MASTER 2

Domaine : Sciences Humaines et Sociales

Mention : Sciences du Territoire

Spécialité Recherche :

Systèmes Territoriaux, Aide à la Décision, Environnement

en réseau sur Rhône-Alpes

Tendances et variabilité du jet stream de l'hémisphère nord : quels liens avec le changement climatique ?

réalisé au **Centre National de Recherches Météorologiques (CNRM)**

Mémoire soutenu le : 29 juin 2015

devant un jury composé de :

Responsable :	M. Cattiaux Julien, chargé de recherche - CNRM
Examinateur(s) :	M. BIGOT Sylvain, professeur des universités en géographie - UJF, LTHE
	Mme ROME Sandra, maître de conférence en géographie - UJF, LTHE

TROU-KECHOUT Nadège

M2 STADE

ANNEE 2014-2015

Etablissements partenaires :

Remerciements

Mes premiers remerciements s'adressent évidemment à Julien Cattiaux pour m'avoir permis de réaliser ce stage et pour m'avoir aidé, soutenu et guidé durant cette expérience enrichissante mais aussi pour m'avoir appris de nombreuses choses. Merci de m'avoir fait confiance pour ce stage et merci pour les smiley sur les nombreux exemplaires de mon mémoire. Merci pour tout.

Je remercie chaleureusement Audrey Brouillet et Eva Krug, sans qui rien n'aurait été pareil. Merci pour les nombreuses heures de travail passées ensemble dans notre cher bureau sans fenêtre, pour les précieux coups de main, et les nombreux fous rires. Je remercie Audrey pour ces petites étoiles et Eva pour les multiples Prix Nobel obtenus à chaque réussite durant cette période. Ce bureau va paraître bien vide et triste sans vous durant ce dernier mois à venir. Vous allez me manquer.

Je remercie également les membres du GMGEC, ceux de l'équipe VDR pour leur accueil et la bonne humeur qu'ils dégagent quotidiennement. Je remercie particulièrement Fabrice Chauvin, Marie Drouard et David Saint-Martin pour leur participation et leurs suggestions concernant le sujet du stage.

De sincères remerciements à l'équipe pédagogique du master STADE pour son implication envers les étudiants, et tout particulièrement à Sylvain Bigot, Nathalie Dubus et Sandra Rome pour m'avoir soutenu et avoir accepté d'encadrer mon travail durant ces deux dernières années.

J'aimerai aussi remercier mon père et ma mère pour leur aide précieuse et qui ont rendu ce stage possible. Une spéciale dédicace à mes deux chères sœurs, Big up Bros ! Mais aussi à Matthieu, mon tendre maçon.

Et merci à Charlotte, Chloé et Maud pour leur soutien et leur attention continuelle….Merci d'avoir été là quand j'en avais besoin.

Résumé

Cette étude s'intéresse à la dynamique atmosphérique des moyennes latitudes et tout particulièrement au jet stream en lien avec le changement climatique. Deux phénomènes majeurs sont attendus dans ce contexte : un réchauffement de la haute troposphère aux tropiques et un réchauffement de la basse troposphère au niveau du pôle. Le jet stream étant pilotés par le gradient de température entre l'équateur et le pôle, il est important de se demander quelles conséquences ces changements peuvent avoir sur ce dernier. Le but de cette étude est donc de voir si des tendances récentes et/ou futures dans la trajectoire du jet stream sont identifiables et de déterminer l'implication du changement climatique dans ces éventuelles tendances. Dans cette optique, plusieurs métriques basées sur des statistiques d'iso-contour de hauteur de géopotentiel permettant de caractériser le caractère ondulatoire et la persistance de la trajectoire sont présentées. Ces métriques sont ensuite validées par rapport à des indices plus classiques tels que les indices de NAO (North Atlantic Oscillation) afin de pouvoir juger de leur pertinence puis sont appliquées aux observations récentes sur la période 1979 – 2014 et aux projections climatiques entre 2070 et 2099 à la fois à l'échelle de l'hémisphère nord et de différents domaines géographiques. Cette étude suggère que les tendances mises en évidence sont cohérentes avec l'extension de la cellule de Hadley et que l'Amplification Arctique n'est pas un effet prédominant.

Abstract

This study deals with the mid-latitude atmospheric dynamics especially the jet stream in the climate change context. Two major processes are expected in this context : an upper-tropospheric warming in the tropics and a lower-tropospheric warming at the pole. The jet stream being driven by the equator-to-pole temperature gradient, it is important to investigate how these changes can affect it. The aim of this study is (i) to assess recent and/or future trends in the jet stream trajectory trends and (ii) to determinate if such potential trends are due to climate change. Several metrics based on iso-contours of the 500hPa geopotential height field are proposed to characterize both waviness and persistence in the jet stream trajectory. Then, these metrics are compared to more classical indices like North Atlantic Oscillation Index to evaluate their relevance, and applied to both on observations and on climate projections in the Northern Hemisphere and in different geographical sub-regions. This study suggests that trends revealed by the jet stream metrics are consistent with the expansion of Hadley cells and that the Arctic Amplification is not a predominant effect.

Liste des abréviations

AM : Amérique du Nord
AMJ : Avril, mai, juin (printemps)
AT : Atlantique Nord
AS : Asie
B13 : Barnes (2013)
Cltot : Longueur de contour
CMIP5 : Programme d'Intercomparaison de Modèles de Climat
c2c : Distance entre contours
EU : Europe
F : Fréquence
Fig. : Figure
FV12 : Francis & Vavrus (2012)
FV15 : Francis & Vavrus (2015)
GES : Gaz à effet de serre
GIEC : Groupe Intergouvernemental d'Experts sur le Climat
HAD : High amplitude day ou jour de grande amplitude
JAS : Juillet, août, septembre (été)
JFM : Janvier, février, mars (hiver)
Latmax : Latitude maximale
Latmin : Latitude minimale
NA : Atlantique Nord
NCEP : National Center of Environmental and Prediction
NH : Hémisphère Nord
NP : Nord Pacifique
OND : Octobre, novembre, décembre (automne)
SS13 : Screen & Simmonds (2013)
Tbl. : Tableau
Z500 : Hauteur de géopotentiel à 500 hPa

SOMMAIRE

Remerciements 2
Résumé 3
Abstract 3
Liste des abréviations 4

Introduction : contexte et problématique de recherche 7

1. État de l'art : de nombreuses incertitudes 9

2. Méthodologie 14
2.1 Nouvelle approche : choix d'un contour centré 14
2.2 Métriques exploratoires : longueur de contour et distance entre contours successifs. 14
2.2.1 Longueur de contour 14
2.2.2 Distance entre deux contours successifs 15
2.2.3 Amplitude latitudinale 16
2.3 Choix méthodologiques : données, période, domaines 16
2.3.1 Présentation des données et période 16
2.3.2. Domaines géographiques 17
2.3.3. Déroulement des étapes 18

3. Validation de la méthode 18
3.1 Comparaison entre saisons, entre statistiques et sur différentes périodes 18
3.2 Comparaison des métriques avec des indices existants 19
3.3 Quelles Incertitudes ? 22

4. Mise en application : tendances et résultats 24
4.1. Tendances récentes 24
4.1.1 Résultats : des tendances ciblées 24
4.1.2 Comparaison avec des résultats existants 28
4.1.3 Étude de cas 30

4.2 Tendances futures : vers un resserrement du jet stream ? 32

Synthèse, discussions et perspectives..... 36

Références bibliographiques..... 39
Webographie..... 42
Table des figures..... 44
Table des tableaux..... 47
Annexes..... 48

Introduction : contexte et problématique de recherche

Le changement climatique avéré et projeté à l'avenir est l'une des préoccupations majeures des sociétés à l'aube du XXI^{e} siècle. Les sociétés humaines ont récemment pris conscience de l'impact des activités anthropiques sur l'environnement et particulièrement sur le climat (développement durable, émergences des énergies renouvelables…).

Comme l'évoquait déjà Charles-Pierre Péguy en 1986[(1)], il est à l'heure actuelle impossible de dissocier l'homme de son impact sur le climat, et plus généralement sur la nature, l'étude du climat sans l'homme ne représentant qu'une vision partielle de ce dernier. Les activités anthropiques se sont multipliées au cours des deux derniers siècles, menant à une surconsommation des ressources et à des émissions toujours plus importantes de gaz à effet de serre (GES). Le développement des technologies, de l'industrie et plus généralement de mondialisation a connu et connait encore aujourd'hui un impact de plus en plus important sur l'environnement et sur le climat. Le Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'évolution du Climat (GIEC ou IPCC) estime qu'au cours des dernières dizaines d'années, la concentration des gaz à effet de serre a atteint un seuil sans précédent depuis 800 000 ans. Le fait que le réchauffement global soit lié aux activités anthropiques est qualifié de « très probable » par le GIEC.

Le GIEC estime également une augmentation des températures d'environ 4,8°C et une augmentation d'environ 1m du niveau marin d'ici 2100 dans le scénario le plus fort. Ces changements déjà perceptibles aujourd'hui et qui le seront d'autant plus à l'avenir rendent certaines zones géographiques plus vulnérables, notamment comme les systèmes insulaires et les zones polaires.

Les moyennes latitudes représentent, de par leur position géographique, un défi de compréhension au niveau des différents processus en interaction. Les conditions météorologiques de ces régions reposent sur l'équilibre instable entre la masse d'air froide venant du pôle et celle chaude venant des tropiques et de l'équateur. Cette zone frontale de discontinuité entre masses d'air est à l'origine de la dynamique atmosphérique caractéristique des latitudes tempérées (e.g. alternance de dépressions et d'anticyclones).

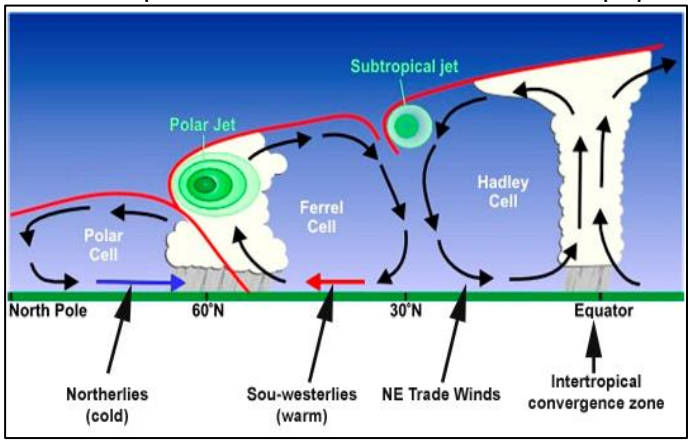


Figure 1. Représentation schématique de la circulation atmosphérique latitudinale à l'échelle de l'hémisphère nord. Source : www.srh.noaa.gov/jetstream/global.jet.htm.

Le jet stream polaire est un courant d'air de la haute troposphère (entre 5 et 10km) situé aux moyennes latitudes (vers 50-60°N) à l'interface entre les deux masses d'air citées précédemment (fig. 1). Ce flux canalisé de vents très puissants

1. « Une étude du climat parait aujourd'hui absurde sans prise en compte de l'homme qui le perçoit et le pense ».

(jusqu'à 350km/h) se déplace d'ouest en est en divagant souvent vers le nord ou vers le sud (adapté de la NOAA). Aux échelles intra-annuelle à intra-saisonnière, les fluctuations du jet stream sont liées au premier mode de variabilité atmosphérique de l'hémisphère nord : l'Oscillation Nord Atlantique (NAO) / Oscillation Arctique (AO). Sa disposition et sa vitesse sont pilotées principalement par le gradient de température entre le pôle et l'équateur (e.g. le Jet Stream est le plus fort en hiver lorsque la différence de température est la plus forte). Le gradient de température connait cependant des modifications en lien avec le changement climatique. Deux phénomènes opposés sont attendus : une augmentation du gradient dans la haute troposphère due à un réchauffement plus marqué dans les tropiques surtout en été (fig. 2, en haut à gauche) et une importante diminution du gradient de surface due à l'Amplification Arctique (AA) au niveau du pôle plus marquée en hiver (fig. 2, en bas à droite) liée à la fonte de la banquise. Ces changements de gradients étant déjà observables, particulièrement l'AA, il est important de s'interroger sur les conséquences actuelles et futures de ces phénomènes sur la trajectoire et les dispositions du jet stream.

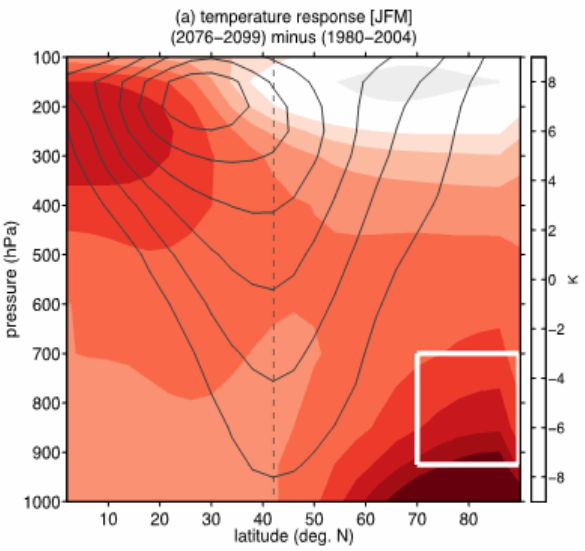


Figure 2. Réponse multi-modèle de la différence de température moyenne entre 2076-2099 et 1980-2004 en hiver selon le scénario RCP8.5 à l'échelle de l'hémisphère nord. La ligne pointillée représente la position moyenne multi-modèle du jet stream aux moyennes latitudes dans la région nord Atlantique/Amérique du nord. La vitesse d'écoulement du jet mesurée sur cette région est représentée par intervalle de 5m/s en commençant à 5m/s. Deux phénomènes sont observables : un réchauffement de la haute troposphère au niveau des tropiques (en altitude) et un réchauffement de la basse troposphère au niveau du pôle (en surface). Source : Barnes et Polvani, 2015.

Le but de ce travail est donc de voir si des tendances récentes et/ou futures dans la trajectoire du Jet Stream sont identifiables et de déterminer l'implication du changement climatique dans ces éventuelles tendances. En d'autres termes, le changement climatique a-t-il un impact significatif sur la trajectoire du Jet Stream, que ce soit durant les dernières dizaines d'années mais aussi dans le siècle à venir ? La principale hypothèse formulée est que des changements au niveau de la trajectoire du Jet Stream sont probablement observables sur la période récente mais aussi de façon plus marquée dans le futur en lien avec les modifications de gradients. Pour répondre à ces interrogations, un premier objectif, d'aspect méthodologique, consiste en la recherche de métriques pertinentes permettant de caractériser au mieux la trajectoire du jet stream. Ainsi, plusieurs métriques seront présentées basées sur des statistiques d'isocontour de hauteur de géopotentiel permettant de caractériser l'aspect ondulatoire et la persistance de la trajectoire. Ces métriques seront validées par rapport à des indices plus classiques afin de pouvoir juger de leur pertinence

puis appliquées aux observations récentes et aux projections climatiques à la fois à l'échelle de l'hémisphère nord et dans différentes régions.

