intéressant de refaire la même expérience, en anticipant de plusieurs jours l'instant initial.

Ce stage n'est qu'une mince partie de ce qui peut être fait sur le sujet. Il reste beaucoup à faire. Pour une thèse sur le même thème, il serait possible de reprendre toutes ces expériences pour la NAO+. Les expériences sur la NAO- pourraient être approfondies. Par ailleurs, il est aussi envisageable de s'intéresser aux 2 autres régimes de temps sur l'Europe : la dorsale et le blocage. Il serait bien d'étudier les causes des 4 régimes de temps en fonction de la période de l'année. Enfin, on pourrait voir si le réchauffement climatique influence ces régimes de temps, avec une étude sur le siècle écoulé.

Table des matières

1	INTRODUCTION	3
1.1	Cadre du stage	3
1.2	Présentation du sujet de stage et de ses objectifs	3
2	METHODOLOGIE	6
2.1	Sources bibliographiques	6
2.2	Outils informatiques	7
2.3	Bases de données utilisées	8
3	ETUDE DE 2 TRANSITIONS RAPIDES VERS LA NAO-	9
3.1	L'indice NAO	9
3.2	La situation de décembre 2009	10
3.3	La situation de novembre 2010	14
4	UTILISATION DE L'INVERSION DU PV	16
4.1	Premières expériences sous Olive	16
4.2	Expérience avec un nouveau filtre basse fréquence	20
4.3	Expérience d'inversion dans la stratosphère	22
5	DISCUSSION	25
5.1	Ce qui a été constaté	25
5.2	Ce qui aurait pu être approfondi	26
5.3	Ce qui reste à faire	27
6	CONCLUSION	28
7	BIBLIOGRAPHIE	29

1 INTRODUCTION

1.1 Cadre du stage

Ce stage en milieu de recherche a duré 4 mois et demi. Il a commencé le 1^{er} février 2011 et s'est achevé le 15 juin 2011. Il correspond au second semestre du M2 OASC de l'Université Paul Sabatier (UPS) de Toulouse. Ce master Océan Atmosphère Surfaces Continentales est un master recherche, qui comme son nom l'indique comporte 3 spécialités :

- 1) L'étude des océans
- 2) L'étude de l'atmosphère
- 3) L'étude des continents

Ces 3 spécialités sont très complémentaires et très reliées entre elles. Les cours associés se sont déroulés au 1^{er} semestre à l'Ecole Nationale de la Météorologie (ENM), au sein de la Météopôle toulousaine. Il s'agit là d'un partenariat et d'une cohabilitation entre l'ENM et l'UPS. Dans ce cadre, le choix de sujets de stage et de laboratoires d'accueil était vaste. Chacun pouvant trouver une thématique de recherche lui convenant. L'objectif du stage était double :

- 1) découvrir le métier de chercheur
- 2) exploiter les cours du 1^{er} semestre correspondants au sujet de stage choisi

En ce qui me concerne, passionné par la météorologie, j'ai choisi une thématique de recherche en relation avec l'atmosphère. J'avais principalement le choix entre 2 laboratoires d'accueil :

- 1) le Laboratoire d'Aérodynamique (LA) de l'Observatoire Midi-Pyrénées (OMP)
- 2) le Centre National de Recherches Météorologiques (CNRM) de Météo-France

Il s'est trouvé que j'ai choisi un sujet de recherches étudié au CNRM. Le CNRM se situe au sein de la Météopôle toulousaine, car il fait parti de Météo-France. C'est aussi un laboratoire du CNRS (Centre National de la Recherche Scientifique). On l'appelle CNRM-GAME dans le cadre de son partenariat avec le CNRS. Il se divise en 8 groupes de recherches. Certains de ces groupes ne sont pas basés à la Météopôle (un à Brest, un à Grenoble, un à Toulouse-Francazal). Chacun de ces groupes de recherches se divisent en plusieurs équipes de recherches, en fonction de leurs thématiques de recherches.

Ayant choisi comme thématique de recherche l'Oscillation Nord Atlantique, j'ai effectué mon stage au sein de l'équipe RECYF (Recherches et Expérimentations sur les CYclogénèses et les Fronts). L'équipe RECYF faisant elle-même partie du groupe GMAP (Groupe de Modélisation et d'Assimilation pour la Prévision). Le groupe GMAP contenant 4 autres équipes de recherches. Il est dirigé par Alain Joly. Pour ce stage, j'étais encadré par Gwendal Rivière et Philippe Arbogast. Gwendal Rivière enseigne quelques cours à l'ENM, dont l'option météorologie dynamique en M2 OASC. J'avais bien évidemment suivi cette option. Philippe Arbogast est quant à lui le directeur de RECYF. Enfin, ce stage s'est également effectué avec le soutien de Karine Maynard, chercheuse au centre de prévision de Météo-France. C'est en effet grâce à elle que certaines expériences ont pu être menées à bien.

1.2 Présentation du sujet de stage et de ses objectifs

L'Oscillation Nord Atlantique (NAO en anglais pour North Atlantic Oscillation) comporte 2 phases. La phase négative NAO- et la phase positive NAO+. Ces 2 phases représentent 2 des 4 régimes de temps que l'on observe sur l'Europe. Les 2 autres régimes de temps étant la dorsale et le blocage. Ci-après, figurent ces 4 régimes de temps :

Cartographie des regimes d'hiver selon l'anomalie Z500

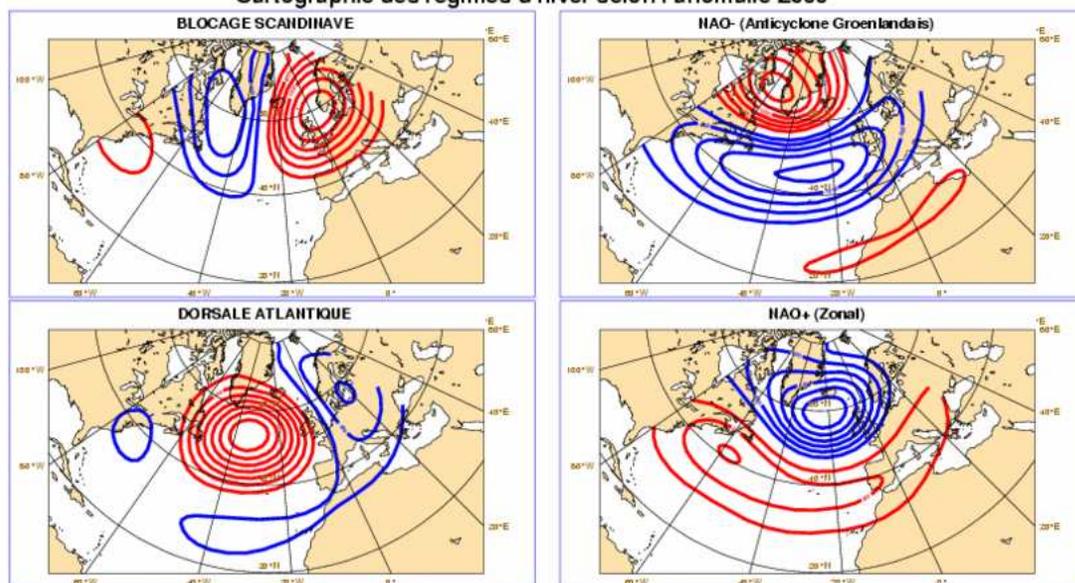


FIG. 1 – Représentation des 4 régimes de temps possibles sur l'Europe. En rouge, figurent les anomalies positives (anticyclones relatifs) du géopotential à 500hPa. En bleu, figurent les anomalies négatives (dépressions relatives) du géopotential à 500hPa.

Ces 4 régimes de temps sont très étudiés au sein de mon équipe de recherche RECYF. Bruno Joly, mon collègue de bureau, a déjà écrit plusieurs articles là-dessus. Il m'a bien aidé à la compréhension de ce concept météorologique, nouveau pour moi mais très intéressant. Cela m'a d'ailleurs donné des idées de recherches pour la suite.

Au cours de ce stage sur la NAO, je ne me suis pas intéressé au régime de dorsale ni au régime de blocage. C'est une possibilité de recherches dans le cadre d'une thèse sur le même thème. Ce qui différencie la NAO- de la NAO+, c'est la position des anticyclones et des dépressions sur l'Europe. En NAO-, les anticyclones sont centrés sur le nord de l'Europe vers l'Islande ou le Groenland. Les dépressions circulent alors plus au Sud qu'en temps normal, et intéressent le sud de la France et les régions méditerranéennes. Le courant-jet est lui aussi plus au sud qu'en temps normal. Il est également moins puissant. La NAO- est synonyme d'hivers froids. En NAO+, c'est tout le contraire. Les anticyclones sont très au sud vers les Açores et les dépressions circulent sur le nord de l'Europe. Le courant-jet est plus au nord et plus fort. La NAO+ est synonyme d'hivers doux et humide avec risque de tempêtes. Au cours de ce stage, je me suis intéressé aux transitions de phase, c'est à dire aux basculements d'une phase à une autre. J'ai sélectionné des cas de transitions rapides. Ces transitions sont liées à ce qu'on appelle des déferlements, c'est à dire des changements de trajectoires des dépressions. On parle de déferlement cyclonique quand on va vers la NAO-. Une dépression va alors plonger vers le sud. On parle de déferlement anticyclonique lorsqu'on se dirige vers la NAO+. Une dépression va alors remonter très au nord. Comme on le verra par la suite, parler d'une dépression est un abus de langage. Il s'agit en fait d'un ensemble de dépressions et d'anticyclones.

L'intérêt d'une telle étude est multiple. Tout d'abord, en comprenant mieux les processus à l'origine des changements de phase de la NAO, on pourra mieux anticiper les changements de temps sur l'Europe. Cette anticipation pourra atteindre une quinzaine de jours, dans la mesure où certains changements débutent sur le Pacifique. Ensuite, une telle étude peut aider à l'élaboration

des tendances saisonnières en Europe. Par ailleurs, une étude plus poussée que celle de ce stage trop court pourrait permettre d'établir des liens entre la NAO et le phénomène El Niño. Enfin avec plus de temps, il serait également intéressant de rechercher les liens entre l'atmosphère et l'océan.

Au cours de ce stage, le principal objectif était de sélectionner certaines situations de transitions rapides vers la NAO+ ou la NAO-. Le but premier était de les analyser à l'aide de différentes cartes afin de mieux les comprendre. Il était important d'arriver à cerner certaines caractéristiques atypiques d'un basculement de la phase de la NAO. L'autre objectif était d'utiliser l'inversion du tourbillon potentiel pour mieux mettre en évidence l'importance de telle ou telle caractéristique dans la mise en place d'un changement de type de temps. L'inversion du tourbillon potentiel (PV en anglais pour Potential Vorticity) consiste à changer les conditions de PV à un instant donné et dans une zone donnée. On supprime localement l'anomalie du tourbillon potentiel à un instant initial. Puis on fait tourner le modèle, et on regarde si au fil du temps quelque chose change par rapport à la situation de référence. On peut alors en déduire l'influence d'une anomalie de PV sur la situation météorologique de grande échelle. Bien évidemment, il va de soit qu'au cours de ce stage la recherche bibliographique, la prise en main des outils informatiques et l'insertion au sein de l'équipe RECYF étaient des objectifs très importants.

Ce projet de recherche s'insère dans un ensemble d'études scientifiques internationales réalisées sur le même thème. De nombreuses autres recherches ont d'ores et déjà été effectuées sur la NAO. Par ailleurs, la NAO est très liée à l'oscillation arctique (AO en anglais pour Arctic Oscillation). Dans l'article de Thompson and Wallace (1998), une comparaison entre les 2 phénomènes est réalisée. On peut ainsi constater leurs points communs et leurs différences. Ces dernières résident dans la zone d'étude. Pour la NAO, on est concentré sur l'Atlantique nord, tandis que pour l'AO on s'intéresse à tout l'hémisphère nord à partir 20° de latitude. On peut donc considérer la NAO comme un aspect régional de l'AO. Par ailleurs, l'AO- est associée à des hautes pressions près du pôle nord, tandis que l'AO+ est associée à des basses pressions vers le pôle nord. Généralement ces 2 phénomènes (NAO et AO) sont assez bien corrélés. L'ensemble des 2 phénomènes forme ce que l'on appelle le mode annulaire de l'hémisphère nord (NAM en anglais pour Northern Annular Mode). Il s'agit comme son nom l'indique d'un phénomène hémisphérique. Il existe un phénomène voisin dans l'hémisphère sud. Ces modes annulaires sont très détaillés dans l'article de Thompson and Wallace (2000). La NAM+ est associée à un fort vortex polaire tandis que la NAM- est combinée à un faible vortex polaire.

On voit donc que la NAO est reliée à d'autres phénomènes atmosphériques. Et en plus, je n'ai pas mentionné les phénomènes océaniques. D'autre part, de nombreuses études ont déjà été menées pour identifier les phénomènes à l'origine des changements de phase de la NAO. Dans l'article de Benedict et al. (2004), toute une étude a été réalisée sur les différents déferlements d'ondes de Rossby. Ces derniers prennent souvent naissance sur le Pacifique, et en arrivant sur l'Atlantique ils provoquent un changement de phase de l'indice NAO. La première partie de ce stage consistait à étudier ces déferlements d'ondes de Rossby. Enfin, d'autres hypothèses sur les changements de phase de l'indice NAO existent. Il semblerait que le changement de phase de la NAO (mais aussi plus généralement de la NAM) s'amorce dans la stratosphère avant de gagner la troposphère. On dirait que les changements démarrent tout en haut de l'atmosphère avant de se propager vers le sol. La fin de ce stage visait à tester cette théorie.