Un état de l'art servant de base aux travaux réalisés pendant ce stage sera présenté en première partie, permettant une vision d'ensemble des études réalisées jusqu'alors et les éléments importants qu'il est possible d'en retirer. La méthodologie employée pour la recherche de ces tendances sera présentée en seconde partie, suivie d'une partie présentant sa validation. Les résultats obtenus seront présentés dans une dernière et quatrième partie.

1. État de l'art : de nombreuses incertitudes

La dynamique atmosphérique des moyennes latitudes étant pilotés par le gradient de température entre l'équateur et le pôle, le changement de température dans la troposphère due au changement climatique peut avoir des répercussions sur la circulation atmosphérique et sur l'intensité et la trajectoire du Jet Stream. Comme évoqué précédemment, deux phénomènes sont attendus : un réchauffement de la haute troposphère au niveau des tropiques et un réchauffement de la basse troposphère au niveau du pôle. Butler *et al.* (2010) et Rivière (2011) montrent à partir d'expériences de modélisation simplifiées et idéalisées, qu'à l'avenir, un réchauffement en altitude au niveau des tropiques seul suggère un renforcement des vents zonaux et un déplacement du jet vers le pôle (fig. 3) et qu'un réchauffement de surface au niveau du pôle seul semble induire un affaiblissement des vents zonaux et un déplacement du jet stream vers l'équateur (fig. 4). Le réchauffement de la haute troposphère est la conséquence de l'expansion de la cellule de Hadley vers le nord (principalement en été et en automne) qui entraine le déplacement de la masse d'air tropicale dans cette même direction (Fu *et al.*, 2006 ; Hu et Fu, 2007 ; Robert et Sherwood, 2008). Cette expansion est aussi projetée dans le futur et semble s'accentuer (Lu *et al.*, 2007). Le réchauffement arctique récent étant singulièrement important (deux fois

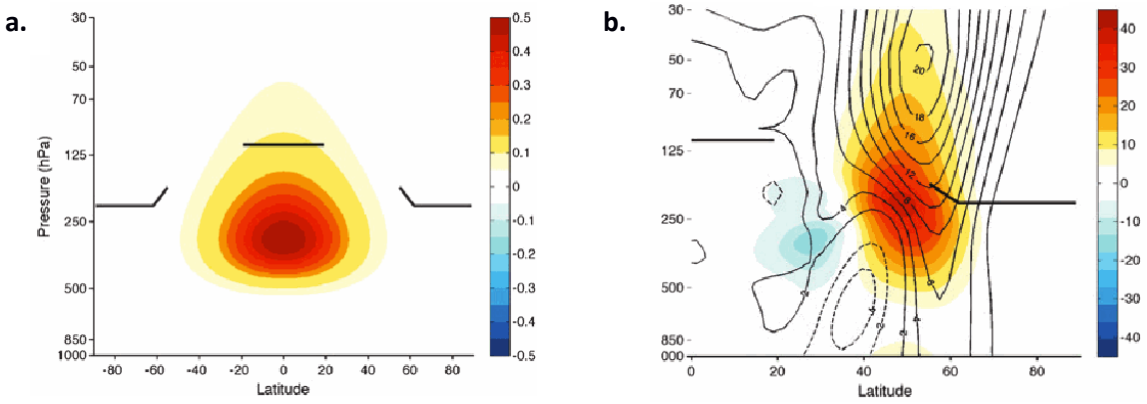


Figure 3. Réponse des vents zonaux (contours en m/s) et du flux tourbillonnant (ombrage en m^2/s^2) de l'Hémisphère Nord (b) à un réchauffement de la haute troposphère au niveau des tropiques (a, K/day). Les lignes noires représentent la hauteur de la tropopause lors du run de contrôle. Ce réchauffement à l'équateur et aux tropiques se traduit par un renforcement et un déplacement vers le nord des vents zonaux au niveau des moyennes latitudes. Source : Butler *et al.*, 2015.

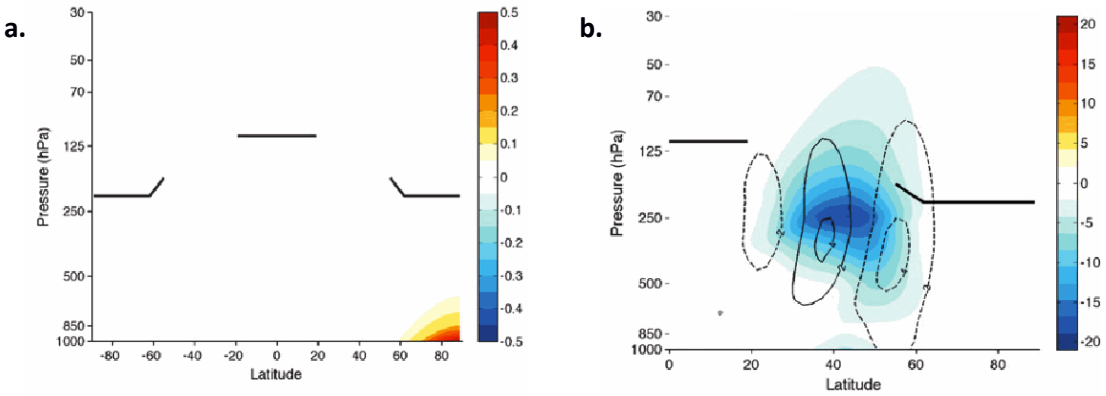


Figure 4. Réponse des vents zonaux (contours en m/s) et du flux tourbillonnant (ombrage en m²/s²) de l'Hémisphère Nord (b) à un réchauffement de la basse troposphère au niveau du pôle (a, K/day). Les lignes noires représentent la hauteur de la tropopause lors du run de contrôle. Ce réchauffement au pôle se traduit par un affaiblissement et un déplacement vers le sud des vents zonaux au niveau des moyennes latitudes. Source : Butler et al., 2015

plus rapide que partout ailleurs sur Terre, d'où le terme Amplification Arctique (AA) ; Screen et Simmonds, 2010), l'attention scientifique s'est principalement portée sur l'influence de la modification du gradient de surface sur le jet stream.

Un signal robuste de l'AA est détectable depuis environ deux décennies (Cohen *et al.*, 2014) comme le montre la figure 5 où les températures des hautes latitudes (>60°N) se dissocient de celles des autres latitudes malgré la variabilité interannuelle. Ce phénomène récent est particulièrement difficile à étudier au vue de la disponibilité réduite des données. Plusieurs études (Overland et Wang, 2010 ; Screen *et al.*, 2013 ; Screen et Simmonds, 2010 ; Serreze et Barry, 2011) suggèrent que l'AA est majoritairement causé par la diminution de la banquise provoquée par l'augmentation des GES dans l'atmosphère (record de la fonte de la banquise en 2012 (Stroeve *et al.*, 2012)). La réduction de la cryosphère modifie l'équilibre énergétique de surface en raison d'un changement d'albédo et induit une absorption plus importante d'énergie. Ce phénomène entraine une intensification des flux de chaleur entre l'océan et l'atmosphère ce qui a pour conséquence le réchauffement de la basse troposphère, elle-même favorisant la diminution de la banquise (boucle de

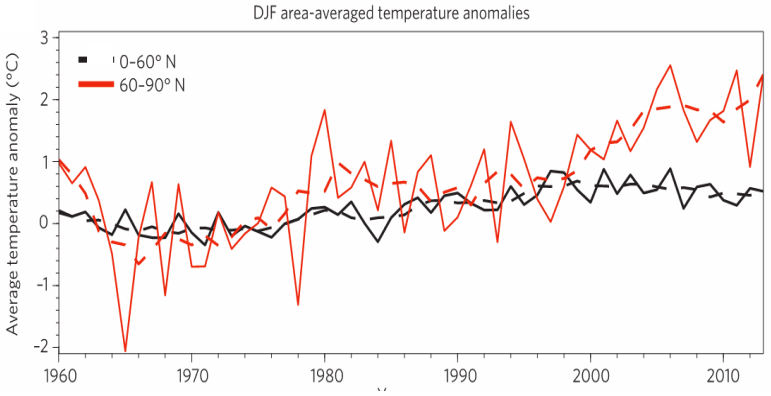


Figure 5. Moyenne des anomalies de température de surface (°C) entre 0 - 60° N (en noir) et 60-90°N (en rouge) avec un lissage sur 5 ans (respectivement en noir et rouge pointillé). Une anomalie de température d'environ +2°C est observable au niveau des hautes latitudes à partir de la fin des années 1990. Source : Cohen *et al.*, 2014.

rétroaction positive). Les changements en Arctique continueront de s'intensifier proportionnellement à l'accumulation plus importante des GES dans l'atmosphère à l'avenir (Meehl *et al.*, 2007) et à la fonte de la banquise (Simmonds, 2015). Certaines études (Francis et Vavrus, 2012 (FV12 par la suite) ; Liu *et al.*, 2012) suggèrent que l'AA impacte d'ores et déjà les conditions météorologiques des moyennes latitudes par la réduction du gradient de température de surface entre le pôle et l'équateur qu'il est possible d'observer à partir du rehaussement des hauteurs de géopotentiel durant la dernière décennie (fig.6) particulièrement en automne et en hiver. Selon ces dernières, cette diminution de gradient s'accompagne d'une décélération des vents zonaux aux moyennes latitudes suivant la relation thermique mais aussi par un ralentissement du jet stream et un déplacement de ce dernier vers l'équateur. Il est également important de noter que, selon ces auteurs, le renforcement de l'AA favorise les phases négatives de l'AO/NAM et de la NAO (fig. 7, ainsi que des changements au niveau du vortex polaire (Kim *et al.*, 2014) et dans la configuration des ondes de Rossby (Petoukhov et Semenov, 2010 ; Kintisch, 2014) suggérant une augmentation de la fréquence des blocages aux moyennes latitudes ces derniers étant responsables de conditions météorologiques persistantes menant aux événements extrêmes (Thompson et Wallace, 2001 ; Screen et Simmonds, 2014). Les dernières dizaines d'années semblent être l'illustration de ce phénomène avec le recensement d'un nombre important d'extrêmes (Coumou et Rahmstorf, 2012) comme des canicules et des sécheresses (Europe en 2003 : Black *et al.*, 2004 ; Russie en 2010 : Dole *et al.*, 2011) ou encore des épisodes d'intenses précipitations. Plusieurs autres études viennent appuyer ce constat en mettant également en avant une diminution des vents zonaux en lien avec l'AA et la diminution du gradient (Francis et Vavrus, 2015 (FV15 par la suite) ; Screen et Simmonds, 2013 (SS13 par la

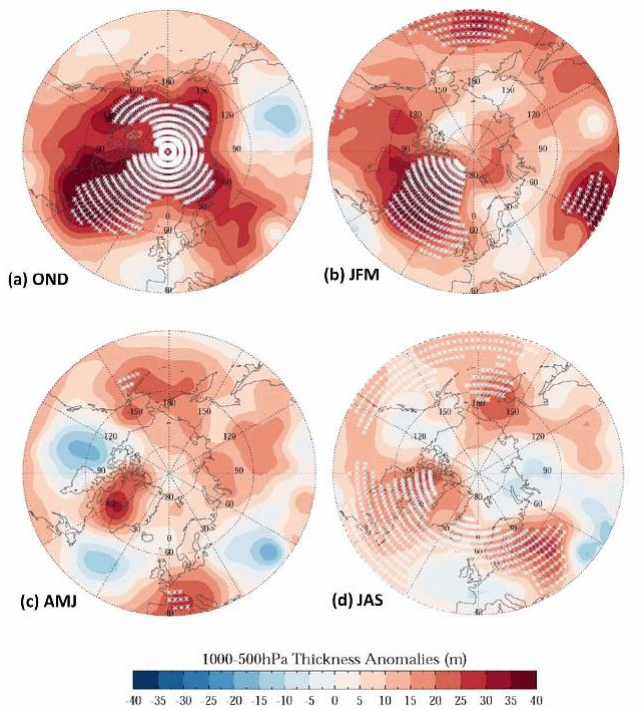


Figure 6. Anomalies saisonnières dans l'épaisseur de géopotentiel entre 1000 et 500hPa au-delà de 40°N sur la période 2000-2010 par rapport à 1970-1999 en automne (OND, a), en hiver (JFM, b), au printemps (AMJ, c) et en été (JAS, d). Les astérisques indiquent une significativité supérieure à 95%. Les données utilisées sont les réanalyses NCEP/NCAR. Des anomalies marquées sont observables en OND et JFM particulièrement au-dessus de la région Nord Atlantique mais aussi au niveau de la région Nord Pacifique et en Asie à des latitudes plus basses. Source : FV12.

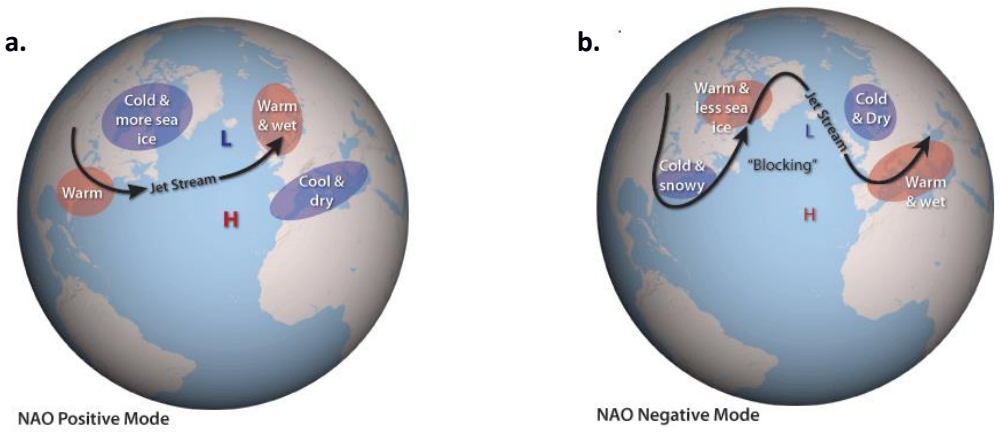


Figure 7. Présentation des deux phases de la NAO et leurs impacts sur le jet stream. La phase positive (a) est caractérisée par un renforcement de la dépression islandaise et de l'anticylone des Açores qui se traduit par un renforcement et une trajectoire moins sinueuse du jet stream. La phase négative (b) se caractérise par un affaiblissement de ces deux centres d'actions et par un affaiblissement et une trajectoire plus sinueuse du jet stream cela pouvant mener à des épisodes de blocages. Source : Evelyn Browining Garris, http://almanac.com, 2012.

suite)) pour chaque saison ainsi qu'une augmentation de l'aspect plus méridien de la circulation selon certaines saisons et domaines géographiques (SS13 même résultats que FV15 mais sans significativité, voir annexe 1). FV15 présente une corrélation entre le changement d'épaisseur de gradient et les changements de fréquence des ondes extrêmes (Spearman's, rho = -0,30 avec une significativité supérieure à 90%) mais aussi un changement dans la fréquence d'occurrence des jours où l'amplitude est supérieure à 35° (High Amplitude Day, HAD) qui suggère une augmentation des configurations de grande amplitude du jet durant ces dernières décennies. Ces études mettent l'accent particulièrement sur l'automne (OND) et l'hiver (JFM) et mettent en avant l'interconnexion de l'ensemble de ces phénomènes et suggèrent également qu'ils connaitront une intensification à l'avenir en parallèle de celle du changement climatique.

A l'opposé, d'autres études soulignent des tendances différentes et parfois contradictoires au constat précédent. Barnes (2013, B13 par la suite) n'observe qu'une diminution significative des vents zonaux en OND sur un domaine d'étude commun aux différentes études réalisées sur le sujet (domaine nord atlantique). Elle suggère que l'observation d'une disposition plus méridienne de la circulation et une réduction des vents zonaux durant chaque saison est la conséquence d'un biais méthodologique en lien avec l'élévation thermique du géopotentiel causée par le réchauffement climatique. Barnes et Polvani (2015) mettent également en évidence des tendances contraires en montrant qu'à l'avenir, le jet stream semble se déplacer vers le pôle plutôt que vers l'équateur sauf en hiver pour ce même domaine d'étude, et que l'étendue des ondes tend à diminuer plutôt qu'à augmenter (principalement au printemps et en été, pas de consensus des modèles en hiver). Une diminution de la fréquence de blocage à l'avenir est également mise en avant dans cette

étude mais aussi par plusieurs autres études (Woolings *et al.,* 2014 ; Hassanzadeh *et al.*, 2014 ; Schneider *et al.*, 2015) qui suggèrent qu'il n'existe pas de lien entre l'AA et la diminution du gradient de température et la fréquence des blocages ou que ce dernier n'est pas le phénomène prépondérant. Ces différents résultats remettent donc l'impact de l'AA et celui du réchauffement de la basse troposphère en question. A l'heure actuelle, il n'existe pas de consensus à propos des impacts de ces deux types de réchauffement sur les moyennes latitudes et particulièrement sur le jet stream (fig. 7 et 8). Néanmoins, l'ensemble des études s'accordent sur le fait que les relations entre l'AA, le réchauffement de la haute troposphère et les conditions météorologiques des moyennes latitudes ne se résument pas à un seul lien de cause à effets mais qu'elles reposent sur une interconnexion d'éléments complexes (fig. 8). Plusieurs méthodologies et métriques ont été mises en place afin de pouvoir quantifier les changements de dispositions et du caractère ondulatoire du jet stream (annexe 1), cependant certaines différences sont observables dans les résultats selon les méthodologies employées, les domaines géographiques et les saisons étudiées. Le lien entre le changement climatique et la configuration du Jet Stream ainsi que les conditions météorologiques des moyennes latitudes reste un sujet à discussion largement débattu par l'ensemble des scientifiques. Cette étude s'inscrit donc dans un contexte de fortes incertitudes et tend vers la recherche d'éléments pouvant répondre à ces interrogations.

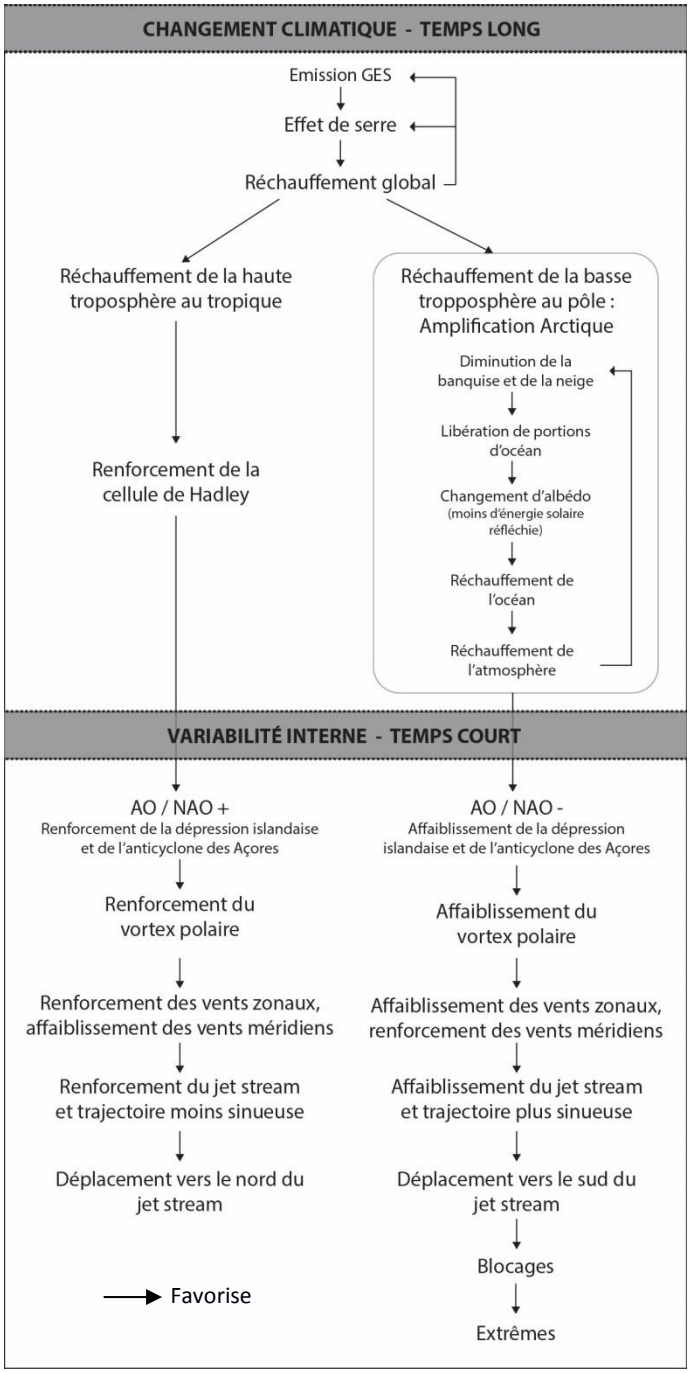


Figure 8. Schéma récapitulatif des différents processus et enjeux selon deux ordres temporels : le temps long (décennal à centennal) et le temps court (interannuel à décennal).

2. Méthodologie

2.1 Nouvelle approche : choix d'un contour centré

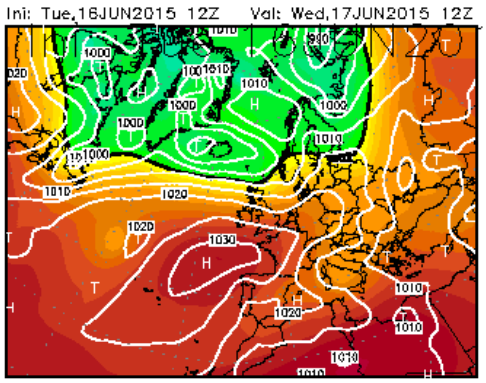


Figure 9. Carte de prévision météorologique basée sur le Z500. Adaptée de : http://www.wetterzentrale.de.

Quelques études récentes ont proposé d'étudier le jet stream à partir d'un isocontour (appelé aussi contour dans ce rapport) de Z500 fixe (JFM : 5400, AMJ : 5500, JAS : 5700, OND : 5600), cette variable décrivant plutôt bien la circulation atmosphérique avec la séparation entre les masses d'air polaire et tropicale (fig. 9). Cette approche se base sur le déplacement saisonnier du géopotentiel lié au réchauffement de l'air en été (contour plus haut en été, plus bas en hiver). Néanmoins, les différentes études réalisées sur le sujet basées sur l'utilisation d'un contour fixe changeant selon les saisons ne semblent pas s'accorder sur les résultats obtenus et/ou leur significativité. Cette approche n'a pas permis la formation d'un consensus sur les tendances récentes observées. En partant de ce constat, l'étude ci-contre se base sur une approche nouvelle reposant sur l'utilisation d'un contour recentré, c'est-à-dire qu'à chaque pas de temps, la valeur de l'iso-contour sélectionné est définie comme la moyenne du Z500 sur la bande 30 - 70°N. En pratique, le contour zéro de la variable recentrée est utilisé [(1)]. Cela permet de s'affranchir du cycle annuel et de s'adapter à l'élévation thermique du géopotentiel liée au changement climatique. Ainsi, le niveau de l'isocontour sélectionné varie à chaque pas de temps étudié.

1. Contour recentré : $Z' = Z - \text{moyenne}_{30\text{-}70}(Z)$

2.2 Métriques exploratoires : longueur de contour et distance entre contours successifs

2.2.1 Longueur de contour

La métrique principale étudiée est la longueur totale de contour exprimée en milliers de kilomètres. Cette métrique permet l'appréhension de l'amplitude latitudinale et du caractère ondulatoire du Jet Stream, la longueur étant directement en lien avec la sinuosité du jet. Théoriquement, une importante amplitude et sinuosité du jet sous-entendent une longueur de contour plus importante, avec une élongation vers le nord et/ou le sud (fig. 10b.). A l'opposé, une amplitude et une sinuosité faible évoque plutôt une longueur de contour faible (fig. 10a). La sélection du contour sur lequel les calculs de statistiques sont appliqués est réalisée à partir de la fonction « contourLines » du package « grDevices » de R qui permet la localisation des points de grilles selon un même niveau de géopotentiel. Le calcul de longueur de contour repose sur la fonction « perimeter » du package

« Geosphere ». Dans certains cas, plusieurs contours peuvent être détectés pour un même pas de temps. Ainsi, la longueur de l'ensemble des contours est additionnée afin d'assurer la continuité entre deux situations successives (annexe 2).

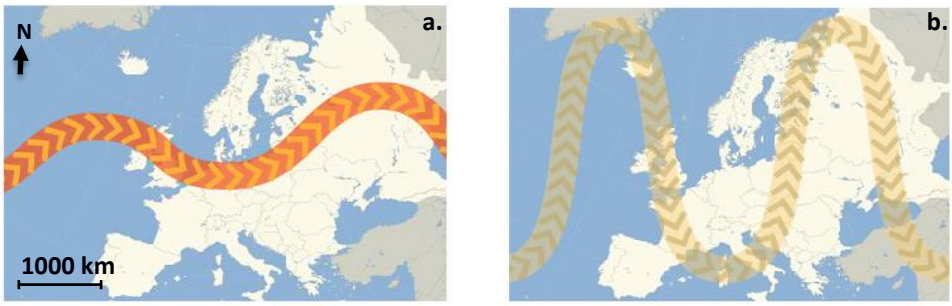


Figure 10. Présentation de deux dispositions du Jet Stream : forte intensité, sinuosité et amplitude réduite (a) ; faible intensité, sinuosité et amplitude forte (b). Adaptée de : http://skepticalscience.com/jetstream-guide.html

2.2.2 Distance entre deux contours successifs

La seconde métrique étudiée est la distance entre deux contours successifs (fig. 11). Ce paramètre mesure plutôt la vitesse de l'écoulement du courant avec une évolution plutôt ouest-est. Une distance entre contours plus importante sous-entend un déplacement plus important du contour entre les deux pas de temps. A l'opposé, une diminution de la distance entre contours sous-entend un ralentissement du déplacement du contour et donc renvoie à la notion de persistance. Cette métrique repose sur le calcul de la distance entre chaque point du contour de référence et le point le plus proche sur le contour du pas de temps successif, comme par exemple entre le point 1 et le point 2 de la figure 9. Néanmoins, la mesure n'est pas symétrique selon le contour utilisé comme référence. En effet, les distances calculées entre chaque point changent en fonction de ce dernier (le point le plus proche du point 1 est le point 2 si le contour de référence est celui à l'instant t, toutefois, le point le plus proche du point 2 est le point 3 si le contour de référence est le celui à l'instant t + 1). Ainsi, pour rendre la mesure symétrique, la distance entre contours repose sur la moyenne de la distance entre le contour à l'instant t et le contour à l'instant t +1 et de la distance entre le contour à l'instant t +1 et le contour à l'instant t.

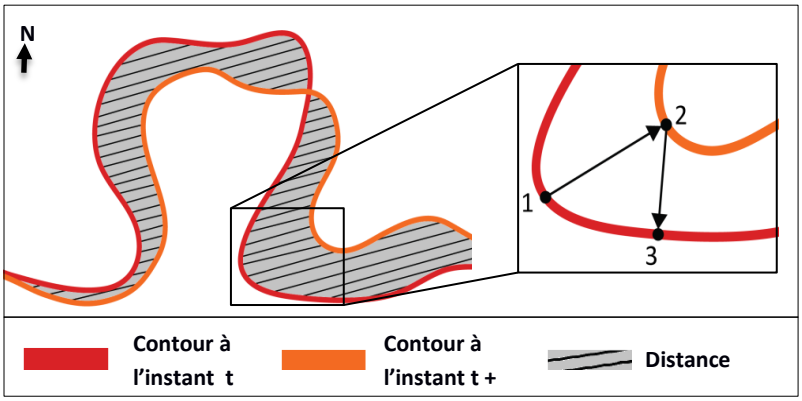


Figure 11. Schéma présentant le calcul de la distance entre deux contours successifs.

2.2.3 Amplitude latitudinale

Afin de pouvoir comparer les résultats obtenus à l'état de l'art, deux métriques issues de la littérature sont utilisées. L'amplitude latitudinale (nommée amplitude dans ce rapport) d'un contour est calculée à partir de la différence entre la latitude maximale et la latitude minimale atteinte par le contour observé. Cette métrique équivaut à la méthode « DayMaxMin » de Barnes (2013). L'amplitude est aussi appréhendée à l'aide du nombre de jours de grande amplitude (HAD), c'est-à-dire les jours où l'amplitude est supérieure à 35°. Cette méthode et les seuils appliqués sont issus de FV15.

2.3 Choix méthodologiques : données, période, domaines

2.3.1 Présentation des données et période

Ce travail se base sur l'étude du géopotentiel à 500hPa (Z500, variable descriptive de la circulation atmosphérique de la moyenne troposphère) à l'aide de données issues de réanalyses. Les réanalyses permettent une reconstitution de l'état du système terrestre suivant une grille spatiale fixe sur plusieurs dizaines d'années à l'échelle du globe. Elles résultent de la combinaison de modèles de prévisions météorologiques et d'observations de l'état de l'atmosphère et de la surface en plusieurs endroits du globe provenant de radiosondages, de stations météorologiques ou encore de satellites (Consortium Ouranos, 2015).

Les deux types de réanalyses utilisées pour l'étude de la période historique (tbl. 1) proviennent de l'European Center for Medium-Range Weather Forcasts (ECMWF) et du National Center of Environmental and Prediction (NCEP/NCAR, États-Unis) et se présentent sous forme de fichiers NetCDF.

Réanalyses	Période	Caractéristiques
NCEP-2 (NCEP/NCAR)	1er janvier 1979 – 31 décembre 2012	Maille spatiale : environ 250km 28 niveaux verticaux (18 en hauteur de géopotentiel) Données journalières
ERA-INTERIM (ECMWF)	1er janvier 1979 – 31 décembre 2014	Maille spatiale : environ 80km 60 niveaux verticaux (le plus haut à 0.1 hPa) Données journalières

Tableau 1. Présentation des données de réanalyses.

La période d'étude s'étend de 1979 à 2014 (2012 pour les réanalyses NCEP2). Les satellites ayant permis de rendre plus fiables les données récoltées, seules les données après le début de leurs utilisations sont utilisées. Par ailleurs, il est également important d'utiliser des données homogènes d'un point de vue temporel pour la recherche de tendances.