Le graphique ci-après est extrait de l'article Baldwin and Dunkerton (2001), qui explique très bien la théorie d'amorce d'un changement de régime à partir de la stratosphère. On voit très bien sur ce graphique que les changements de l'indice NAM ne se produisent pas au même moment que l'on soit près du sol ou à haute altitude. On voit qu'au sol les phénomènes sont en retard par rapport à ce qui se passe en altitude. On voit bien que les contours ne sont pas verticaux comme on pourrait le soupçonner. Ils sont inclinés vers la droite en allant du haut de la stratosphère vers le sol. Ceci est particulièrement vrai pour de grandes transitions comme les transitions de décembre 1998 (vers la

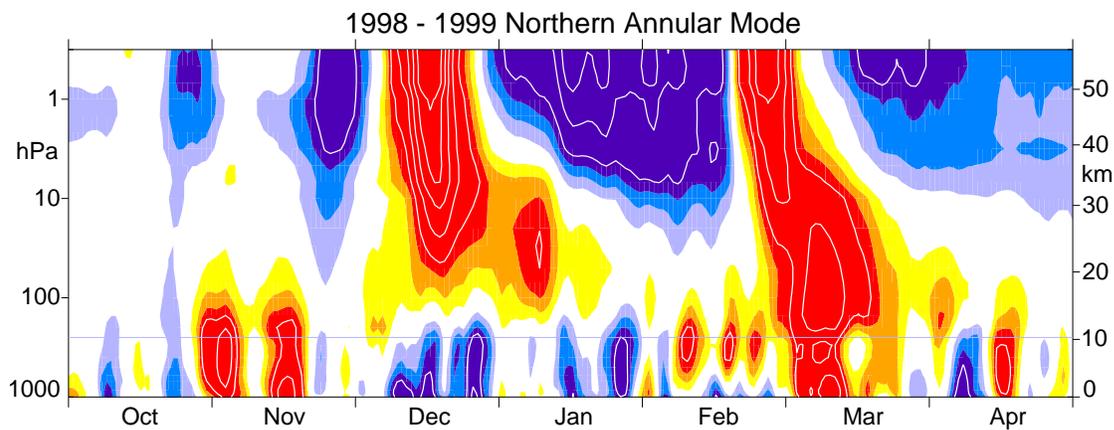


FIG. 2 – Représentation de l'indice du mode annulaire dans l'hémisphère nord. Sur l'axe des ordonnées, ce schéma part du sol (1000hPa) et va jusqu'au sommet de la stratosphère (moins de 1hPa). La ligne horizontale symbolise la frontière entre la troposphère (en dessous) et la stratosphère (au-dessus). En abscisse, on va d'octobre 1998 à avril 1999. On est donc centré sur l'hiver 1998/1999. Les zones rouges indiquent un indice négatif et les zones bleues correspondent à un indice positif. Plus on est dans le bleu et plus l'indice est positif. Plus on est dans le rouge et plus l'indice est négatif. Les zones blanches représentent un indice proche de 0 (entre -0,25 et +0,25). Les contours colorés vont de 0,25 en 0,25. Les lignes blanches vont de 0,5 en 0,5 et partent soit de -1 (zones rouges), soit de +1 (zones bleues).

NAM-), début janvier à début février 1999 (vers la NAM+), et fin février à début mars 1999 (vers la NAM-). A la fin de mon stage, j'ai réalisé une expérience sur la stratosphère visant à confirmer ou à infirmer cette théorie. Je me suis alors intéressé à l'influence de la stratosphère sur la NAO, en ayant conscience que la NAO est différente de la NAM.

2 METHODOLOGIE

2.1 Sources bibliographiques

Tout au long de mon stage, des recherches bibliographiques ont été réalisées. Ceci dans le but de mieux cerner le sujet de recherche et de pouvoir le relier à d'autres domaines connexes. Cela permettait de constater où en sont les recherches sur l'oscillation nord atlantique. Cela a permis une certaine prise conscience de ce qui a été fait et ce qui reste à faire. A la fin de ce rapport, figurent toutes les sources dans la bibliographie. Il est à noter que certains cours du 1^{er} semestre du M2 OASC ont été utilisés. Il s'agit notamment des 2 cours de météorologie dynamique :

- 1) celui du tronc commun enseigné par Jean-Pierre Cammas
- 2) celui en option enseigné par mon maitre de stage Gwendal Rivière

En effet, l'étude de la NAO est avant tout un sujet de météorologie dynamique. Toutefois, le cours de Frank Roux sur le système climatique a également été utilisé. C'est d'ailleurs dans ce cours que j'avais découvert la NAO et que j'y ai pris goût, de part toutes les recherches qui restent à accomplir dans ce domaine. Plusieurs articles en anglais ont aussi été utilisés, car la plupart des grandes revues scientifiques sont en anglais. Enfin, j'ai aussi trouvé 2 articles scientifiques en français :

- 1) Du changement climatique aux régimes de temps : l'oscillation nord atlantique *Christophe Cassou*
- 2) L'inversion du tourbillon potentiel : un outil pour comprendre le creusement des dépressions

Ce dernier article a été rédigé par mon maitre de stage Philippe Arbogast, également directeur de

RECYF. Ces 2 articles sont très importants dans la mesure où ils traitent de la NAO et de l'inversion du tourbillon potentiel. Ces 2 articles sont donc au coeur de ce sujet de stage. Qui plus est, ils ont obtenu le prix Prud'homme respectivement en 2002 et 2000.

2.2 Outils informatiques

Au cours de ce stage, plusieurs outils informatiques ont été utilisés. D'abord, le logiciel FERRET a été le plus utile tout au long de ce stage. C'est un logiciel de programmation qui possède son propre langage. A ce sujet, le site internet présent dans la bibliographie constituait une aide précieuse avec toutes les commandes FERRET. Il est très utile pour obtenir des cartes ou des champs de différents paramètres météorologiques. Pour ce faire, des fichiers de données netcdf (extension en .nc) étaient utilisés, puis à l'aide d'un programme sous FERRET (extension des VI en .jnl), des fichiers images étaient obtenus (extension en .plt). Pour finir, les fichiers images (.plt) étaient convertis en images PostScript (.eps) plus lisibles sur l'écran. Je me constituais également un double de tous ces fichiers eps sous le format pdf plus pratique pour les impressions. Chaque fichier de données contenait les valeurs d'un paramètre météorologique (géopotential, vent zonal, vent méridien, tourbillon relatif, tourbillon potentiel, ...) en fonction de 4 variables :

- 1) la longitude
- 2) la latitude
- 3) la pression (c'est à dire l'altitude)
- 4) le temps (je choisissais la période qui m'intéressait et l'intervalle de temps entre 2 instants)

Certains fichiers de données étaient très lourds. Il fallait donc soit réduire la période étudiée, soit augmenter l'intervalle de temps entre 2 instants. Lors de la programmation, des graphiques (plot) ou des cartes (fill) pouvaient être construits. Les graphiques représentaient un ou plusieurs paramètres météorologiques en fonction d'une variable. Les cartes permettaient d'obtenir 2 paramètres météorologiques (l'un en couleur et l'autre en contours) en fonction de 2 variables. Une fois que les fichiers images souhaités avaient été obtenus, ils étaient organisés dans un fichier latex pour pouvoir les comparer ou les associer. En ce qui concerne le logiciel latex, ce rapport a été entièrement rédigé sous latex. Certaines commandes peuvent en effet s'avérer très utiles pour la rédaction d'un rapport et la disposition des figures les plus pertinentes. L'obtention d'images PostScript était d'ailleurs une nécessité pour les inclure dans un fichier latex. Toutes ces figures étaient réalisées dans le but de bien comprendre les transitions de phase de la NAO. En les analysant, des conjectures pouvaient être faites sur les origines de ces changements de phase. Ces hypothèses tenaient compte de la comparaison de plusieurs types de cartes représentant différents paramètres météorologiques. Pour concevoir toutes les figures, l'article de Rivière and Orlanski (2007) servait de modèle. Certains types de figures provenaient en effet directement des figures de cet article. Ce dernier avait en effet de nombreux objectifs communs avec ce stage, à savoir trouver les causes des changements de phase de la NAO. Dans la suite de ce rapport, quelques explications seront apportées (chapitres 3 et 4).

D'autre part, le logiciel Olive a aussi été utilisé. Il s'agit d'un logiciel propre à Météo-France. Il permet de réaliser des expériences de modélisation. Pour ce faire, on conçoit sur Olive l'expérience à réaliser, puis on la lance. Elle va alors se réaliser en utilisant le super-calculateur de Météo-France. Certaines fois, elle n'arrivera pas à terme. Il se peut qu'il s'agisse d'une erreur de conception. Mais il se peut aussi que l'expérience soit trop longue. En effet, de nombreuses personnes utilisent le super-calculateur de Météo-France. Pour éviter qu'il n'y ait saturation à cause d'un utilisateur, il est prévu de préciser lors de la conception d'une expérience sa durée maximale de calculs à ne pas dépasser. Ceci dans le but de permettre au super-calculateur de mieux gérer l'ordre de passage des expériences. Par conséquent, il arrive qu'une expérience dure plus de 24 heures parce qu'elle est longue et qu'elle est souvent mise en attente entre 2 étapes de calcul. Le super-calculateur est communément appelé Yuki

par ses utilisateurs. Une fois les expériences terminées, elles sont stockées sur un logiciel de stockage surnommé Delage ou Cougar. Les expériences que j'ai menées sur Olive étaient des expériences d'inversion du tourbillon potentiel. Leur but était de prouver que telle ou telle anomalie était à l'origine d'un changement de phase de la NAO. Elles n'ont pas toujours abouti sur des résultats satisfaisants. Mais c'est aussi cela la recherche.

2.3 Bases de données utilisées

Pour obtenir des données, le site internet du CEPMMT (Centre Européen de Prévisions Météorologiques à Moyen Terme), plus couramment appelé CEP, s'est avéré d'une grande utilité. Le CEP est basé à Reading en Grande-Bretagne. En anglais, il est appelé ECMWF pour European Centre for Medium-Range Weather Forecasts. Le CEP possède plusieurs bases de données. Au cours de ce stage, ce sont les bases de données issues de réanalyses qui m'intéressaient. Une réanalyse est une analyse de la situation météorologique réalisée après coup (en retournant dans le passé), contrairement aux prévisions météo qui sont des anticipations. L'avantage des réanalyses par rapport aux prévisions, c'est qu'elles sont beaucoup plus proches de la réalité dans la mesure où l'on dispose de toutes les données pour les réaliser. En prévision, il faut toujours faire des hypothèses, car on ne possède pas toutes les informations sur ce qui va se passer ! C'est bien là la difficulté des prévisions. En ce qui concerne les réanalyses, ce sont des analyses de ce qui s'est déjà passé. On peut donc considérer qu'il s'agit d'une bonne représentation de la situation passée.

Le CEP dispose de plusieurs réanalyses, parmi lesquelles ERA-40 et ERA-interim. Pour ce stage, c'est ERA-interim qui a été utilisée. C'est une importante base de données. Elle permet de constituer des fichiers netcdf (.nc) ou des fichiers grib (.grib). J'ai principalement créé des fichiers netcdf, comme expliqué plus haut. En bibliographie figure le site internet du CEP donnant accès à la base de données ERA-interim. Avec ERA-interim, on a le choix parmi une quinzaine de paramètres météorologiques. On peut remonter jusqu'en 1989 et elle est régulièrement remise à jour avec un retard de 3 mois entre l'instant présent et les dernières dates rajoutées dans la base de données. Ce qui est pratique avec ERA-interim, c'est qu'on peut choisir d'avoir soit des valeurs toutes les 6 heures, soit des valeurs journalières, mais aussi des moyennes mensuelles, ... On peut également choisir un axe vertical fonction de la pression, de la température potentielle ou du tourbillon potentiel. D'autre part, on obtient les valeurs du paramètre choisi tous les 1.5° de longitude et de latitude. Cela fait 240 valeurs suivant la longitude et 121 valeurs suivant la latitude. Par ailleurs, il fallait faire en sorte que les fichiers ne soient pas trop long à télécharger. Par conséquent, je ne sélectionnais que 5 niveaux de pression. La plupart du temps, il s'agissait de : 850, 500, 100, 10, 1 hPa. Ceci dans le but d'avoir un aperçu de toute la troposphère mais aussi de toute la stratosphère. Concernant la période étudiée, je me contentais de 4 mois hivernaux à savoir : novembre, décembre, janvier, février. C'est en effet en hiver, que l'on a les changements de phase de la NAO les plus rapides.

D'autre part, les données de Météo-France ont aussi été utilisées, par le biais du modèle Arpège. Lors des expériences d'inversion du tourbillon potentiel, les analyses ou les prévisions du modèle Arpège servaient comme point de repère. Il est important de bien distinguer les analyses Arpège des prévisions Arpège. La prévision démarre d'une analyse à un instant donné puis s'obtient en faisant tourner le modèle Arpège jusqu'à une certaine échéance. Concernant l'analyse, il s'agit d'un regroupement des analyses de tous les instants. Il n'y a donc pas de projection dans le futur. Les analyses Arpège sont donc plus proches de la réalité, un peu comme les réanalyses du CEP. Toutefois, il y avait toujours de petites différences entre les analyses Arpège et les réanalyses du CEP. A l'inverse, les prévisions Arpège présentent des différences avec les analyses Arpège ou les réanalyses du CEP, d'autant plus importantes que l'échéance est lointaine. Ceci est somme toute logique. Les réanalyses du CEP ont été utilisées, afin de les comparer à chaque expérience d'inversion du PV. Mais l'avantage

de la comparaison avec Arpège, c'est que les expériences étaient réalisées avec ce même modèle. La prévision Arpège est appelée run de contrôle. Cela consistait à faire tourner le modèle Arpège à partir d'une date initiale, sans rien changer à la réalité. La date initiale correspondant à la date de mise en place du changement propre à l'expérience. Pour les expériences, on fait aussi tourner Arpège mais à partir d'un état initial différent de celui de la réalité. Je pouvais donc comparer les 2 résultats obtenus, c'est à dire le run de contrôle et le run résultant de l'expérience. La base de données propre au modèle Arpège était très pratique, dans le sens où il y avait une certaine homogénéité avec les expériences. Seule petite contrainte, les fichiers de données créés étaient des fichiers grib. Il y avait alors tout un processus pour les convertir en fichiers netcdf utilisables sous Ferret. Il est vrai qu'avec des fichiers grib, le logiciel Metview aurait également pu être utilisé, mais il n'a servi qu'occasionnellement.