Pour analyser l'évolution du Jet Stream dans les années futures (fin du XXI[e] siècle), les données issues des modèles du Programme d'Intercomparaison de Modèles de Climat (CMIP5) sont utilisées. Ce projet regroupe plus d'une vingtaine de centres modélisant le climat à travers le monde (annexe 3) permettant de réaliser des projections climatiques pour le XXI[e] siècle sur la base de scénarios socio-économiques. L'étude s'est focalisée sur 30 ans de données futures entre 2070 et 2100 selon le scénario RCP8.5 du Groupe Intergouvernemental d'Experts sur le Climat (GIEC), soit le scénario le plus fort en termes d'augmentation des émissions des GES et de la concentration en CO_2 durant le prochain siècle (fig. 12) dans le but de maximiser la détection d'un éventuel signal impliquant le changement climatique. De plus, les données historiques issues de ces différents modèles ont été utilisées en parallèle des réanalyses afin de relativiser les résultats obtenus sur les différentes périodes.

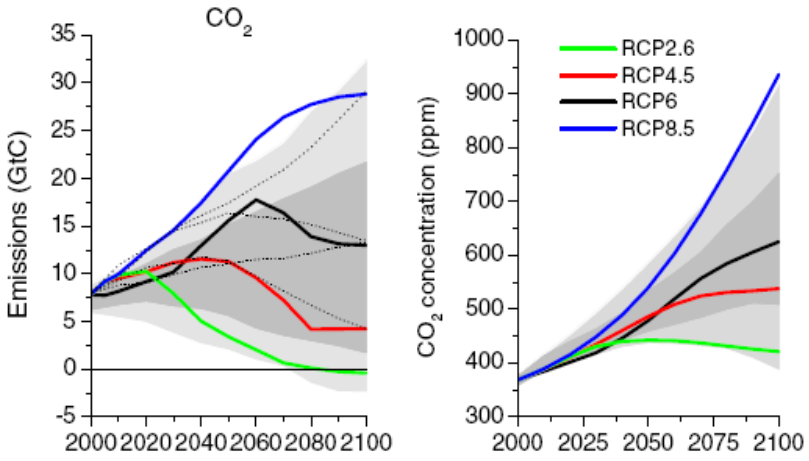


Figure 12. Émissions et concentration de CO2 selon les 4 scénarios RCP entre 2000 et 2100. Source : Van Vuuren, 2011.

Les saisons sont définies comme établies dans la littérature: hiver (JFM), printemps (AMJ), été (JAS) et automne (OND). Ce découpage des saisons correspond au minimum estival (JAS) et au maximum hivernal (JFM) de l'étendue de la banquise arctique (FV15).

2.3.2. Domaines géographiques

Plusieurs domaines géographiques ont été sélectionnés afin de voir si des tendances sont détectables sur des régions plus ciblées qu'à l'échelle de l'hémisphère. L'ensemble des domaines sont compris entre 20°N et 80°N en termes de latitude et s'étendent selon différentes longitudes (tbl. 2). Les domaines ont été choisis en fonction des études précédemment réalisées pour permettre la comparaison des résultats. Le domaine Atlantique Nord est représenté par deux boites géographiques différentes. La boîte NA rassemble l'océan Atlantique et l'Amérique du Nord (même domaine que FV12, SS13 et Barnes, 2011) alors que la boite AT rassemble l'océan Atlantique et l'Europe (même domaine que FV15).

Domaines		Longitudes
Nord Atlantique	(NA)	130°W – 10°W
	(AT)	75°O – 60°E
Europe	(EU)	15°O – 45°E
Amérique du Nord	(AM)	140°O – 70°O
Nord Pacifique	(NP)	120°E – 120°O
Asie	(AS)	30°E – 150°E
Hémisphère Nord	(NH)	180°O – 180°E

Tableau 2. Domaines géographiques et longitudes associées.

2.3.3. Déroulement des étapes

Plusieurs étapes de traitements sont réalisées comme l'illustre la figure 13.

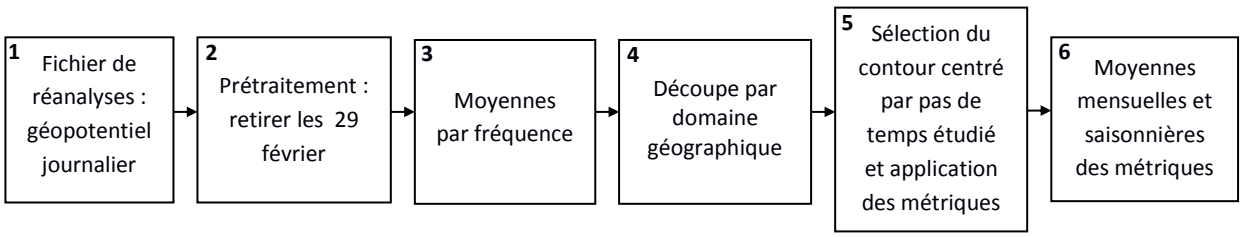


Figure 13. Domaines géographiques et longitudes associées.

L'ensemble des manipulations a été réalisé à l'aide du logiciel R et de commandes CDO (Climate Data Operators), ces dernières permettant la manipulation de fichiers NetCDF. Il est important de noter que l'étape 3 sert de filtrage temporel et consiste en la réalisation de moyennes du Z500 selon différents pas de temps à partir des données journalières, diverses fréquences de moyennes pouvant mettre en avant des tendances à différentes échelles de temps de la circulation atmosphérique. Les moyennes sont réalisées selon 2, 5, 7 et 14 jours mais également par mois (28-30-31 jours selon les mois).

3. Validation de la méthode

3.1 Comparaison entre saisons, entre statistiques et sur différentes périodes

La première étape de validation consiste à voir si un cycle saisonnier est observable dans les données obtenues à l'aide de la méthodologie choisie. Les hauteurs de géopotentiel utilisées pour chaque pas de temps avec un contour recentré évoluent saisonnièrement (fig. 14a) avec un contour élevé en été (entre 5700 et 5750) et plus bas en hiver (entre 5400 et 5500). Ce cycle saisonnier est aussi visible en termes de longueur de contour et distance entre contours avec des longueurs plus grandes et des distances changeantes selon les saisons (fig. 14b et c). Ici est mis en évidence l'intérêt d'utiliser un contour centré sur 30-70°N qui décrit

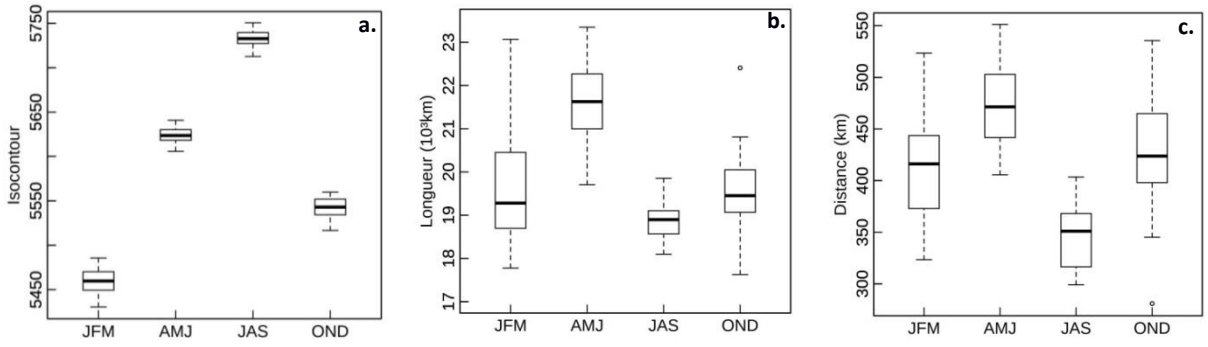


Figure 14. Hauteurs géopotentielles (a), longueur de contour (b) et distance entre contours successifs (c) par saison pour le domaine Nord-Atlantique (NA) sur la période 1979 – 2014. Chaque boîte à moustaches regroupe 36 saisons. Le cycle saisonnier du géopotentiel se retrouve sur ces trois graphiques.

bien l'écoulement des moyennes latitudes en s'affranchissant du cycle annuel du Z500. De plus, le lien entre longueur de contour et amplitude se confirme (corrélation de Bravais-Pearson). A l'opposé, d'après le mécanisme et l'hypothèse de FV12, il était attendu que la distance entre contours évolue dans le sens inverse de la longueur et de l'amplitude (longueur importante de contour = contour plus sinueux avec augmentation de la persistance = distance entre contours réduite). Ici, il est mis en évidence que la longueur de contour et la distance entre contours sont corrélées positivement (fig. 15).

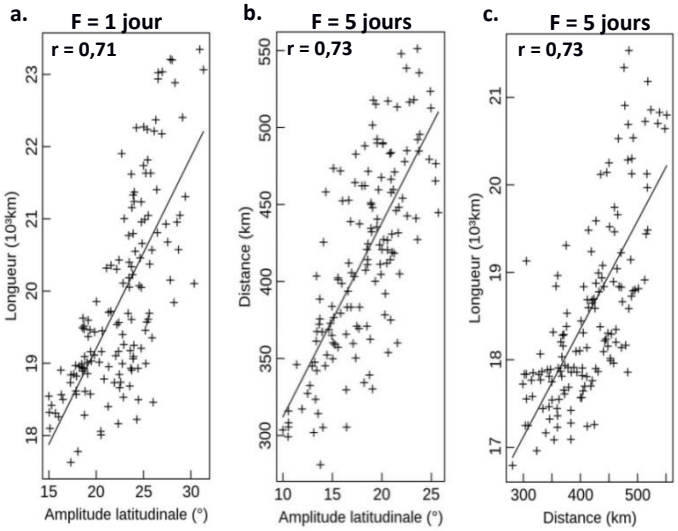


Figure 15. Relation bivariée entre la longueur de contour et l'amplitude (a), la distance entre contours successifs et l'amplitude (b) et la longueur de contour et la distance entre contours (c) par saison pour le domaine Nord Atlantique (NA) sur la période 1979 – 2014. Chaque point représente une saison. Ces trois graphiques montrent que ces 3 variables sont dépendantes entre elles.

3.2 Comparaison des métriques avec des indices existants

3.2.1 Indices NAO

L'indice d'Oscillation Nord Atlantique (NAO) est un indice basé sur la différence de pression au niveau de la mer entre Lisbonne au Portugal au cœur de l'anticyclone des Açores et Reykjavík en Islande au cœur de la dépression islandaise (Osborn, 2006). Il caractérise la NAO, le premier mode de variabilité atmosphérique dans la région Nord-Atlantique et notamment en Europe. L'intérêt est de comparer les deux métriques étudiées à des indices robustes existants comme celui de la NAO pour montrer que ces dernières ne sont pas en totale inéquation avec des phénomènes déjà connus et quantifiés. Il existe plusieurs indices de NAO. Dans cette étude sont utilisés l'indice d'Hurrel et celui d'Osborn. Ces deux indices présentent de légères différences mais restent globalement similaires. Les graphiques suivants présentent les résultats selon l'indice d'Osborn (voir annexe 4 pour les résultats avec l'indice NAO Hurrel et le domaine AT).

La longueur de contour est fortement corrélée aux indices NAO en automne (r compris entre -0,62 et -0,78 selon les différentes fréquences en NA et -0,48 et -0,79 en AT) et en hiver (r entre -0,48 et -0,76 en NA ; entre -0,43 et -0,83 en AT) avec une significativité supérieure à 99% (test de Student, fig. 16a). La distance entre contours est elle aussi fortement liée aux indices NAO en hiver (r entre -0,50 et -0,78 en NA ; entre -0,58 et -0,78 en

AT sauf pour la fréquence journalière : r = -0,37) avec significativité supérieure à 99%, (fig. 16b) mais légèrement moins en automne (r entre -0,29 et -0,69 en NA, entre -0,35 et -0,66 pour AT (significativité supérieure à 99% sauf dans deux cas spécifique de fréquence, voir annexe 4). Généralement, plus le nombre de jours sur lequel les moyennes sont effectuées augmente, plus la corrélation diminue. Néanmoins, en ce qui concerne la distance entre contours, ce n'est pas la fréquence journalière qui possède les corrélations les plus fortes. Ces dernières se retrouvent sur les moyennes réalisées sur deux jours jusqu'à celles réalisées sur deux semaines.

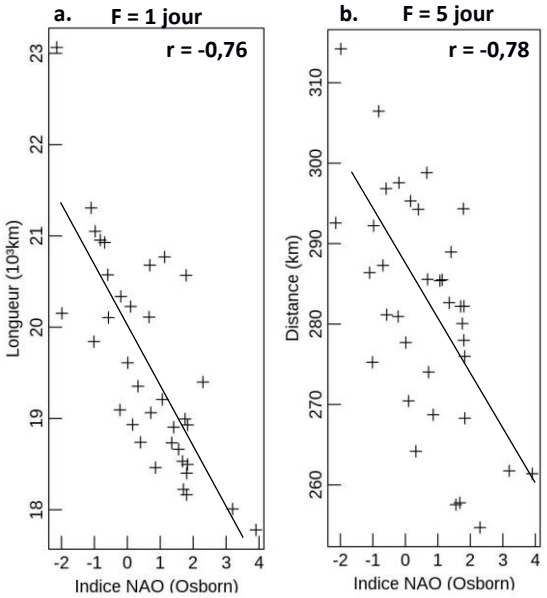


Figure 16. Relation bivariée entre la longueur de contour (a), la distance entre contours sucessifs (b) et l'indice NAO (Osborn) en hiver (JFM) pour le domaine Nord-Atlantique (NA) sur la période 1979 – 2014. Chaque point représente une saison. Ces deux graphiques mettent en évidence la corrélation entre la longueur de contour et la distance entre contours successifs avec l'indice NAO.

Ainsi, lorsque l'indice NAO est négatif, la longueur de contour ainsi que la distance entre contours sont importantes. Au contraire, lorsque l'indice NAO est positif, la longueur de contour ainsi que la distance entre contours sont faibles, liées notamment au renforcement des vents d'ouest au niveau des moyennes latitudes. Par exemple, l'année 2010 est une année record en termes d'indice NAO (en DJF, Cattiaux *et al.*, 2010) avec l'indice saisonnier négatif le plus important (3,45 en OND, -4,62 en décembre, indice NAO d'Osborn). L'hiver et l'automne 2010 représentent respectivement des records en termes de longueur pour le domaine NA (fig. 17) et pour le domaine AT mais de façon moins marquée pour ce dernier. L'année 2010 ne se démarque pas particulièrement au niveau de la distance entre contours.

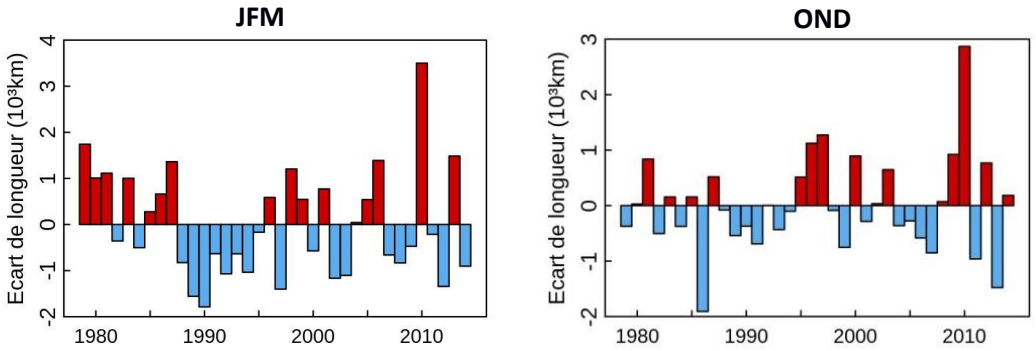


Figure 17. Écarts à la moyenne de la longueur de contour en JFM et en OND pour le domaine Nord-Atlantique (NA) sur la période 1979 – 2014. La moyenne est calculée sur l'ensemble de la période. L'année 2010 se démarque particulièrement du point de vue de ces deux métriques.

3.2.2 Indice de blocage

Un blocage est caractérisé par l'interruption de la circulation zonale climatologique par un fort et persistant flux méridien causé par la stagnation d'un anticyclone. La progression vers l'est des perturbations synoptiques est obstruée pendant plusieurs jours à quelques semaines, conduisant à des épisodes de persistance météorologique favorisant les extrêmes. Il est souvent fait allusion dans la littérature qu'une disposition plus méandreuse et un ralentissement de la propagation des ondes favorise la fréquence d'occurrence de ce phénomène (cf. état de l'art).

L'indice de blocage utilisé pour comparaison est celui de Tibaldi-Molteni (Tibaldi & Molteni, 1990) basé sur l'indice de Lejenas & Okland (1983). En suivant cet indice, il est possible de parler de blocage lorsque les valeurs de deux gradients méridiens d'altitude géopotentielle dépassent certaines valeurs seuils pour chaque jour étudié. Ainsi, l'indice de blocage est calculé sur la région Atlantique Nord (NA : 130°W – 10°W) et est comparé à la longueur de contour ainsi qu'à la distance entre contours sur les domaines Nord Atlantique.

Il existe un lien fort entre les longueurs de contours et les distances entre contours mesurées sur l'Atlantique Nord et les indices de blocage en hiver (longueur : r compris entre 0,65 et 0,74 pour NA (sauf fréquence deux semaines et mensuelle) et entre 0,44 et 0,78 en AT avec une significativité supérieure à 99% (sauf pour la fréquence mensuelle en NA ; distance : r entre 0,53 et 0,72 en NA, entre 0,52 et 0,65 (sauf la fréquence journalière) en AT avec significativité supérieure à 99% sauf fréquence journalière pour AT). Cette tendance est également visible en automne mais de façon moins marquée (longueur : r compris entre 0,44 et 0,59 en NA, entre 0,58 et 0,70 en AT avec une significativité à 99% ; distance : r entre 0,38 et 0,55 en NA, entre 0,21 et 0,57 en AT (sauf fréquence journalière voir annexe 4) avec une significativité supérieure à 95%. Généralement, lorsque la longueur de contour ou la

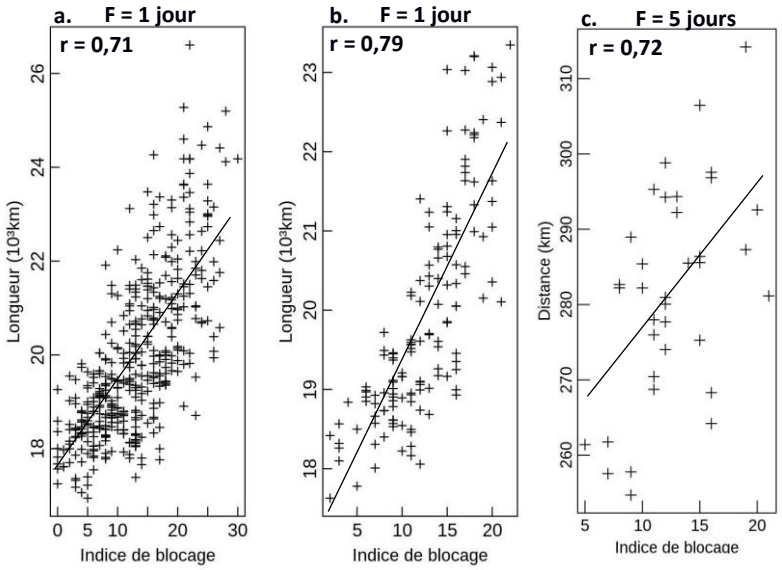


Figure 18. Relation bivariée entre la longueur de contour par mois (a), par saisons (b), la distance entre contours successifs en JFM (c) et l'indice de blocage pour le domaine Nord-Atlantique (NA) sur la période 1979 – 2014. Chaque point représente un mois (a), une saison (b et c). La longueur de contour et la distance entre contours successifs sont corrélées à l'indice de blocage.

distance entre contours est faible alors l'indice de blocage l'est aussi et inversement (fig. 18). Néanmoins, il est parfois observable qu'un indice de blocage fort peut correspondre à des longueurs de contour ou des distances entre contours plutôt moyennes. Une relation entre la longueur de contour/distance entre contours et l'indice de blocage ainsi qu'aux indices NAO existe donc.

Il est clairement observable sur la figure 19 que les courbes des indices NAO et celles de l'indice de blocage, de longueur et de distance entres contours sont opposées. Durant la phase positive de la NAO, l'indice de blocage, la longueur de contour et la distance entre contours sont faibles. A l'inverse, durant la phase négative, l'indice de blocage, la longueur de contour et la distance entre contours sont élevés. Ainsi la longueur de contour et la distance entre contours sont cohérentes en automne et en hiver avec des indices déjà existants sur un bassin largement étudié (NA). Ces dernières semblent être des métriques intuitives de l'écoulement aux moyennes latitudes et permettent de caractériser de manière pertinente la trajectoire du jet stream. Il est alors possible de les appliquer aux différentes saisons, domaines ainsi qu'aux différentes fréquences temporelles.

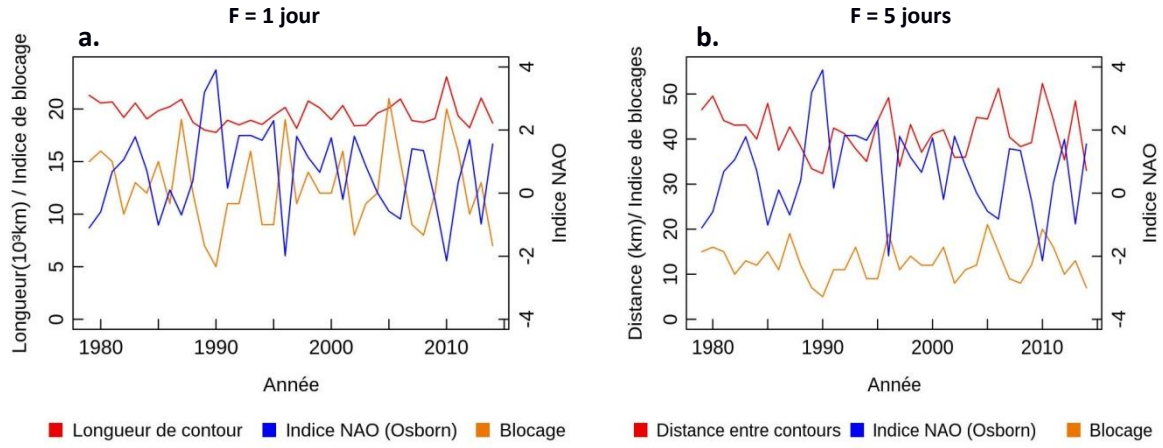


Figure 19. Relation entre la longueur de contour (a), la distance entre contours successifs (b) et les indices de blocage et de NAO (Osborn) pour le domaine Nord-Atlantique (NA) en hiver sur la période 1979 – 2014. Les courbes de longueur, de distance et de blocage sont opposées à celle de la NAO.

3.3 Quelles Incertitudes ?

Les champs de géopotentiel de la moyenne troposphère sont très proches entre les réanalyses ERA-Interim et NCEP2 (corrélation significative à 99% des anomalies à 500hPa entre ces deux réanalyses (FV15)). Les longueurs et les distances entre deux contours successifs calculées à partir de ces deux types de réanalyses sont donc similaires d'une réanalyse à l'autre. Des différences de tendances sont néanmoins observables (fig. 20a et c). Cette différence est liée à la période utilisée par ces deux réanalyses (1979 – 2012 pour NCEP2, 1979 – 2014 pour ERA-Interim) qui modifie ainsi les tendances obtenues. En retirant

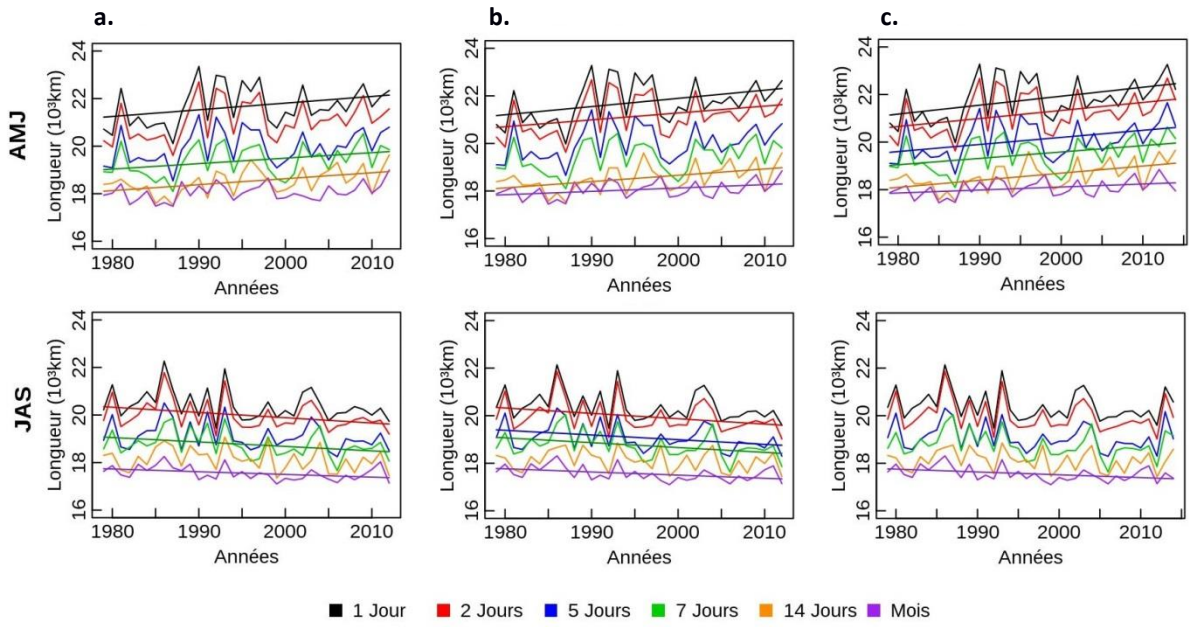


Figure 20. Longueur de contour sur le domaine Nord-Pacifique (NP) selon les réanalyses NCEP2 sur la période 1979 – 2014 (a), et selon les réanalyses ERA-Interim sur la période 1979 – 2012 (b) et 1979 – 2014 (c). Les tendances sont significatives à 95%. Ces dernières dépendent avant tout de la période étudiée.

les deux dernières années de mesures des réanalyses ERA-Interim, les tendances qui se démarquent sont proches de celles obtenues à partir des réanalyses NCEP2 (fig. 20b). Cela explique pourquoi peu de tendances sont mises en avant à partir des réanalyses NCEP2. Le choix de la période d'observation des données est lui aussi important. Ainsi, l'ensemble des résultats présentés sont donc ceux liés aux réanalyses ERA-Interim, ces réanalyses présentant la période de mesures la plus longue et se rapportent à la période d'observation complète si aucune indication complémentaire n'est apportée. Les données moyennées selon les 6 fréquences sélectionnées sont largement corrélées entre elles au niveau de la longueur de contour (malgré le fait que des tendances ne soient pas observables sur l'ensemble des fréquences de façon simultanée), mais le sont moins en termes de distance entre deux contours successifs. Avec cette métrique, les données moyennées selon les fréquences semblent plus indépendantes les unes des autres. Ainsi, il est parfois observable des tendances opposées entre les différentes fréquences de moyennes. Ce phénomène peut suggérer des différences de persistance selon les différentes échelles temporelles.

4. Mise en application : tendances et résultats

4.1. Tendances récentes

4.1.1 Résultats : des tendances ciblées

4.1.1.1 Hémisphère nord

Globalement, aucune tendance interannuelle significative n'est discernable pour chaque saison du point de vue de la longueur de contour (fig. 21) et de l'amplitude à l'échelle de l'hémisphère Nord. Néanmoins, des tendances plus ciblées sont observables sur le mois de septembre avec une diminution de la longueur de contour (1 fréquence avec une tendance significative à 95%, notée 1F >95%) lié à une augmentation de la latitude minimale (2F >95%) et dans une moindre mesure sur le mois de décembre avec une augmentation de la longueur de contour (2F >90%), de l'amplitude (1F >95%) et de la latitude maximale (1F >90%). Quelques tendances sont perceptibles au printemps et en été en termes de distance entre contours et de latitude. Une diminution de la latitude minimale (2F >95%) et une augmentation de la distance entre contours (1F >95%, fréquence hebdomadaire) sont observables en AMJ. A l'opposé, une diminution de la distance entre contours selon la fréquence mensuelle (>95%) est aussi mise en évidence. Des tendances sont également visibles en JAS avec une augmentation de la distance entre contours (1F >90%, fréquence hebdomadaire), de la latitude minimale (2F >95%) due au mois de septembre (2F >95%, 4F >90%), et de la latitude maximale (1F >90%). Il n'est donc pas observable d'évolution particulière concernant la longueur de contour et l'amplitude sur la période 1979 – 2014 à l'échelle de l'hémisphère Nord. Cela n'exclut néanmoins pas la possibilité de changements aux échelles régionales.

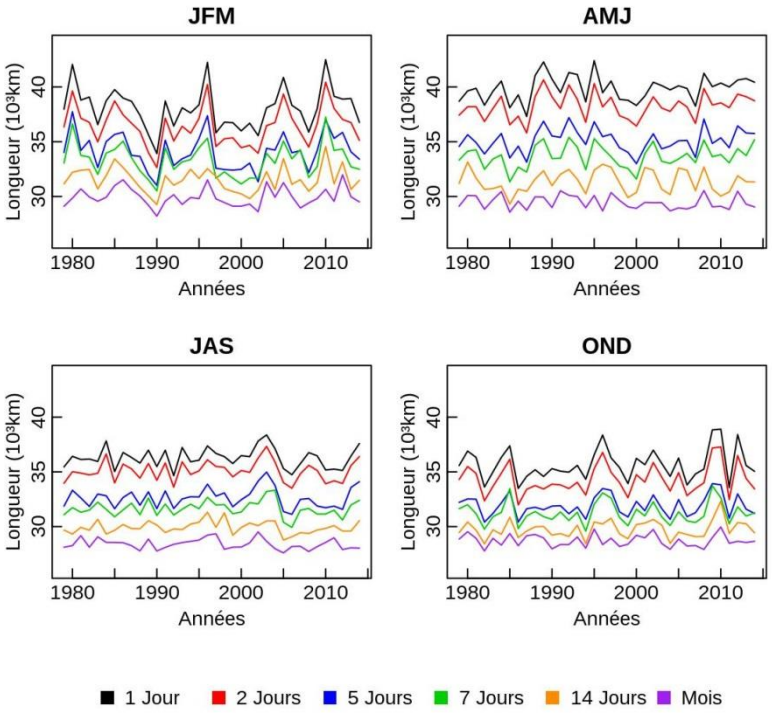


Figure 21. Longueur de contour par saison à l'échelle de l'Hémisphère Nord (NH) sur la période 1979 – 2014. Aucune tendance particulière n'est mise en avant durant chacune des saisons.