3 ETUDE DE 2 TRANSITIONS RAPIDES VERS LA NAO-

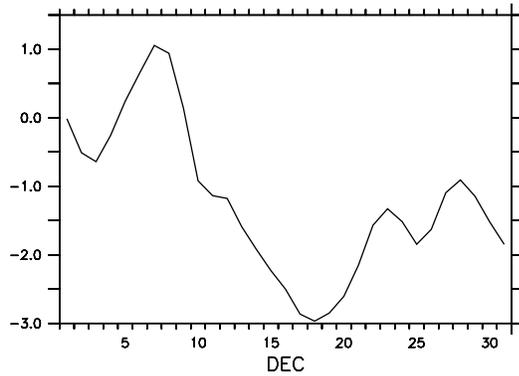
3.1 L'indice NAO

Le 1^{er} objectif de ce stage était de trouver des situations de transitions rapides de la NAO. Pour ce faire, l'indice NAO s'est avéré très utile. Il s'agit d'un indice permettant de savoir dans quelle phase de la NAO on se trouve. S'il est positif, on est en NAO+. S'il est négatif, on est alors en NAO-. Dans le cas, où il est proche de 0, cela signifie que l'on n'est ni en NAO+ ni en NAO-. On est tout simplement dans un autre régime de temps (la dorsale ou le blocage). Cet indice NAO varie généralement entre -3 et +3. On peut le calculer de diverses façons. Mais l'élément clé, c'est la différence de pression au sol entre les Açores et l'Islande. Ces 2 endroits sont en effet stratégiques du fait de l'anticyclone des Açores et la dépression d'Islande. Comme expliqué dans l'article de Cassou (2004), il ne s'agit pas de faire une simple différence de ces 2 valeurs de pression. Il faut en fait effectuer une normalisation de ces 2 valeurs en tenant compte de la situation statistique du moment. Pour ce faire on les soustrait à leur moyenne statistique puis on divise le tout par l'écart type. La moyenne statistique et l'écart-type dépendent de la période de l'année. Ce n'est qu'une fois que l'on a normalisé les 2 valeurs de pression, qu'on les retranche pour obtenir l'indice NAO. L'étape de normalisation est fondamentale si l'on souhaite avoir un indice NAO valable toute l'année. En effet, selon la période de l'année, l'anticyclone des Açores et la dépression d'Islande sont plus ou moins développés. Grâce à la normalisation, l'indice NAO hivernal peut-être comparé à l'indice NAO estival. Comme l'on retranche la valeur de pression normalisée des Açores à celle d'Islande, lorsque l'anticyclone des Açores et la dépression d'Islande sont plus développés, on obtient un indice NAO positif. On est donc en NAO+, avec un fort courant jet entre ces 2 systèmes. Le flux d'Ouest perturbé concerne alors une grande partie de l'Europe du nord. Le sud de l'Europe est protégé par l'anticyclone des Açores. A l'inverse, lorsque l'anticyclone des Açores et la dépression d'Islande sont moins développés qu'en temps normal, l'indice NAO est négatif. On est alors en NAO-, avec un faible courant jet plus au sud qu'à l'accoutumée. L'Europe du nord a un temps sec et l'Europe du sud est sous la pluie. Au cours de ce stage, l'indice NAO a été calculée à partir du géopotentiel à 850hPa. Il s'agit de la même procédure (normalisation et différence entre les Açores et l'Islande) que pour la pression au sol. Par ailleurs, l'analyse en composante principale permettait d'obtenir l'indice NAO. En effet, en hiver la NAO correspond au 1^{er} EOF (Empirical Orthogonal Functions), c'est à dire à la première fonction orthogonale empirique. De façon plus générale, les EOF sont des vecteurs. Plus simplement, cela signifie que la NAO est la situation la plus fréquente en hiver. Comme il s'agit d'une analyse en vecteurs et que les vecteurs peuvent avoir 2 orientations, dire que la NAO constitue le 1^{er} EOF, c'est dire que la NAO+ et la NAO- correspondent aux 2 orientations de ce 1^{er} EOF. Grâce à cela, je pouvais en déduire la composante principale de ce 1^{er} EOF, qui n'est autre que l'indice NAO.

Au cours de ce stage, l'étude concernait des transitions rapides vers la NAO-. Avec plus de temps, il aurait été intéressant de refaire la même étude sur des transitions rapides vers la NAO+. Ce sont

principalement 2 basculements vers la NAO- qui ont été étudiés, à savoir décembre 2009 et novembre 2010. En effet, lors de ces 2 derniers hivers (2009/2010 et 2010/2011) il y avait une NAO- durable. Tout le monde se souvient du temps froid associé lors des 2 derniers hivers. Cela faisait plusieurs décennies que cela n'était pas arrivé. Pendant une quarantaine d'années, les hivers avaient vu la prédominance de la NAO+ avec sa douceur. Mais ces 2 derniers hivers, c'est la NAO- qui a prédominé. Toutefois l'hiver dernier, la situation de NAO- présente très tôt (dès novembre) n'a pas persisté tout l'hiver. Tout l'intérêt du stage était de comprendre ce qui provoque l'arrivée brutale d'une situation de NAO- sur l'Europe. Voici ces 2 basculements vers la NAO- :

indice NAO decembre 2009



indice NAO novembre 2010

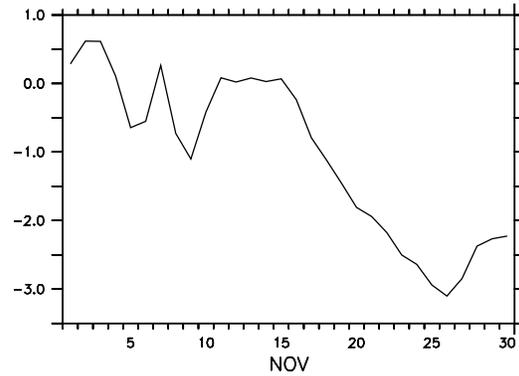


FIG. 3 – Evolution de l'indice NAO au cours du temps en décembre 2009 et en novembre 2010

Comme on peut le voir sur ces 2 tracés, ces 2 mois présentent une forte baisse de l'indice NAO. On a donc bien un brutal basculement vers la NAO-, d'où l'intérêt de ces 2 situations. On peut voir qu'en décembre 2009 le basculement intervient autour du 7 ou du 8. En novembre 2010, c'est autour du 15 ou du 16 que cela se produit. L'indice NAO diminue de 3 ou 4 unités en une dizaine de jours, ce qui est énorme. Dans un premier temps, nous allons voir à quoi correspondent ces situations ou ce qui les provoquent. Pour étudier ces 2 situations, j'ai créé avec Ferret de nombreuses cartes. Pour ce faire, j'utilisais la base de données du CEP, à savoir les réanalyses d'ERA-interim. Je me concentrais sur la période autour des basculements. Le but étant de trouver les causes. A chaque fois, j'obtenais le même type de cartes toutes les 6 heures (à 0h00, 6h00, 12h00 et 18h00 UTC). Mais je ne vais commenter que les plus pertinentes.

3.2 La situation de décembre 2009

Pour commencer, sur les 2 figures ci-après, j'ai représenté le tourbillon potentiel PV et la vorticité relative VR. Le PV est représenté à une température potentielle de 315K. La VR est représentée à une pression de 850hPa. Il s'agit là de 2 façons différentes de fixer un certain niveau. Ces 2 cartes sont centrées sur l'océan Atlantique nord, étant donnée notre étude sur la NAO. Si on regarde bien, on peut voir sur ces cartes les frontières entre l'océan et les continents. A ces 2 instants, on peut voir un déferlement cyclonique se mettre en place. C'est lui qui est à l'origine du basculement vers la NAO-. A gauche (le 07/12/09 à 0h00), on voit grâce aux contours de VR à 850hPa, la formation en plein coeur de l'Atlantique (à 50W et 45N) d'un tourbillon. Comme les iso-lignes de VR sont continues, il s'agit de valeurs positives de VR. On a donc une rotation dans le sens trigonométrique. Ce tourbillon est assimilable à une dépression. A droite (le 08/12/09 à 12h00), on constate que ce tourbillon s'est déplacé vers le nord-est (à 25W et 55N). On peut voir grâce aux couleurs du PV que ce tourbillon est en train de créer le déferlement cyclonique. Ce dernier se caractérise par de faibles valeurs de PV au nord du tourbillon et par de fortes valeurs de PV au sud. C'est typique de la transition vers la NAO-,

07/12/09 0h00 PV315 VR850

08/12/09 12h00 PV315 VR850

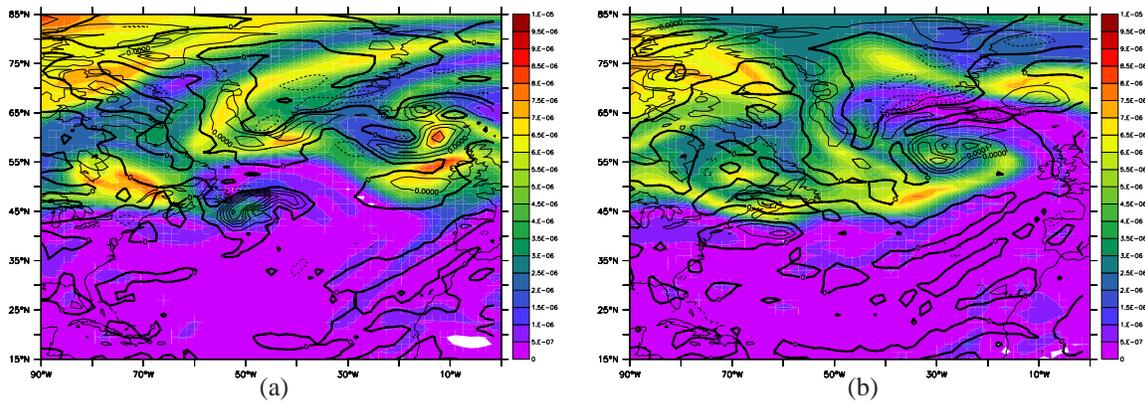


FIG. 4 – PV à 315K (couleurs) et VR à 850hPa (traits noirs) pour le 07/12/09 à 0h00 et le 08/12/09 à 12h00

car le courant jet se retrouve plus au sud de sa position habituelle.

Ensuite, j'ai représenté les flux de quantité de mouvement superposés au vent zonal basse fréquence :

uv anom et u BF 07/12/09 0h00 300hPa

uv anom et u BF 09/12/09 18h00 300hPa

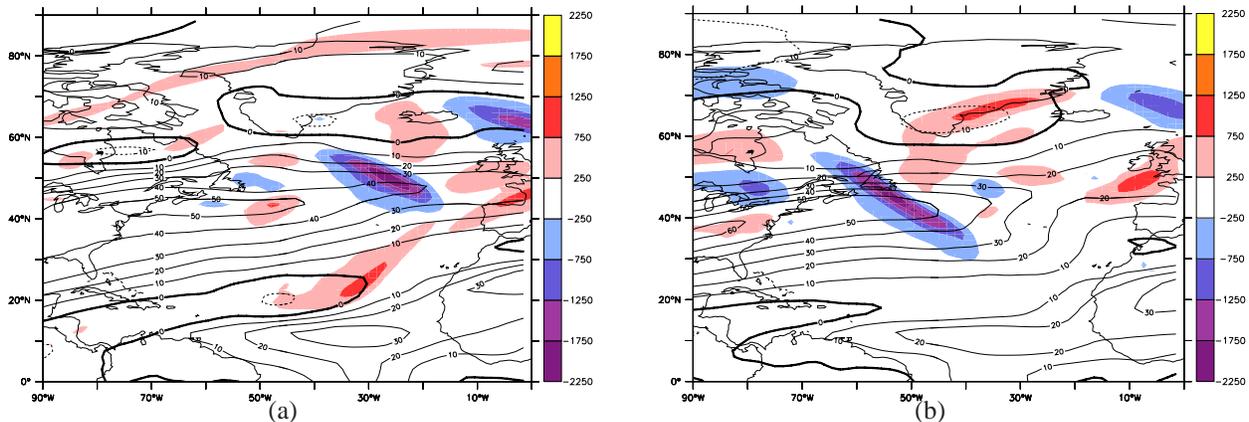


FIG. 5 – flux de quantité de mouvement (couleurs) et vent zonal basse fréquence (traits noirs) à 300hPa. Situation du 07/12/09 à 0h00 UTC en (a), et situation du 09/12/09 à 18h00 UTC en (b). Ces 2 cartes sont centrées comme les précédentes sur l'océan Atlantique nord.

Tout d'abord, ces figures ont été réalisées pour un niveau de pression de 300 hPa, soit en haut de la troposphère. C'est à ce niveau là que le courant-jet est le plus fort. Or, ces figures nous donnent de précieuses informations sur le courant-jet, comme on va le voir. Ensuite, l'échelle de couleur est en unité SI, c'est à dire en m^2/s^2 . En effet le flux de quantité de mouvement s'exprime ainsi : $u'v'$. u est le vent zonal et v est le vent méridien. Le ' symbolisant l'anomalie (anom). Cette anomalie a été calculée à partir de la climatologie du mois de décembre. Que cela soit pour u ou pour v , j'ai constitué des valeurs climatologiques (moyennes) pour chaque mois étudié. u' et v' sont obtenues ainsi : $u' = u - u_{clim}$ et $v' = v - v_{clim}$. u et v sont les valeurs du vent zonal et du vent méridien toutes les 6 heures pour la période étudiée, à savoir décembre 2009. u_{clim} et v_{clim} sont les climatologies de décembre pour le vent zonal et le vent méridien. Ces 2 valeurs sont fixées. Elles ne varient pas. Elles représentent la normale de u et de v en décembre.

Concernant les lignes noires représentant le vent zonal basse fréquence, elles vont de 10 en 10 m/s. En temps normal, il s'agit de valeurs positives symbolisant des vents d'ouest. Les lignes sont alors en traits pleins. Mais localement les valeurs sont négatives comme au sud du Groenland. Cela matérialise des vents d'est. Les lignes sont alors en pointillés. Le terme basse fréquence signifie qu'on ne s'intéresse pas seulement aux valeurs d'un paramètre à un instant donné. Pour chaque instant étudié (toutes les 6 heures), on tient compte des instants le précédant et des instants le suivant. Chacun de ces instants étant associé à un coefficient. L'ensemble des coefficients suit une Gaussienne centré sur l'instant étudié. Le coefficient maximal est associé à la valeur du paramètre (ici le vent zonal) de l'instant étudié. Plus on s'éloigne de cet instant étudié, plus les coefficients diminuent jusqu'à avoisiner 0. Cette diminution des coefficients est symétrique de part et d'autre de l'instant étudié (Gaussienne). Au début de ce stage, la basse fréquence d'un paramètre à un instant donné a été définie à partir des 16 instants le précédant et des 16 instants le suivant. Or, tous les instants étaient espacés de 6 heures. On a donc la basse fréquence qui tient compte de l'instant étudié et d'une période de 8 jours (4 jours avant et 4 jours après). Pour chaque paramètre et à chaque instant, une basse fréquence était donc définie. A partir de cette basse fréquence (BF), on peut en déduire la haute fréquence (HF) résultante définie comme ceci : $X_{HF} = X - X_{BF}$ où X est la valeur d'un paramètre quelconque obtenue toutes les 6 heures.