4.1.1.2 Nord Atlantique (NA)

La même observation est possible pour le domaine NA. Aucune tendance significative n'est discernable ce pour tous les mois/saisons au niveau de la longueur de contour. Une diminution de l'amplitude et la latitude maximale est observable en AMJ (amplitude : 1F >95%, 2F >90% ; latitude maximale : 2F >95%, 4F >90%). En OND, une légère augmentation de la distance entre contours selon la fréquence hebdomadaire semble se dessiner (1F >90%).

4.1.1.3 Analyse par saison

De manière générale, c'est en AMJ et en JAS que s'observent le plus de tendances sur l'ensemble des domaines étudiés (annexe 5). Aucune évolution en termes de longueur de contour n'est perceptible ni en JFM ni en OND et peu de tendances sont visibles durant ces saisons plus généralement. Il est important de noter qu'une opposition semble se dessiner entre les domaines atlantiques et ceux pacifiques.

En JFM, les tendances se résument en une diminution de la distance entre contours dans plusieurs domaines (AT (mensuelle à 95%, journalière à 90%), EU (hebdomadaire à 95%), AS (fréquence 5 jours et 7 jours à 95%). Des tendances sont visibles particulièrement en février et en mars avec selon les domaines une diminution de la longueur et de la distance entre contours, de l'amplitude, de la latitude maximale et une augmentation de la latitude minimale. Cela suggère une augmentation de la persistance de la circulation à différences échelles temporelles selon les domaines étudiés.

En AMJ, les domaines atlantiques (NA, AT, EU) connaissent plutôt une diminution de la longueur de contour, de l'amplitude, de latitude maximale et une augmentation de la

Domaine	JFM			AMJ			JAS			OND		
	90 - 14	95 - 14	00 - 14	90 - 14	95 - 14	00 - 14	90 - 14	95 - 14	00 - 14	90 - 14	95 - 14	00 - 14
NA	-9	6	22	0	2	-12	97	105	82	41	63	66
AT	-12	-4	-1	-14	-17	-19	-1	9	6	31	45	50
AM	-5	-2	11	24	30	14	26	23	10	8	27	27
EU	-15	-10	-9	-15	-17	-11	33	47	38	19	27	28
AS	-8	-5	-10	-4	-11	-6	-5	-4	2	19	36	51
NP	-8	-4	-6	33	31	32	-8	-12	-9	26	47	43
NH	-2	3	5	0	-2	-4	1	4	10	24	37	37

0 à 9%	10 à 19%	20 à 29%	30 - 39%	> 40%
0 à -9%	-10 à -19%	-20 à 29%	-30 - 39%	< - 40%

Tableau 3. Changement relatif en pourcentage du nombre de HAD calculé à partir de contours centrés sur la période 1990-2014 (90-14), 1995-2014 (95-14) et 2000-2014 (00-14) par rapport à la période 1979-1994 (période pré-AA selon FV15) par domaine et par saison. Une augmentation des HAD est constatée en OND sur l'ensemble des domaines étudiés ainsi qu'une augmentation durant chaque saison pour le domaine AM, durant le printemps en NP et en été en EU.

latitude minimale (annexe 5) alors que le domaine NP tend vers une augmentation franche de la longueur de contour (6F >95%), de la distance entre contour (3F >95%) et vers une diminution de la latitude minimale (5F >95%, 6F >90%). Ce constat se retranscrit également au niveau des HAD (tbl. 3) avec une augmentation d'environ 35% des HAD pour le domaine NP contre une diminution d'environ 10 à 20% pour les domaines NA, AT et EU. Ces changements suggèrent plutôt une disposition moins sinueuse du jet stream dans les domaines atlantiques sur la période 1979-2014 et plus sinueuse pour le domaine NP. Le mois d'avril semble se démarquer un peu plus que les autres mois en AMJ avec plutôt une augmentation de la distance entre contours pour l'ensemble des domaines, une diminution pour des domaines atlantiques et une augmentation pour ceux pacifiques en termes de longueur de contour et en latitude minimale (annexe 5).

A l'opposé, en JAS, les domaines atlantiques (AT, EU) connaissent plutôt une augmentation assez importante de l'amplitude (AT : 3F >95%, 4F >90% ; EU : 3F >95%, 5F >90%) et de la latitude maximale (AT : 2F >95%, 4F >90% ; EU : 3F >95%, 4F >90%), auxquelles s'ajoute une potentielle augmentation de la longueur de contour (AT : 1F >95%, EU : observation d'une augmentation mais pas de tendances significatives) et de la distance entre contours à la fréquence hebdomadaire, alors que les domaines pacifiques (NP, AS) connaissent plutôt une forte augmentation de la latitude minimale (NP : 3F >95% ; AS : 3F >95%, 4F >90%) ainsi qu'une diminution de la longueur de contour (1F >95% pour chaque domaine, 2F >90% pour AS) et de la distance entre contours (NP : 1F>95%, fréquence mensuelle). Ces tendances sont fortement influencées par le mois de septembre qui suscite un intérêt particulier. De nombreuses tendances significatives se démarquent au sein de plusieurs variables, selon plusieurs fréquences et dans divers domaines (tbl. 4). L'amplitude et la latitude maximale augmentent de façon conséquente dans la région Nord-Atlantique (AT) et en Europe en JAS et particulièrement en septembre (fig. 22), cela s'additionnant à une augmentation de la longueur de contour. Par ailleurs, cette tendance estivale se retrouve également au niveau des HAD avec une augmentation marquée de ces derniers en Europe (tbl. 3). Il semble que le Jet Stream tend vers une disposition plus sinueuse en été (augmentation de la latitude maximale sans changements pour la latitude minimale : élongation des crêtes vers le nord) d'autant plus en septembre, cela pouvant mener à plus de conditions météorologiques

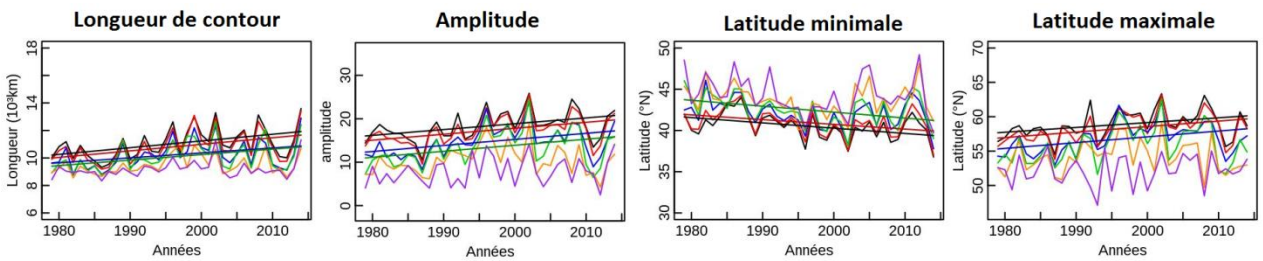


Figure 22. Longueur de contour (a), amplitude (b), latitude minimale (c) et latitude maximale (d) pour le mois de septembre en Europe (EU) sur la période 1979 – 2014. Les tendances représentées sont significatives à plus de 95%. La longueur de contour, l'amplitude et la latitude maximale augmentent alors que la latitude minimale diminue. Ces tendances suggèrent un élargissement du jet stream vers le nord et le sud.

Tableau 4. Fréquences avec des tendances significatives par variable et par domaine pour le mois de septembre sur la période 1979 – 2014. Les domaines ne présentant pas de tendances pendant ce mois ne sont pas représentés. Les hachures correspondent à une absence de tendances. Globalement, il est possible d'observer une augmentation (diminution) de la longueur, de la distance, de l'amplitude et de la latitude maximale dans les domaines atlantiques (pacifiques) et une diminution (augmentation) de la latitude minimale se traduisant par un étalement (resserrement) du jet stream.

Domaine	Longueur de contour	Distance entre contours	Amplitude	Latitude maximale	Latitude minimale
EU	4 5	1 3	4	3	3 4
AT	4	2 3	2 4	3	1
NP	6	1	1 3	2	4
AS	1 2	1			4
NH	1	1 1			2 4

Tendance positive significative à : 90% 95% Tendance négative significative à : 90% 95%

persistantes en Europe (Black *et al.*, 2004). L'été et le mois de septembre 2003 enregistrent respectivement les records en termes d'amplitude, de la latitude minimale et maximale en Europe et en Atlantique Nord (AT). Néanmoins, la tendance à l'augmentation de l'amplitude pour le domaine AT ne se reflète pas en termes de HAD, cela sous-entend qu'en moyenne l'amplitude augmente mais que peu de jours avec une disposition de grande amplitude sont recensés. Ces deux métriques ne semblent pas être liées directement.

En OND, le nombre de HAD a augmenté de façon conséquente depuis 1990 au sein de la quasi-totalité des domaines. Toutefois, aucune tendance en termes d'amplitude et de longueur de contour n'a été mise en mise en avant dans aucun domaine durant cette saison sur la période 1979-2014. Cela suggère d'étudier plus en détail le changement de variabilité au-delà de l'état moyen.

Globalement, il n'a pas été mis en évidence d'importants changements dans la trajectoire du jet stream sur la période récente. Aucune augmentation générale de la longueur de contour qui pourrait suggérer que le changement climatique impacte la trajectoire du jet stream n'a été mise en avant. Toutefois, il semble évident que des tendances plus ciblées se démarquent selon certaines saisons et certains domaines. Ces changements sont principalement observables aux intersaisons, au printemps et à la fin de l'été particulièrement en septembre : la région atlantique connait plutôt une augmentation de la longueur de contour et de l'amplitude en été, alors qu'une diminution de ces métriques est recensé dans la région pacifique et inversement au printemps. Cette opposition pose des questions concernant la trajectoire et le déplacement du jet selon un cycle annuel et suggère un possible équilibrage du jet sur l'ensemble de l'hémisphère nord à cette échelle temporelle.

4.1.2 Comparaison avec des résultats existants

Quatre études principales sont utilisées pour comparer les résultats obtenus précédemment. Ces études sont basées sur des réanalyses et des périodes légèrement différentes (tbl. 5). Si le choix des réanalyses importe peu, ces dernières restant relativement très proches, il est important de noter que la période sur laquelle l'étude est réalisée ainsi que la méthode utilisée peuvent avoir un impact sur les résultats (cf. 3.3 Quelles incertitudes?) et qu'il convient de les relativiser. Les tendances obtenues lors de cette étude sont selon les cas en concordance ou en opposition avec celles mises en évidence par les études réalisées précédemment. Les résultats dépendent des domaines géographiques étudiés mais aussi des saisons. Les principales tendances observables dans les études précédemment réalisées concernent principalement l'automne (B11 ; FV12 ; FV15; SS13) et l'été (SS13 ; FV15 ; annexe 6).

Concernant l'automne, trois de ces dernières s'accordent sur une augmentation de l'amplitude/vents méridionaux : sur l'ensemble des domaines géographiques concernées (FV15), sur l'Atlantique Nord et l'Europe (SS13) ; et sur une diminution de l'amplitude/vents

Études	Période	Réanalyses	Méthode
Barnes	1980 – 2011	ERA-Interim, NCEP2, MERRA	Deux métriques : « SeaMaxMin », « DayMaxMin »
Francis & Vavrus, 2012	1979 – 2010	NCEP2	Épaisseur de géopotentiel entre 1000 et 500hPa, vent zonaux, moyenne saisonnière de latitude maximale, corrélation statistique avec l'indice AO et avec la couverture neigeuse (NH) et de la banquise arctique
Francis & Vavrus, 2015	1979 – 2013	NCEP2	Indice de circulation méridionale (MCI), HAD
Cette étude	1979 – 2014	ERA-Interim NCEP2	Longueur de contour, distance entre deux contours successifs, amplitude, HAD
	1979 – 2012		
Screen & Simmonds	1979 – 2011	ERA-Interim	Amplitude méridionale et amplitude zonale

Tableau 5. Récapitulatif des réanalyses, des périodes et des méthodes utilisées par étude.

zonaux : globale (SS13) et en Atlantique Nord (B11, FV12). A l'opposé, aucune tendance n'a été détectée en automne à partir de l'utilisation du contour centré quelle que soit la variable étudiée. Néanmoins, une augmentation importante des HAD a été mise en avant et semble concorder avec l'augmentation des HAD montrée par FV15 durant cette saison.

En JFM, quelques tendances sont observables. Le nombre de HAD augmente dans les domaines AT et AM (FV15, et avec un contour centré malgré que le nombre HAD varie entre ces deux études) et tend à diminuer en NP. Cela concorde avec la diminution de la distance entre contours en AT (1F >95%) et celle de l'amplitude et de la latitude maximale en NP. Un affaiblissement des vents zonaux et une augmentation de l'amplitude méridionale en NA est aussi mise en avant (SS13, FV12).

Dans l'ensemble, les résultats mis en avant en AMJ sont opposés sauf pour le domaine NP (tendance à l'augmentation de l'amplitude) avec des tendances moins marquées avec l'utilisation d'un contour fixe. En utilisant ce type de contour, il est souvent observable des tendances à l'augmentation de l'amplitude dans les domaines AT, AM et EU alors qu'une diminution se dessine pour ces mêmes domaines avec un contour centré.

De manière générale, l'ensemble des études semblent concorder sur les tendances obtenues en été. Pour l'été, certaines études suggèrent une augmentation de l'amplitude/vents méridionaux dans les régions atlantiques (NA, EU (SS13), NA AM (FF15)), une diminution en Asie et dans le domaine Nord Pacifique (FV15), et une diminution de l'amplitude/vents zonaux sur l'ensemble des régions étudiées (SS13). Les tendances observées dans ces régions sont aussi observables avec l'utilisation un contour centré sauf en Amérique du Nord. L'amplitude et la latitude maximale dans le domaine NA augmente de façon significative entre 1979 et 2014 (4F >95%) probablement en lien avec une augmentation de la longueur de contour (1F > 95%). Le même constat est observable en Europe en terme d'amplitude (3F >95%, 5F >90%), de latitude maximale (3F >95%, 4F >90%) et de longueur de contour (observation d'une augmentation mais sans tendances significatives). L'augmentation significative de la latitude minimale en Asie (3F >95%, 4F >90%) et la diminution de la longueur de contour (1F >95%, 2F >90%) concordent avec la diminution des jours de grande amplitude mise en avant par FV15. Il en est de même pour le domaine Nord Pacifique avec une diminution de la longueur de contour et de la distance entre contours à la fréquence mensuelle (>95%) et une augmentation de latitude minimale (3F >95%). Globalement, l'opposition entre le bassin atlantique et le bassin pacifique est observable dans la plupart des études en JAS avec une tendance plus méridienne pour le bassin atlantique (augmentation importante de l'amplitude, de la latitude maximale et du nombre de HAD (FV15, et diminution des HAD en Europe selon cette étude) et une tendance moins méridienne pour le bassin pacifique (augmentation de la latitude minimale et diminution des HAD, selon FV15).