Les cartes précédentes permettent de visionner différentes choses. Tout d'abord grâce au vent zonal basse fréquence, on peut situer la position du courant jet ($u_{BF} > 50$ m/s). Ce dernier se situe vers 45N le 07/12/09 à 0h00 UTC, puis vers 40N le 09/12/09 à 18h00 UTC. Dans les 2 cas, il est très au sud par rapport à la normale (50N ou 60N). C'est typique d'une situation de NAO-. On constate aussi que la NAO- est en train de se mettre en place, car le courant-jet continue à se déplacer vers le sud. Il s'est déplacé de 5 degrés de latitude vers le sud en 3 jours. Ce n'est pas négligeable. Mais sur ces cartes, on peut aussi voir les causes de ce basculement vers la NAO-. Grâce aux flux de quantité de mouvement, on peut voir les déferlements cycloniques qui provoquent le déplacement du courant-jet vers le sud, conduisant à la NAO-. Les déferlements cycloniques (à l'origine de la NAO-) se caractérisent par des flux de quantité de mouvement négatifs. A l'inverse, les déferlements anticycloniques (à l'origine de la NAO+) sont associés à des flux de quantités de mouvement positifs. Ceci s'explique par l'orientation des ondes associées aux déferlements. Ces ondes ne sont autres que des ondes de Rossby. Elles se regroupent en paquets d'ondes regroupant une succession de dépressions et d'anticyclones. Il arrive que le paquet d'onde ait un axe orienté du nord-ouest vers le sud-est. A ce moment là, les ondes de Rossby associées seront allongées suivant un axe orthogonal orienté du sud-ouest vers le nord-est. Tout autour de ces ondes de Rossby, il en résultera des vents de sud-ouest ou de nord-est qui seront tels que $u'v'$ soit positif. Or, de part et d'autre de l'axe de ce paquet d'onde (au nord et au sud) les flux de quantité de mouvement $u'v'$ sont nuls. Il n'y a en effet aucune anomalie de vent provoquée par ces ondes de Rossby au delà d'une certaine distance. Cela signifie que la variation méridienne (sud-nord) des flux de quantité de mouvement est positive au sud du paquet d'onde et négative au nord du paquet d'onde. Or, l'accélération du vent zonal dépend de l'opposé de ce terme : $-\partial_y(u'v')$. Il apparaît donc évident que cela provoque une accélération du vent zonal au nord du paquet d'ondes et une décélération du vent zonal au sud de ce même paquet d'ondes. Le courant-jet est ainsi déplacé vers le nord. C'est ce que l'on appelle un déferlement anticyclonique. Cela correspond à des ondes de Rossby allongées suivant un axe allant du sud-ouest au nord-est. Ce n'est vraisemblablement pas le cas des 2 grosses taches violettes de la figure 5. Ces 2 taches (30W et 50N à gauche et 50W et 40N à droite) sont des représentations de 2 déferlements cycloniques ($u'v' < 0$). On voit d'ailleurs bien qu'ils sont allongés suivant un axe allant du nord-ouest au sud-est. Cela implique donc bel et bien des flux de quantité de mouvements négatifs, car les vents tournant autour de ces déferlements cycloniques sont avant tout des vents de nord-ouest ou de sud-est. Qui dit flux de quantité de mouvement négatifs, implique aussi une variation méridienne de ces derniers négative au sud du déferlement cyclonique et positive au nord de celui-ci. Il en résulte donc que : $-\partial_y(u'v') > 0$ au sud et $-\partial_y(u'v') < 0$ au nord du déferlement cyclonique.

Cela crée ainsi une accélération du vent zonal au sud et une décélération du vent zonal au nord du déferlement cyclonique. Un déferlement cyclonique provoque donc un décalage du courant-jet vers le sud et une transition vers la NAO-. Enfin, on constate aussi qu'il peut y avoir plusieurs déferlements cycloniques à l'origine d'un basculement vers la NAO-. C'était le cas en décembre 2009, où il y en a eu 2. On peut supposer que c'est la même chose avec les déferlements anticycloniques, vis à vis de la NAO+.

Concernant les paquets d'ondes de Rossby, les trains d'ondes associés ont été représentés. Pour ce faire, des diagrammes de Hovmöller ont été réalisés, comme ceux étudiés dans le cours de météorologie dynamique de Gwendal Rivière. Ci-dessous l'un d'entre eux, correspondant à tout le mois de décembre 2009.

Hovmoller V 4daily 300hPa decembre 2009

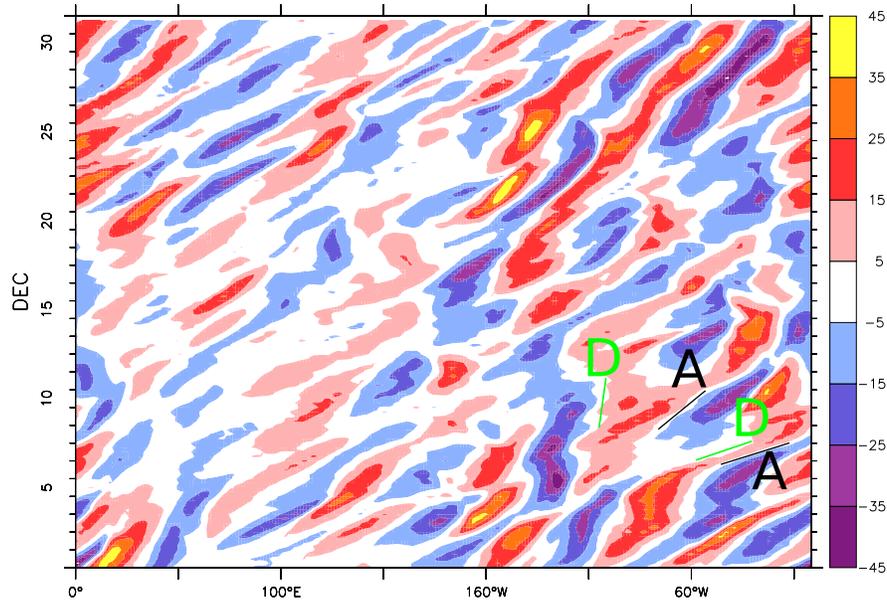


FIG. 6 – Diagramme de Hovmöller pour le mois de décembre 2009. Il a été obtenu avec les données de réanalyses du CEP. Il s'agit de données toutes les 6 heures (à 0h00, 6h00, 12h00 et 18h00 UTC))

Ce type de diagramme représente l'anomalie du vent méridien v' à 300hPa. Cette anomalie est définie par rapport à la climatologie (la normale) du mois de décembre ($v' = v - v_{clim}$). Sur l'axe des abscisses, on a la longitude d'ouest en est (360°). Sur l'axe des ordonnées, on a le temps avec tous les jours du mois de décembre 2009 (du bas vers le haut). Par ailleurs, l'anomalie du vent méridien qui est représentée sur ce diagramme a été moyennée entre 30N et 60N. C'est en effet autour de 45N que les trains d'ondes de Rossby sont les plus marqués. L'échelle des couleurs est en m/s d'anomalie. Les couleurs chaudes représentent des anomalies de vent méridien positives, donc des vents de sud. Les couleurs froides représentent des anomalies de vent méridien négatives, donc des vents du nord. Sur ce diagramme d'Hovmöller 2 dépressions (D en vert) et 2 anticyclones (A en noir) ont également été représentés. On constate que ces derniers sont entre les anomalies de vent méridien. Ils sont dans des zones où les anomalies de vent méridien sont proches de 0. C'est normal, dans le sens où le vent contourne les dépressions et les anticyclones. Au coeur de ces derniers, il n'y a que très peu de vent. Les dépressions ont ainsi à leur droite des couleurs chaudes (vent du sud) et à leur gauche des couleurs froides (vent du nord). C'est le contraire pour les anticyclones. L'anticyclone et la dépression en bas à droite correspondent au 1^{er} déferlement cyclonique (celui du 07/12/09). L'anticyclone et la dépression en haut et à gauche correspondent au 2nd déferlement cyclonique (celui du 09/12/09). Grâce à ce diagramme d'Hovmöller, on voit très bien les origines d'un paquet d'ondes.

En suivant le train d'onde associé, on peut remonter dans le temps et se déplacer dans l'espace. Il est important de noter que l'extrémité droite du diagramme Hovmöller est en continuité avec son extrémité gauche. Les paquets d'ondes se décalent vers le haut et la droite du diagramme, car avec le temps ils vont vers l'est. S'ils atteignent l'extrémité droite, alors ils réapparaissent à l'extrémité gauche. Les trains d'ondes forment donc des alignements de paquets d'ondes en allant vers le haut et la droite du diagramme. Dans la partie 'utilisation de l'inversion du PV', tout l'objectif sera d'essayer de supprimer les anomalies créées par ces trains d'ondes en amont, c'est à dire à leur source. Grâce au diagramme d'Hovmöller, on peut localiser l'endroit et l'instant où ces paquets d'ondes prennent naissance. Ces 2 données sont essentielles pour réaliser l'inversion du tourbillon potentiel.

Enfin, un dernier type de diagramme a été créé pour essayer de comprendre l'origine des basculements vers la NAO-. Comme expliqué en introduction, la NAO fait parti d'un phénomène plus général incluant l'oscillation arctique. Ce phénomène n'est autre que le mode annulaire de l'hémisphère nord (NAM en anglais). En m'appuyant sur l'étude de Baldwin and Dunkerton (2001), l'évolution de l'indice NAM en fonction de l'altitude et du temps a été représentée.

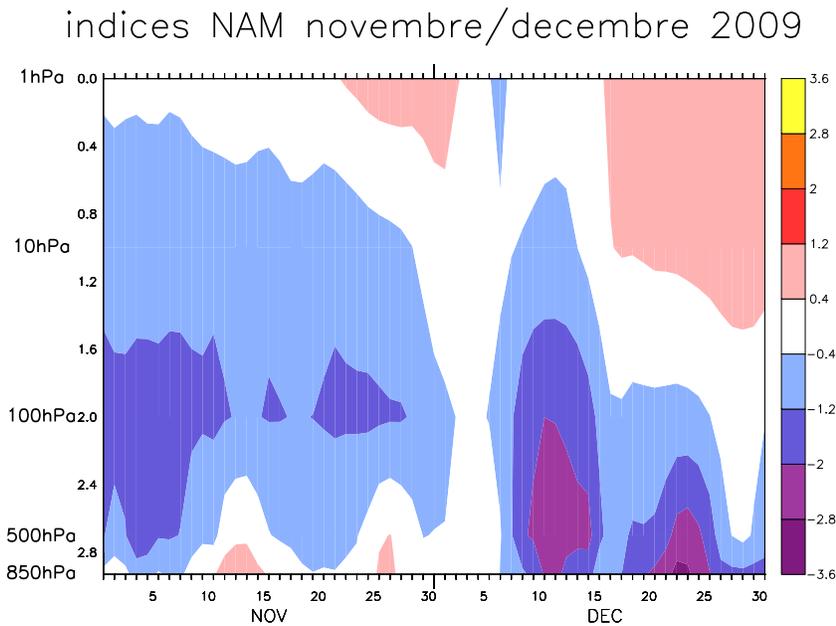


FIG. 7 – Sur ce diagramme, les couleurs représentent les valeurs de l'indice NAM. En bleu, ce sont les valeurs négatives et en rouge les valeurs positives. Sur l'axe des ordonnées, figure une échelle logarithmique de pression (entre 850hPa au bas et 1hPa en haut). Sur l'axe des abscisses, figure le temps (novembre et décembre 2009).

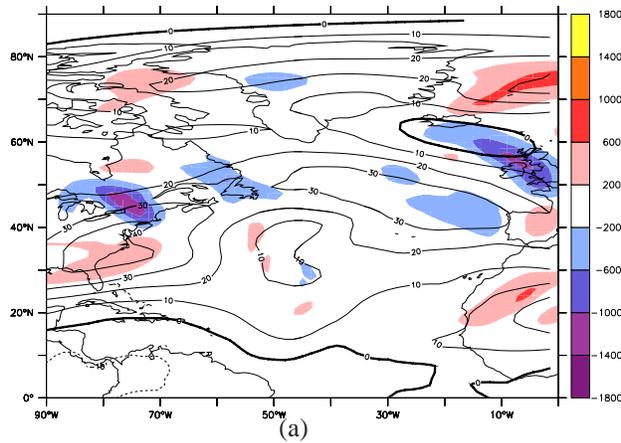
Le but est de voir si le basculement vers la NAM- s'amorce en altitude. On peut voir que l'indice NAM est fortement négatif près du sol à partir du 10/12/09. Cela rejoint ce qui a été vu précédemment pour la NAO. On peut également constater qu'en amont (en novembre), l'indice NAM était déjà légèrement négatif à des altitudes plus élevées. Il se peut qu'il s'agisse d'un précurseur. De même le 06/12/09, il y a en haut de la stratosphère une sorte de pic négatif qui pourrait aussi être un précurseur du basculement qui a suivi quelques jours plus tard près du sol. Une expérience d'inversion du tourbillon potentiel dans la stratosphère a été réalisée à la fin de ce stage. Ceci dans le but d'y voir plus clair sur les origines stratosphériques des basculements.

3.3 La situation de novembre 2010

Cette partie est la jumelle de la précédente. On ne va donc plus s'attarder sur les explications techniques d'obtention des différentes figures. On va essentiellement commenter les différentes cartes

obtenues pour la situation de novembre 2010. Il s'agit également d'un basculement vers la NAO-, que l'on va essayer de comprendre. Comme fait précédemment, seules les figures les plus pertinentes sont montrées ici.

uv anom et u BF 17/11/10 12h00 300hPa



17/11/10 18h00 PV315 VR850

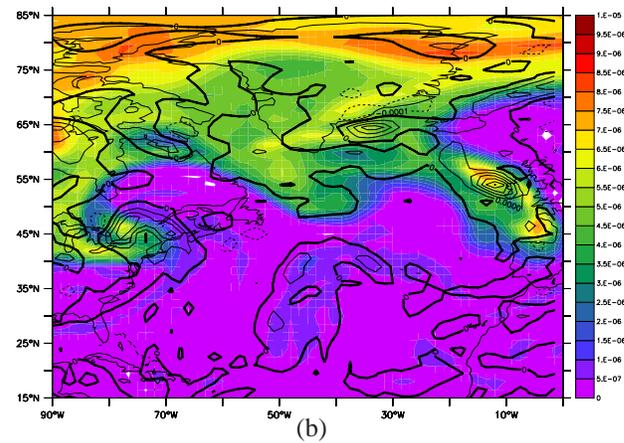
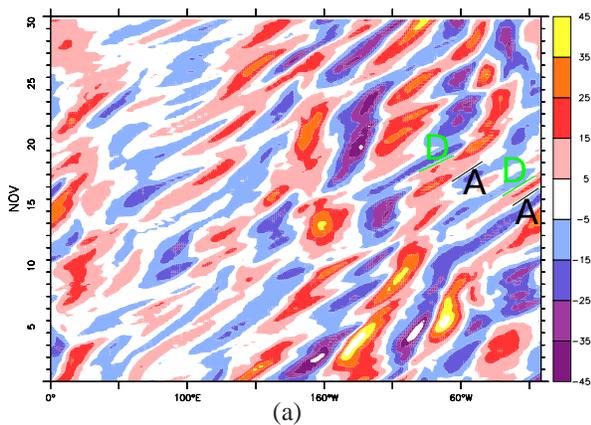


FIG. 8 – flux de quantité de mouvement (couleurs) et vent zonal basse fréquence (traits noirs) à 300hPa le 17/11/10 à 12h00 (a) ; PV à 315K (couleurs) et VR à 850hPa (traits noirs) pour le 17/11/10 à 18h00 (b)

Pour commencer, voici 2 types de cartes déjà vus pour décembre 2009. Ce n'est pas le même instant qui a été choisi, car les 2 cartes sont plus parlantes ainsi. On peut y voir 2 déferlements cycloniques sur l'Atlantique nord (10W et 50N pour le 1^{er} ; 75W et 45N pour le 2nd). Ces 2 déferlements sont visibles aussi bien avec les flux de quantité de mouvements négatifs qu'avec le PV et le tourbillon. Ces 2 déferlements sont à l'origine du basculement vers la NAO- que l'on peut voir sur la figure 3. On constate que le courant-jet est plus au sud (35N) lors du 2nd déferlement que pour le 1^{er} (50N). Cela montre le changement de situation. Par ailleurs, on a de nouveau 2 déferlements cycloniques à l'origine du basculement. On ne peut toutefois pas généraliser cette remarque. Il faudrait une étude sur de très nombreux cas de figure. Enfin, il faut noter que la position des flux de quantité de mouvement négatifs est décalée par rapport à la position des tourbillons (dépressions).

Hovmoller V 4daily 300hPa novembre 2010



indices NAM novembre 2010

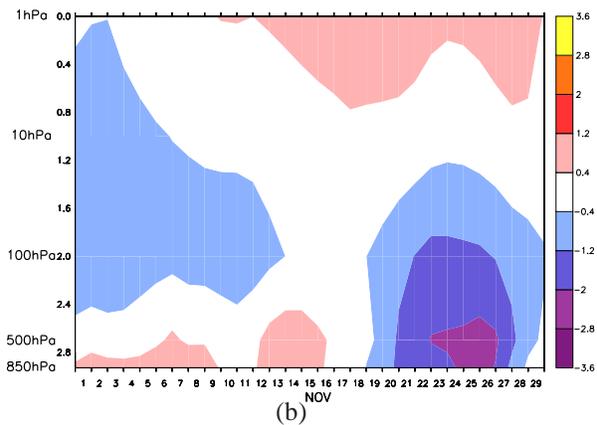


FIG. 9 – Diagramme de Hovmöller (a) ; diagramme représentant l'indice NAM (b)

Comme pour décembre 2009, un diagramme d'Hovmöller et un diagramme de représentation de l'indice NAM ont été réalisés. Concernant le diagramme de Hovmöller, les dépressions et les

anticyclones correspondants aux 2 déferlements ont à nouveau été ajoutés sur la figure. La dépression et l'anticyclone en bas à droite correspondent au 1^{er} déferlement. Et la dépression et l'anticyclone en haut à gauche correspondent au 2nd déferlement. On peut ainsi voir les trains d'ondes d'où sont originaires ces 2 déferlements. Mais au cours de ce stage, il n'a pas été utilisé faute de temps. Seule la situation de décembre 2009 a été étudiée, lors de la réalisation d'expériences d'inversion du PV.

Pour ce qui est du diagramme de l'indice NAM, on constate de nouveau que juste après les 2 déferlements (vers le 20/11/10) l'indice NAM devient très négatif près du sol. Par ailleurs, on peut voir qu'en amont (au début du mois), l'indice NAM était déjà négatif en altitude alors qu'il était positif près du sol. C'est à nouveau la possibilité qu'il s'agisse d'un précurseur.

4 UTILISATION DE L'INVERSION DU PV

4.1 Premières expériences sous Olive

La seconde partie du stage consistait à réaliser des expériences d'inversion du tourbillon potentiel PV. Ceci dans le but de trouver les causes du basculement en NAO-. Par manque de temps, ces expériences n'ont concerné que la situation de décembre 2009. Il serait tout à fait envisageable de les reproduire pour novembre 2010. Comme expliqué dans l'article d'Arbogast (2002), l'inversion du PV consiste à repérer une anomalie de PV, à la supprimer, puis à constater ce qui se passe en l'absence de cette anomalie. Les anomalies de PV sont à l'origine des anomalies des autres paramètres météorologiques. En connaissant la distribution spatio-temporelle du PV, on peut reconstituer tous les autres champs météorologiques. Les expériences d'inversion du PV sous Olive consistaient à supprimer certaines anomalies du PV à un instant initial en amont. Puis le super-calculateur Yuki tournait en mode prévision, pour voir si en aval on obtenait des résultats autres que ceux des analyses Arpège. Si tel était le cas, alors cela voulait dire que l'anomalie de PV supprimée en amont était bel est bien à l'origine de tel ou tel phénomène météorologique en aval. Ceci a été constaté grâce à d'autres cartes, représentant différents champs de paramètres météorologiques. Ainsi, on peut voir l'influence de tel phénomène en amont sur tel autre en aval.

Pour commencer ces expériences Olive, l'objectif était de voir si le paquet d'ondes en amont du 1^{er} déferlement cyclonique était bien à l'origine de ce dernier. Grâce au diagramme de Hovmöller montrant les trains d'ondes de Rossby, on a la possibilité de remonter aux origines du paquet d'ondes créant le déferlement en question. Le but étant d'empêcher le basculement vers la NAO- de se produire pour le mois de décembre 2009. Il était plus important d'empêcher le 1^{er} déferlement cyclonique que le 2nd, car il est possible que le 1^{er} initie le 2nd. Mais ceci reste une hypothèse. Grâce au diagramme d'Hovmöller (figure 6), on peut voir le parcours du paquet d'onde entre le 1^{er} décembre et le 7 décembre 2009. Le 1^{er} décembre, il est en bas du diagramme vers 180W de longitude, c'est à dire en plein Pacifique. Puis sur la figure on le voit monter vers la droite, car avec le temps il va vers l'est. On le retrouve alors à cheval entre l'extrémité droite et l'extrémité gauche (méridien de Greenwich) pour le 7 décembre 2009. Grâce à ces informations, plusieurs expériences d'inversion du tourbillon potentiel ont été mises en place. Le but était de supprimer les anomalies créées par le paquet d'ondes en amont, c'est à dire début décembre lorsqu'il est encore sur le Pacifique.

Pour chaque expérience d'inversion du PV, il fallait d'abord créer un état initial différent de la réalité. Pour ce faire, il fallait entrer les coordonnées de la zone où l'on souhaitait effectuer les modifications. Il s'agissait de fixer la latitude et la longitude du coeur de cette zone de modifications. On note ces coordonnées lat et lon. Les modifications consistent en une suppression de l'anomalie de PV présente à cet endroit. Ensuite, un rayon R était fixé pour créer une zone de modifications ayant la forme d'un cercle centré en lat et lon. La modification (suppression de l'anomalie de PV)

était maximale près du centre du cercle (en lat et lon). Elle décroissait à mesure qu'on s'éloignait du centre, pour devenir nulle à une distance R du centre du cercle. Ainsi il y avait une certaine continuité entre l'extérieur et l'intérieur de la zone de modifications. Nous voilà avec un instant initial différent de la réalité, dans certaine zone modifiable à notre guise.

La deuxième étape consistait à lancer la prévision du modèle Arpège à partir de ce nouvel instant initial. Cette prévision était réalisée pour une dizaine de jours à partir de l'instant initial. Une fois cette prévision réalisée, il n'y avait plus qu'à la comparer à la réalité (analyses Arpège ou réanalyses CEP). Par ailleurs, il y avait aussi comparaison entre les résultats de l'expérience, et ceux d'une prévision Arpège (run de contrôle). Il s'agit d'une prévision réalisée à partir de l'instant initial réel. Cette comparaison était la plus intéressante, car elle était somme toute homogène. L'objectif étant de voir les conséquences de la modification sur les instants suivants la modification.

Au cours de ce stage, 3 expériences de ce type ont été réalisées. A chaque fois, l'instant initial était fixé au 3 décembre 2009 à 0h00. Le centre de la zone de modification a été fixé à lat=140W et lon=45N. Si on regarde le diagramme d'Hovmöller de la figure 6, on s'apercevra que l'on tombe en plein dans le train d'ondes à l'origine du déferlement cyclonique du 7 décembre 2009. Sauf que cette fois-ci, on est en amont sur le Pacifique. Pour les 3 expériences, la prévision partait de l'instant initial (le 03/12/09 à 0h00) et était réalisée pour 10 jours (jusqu'au 13/12/09 à 0h00). Ce qui différenciat les 3 expériences, c'était le rayon de la zone de suppression de l'anomalie du PV. Il a progressivement été augmenté, car pour les 2 premières expériences les résultats n'étaient pas très intéressants. Il n'y avait que peu de différences entre l'expérience et le run de contrôle. Par conséquent, seule la 3^{ème} et dernière de ces expériences est vraiment intéressante. Pour celle-ci, un rayon de 100° de latitude et de longitude a été choisi. Cela représente environ 110km en latitude et 80km en longitude (car on est à 45N). Cela signifie que dans cette expérience le cercle est en fait une ellipse et que le terme rayon est mal adapté. On constate donc que la zone de modification est vaste. Elle couvre environ 220km du nord au sud et 160km d'ouest en est. Mais ce n'est qu'au coeur de cette zone que la suppression des anomalies de PV est significative. Sur les bords il ne se passe presque rien, conditions aux limites obligent.

Quelques résultats ont été constatés, mais il ne sont pas très nombreux. En effet, malgré une zone de modifications étendue les différences entre l'expérience et le run de contrôle ne sont pas toujours très importantes. Elles sont bien évidemment très peu importantes près de l'initialisation (le 03/12/09), tandis qu'elles se multiplient au cours de l'échéance de prévision. Afin d'illustrer ce propos, figurent les différences entre l'expérience et le run de contrôle à 2 échéances éloignées (voir au dos). Ces 2 cartes ont été réalisées pour le géopotential à 300hPa. Mais on aurait pu faire la même chose à d'autres niveaux de pression ou avec d'autres paramètres. Les échelles de couleur sont en unité SI, c'est à dire l'unité du géopotential à savoir le mgp (mètre géopotential). En moyenne le géopotential tourne autour de 9000 décimètres géopotential (damgp) à 300hPa, soit 90000mgp. En effet, l'isobare 300hPa se situe en moyenne à 9km d'altitude. Sur mes cartes, la différence de valeur du géopotential à 300hPa entre les 2 situations ne dépassent que rarement 6000mgp. Cela représente environ 7 % de la valeur moyenne du géopotential à 300hPa. En blanc, figurent des zones où cette différence est négligeable devant la valeur du géopotential à 300hPa. La limite a été fixée à $\pm 700\text{mgp}$, ce qui représente $\pm 0,8\%$ de la valeur moyenne du géopotential à 300hPa. Sur la carte de gauche, on peut voir que le 03/12/09 au début de la prévision (à 12 heures d'échéance), les différences entre l'expérience et le contrôle sont minimales. Elles sont d'ailleurs cantonnées à l'ouest de la carte, c'est à dire près de la zone de modification. Ces différences n'ont pas encore eu le temps d'aller vers l'Europe. En revanche sur la carte de droite (le 10/12/09), c'est à dire une semaine plus tard dans la prévision (échéance de 7 jours et 12 heures), on constate que les différences sont très importantes entre l'expérience et le contrôle. Ces différences sont généralisées. On peut voir que la France (tout à

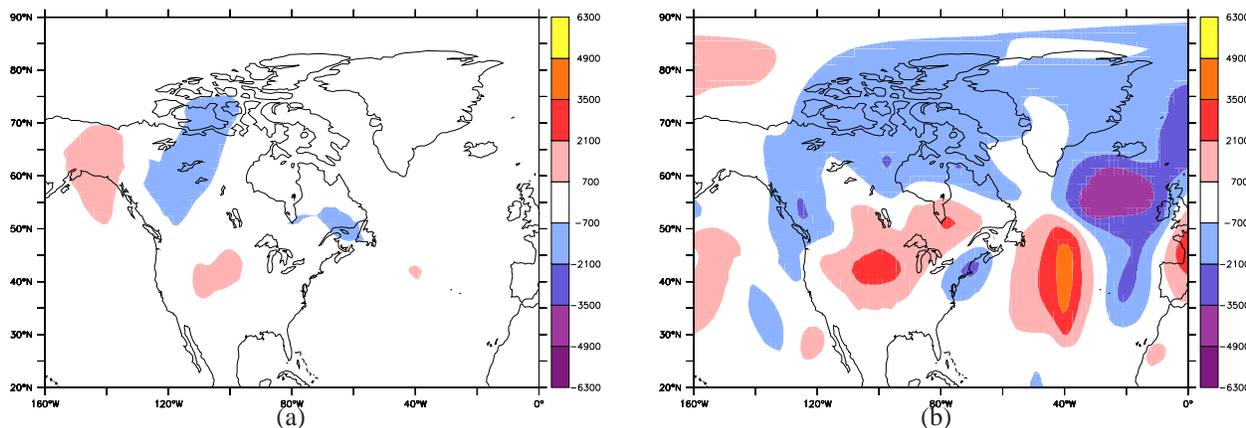


FIG. 10 – différences entre l’inversion et le contrôle le 03/12/09 12h00 (a) et le 10/12/09 12h00 (b)

droite) est en rouge. Cela signifie que l’expérience à créer une situation où le géopotential à 300hPa est plus élevé que dans la réalité. Cela signifie qu’en France, la modification créée sur le Pacifique une semaine auparavant va provoquer la formation d’un “anticyclone relatif” une semaine après. “anticyclone relatif” signifie que la situation sera moins dépressionnaire ou plus anticyclonique que pour la réalité. Mais dans l’absolu, on ne sait pas qu’elle sera la situation (anticyclonique, dépressionnaire ou marais barométrique). Pour les zones bleues, c’est tout le contraire : formation d’une “dépression relative”. Grâce à ces 2 cartes, on voit bien la propagation et l’amplification des différences avec le temps, à partir d’un état initial différent. C’est un peu comme la propagation des erreurs de prévisions avec l’échéance, lorsqu’on part d’une mauvaise analyse (c’est à dire différente de la réalité).