Un intérêt tout particulier est porté sur le domaine NA qui est le domaine commun aux 4 études. Concernant ce domaine, les résultats obtenus divergent selon ces dernières. Les trois précédentes études réalisées traitant de ce domaine s'accordent sur une diminution des vents zonaux en OND (seulement significative pour B13 et FV12). Deux d'entre elles mettent en avant une augmentation des vents méridiens (SS13 et FV12 mais significativité seulement pour FV12). SS13 et FV15 présentent des résultats similaires en ce qui concerne les autres saisons (diminution globale des vents zonaux et augmentation de ceux méridiens). Ces résultats ne se retrouvent pas dans l'étude de B13 ni-même dans cette étude. Les seules tendances mises en évidence à partir de l'utilisation d'un contour centré sont une diminution notable de la latitude maximale et de l'amplitude en AMJ, cela allant plutôt dans le sens opposé des résultats de SS13 et de FV15 et se rapprochant de ceux de B13.

4.1.3 Étude de cas

Les résultats obtenus à l'aide d'un contour centré étant différents de ceux mis en avant par les études précédemment réalisées utilisant des contours fixes, cette partie a pour but l'application des métriques sur des contours fixes afin de pouvoir entrevoir s'il existe des différences de tendances entre ces deux méthodes mais aussi pour comparer les résultats de cette étude à ceux précédemment obtenus de façon plus précise. Les contours fixes sont définis comme dans la littérature : 5400 en JFM, 5500 en AMJ, 5700 en JAS et 5600 en OND. Les tendances mises en évidence avec les contours fixes sont globalement similaires à celles avec des contours centrés mais sont bien plus amplifiées que ces dernières. Certaines

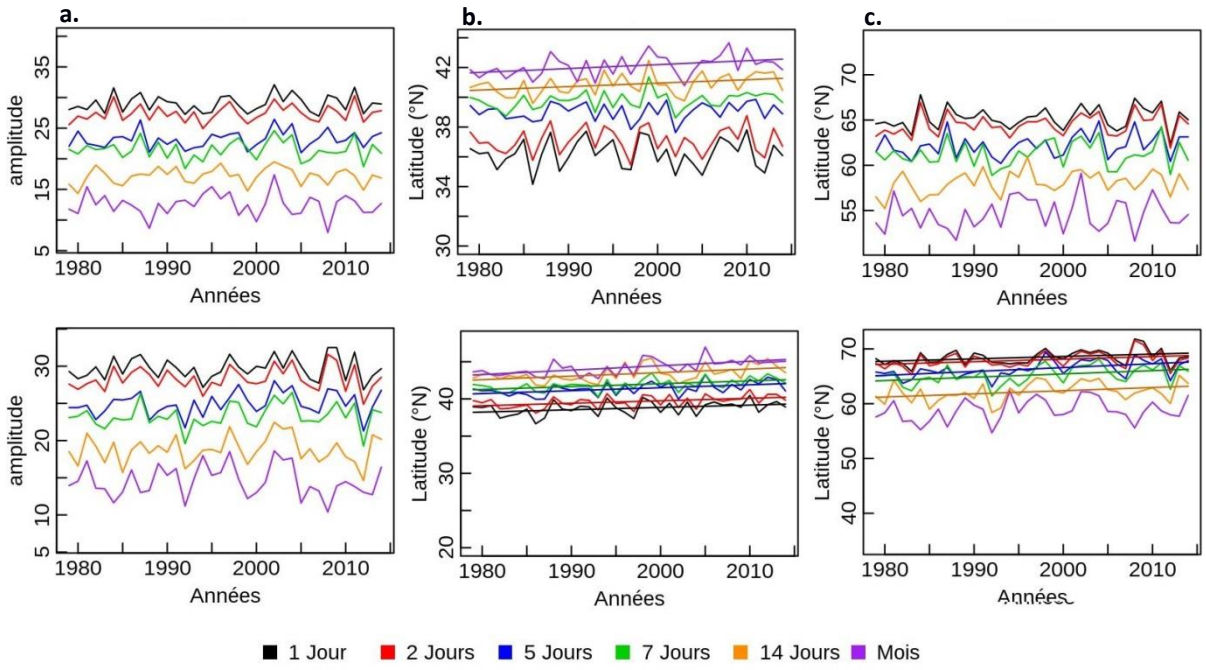


Figure 23. Amplitude (a), latitude minimale (b) et latitude maximale (c) en JAS pour l'Hémisphère Nord (NH) sur la période 1979 – 2014 à partir de contours centrés (1ere ligne) et de contours fixes (2e). Les tendances représentées sont significatives à 95%. Les tendances mises en avant changent selon le type de contour utilisé.

tendances n'apparaissent que lorsqu'un contour fixe est utilisé, ce qui montre la sensibilité des résultats à la méthodologie. Il est évident que les données liées à l'utilisation d'un contour fixe semblent biaisées par l'élévation thermique du géopotentiel comme le montre la figure 23. La latitude minimale et la latitude maximale augmentent toutes les deux de façon significatives sur la période étudiée avec un contour fixe (5F >95% dans les deux cas), ce qui traduit le déplacement vers le nord de l'isocontour sélectionné, alors que ces tendances ne se retrouvent pas avec l'utilisation d'un contour centré. Dans ce cas, seule une augmentation de la latitude minimale est observable.

Ensuite, les résultats de notre étude issus de l'utilisation de contours fixes ont été comparés à ceux de l'étude de FV15 faisant de même. Cette comparaison est réalisée à partir des HAD. Un premier coup d'œil permet d'observer des résultats similaires entre ces deux études. La saison OND se démarque particulièrement dans l'ensemble des domaines et globalement les tendances à l'augmentation se remarquent dans la région atlantique et en Amérique du nord (à l'opposé des HAD réalisés à partir de contours centrés). Des nuances sont toutefois perceptibles. FV15 met en évidence une augmentation importante des HAD en atlantique mais cette tendance ne se retrouve pas sur ce domaine commun (AT) mais plutôt sur le domaine NA (propre à notre étude) qui est plutôt décalé vers l'ouest par rapport au domaine AT. Une augmentation des HAD est observable en JAS en Amérique du Nord dans leur étude mais cette dernière se retrouve principalement en OND et en JFM dans notre étude. Des tendances inverses sont également observables comme une diminution notable des HAD en Europe en AMJ ainsi qu'une importante augmentation en JAS dans notre étude alors qu'il est observable une légère augmentation de ces derniers en AMJ selon FV15.

Domaine	JFM			AMJ			JAS			OND		
	90 - 14	95 - 14	00 - 14	90 - 14	95 - 14	00 - 14	90 - 14	95 - 14	00 - 14	90 - 14	95 - 14	00 - 14
NA	-5	10	20	11	14	7	91	108	128	27	42	51
AT	-1	11	15	-6	-5	-12	8	19	24	17	26	35
AM	15	24	34	7	9	2	3	2	0	66	108	119
EU	-6	3	5	-23	-20	-25	22	39	42	8	11	12
AS	-6	0	-3	10	16	12	-17	-19	-19	11	27	27
NP	11	17	19	20	28	26	6	6	12	75	95	73
NH	2	8	10	5	8	5	-1	0	6	24	31	31

0 à 9%	10 à 19%	20 à 29%	30 - 39%	> 40%
0 à -9%	-10 à -19%	-20 à 29%	-30 - 39%	< - 40%

Tableau 6. Changement relatif en pourcentage du nombre de HAD calculé à partir de contours fixes sur la période 1990-2014 (90-14), 1995-2014 (95-14) et 2000-2014 (00-14) par rapport à 1979-1994 (période pré-AA selon FV15) par domaine et par saison. Une augmentation des HAD est constatée sur l'ensemble des domaines étudiés en OND, pour les domaines plutôt atlantiques en JFM et en JAS (NA, AT, EU, AM) et les domaines pacifiques (AS, NP) en AMJ. Au contraire, une diminution est observable en AMJ en Europe et en JAS en Asie.

Ces différences de résultats peuvent reposer sur plusieurs éléments. Tout d'abord, il est possible d'expliquer ces dernières par l'utilisation de domaines géographiques différents

Region	JFM			AMJ			JAS			OND		
Atlantic 285 – 60E	16	19	30	10	5	15	25	57*	58*	23	47*	70*
North America 220 – 290E	14	18	27	13	12	18	33	59*	65*	-5	23	20
Europe -15 – 45E	3	1	-3	7	3	14	-8	6	0	1	17	40*
Asia 30 – 150E	4	4	5	12	1	18	-15	-15	-24*	15	65*	103*
Pacific 150 – 240E	-4	-18	-14	18*	12	24*	-3	-3	-9	2	25	13
Northern Hemisphere	4	-6	-5	3	1	3	-7	-5	-11	7	16	25*

< -40%	-39 to -30%	-29 to -20%	-19 to -10%	-9 to 0%
0 to 9%	10 to 19%	20 to 29%	30 to 39%	> 40%

Tableau 7. Changement relatif en pourcentage du nombre de HAD sur la période 1990-2014 (colonne de gauche), 1995-2014 (colonne du milieu), et 2000-2014 (colonne de droite) par rapport à la période 1979 – 2014 (période pré-AA) par saison et par domaine. Une augmentation des HAD est observable durant chaque saison pour le domaine atlantique et nord-américain et sur l'ensemble des domaines étudiés en OND mais également en AMJ de manière moins marquée (sauf en Europe et à l'échelle de l'hémisphère). Au contraire, les HAD diminuent en JAS en Asie et en JFM dans la région Pacifique. Source : FV15.

malgré le fait que les longitudes utilisées soient identiques, il se peut que les latitudes soient différentes. Ensuite, cela peut aussi être lié au fait que dans certaines saisons et/ou mois, le nombre de HAD est relativement très faible et qu'il est facile d'obtenir des pourcentages d'évolution largement différents. Une différence minime entre les deux jeux donnés peut représenter une incertitude importante et peut rapidement prendre de l'ampleur (nombre moyen de HAD en OND pour le domaine AM sur 1979 - 2014 à partir de contours fixes : 1,1 ; sur la période 1990-2014 : 1,9 soit une augmentation de 66,4% ; sur la période 2000-2014 : 2,5 soit une augmentation de 118,6%).

4.2 Tendances futures : vers un resserrement du jet stream ?

Tout d'abord, le contour centré utilisé à chaque pas de temps augmente de façon significative dans le futur et ce pour chaque saison (fig. 24). Cela concorde avec ce qui est attendu en termes d'élévation du géopotentiel en lien avec le réchauffement climatique (FV12, voir fig. 6). Il faut toute de même noter que les modèles ont tendance à légèrement sous-estimer le contour utilisé sur la période historique. De manière générale, l'ensemble des modèles s'accordent sur une stagnation ou sur une diminution de la longueur de contour pour l'ensemble des saisons sur la quasi-totalité des domaines. La même observation est possible pour l'amplitude (à relativiser car la dispersion entre modèles est importante) et dans une moindre mesure pour la latitude maximale (valeurs similaires ou diminution). Au contraire, la latitude minimale semble connaitre une augmentation notable

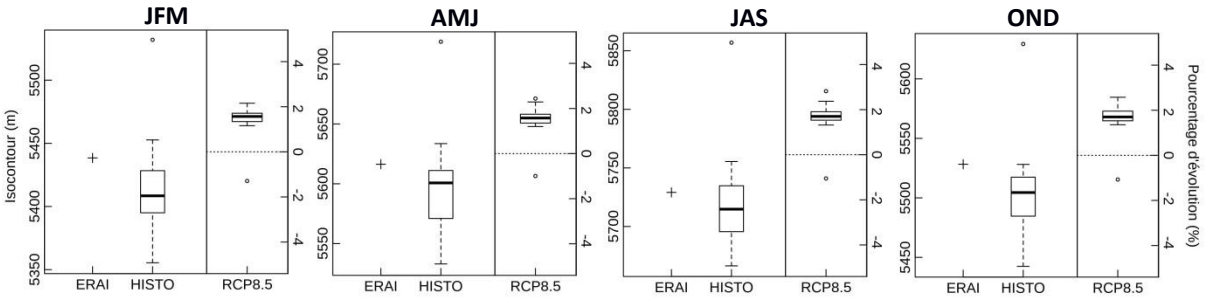


Figure 24. Valeurs moyennes des réanalyses ERA-Interim sur la période 1979 – 2014 (croix), moyennes historiques et changement relatif en pourcentage de la période future (2070 – 2099) par rapport à la période historique (1979 – 2008, boîtes à moustaches) des 24 modèles CMIP5 en termes d'isocontour (centré) par saison. L'isocontour sélectionné augmente dans le futur pour chaque saison ce qui concorde avec l'élévation thermique du géopotentiel attendue dans un contexte de changement climatique.

(fig. 27). Il semble donc que la diminution de contour mise en évidence soit étroitement liée à cette augmentation. Cela suggère que le réchauffement tropical en altitude à tendance à repousser la partie subtropicale du jet stream vers le nord. Les modèles s'accordent également majoritairement sur les tendances mises en avant en AMJ et en JAS. Les doutes sont très faibles en OND car les modèles sont quasiment unanimes sur ce qu'ils constatent (très peu de tendances opposées sont mises en avant sur l'ensemble des modèles, annexe 7). En revanche, l'hiver est globalement une saison où la dispersion entre simulations futures est importante. Les projections semblent partagées et les tendances mises en avant peuvent être assez différentes. L'hiver reste une saison complexe où la variabilité interne est forte (peu de tendances sont mises en avant en JFM dans les observations, de nombreuses incertitudes entre les différentes simulations dans le futur). Généralement, les modèles présentent le même constat en JFM que dans les autres saisons étudiées mais de façon moins marquée à l'exception du domaine AM qui semble plutôt évoluer en sens contraire avec une augmentation de la longueur de contour et de l'amplitude (fig. 25). Cette tendance

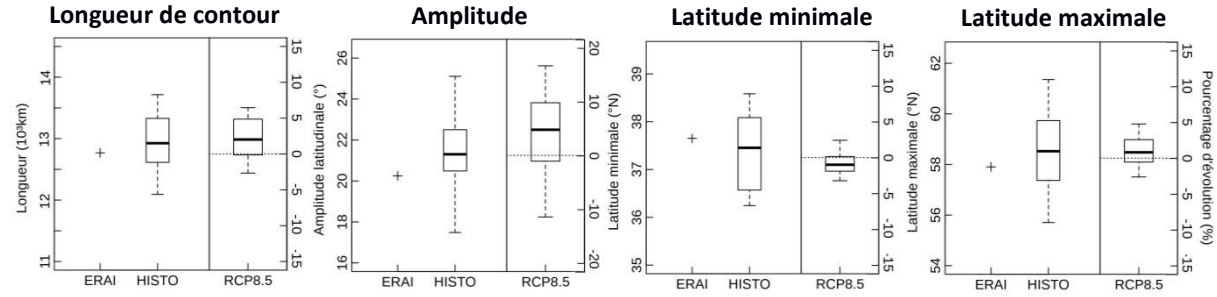


Figure 25. Valeurs moyennes des réanalyses ERA-Interim sur la période 1979 – 2014 (croix), moyennes historiques et changement relatif en pourcentage de la période future (2070 – 2099) par rapport à la période historique (1979 – 2008, boîtes à moustaches) des 24 modèles CMIP5 en termes de longueur de contour, d'amplitude, de latitude minimale et de latitude maximale en hiver (JFM) pour le domaine AM. La longueur de contour, l'amplitude et la latitude maximale augmentent alors que la latitude minimale diminue ce qui suggère un étirement du jet stream dans ce domaine.