Voici ce qui a vraiment été constaté pour cette expérience :

4 indices NAO du 3 au 12 decembre 2009

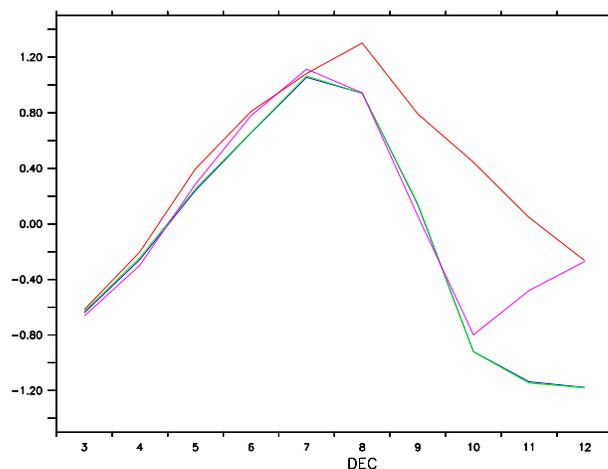


FIG. 11 – Superposition de l’évolution de l’indice NAO entre le 03/12/09 et le 12/12/09 pour la réanalyse du CEP (en bleu), l’analyse Arpège (en vert), le run de contrôle (en rose) et l’expérience d’inversion (en rouge)

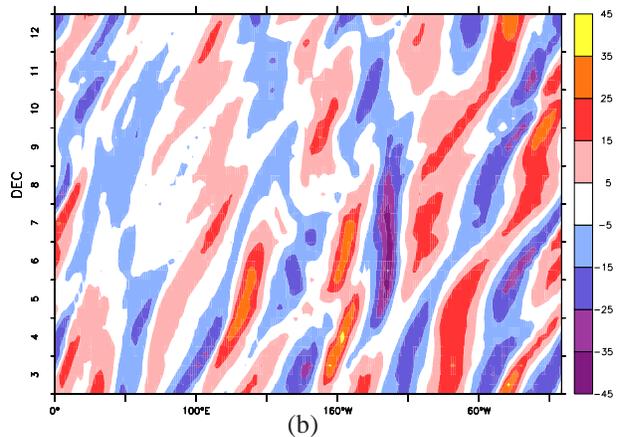
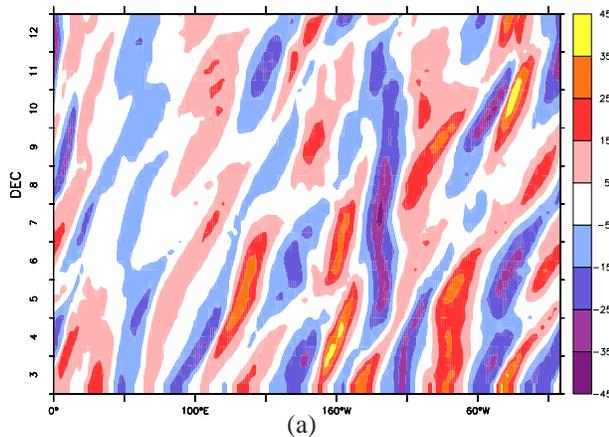
L’indice NAO qui normalement plonge à partir du 07/12/09, le fait avec un jour de retard et moins vite. Comme on peut le voir sur la figure 11, la réanalyse du CEP et l’analyse Arpège sont très proches et se superposent. On distingue difficilement le bleu ou le vert. En revanche, le run de contrôle très proche de ces 2 derniers, divergent après le 10/12/09. Ceci vient du fait qu’il s’agit

d'une prévision et qu'au delà de 7 jours la fiabilité devient très limitée. Enfin, l'indice NAO de notre expérience d'inversion est presque identique pendant la phase de croissance. Mais ensuite il prend tout son temps pour décroître. Cela prouve que l'expérience d'inversion du PV a provoqué un certain retard. Le fait de limiter en amont les anomalies de PV du train d'ondes à l'origine du déferlement, va ralentir le phénomène de basculement vers la NAO-. Il va prendre plus de temps pour se mettre en place. Le déferlement cyclonique associé sera retardé et/ou moins prononcé.

Comme le montre les 4 figures ci-après, le paquet d'onde à l'origine du basculement vers la NAO- a bien été affaibli sur le Pacifique (figures a et b) quant au déferlement cyclonique associé sur l'Atlantique, il a été retardé par notre expérience (figures c et d).

Hovmoller V 4daily 3:13 decembre 2009

Hovmoller V 4daily 3:13 decembre 2009

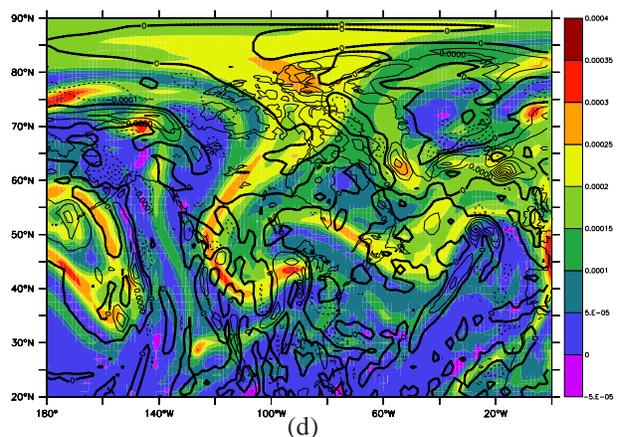
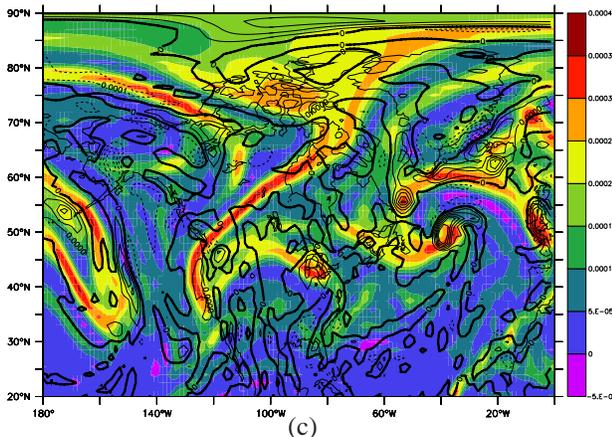


(a)

(b)

07/12/09 12h00 VA300 VR850

07/12/09 12h00 VA300 VR850



(c)

(d)

FIG. 12 – EN HAUT : Comparaisons de 2 diagrammes de Hovmöller entre le 03/12/09 et le 12/12/09 : celui du run de contrôle (a) et celui de l'expérience d'inversion (b) ; EN BAS : Représentation de la vorticité absolue VA à 300hPa (en couleur) et de la vorticité relative VR à 850hPa (en contours). Il s'agit de la situation du 07/12/09 à 12h00 pour le run de contrôle (c) et l'expérience d'inversion (d).

D'abord on peut voir qu'en bas à droite des Hovmöller les trains d'ondes sont moins organisés dans l'expérience (figure b) que pour le run de contrôle (figure a). En effet, les couleurs des trains d'ondes sont moins prononcées dans la zone où l'on réalise l'expérience (le Pacifique vers 140W). Cette atténuation des paquets d'ondes va alors se propager par la suite en aval (sur l'Atlantique) les jours suivants. On voit aussi très clairement que le déferlement cyclonique présent le 07/12/09 à 40W et 50N (sur l'Atlantique) est plus développé (plus de contours et couleurs plus contrastées) pour le run de contrôle que pour notre expérience. Notre expérience a donc bien affaibli le train d'ondes du

Pacifique et le déferlement cyclonique qui lui est associé sur l'Atlantique quelques jours plus tard.

Avec plus de temps, il aurait été intéressant d'élargir la zone où l'on effectue la modification. Il est possible d'effectuer les mêmes expériences mais en changeant tantôt les coordonnées (latitude et longitude) du centre de la zone tantôt son "rayon" (en °). Mais ces expériences ne sont pas les seules que l'on puisse réaliser avec l'inversion du tourbillon potentiel.

4.2 Expérience avec un nouveau filtre basse fréquence

La distinction entre basse fréquence et haute fréquence joue un rôle fondamental dans ces expériences d'inversion du PV. En effet, pour cette étude de basculement vers la NAO-, seuls les phénomènes basse fréquence ont été étudiés. Sans toucher à l'expérience précédente, il a été réalisé une autre expérience en agissant uniquement sur un nouvel élément : le filtre basse fréquence (BF).

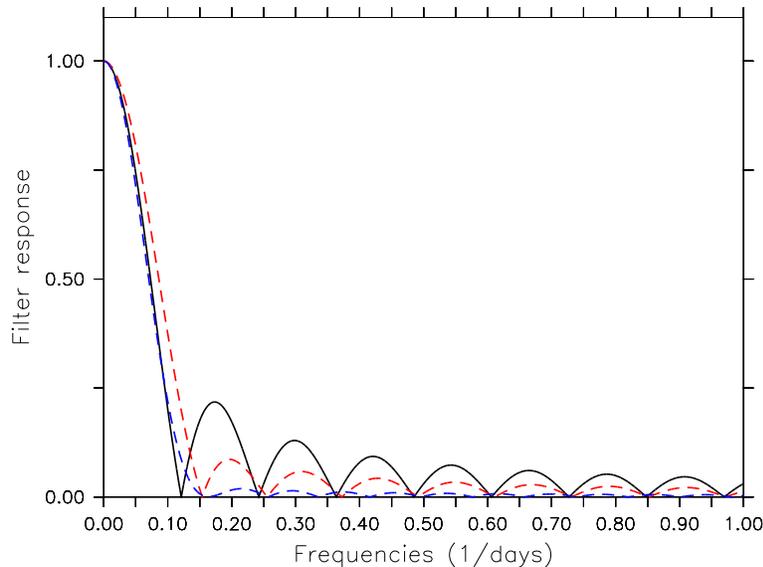


FIG. 13 – réponses de 3 filtres passe-bas dans l'espace de Fourier. **EN NOIR** : moyenne glissante sur 33 pas de temps (8 jours). **EN ROUGE** : méthode gaussienne sur 33 pas de temps (8 jours) avec période de coupure de 8 jours. **EN BLEU** : méthode gaussienne sur 49 pas de temps (12 jours) avec période de coupure de 12 jours.

Sur cette figure, on peut voir l'efficacité de 3 filtres passe-bas (basse fréquence). Ces 3 filtres comme leur nom l'indique, laissent passer la basse fréquence et bloquent la haute fréquence. Comme les instants avaient lieu à 0h00, 6h00, 12h00 et 18h00 UTC, le pas de temps était de 6 heures. Sur la figure, il apparaît très clairement que le filtre représenté en noir n'est pas assez efficace. Il laisse passer certaines hautes fréquences ce qui constitue du bruit. Le fait d'effectuer simplement la moyenne de 33 instants (l'instant en question + 16 instants avant et 16 instants après) ne suffit pas à obtenir de bons résultats. Par conséquent, ce filtre passe-bas n'a pas été utilisé. Les 2 autres filtres sont bien meilleurs car ce sont des filtres gaussiens qui attribuent à chaque instant des coefficients (importants près de l'instant considéré et de plus en plus faibles à mesure que l'on s'en éloigne). Pour ces filtres gaussiens représentés en rouge et en bleu, le bruit en haute fréquence est beaucoup plus faible. On constate aussi que le filtre gaussien bleu est le meilleur avec un bruit presque inexistant. Ceci est dû au fait qu'il prend en compte plus d'instant (49 contre 33 pour le filtre rouge). Ces instants sont répartis symétriquement de part et d'autre de l'instant considéré. D'autre part, la période de coupure du filtre bleu est plus importante, ce qui signifie une fréquence de coupure plus faible. Le filtre passe-bas bleu est donc plus sélectif en basse fréquence que le filtre passe-bas rouge. On peut s'en rendre compte en voyant que la courbe bleue est plus proche de l'axe des ordonnées que la courbe rouge. Jusqu'à présent le filtre basse fréquence utilisé était le filtre rouge. Mais pour cette toute nouvelle expérience,

c'est le filtre bleu qui a été utilisé. En augmentant la période de coupure de 8 jours à 12 jours, on a bel et bien créé un filtre plus sélectif en basse fréquence. Cela signifie que moins de phénomènes seront considérés comme phénomènes de basse fréquence. A contrario, il y aura plus de phénomènes caractérisés par la haute fréquence. Voici le principal résultat obtenu à partir de cette expérience :

4 indices NAO du 3 au 12 decembre 2009

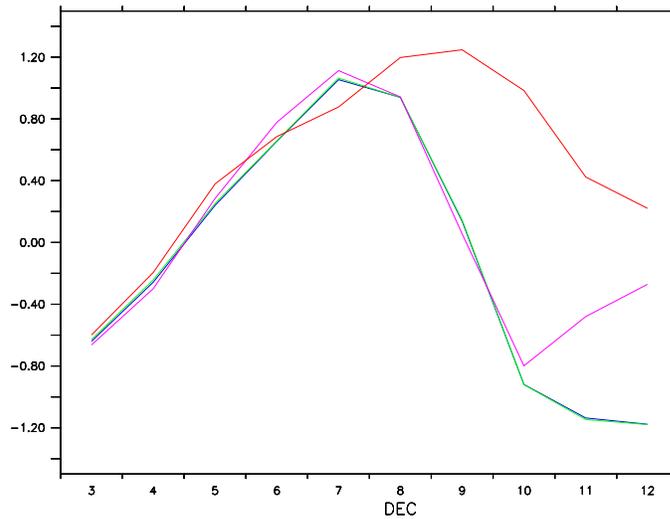


FIG. 14 – Superposition de l'évolution de l'indice NAO entre le 03/12/09 et le 12/12/09 pour la réanalyse du CEP (en bleu), l'analyse d'Arpège (en vert), le run de contrôle (en rose) et l'expérience d'inversion avec un nouveau filtre basse fréquence (en rouge)

Cette figure est analogue à la figure 11 mais avec un changement de la courbe rouge. Comme on peut le voir, dans cette nouvelle expérience l'indice NAO se met à plonger plus tard que dans la réalité. En effet, normalement l'indice NAO commence à diminuer après le 07/12/09. Dans cette expérience, cela ne se produit qu'après le 09/12/09, soit avec un retard de 2 jours. Ce retard est plus important que lors de la précédente expérience d'inversion du PV (courbe rouge de la figure 11). Cela signifie que le changement de définition de la basse fréquence (et donc de la haute fréquence) joue un rôle dans la mise en place de la NAO-. Pour la précédente expérience, la période de coupure était de 8 jours. Cela signifie que seuls les phénomènes ayant une durée de vie moyenne supérieure à 8 jours étaient conservés. Pour cette expérience, la période de coupure est de 12 jours. Ainsi seuls les phénomènes ayant une durée de vie moyenne supérieur à 12 jours sont conservés. On déduit que les phénomènes ayant une durée de vie moyenne entre 8 et 12 jours ont un rôle dans le basculement vers la NAO-. D'abord ils faisaient partis de la basse fréquence, puis ils ont été mis dans la haute fréquence. Ces phénomènes ont un effet d'accélération du basculement vers la NAO- lorsqu'ils sont pris en compte (expérience précédente). A l'inverse, lorsqu'on les néglige le basculement vers la NAO- prend du retard (expérience actuelle). Peut-être même qu'ils ont rôle fondamental dans le basculement vers la NAO-.

Cette situation est assez similaire aux prévisions de modèles à moyen-terme (5 à 8 jours). Il arrive assez fréquemment que les modèles (Arpège ou CEP) prévoient un changement de situation pour une échéance de 5 à 8 jours. Puis ce changement de type de temps est sans cesse repoussé lors des actualisations suivantes. Parfois, le changement de temps se produira avec 3 ou 4 jours d'avance ou de retard, mais il se produire bel et bien. Ceci est dû au fait que dans les modèles à moyenne échéance, certains phénomènes haute fréquence (dépression, cyclogénèse) sont mal représentés, à l'instant initial de l'analyse. Ils vont alors induire des erreurs croissantes à mesure que l'on avance dans la prévision et que l'on s'éloigne de l'analyse. Ainsi, cela provoque dans la prévision une certaine anticipation ou un certain retard des changements de temps. Heureusement l'effet induit ne change

pas fondamentalement la situation prévue par le modèle. Les changements de temps finissent toujours par se produire, mais avec un décalage temporel. Néanmoins dans certaines situations, il arrive que les changements induits par une mauvaise représentation de certains phénomènes haute fréquence provoquent à longue échéance des prévisions complètement indécises. La prévision devient alors peu fiable avec un un faible pourcentage d'occurrence.

4.3 Expérience d'inversion dans la stratosphère

Pour cette expérience, l'enjeu était de confirmer ou d'infirmer une hypothèse selon laquelle, les changements de phase de la NAO débuteraient dans la stratosphère. Une étude similaire avait déjà eu lieu mais pour le NAM (mode annulaire de l'hémisphère nord) dans l'article de Baldwin and Dunkerton (2001). Il y apparaît très clairement que les processus commencent dans la stratosphère avant de gagner la troposphère. Mais rien n'indique qu'il en sera de même pour la NAO. Dans cette nouvelle expérience d'inversion du tourbillon potentiel, l'objectif était de modifier la stratosphère à l'instant initial (le 03/12/09 à 0h00) sans toucher à la troposphère. Etant donné qu'en décembre 2009 le basculement vers la NAO- intervient autour du 07/12/09, il a été décidé de mettre comme conditions initiales la situation du 07/12/09 à 0h00. Il en résulte que cette nouvelle inversion du PV avait comme instant initial la situation du 03/12/09 dans la troposphère et celle du 07/12/09 dans la stratosphère. C'est à partir de cette configuration qu'était lancée la prévision Arpège.

La comparaison ci-après (figure 15) permet de voir que la nouvelle expérience d'inversion du PV créée à l'instant initial (le 03/12/09 à 0h00) une certaine incohérence. Concernant le vent zonal U, la situation du 07/12/09 dans la réalité (analyse Arpège) a bien été transposée au 03/12/09 dans l'expérience. Les couleurs des figures a et b (expérience à l'instant initial) sont plus proches de celles des figures e et f (analyse du 07/12/09) que de celles des figures c et d (analyse du 03/12/09). Certes, cela n'est pas vrai partout. Mais en analysant bien les différentes cartes on s'aperçoit que c'est globalement vrai. Hélas, dans ce rapport les cartes ne peuvent pas être agrandies ! Sur la figure 15, on ne le voit qu'aux niveaux 1hPa et 150hPa. Toutefois, pour d'autres niveaux de la stratosphère on obtiendrait les mêmes ressemblances entre l'analyse Arpège du 07/12/09 et l'instant initial de l'expérience (03/12/09 à 0h00). On obtient donc ce que l'on escomptait. Dans la stratosphère, on a donc l'instant initial de l'expérience (le 03/12/09 à 0h00) très proche de la situation réelle du 07/12/09 à 0h00. Néanmoins, si l'on effectue cette même comparaison entre expérience et réalité (analyse Arpège) pour le géopotentiel Z, on n'obtient pas du tout ces mêmes résultats escomptés. En comparant les contours des figures a et c (géopotentiel à 150hPa), on voit qu'ils sont très ressemblants, à 2 ou 3 détails près. On constate donc qu'à 150hPa (en bas de la stratosphère), le géopotentiel de l'instant initial de l'expérience (le 03/12/09 à 0h00) est très proche de la situation réelle du 03/12/09 à 0h00 (figure c). Pour le géopotentiel, notre expérience démarre sans aucun changement avec la réalité. Notre expérience n'a pas réussi à transposer le géopotentiel réel du 07/12/09 à 0h00 (figure e) vers l'instant initial de l'expérience (figure a).

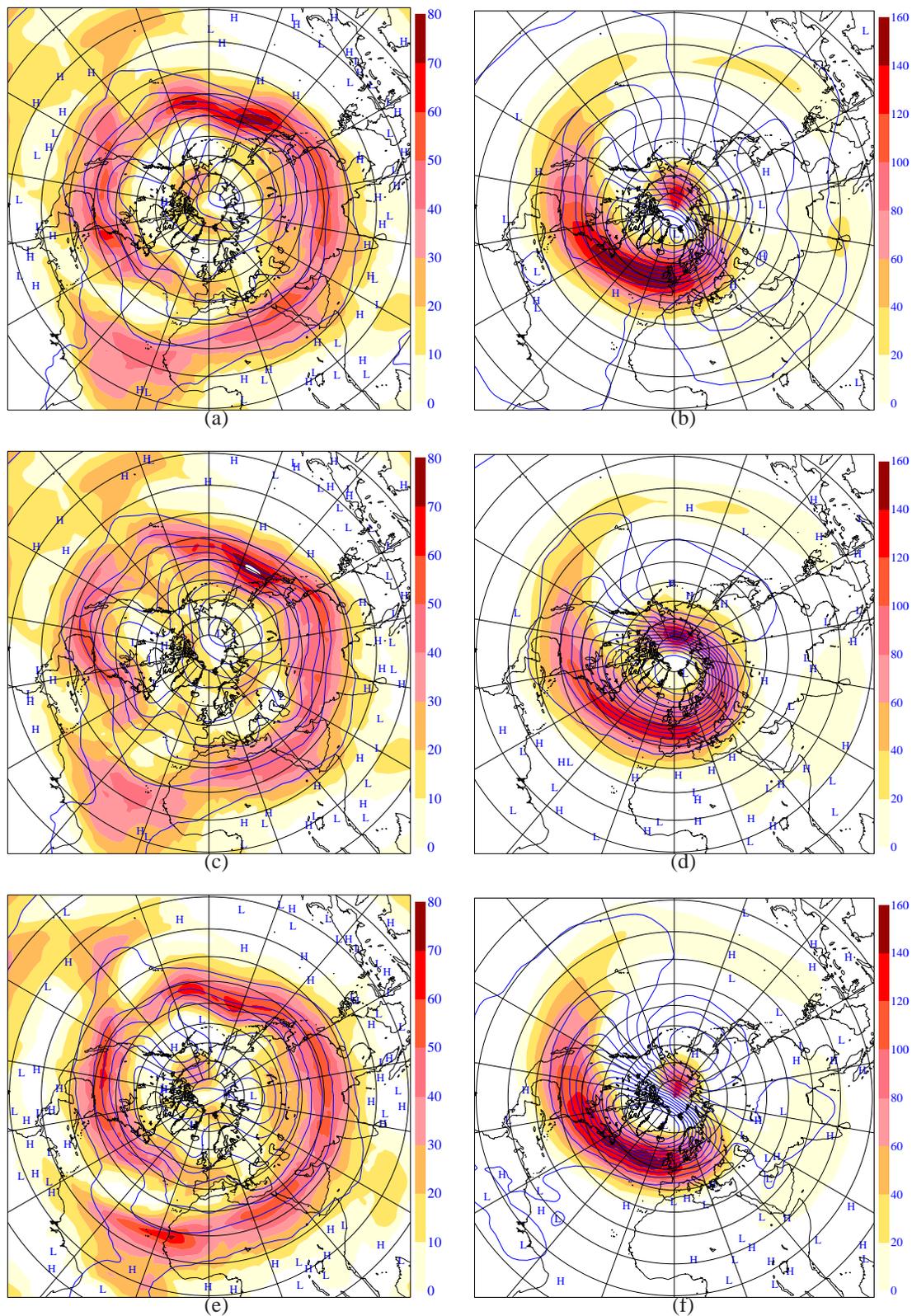


FIG. 15 – Cartes stréréographiques centrées sur le pôle nord. Sur ces cartes, le vent zonal est en couleurs, et le géopotiel est en contours bleus. Les cartes de gauche sont à 150hPa (bas de la stratosphère). Celles de droite sont à 1hPa (haut de la stratosphère). Les cartes a et b correspondent à l’initialisation de l’expérience d’inversion (03/12/09 à 0h00). Les cartes c et d représentent l’analyse Arpège du 03/12/09 à 0h00. Enfin, les cartes e et f montrent l’analyse Arpège du 07/12/09 à 0h00.

Comme on peut le voir au travers de cette comparaison, les résultats obtenus pour cette nouvelle expérience d'inversion du PV sont quelque peu dérangeants. En effet, si pour le vent zonal U, on obtient bel et bien le résultat escompté, à savoir la situation du 7 à l'instant initial (le 3) de l'expérience, pour le géopotentiel cela ne marche pas. Toutefois, il existe une possible explication à cette incohérence. Le géopotentiel est calculé à partir de la température avec une intégration verticale de bas en haut. Comme dans l'expérience, il n'y a aucun changement d'effectuer dans la troposphère, c'est de ce fait normal que le géopotentiel du bas de la stratosphère (vers 150hPa) soit dans l'expérience celui de la réalité, sans changement de date. Par ailleurs, en regardant l'évolution du géopotentiel vers le haut de la stratosphère à 1hPa (figure b), il a été constaté que le géopotentiel à l'instant initial de l'expérience s'éloigne de la réalité du 03/12/09 à 0h00 (figure d). Il ne se rapproche pas pour autant de la situation escomptée, à savoir celle du 07/12/09 à 0h00 (figure f). On obtient au final en haut de la stratosphère (figure b) un géopotentiel dans une situation intermédiaire (ni celle du 3, ni celle du 7). Il convient quand même de rappeler que malgré ce résultat différent de ce que l'on souhaitait, pour le vent zonal l'expérience a fonctionné. On va maintenant voir ce qui en résulte.

Tout d'abord, l'indice NAO va de nouveau être un bon indicateur :

4 indices NAO du 3 au 12 decembre 2009

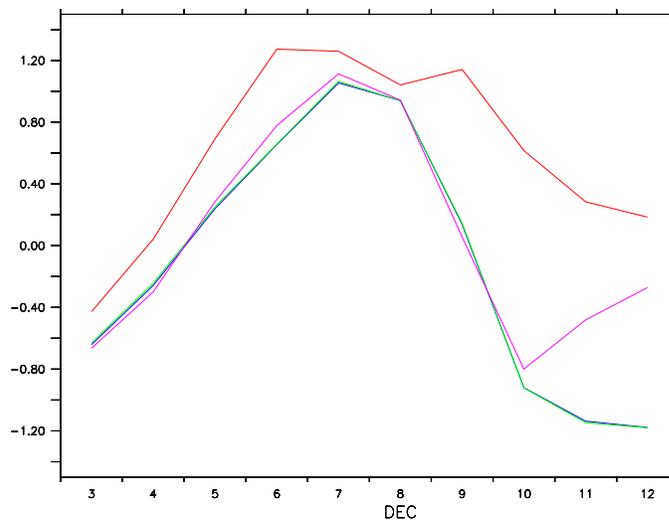


FIG. 16 – Superposition de l'évolution de l'indice NAO entre le 03/12/09 et le 12/12/09 pour la réanalyse du CEP (en bleu), l'analyse Arpège (en vert), le run de contrôle (en rose) et l'expérience d'inversion dans la stratosphère (en rouge)

Cette figure est analogue aux figures 11 et 14. Seule la courbe rouge change. De part une allure de la courbe rouge assez atypique, on constate que la stratosphère joue un rôle prépondérant dans ces situations de NAO. En effet, l'indice NAO décroît moins rapidement vers la NAO-. Il s'agit d'un changement très progressif, car la stratosphère a besoin de temps pour influencer la troposphère. On aurait pu penser que l'indice NAO réagirait immédiatement à la mise en place dans la stratosphère des conditions de changement de phase. Ici ce n'est pas le cas, car avant d'entamer sa chute l'indice NAO augmente encore pendant 4 jours (du 3 au 7). Il ne suffit donc pas d'imposer certaines conditions dans la stratosphère pour voir évoluer l'indice NAO dans le sens escompté.

Or, comme les modifications ne concernent que la stratosphère, il leur faut du temps pour gagner la troposphère puis le sol. Cela ne se fait pas en instantané. Comme le montre cette figure similaire à la figure 10, il n'y a que peu de différences à 300hPa entre l'expérience (modification dans la stratosphère) et le contrôle (aucune modification) jusqu'au 07/12/09. Et pourtant, les modifications ont lieu dès le 03/12/09 0h00. Cela signifie que pendant 4 jours, la mise en place d'un changement

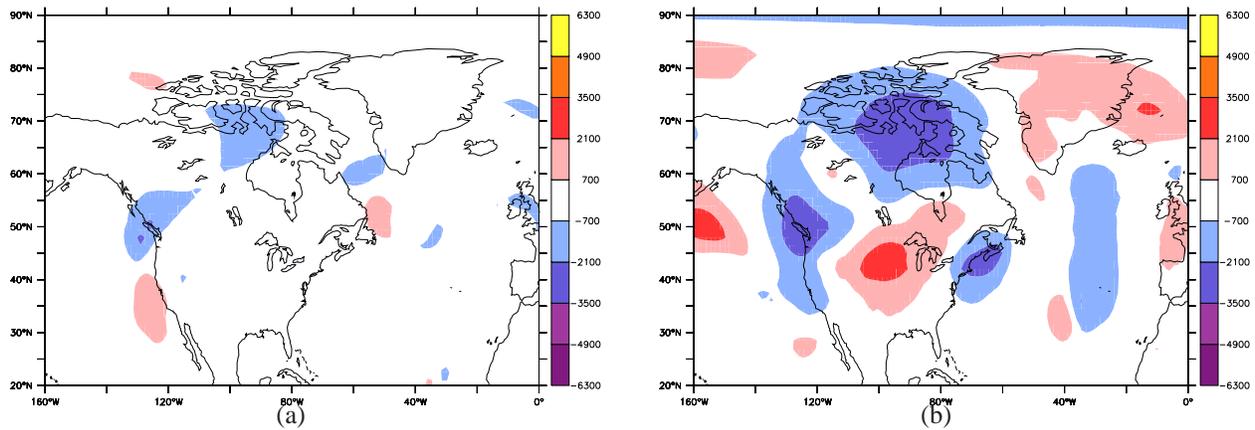


FIG. 17 – différences entre l'inversion et le contrôle le 07/12/09 12h00 (a) et le 10/12/09 12h00 (b)

dans la stratosphère ne provoque que peu de modifications à 300hPa. C'est quelque peu surprenant, car il s'agit pourtant du haut de la troposphère. Les vrais différences entre le contrôle et notre expérience vont apparaître le 10/12/09. Mais encore une fois, en comparant ces différences à celles de la figure 10, on s'aperçoit qu'elles sont moins importantes que pour l'expérience d'étude de l'impact des paquets d'ondes. Or, dans les 2 cas la procédure et l'instant initial (le 03/12/09 à 0h00) sont les mêmes. Ceci prouve qu'un phénomène stratosphérique met plusieurs jours voire plusieurs semaines à influencer la troposphère puis le sol. Pour autant, la stratosphère peut très bien être à l'origine d'un changement de type de temps ou d'un changement de phase de la NAO. Il lui faut juste un peu de temps. Il aurait été intéressant de refaire la même expérience, mais en anticipant de plusieurs jours la modification effectuée dans la stratosphère. On aurait éventuellement pu constater une véritable anticipation de la NAO-. Enfin, il est également possible que les conditions stratosphériques soient nécessaires mais pas suffisantes. Dans cette expérience les conditions stratosphériques favorables au basculement vers la NAO-, ont été transposées au 03/12/09 à 0h00. Or, dans la troposphère le 03/12/09 à 0h00 les conditions ne sont pas réunies pour un changement de phase. Il se peut qu'il faille des conditions favorables au basculement à la fois dans la stratosphère et dans la troposphère. Peut-être qui plus est que dans l'expérience le 07/12/09 à 0h00, les conditions troposphériques sont réunies comme dans la réalité, mais que cela n'est plus le cas dans la stratosphère déphasée.

5 DISCUSSION

5.1 Ce qui a été constaté

Au cours de ce stage, l'accent a été mis sur l'étude de la mise en place de la NAO-. Pour ce faire, 2 cas de transition rapide vers la NAO- ont été étudiés, à savoir décembre 2009 et novembre 2010. Il a été constaté que les déferlements cycloniques précurseurs de la NAO- prennent naissance sur le Pacifique. Il est donc possible de les anticiper avec 10 ou 15 jours d'avance. Plusieurs cartes ont été réalisées pour matérialiser ces déferlements cycloniques (figures 4, 5 et 6 pour décembre 2009, puis figures 8 et 9a pour novembre 2010). Il apparaît assez clairement que les déferlements cycloniques sont des paquets d'ondes de Rossby s'organisant en trains d'ondes. Tout l'enjeu était d'arriver à les empêcher de se développer au dessus de l'Atlantique. Lors de plusieurs expériences d'inversion du tourbillon potentiel, on a atténué l'anomalie du PV dans une certaine zone à un instant donné. On a alors pu constater que cela provoquait un retard dans la mise en place du déferlement cyclonique et dans le basculement vers la NAO-. L'indice NAO amorçait sa baisse avec un jour de retard (figure 11).

Par ailleurs, une toute autre expérience d'inversion du PV a été réalisée. Mais cette fois-ci le changement portait sur le filtre passe-bas. En effet lors de toutes les expériences, seuls les phénomènes basse fréquence ont été étudiés. Il s'agissait toujours d'une méthode gaussienne. Mais contrairement aux expériences précédentes qui utilisaient 33 pas de temps, cette fois-ci 49 pas de temps ont été utilisés. Les périodes de coupures associées étaient de 8 jours précédemment et de 12 jours pour cette nouvelle expérience. L'intérêt d'une telle expérience était donc d'utiliser un filtre basse fréquence plus sélectif avec moins de bruit lié à la haute fréquence. Ce qui a alors été constaté, c'est un retard du basculement vers la NAO- encore plus marqué que pour les expériences précédentes. Les phénomènes ayant une durée de vie moyenne entre 8 et 12 jours jouent un rôle dans le basculement vers la NAO-. Le fait de ne plus les considérer dans la basse fréquence étudiée va ralentir l'arrivée de la NAO-, voire même l'empêcher. On constate la même chose dans les prévisions à moyen terme. Il apparaît alors des anticipations ou des retards dans la prévision de déclenchement de certaine situation météo. Ceci est dû à une mauvaise représentation de certains phénomènes haute fréquence (cyclogénèses) lors de l'analyse. Cela induit une croissance des erreurs au fil de la prévision. Certaines fois, cela provoque même des prévisions avec une faible probabilité d'occurrence.

Enfin, la dernière expérience d'inversion du PV réalisée concernait la stratosphère. Le but était de constater l'influence de la stratosphère sur la NAO. Il avait déjà été démontré que la stratosphère joue un rôle important pour les changements de phase de la NAM (mode annulaire de l'hémisphère nord). Pour la NAM, certaines études comme celle de Baldwin and Dunkerton (2001) ont montré que le changement de phase de la NAM s'amorce dans la stratosphère avant de gagner la troposphère puis le sol. L'objectif de cette dernière expérience était de voir si une transposition à la NAO est possible. Par conséquent, pour notre cas d'étude (décembre 2009) il a été décidé d'imposer certaines conditions initiales dans la stratosphère différentes de la réalité. Comme le basculement vers la NAO- démarre autour du 07/12/09, ce sont les conditions du 07/12/09 à 0h00 qui ont été instaurées pour l'instant initial (03/12/09 à 0h00) de la simulation. Il a lors été constaté que l'indice NAO (voir figure 16) plonge moins rapidement vers la phase négative. Cela prouve que la stratosphère de part son influence sur la troposphère joue un rôle vis à vis de la NAO. Toutefois, il a aussi été constaté que l'effet de la stratosphère sur la troposphère n'est pas immédiat. Les véritables influences ne se font sentir qu'au bout de 4 jours (voir figure 17), c'est à dire le 07/12/09. Il est également envisageable que les conditions stratosphériques soient nécessaires mais pas suffisantes au basculement vers la NAO-. Il faut peut-être simultanément les bonnes conditions stratosphériques et les bonnes conditions troposphériques pour créer un changement de phase.

5.2 Ce qui aurait pu être approfondi

Tout d'abord, toutes les études de ce stage concernaient des basculements vers la NAO-. Il aurait été intéressant de refaire les mêmes études pour des basculements vers la NAO+. A ce sujet, il aurait été bien de comparer la représentation des déferlements cycloniques (vers la NAO-) aux déferlements anticycloniques (vers la NAO+). Ensuite, toutes les expériences d'inversion du tourbillon potentiel qui ont été réalisées, l'ont été pour le seul cas de décembre 2009. Il aurait été bien avec plus de temps de refaire ces expériences d'inversion du PV pour le cas de novembre 2010, cas pour lequel différentes cartes avaient été obtenues. Concernant les expériences d'inversion du PV réalisées, plusieurs améliorations auraient pu leur être apportées. Pour l'expérience d'atténuation de l'anomalie du PV dans une certaine zone du Pacifique, il aurait été bien d'élargir cette zone. Il aurait également été possible d'en changer la localisation pour essayer de jouer sur un autre paquet d'ondes de Rossby. Ceci dans le but de voir l'influence de tel paquet d'ondes du Pacifique sur l'indice NAO quelques jours plus tard. Le vrai but recherché étant d'empêcher le basculement vers la NAO- d'avoir lieu. A ce moment là, il aura été prouvé que tel ou tel paquet d'ondes du Pacifique est à l'origine du déferlement cyclonique sur

l'Atlantique, et donc de la transition vers la NAO-. D'autre part, pour l'expérience d'inversion du PV avec un autre filtre basse fréquence (passe-bas), il aurait été bien de tester d'autres filtres : les uns plus sélectifs et les autres moins sélectifs. Ceci dans le but de bien comprendre l'influence des phénomènes basse fréquence et des phénomènes haute fréquence sur la NAO. Par ailleurs, pour ce qui est de l'expérience d'inversion dans la stratosphère, il aurait été bien d'anticiper au maximum la mise en place des conditions de basculement stratosphériques. Ceci dans le but de mieux constater l'influence de la stratosphère sur la NAO, et de voir le temps que cela prend. Par exemple au lieu de mettre l'instant initial au 03/12/09 (4 jours avant le début du basculement du 07/12/09), il aurait été intéressant de l'installer fin novembre 2009, et de lancer la prévision à partir de là. On peut alors supposer que la décroissance de l'indice NAO intervenait bien avant le 07/12/09. Mais ce n'est qu'une hypothèse qui reste à démontrer. Enfin, il aurait été intéressant de combiner ces différentes expériences d'inversion du PV entre elles. Comme elles ont déjà été analysées séparément, on peut entreprendre une combinaison, déconseillée initialement. En effet, si l'on effectue 2 ou plusieurs modifications lors d'une expérience, on ne saura plus d'où proviennent les résultats. Mais là, cela ne pose aucun problème, car les expériences ont déjà été faites individuellement.

5.3 Ce qui reste à faire

Dans le cadre d'une possible thèse sur ce sujet, de nombreuses pistes de recherches sont envisageables. Tout d'abord, ce stage ne s'est intéressé qu'à la NAO, qui ne représente que 2 régimes de temps sur l'Europe (la NAO- et la NAO+). Il serait intéressant de refaire les mêmes études pour les 2 autres régimes de temps, à savoir la dorsale et le blocage. Ainsi pour chacune de ces 4 situations météorologiques européennes, il serait possible de trouver leurs différents signes précurseurs. Ces signes précurseurs prenant souvent naissance sur le Pacifique, il serait alors possible d'anticiper un changement de type de temps sur l'Europe 10 ou 15 jours à l'avance. Ceci pourrait constituer une révolution dans les prévisions météo. Cette première piste de recherches sur les origines des différents régimes de temps est donc très intéressante. D'autre part, il pourrait s'avérer très important de trouver des liens entre ces phénomènes atmosphériques et des phénomènes océaniques. Par exemple, l'étude de la température de l'océan Atlantique ou du courant du Gulf Stream pourrait apporter quelques précieuses indications dans la compréhension des différents phénomènes étudiés (la mise en place des différents régimes de temps). En parlant de liens entre l'atmosphère et l'océan, il serait également intéressant de voir si les phénomènes El Niño et la Niña influencent les régimes de temps européens. El Niño et la Niña sont des phénomènes à la fois atmosphériques et océaniques. Ils peuvent donc doublement influencer ce qui se passe sur l'Atlantique. Or, c'est la situation sur l'Atlantique qui interagit directement avec l'Europe. Ce type de liens fait parti intégrante des études réalisées en tendances saisonnières. S'intéresser à l'océan et au phénomène El Niño constitue donc une autre piste à explorer lors d'une thèse. Enfin, il serait également utile d'étudier l'évolution de la fréquence des régimes de temps (dont la NAO- et la NAO+). Il serait intéressant de voir quels sont les régimes de temps les plus fréquents en fonction de la période de l'année. Il pourrait aussi être bien de voir l'évolution des ces fréquences dans le temps (par exemple au cours du siècle écoulé). Ainsi on verrait si le réchauffement climatique favorise tel ou tel régime au dépend de tel ou tel autre. Etudier la fréquence des différents régimes de temps au cours d'une année ou au cours du siècle passé peut s'avérer être une dernière piste de recherches pour une thèse.

6 CONCLUSION

Ce stage en milieu de recherche m'aura appris de nombreuses choses. Le fait de l'avoir effectué au Centre National de Recherches Météorologiques m'a permis d'utiliser des outils informatiques propres à Météo-France, comme son super-calculateur Yuki ou le logiciel Olive. Par ailleurs, j'ai découvert la programmation sous Ferret. Il s'agit d'un logiciel très utile d'en la mesure où il permet de créer toutes sortes de cartes ou de champs représentant différents paramètres météorologiques. Par ailleurs, j'ai compris le fonctionnement d'un outil très puissant en météorologie : l'inversion du tourbillon potentiel. J'ai ainsi créé plusieurs expériences pour trouver les influences de tel ou tel système en amont sur la situation météorologique des jours suivants. D'autre part, j'ai développé une certaine démarche scientifique visant à analyser ces résultats tout en gardant un côté critique. En effet, certains résultats devaient être laissés de côté car ils ne correspondaient pas à ce qu'on attendait. Le plus compliqué, c'était de s'apercevoir de certaines erreurs. Mais c'est bien là le métier de chercheur. Le chercheur se doit d'avoir toujours un esprit critique à l'égard de ses résultats. Par ailleurs, j'ai découvert et compris beaucoup de l'oscillation nord atlantique. Mais j'ai vite compris que ce n'était qu'une toute petite partie de ce qu'il reste à faire sur le sujet. Grâce à ce stage, j'ai d'ailleurs développé une certaine humilité vis à vis du monde qui nous entoure. J'ai réalisé combien de possibilités s'offrent aux chercheurs sur cette thématique. D'ailleurs, j'envisage d'effectuer une thèse dans la continuité de ce stage. J'ai déjà plusieurs pistes de recherche sur cette thématique. J'ai conscience qu'il y a beaucoup de possibilités et que 3 années de thèse ne seraient pas de trop. Cela ne correspondrait qu'au début d'une longue histoire internationale sur l'oscillation nord atlantique. En effet, la recherche c'est avant tout des échanges entre collègues du même laboratoire, entre laboratoires d'un même pays, ou encore entre laboratoires de différents pays. La recherche est d'ailleurs universelle. Toute recherche effectuée à un endroit par telles personnes peut être reprise et approfondie ailleurs par d'autres personnes. C'est ce qui rend la recherche efficace. En ce qui me concerne, j'ai pris goût au monde de la recherche, et je vais faire tout mon possible pour être à la hauteur de ses enjeux. Le savoir de demain prend naissance dès aujourd'hui dans les laboratoires. Les possibilités de connaissances étant infinies. La météorologie et l'océanographie sont d'ailleurs des domaines où l'homme a encore le plus à apprendre.

7 BIBLIOGRAPHIE

Références

- Arbogast, P. (2002). L'inversion du tourbillon potentiel : un outil pour comprendre le creusement des dépressions. *La Météorologie*, 8ème série(38) :19–29.
- Baldwin, M. and Dunkerton, T. (2001). Stratospheric Harbingers of Anomalous Weather Regimes. *Science*, 294 :581–584.
- Benedict, J., Lee, S., and Feldstein, S. (2004). Synoptic view of the North Atlantic Oscillation. *J. Atmos. Sci.*, 61(2) :121–144.
- Cassou, C. (2004). Du changement climatique aux régimes de temps : l'oscillation nord-atlantique. *La Météorologie*, 8ème série(45) :21–32.
- Rivière, G. and Orlanski, I. (2007). Characteristics of the Atlantic storm-track eddy activity and its relation with the North Atlantic Oscillation. *J. Atmos. Sci.*, 64 :241–266.
- Thompson, D. and Wallace, J. (1998). The Arctic Oscillation signature in the wintertime geopotential height and temperature fields. *Geophys. Res. Lett.*, 25(9) :1297–1300.
- Thompson, D. and Wallace, J. (2000). Annular Modes in the Extratropical Circulation. Part I : Month-to-Month Variability. *Journal of Climate*, 13 :1000–1015.

Cours du M2 OASC

- Cammas Jean-Pierre. Dynamique de l'atmosphère (tronc commun).
- Frank Roux. Système climatique et couplages (tronc commun).
- Gwendal Rivière. Météorologie dynamique (option).

Sites internet

FERRET

http://ferret.pmel.noaa.gov/ferret_17sep07/Documentation/Users_Guide/v607/fer_html.htm

ERAinterim

http://data-portal.ecmwf.int/data/d/interim_daily/levtype=pl/