semble concorder avec l'observation de l'augmentation des HAD dans cette saison sur la période présente (toutes méthodologies confondues malgré une proportion de HAD différente avec l'utilisation d'un contour centré). Les tendances à l'augmentation de la longueur de contour, de l'amplitude et de la latitude maximale en JAS et particulièrement en septembre pour le domaine EU et en AMJ pour le domaine NP observables sur la période présente ne semblent pas s'amplifier dans le futur malgré la maximisation du signal du changement climatique. Au contraire, la longueur de contour, l'amplitude et la latitude maximale semble diminuer alors que la latitude minimale augmente en Europe (fig. 26) mais aussi dans le domaine NP (annexe 8). Cela montre que les tendances récentes ne reflètent pas forcément le signal attendu du changement climatique. Les résultats obtenus à partir de l'étude des modèles basés sur le scénario RCP8.5 mettent donc en évidence une tendance à la diminution de la longueur de contour et de l'amplitude ainsi qu'une stagnation ou diminution de latitude maximale et une augmentation de la latitude minimale. Or selon le mécanisme de FV12, le contraire serait attendu si le changement climatique impactait de façon significative la trajectoire du jet stream. Ce constat permet donc de montrer plusieurs choses. Tout d'abord, il permet de mettre en avant le fait qu'il ne semble pas exister de liens systématiques entre les résultats obtenus sur la période présente et ceux obtenus sur la période future. Il permet également de montrer que les tendances mises en avant dans les observations ne semblent pas être causées par le changement climatique mais qu'elles sont plutôt dues à de la variabilité interne. De plus, il ne semble pas y avoir de modification du jet stream en termes de longueur où d'amplitude à l'avenir allant dans le sens de l'Amplification Arctique même si l'on maximise son signal avec l'utilisation du scénario le plus fort. Le jet stream semblerait être moins sinueux dans le futur et se déplacer sur une bande latitudinale plus restreinte. Ce resserrement soulève des questions concernant son intensité. L'augmentation de la latitude minimale va dans le sens de l'hypothèse d'un réchauffement de la haute troposphère au niveau des tropiques (engendrant un déplacement du jet vers le nord). La diminution de la latitude maximale va elle dans le sens d'un réchauffement de la basse troposphère au niveau du pôle (déplacement du jet vers le sud) mais cette tendance reste toutefois largement moins marquée. Ainsi, il semblerait que le réchauffement de la haute troposphère influence de façon plus importante le jet stream dans le futur (dans une moindre mesure en hiver). Cette tendance semble donc aller dans le sens de Barnes et Polvani (2015) qui démontrent que le jet tend à se déplacer vers le pôle plutôt que vers

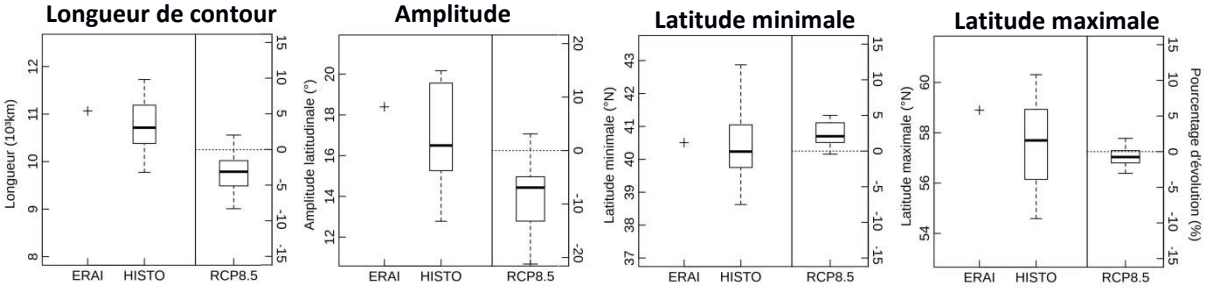


Figure 26. Même graphiques que la figure 23 pour le mois de septembre en Europe (EU). La longueur de contour, l'amplitude et la latitude maximale diminuent alors que la latitude minimale augmente ce qui suggère un resserrement du jet stream.

l'équateur (mais pas en hiver) mais aussi dans le sens des études montrant qu'il n'existe pas de lien systématique entre l'AA, la diminution du gradient de température et la fréquence des blocages à l'avenir (Wooling *et al.*, 2014 ; Hassanzadeh *et al.*, 2014 ; Schneider *et al.*, 2015). Selon toutes ces études, l'AA ne semble pas être l'effet prédominant impactant le jet stream. Néanmoins, cela ne veut pas dire que l'AA n'influe pas ce dernier.

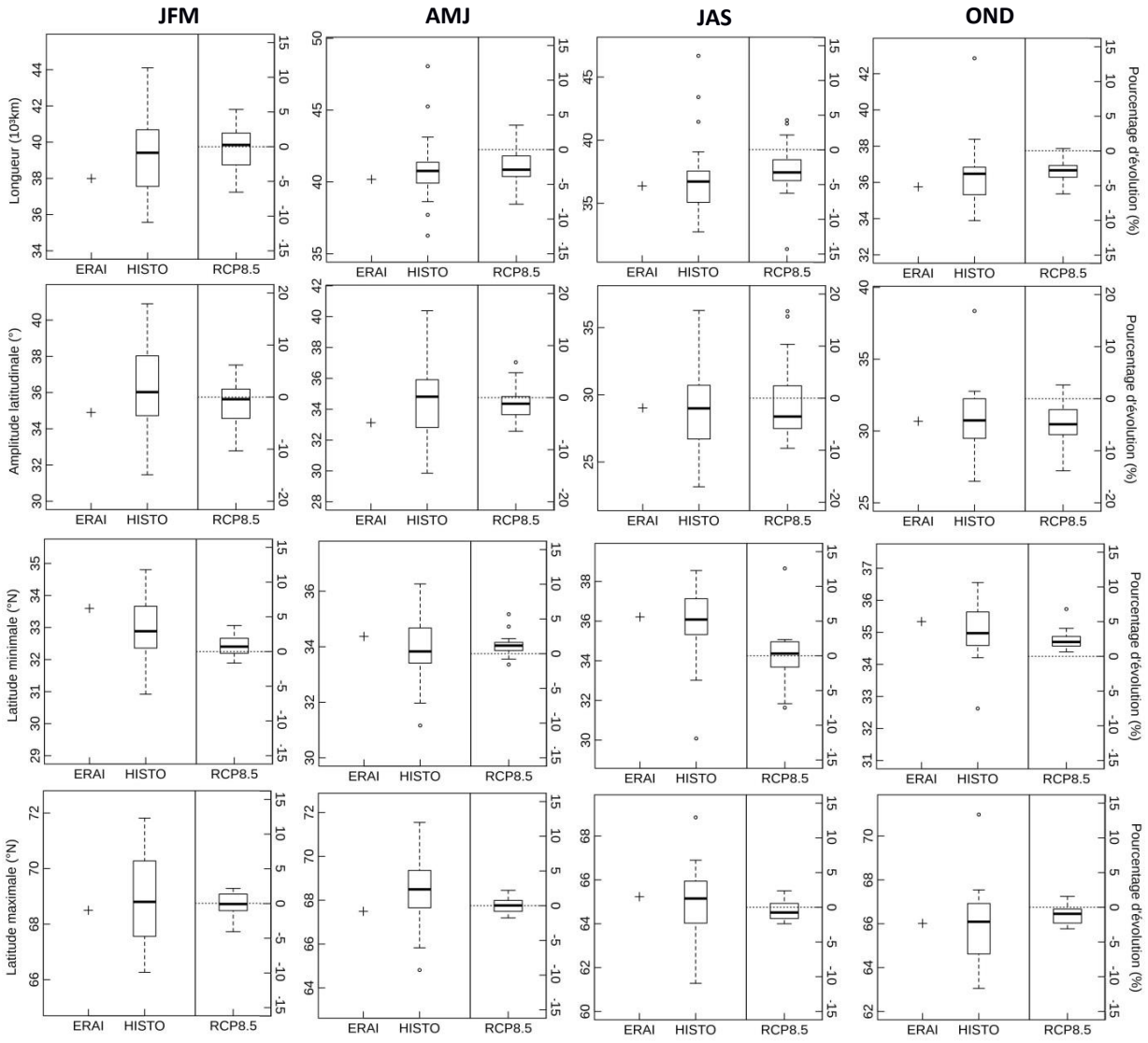


Figure 27. Valeurs moyennes des réanalyses ERA-Interim sur la période 1979 – 2014 (croix), moyennes historiques et changement relatif en pourcentage de la période future (2070 – 2099) par rapport à la période historique (1979 – 2008, boîtes à moustaches) des 24 modèles CMIP5 en terme de longueur de contour (1ère ligne), d'amplitude (2e ligne), de latitude minimale (3e ligne) et de latitude maximale (4e ligne) par saison pour l'Hémisphère Nord (NH). Globalement, la longueur de contour et l'amplitude diminuent durant chaque saison (sauf en JFM) alors que la latitude minimale augmente. La latitude maximale semble légèrement diminuer en JAS et en OND mais ne semble pas changer particulièrement en JFM et en AMJ. Ces tendances suggèrent un déplacement vers le nord de la partie équatoriale du jet stream, un resserrement de ce dernier sur une bande latitudinale plus restreinte et une trajectoire moins sinueuse.

Synthèse, discussions et perspectives

Pour conclure, les résultats mis en lumière dans cette étude montrent plutôt qu'il n'y a pas de changement systématique en termes de trajectoire du jet stream de manière générale sur la période présente et qu'il ne semble pas y avoir de changement à la fin du XXI^{e} siècle également malgré la maximisation du signal du changement climatique avec l'utilisation du RCP8.5. Il avait été émis l'hypothèse que des changements de trajectoire du jet induits par le changement climatique seraient visibles sur la période récente et de façon plus marquée dans le futur. Cette hypothèse a donc été réfutée. Néanmoins, des tendances plus ciblées sont observables selon certaines saisons et certains domaines géographiques. De nombreuses tendances récentes ont été observées au niveau des intersaisons : au printemps (AMJ) et en septembre (fin de l'été, JAS). La suggestion d'une opposition entre les régions plutôt atlantiques et celles pacifiques a été mise en avant avec un parallèle entre les tendances observées au printemps avec des tendances à la diminution dans la région atlantique (de longueur et de distance entre contours, d'amplitude et de latitude maximale associée à une augmentation de la latitude minimale) et à l'augmentation dans la région pacifique et inversement durant l'été et particulièrement en septembre. A l'opposé, aucune tendance n'a été mise en avant en automne (OND) et très peu en hiver (JFM), ces dernières se résumant à une augmentation de la persistance des phénomènes météorologiques à différentes échelles temporelles.

En ce qui concerne la période future, une diminution de la longueur de contour et de l'amplitude a pu être observée globalement. Cette tendance se retranscrit également sur la latitude maximale qui évolue approximativement dans le même ordre de grandeur que sur la période présente ou qui diminue légèrement. Au contraire, une augmentation assez marquée de la latitude minimale a pu être observée. L'ensemble de ces tendances suggèrent que le jet stream tend dans le futur à se déployer sur une bande latitudinale plus restreinte avec un déplacement vers le nord de sa partie méridionale et sans déplacement pour sa partie septentrionale. Cette tendance est cohérente avec une extension de la cellule de Hadley en changement climatique et semble indiquer que l'AA ne paraît pas être l'effet prédominant impactant le jet. Un cas particulier a été mis en avant concernant l'hiver en Amérique du Nord où les modèles suggèrent une tendance en sens contraire avec une augmentation de la longueur de contour, de l'amplitude et de la latitude maximale ainsi qu'une diminution de la latitude minimale qui se traduit par un jet stream se déplaçant légèrement vers le nord. De manière générale, les tendances spécifiques mises en avant dans le présent au printemps, en été et particulièrement au mois de septembre ne se retrouvent pas dans le futur. L'hiver suscite un intérêt singulier en tout temps car peu de tendances récentes sont identifiables mais aussi car cette saison fait l'objet de fortes incertitudes inter-modèle dans le futur. Cela suggère que cette saison reste un défi de compréhension et que les divers processus et mécanismes en œuvre sont complexes et restent encore partiellement appréhendés. Ces résultats soulèvent donc plusieurs

interrogations concernant la trajectoire et le déplacement du jet avec un possible équilibrage sur le cycle annuel entre les différents domaines géographiques sur la période présente mais aussi quant à son intensité lié à son resserrement latitudinal dans le siècle à venir.

D'un point de vue méthodologique, dans ce mémoire a également été mise en avant une méthodologie nouvelle appliquée à l'étude du jet stream : l'utilisation d'un isocontour de géopotentiel recentré ; ainsi que de deux métriques : la longueur de contour et la distance entre contours. Il convient néanmoins de prendre du recul vis-à-vis de cette méthode et de ces métriques. L'utilisation d'un contour centré permet de palier plusieurs biais liés à la fixation du contour. Elle permet la réduction du biais lié à la saisonnalité mais aussi la prise en compte de l'élévation thermique du géopotentiel en réponse au réchauffement climatique. En ce qui concerne les métriques, des corrélations fortes avec des indices déjà existants ont permis de mettre en avant leur robustesse. La longueur de contour semble être une métrique fiable, pertinente et simple d'utilisation qui permet une bonne caractérisation de l'écoulement aux moyennes latitudes et de la trajectoire et indirectement de l'amplitude du jet. Cette relation semble être moins intuitive avec la distance entre contours qui reste plus exploratoire que la longueur. Cette métrique nécessite donc une réflexion plus approfondie. Cette étude a donc mis en évidence le fait que les choix méthodologiques réalisés en amont sont primordiaux et que les résultats sont particulièrement sensibles à ces derniers. La période d'étude, les données utilisées (les différentes réanalyses, données simulées issues de modèles), la méthodologie employée, les traitements réalisées selon certaines fréquences temporelles sont autant d'éléments qui peuvent avoir des impacts sur les résultats et les tendances qui en découlent. Par exemple, il a été montré qu'en ce qui concerne la période d'étude, l'ajout d'une voire ou de deux années de données supplémentaires peut jouer un rôle considérable sur les résultats. De plus, l'enchainement de plusieurs étapes de traitement et de moyennes peut constituer une relative perte d'informations et une cascade d'incertitudes.

Afin de compléter cette étude, plusieurs traitements pourraient être réalisés. Il serait intéressant d'étendre l'étude sur une période plus longue en utilisant les données des réanalyses ERA-20C portant sur l'ensemble du 20^{e} siècle tout en prenant en compte les incertitudes liées à ces réanalyses. Du point de vue du futur, il serait intéressant d'utiliser plusieurs simulations de modèles afin d'avoir un plus large panel d'horizons, une seule simulation étant utilisée pour chaque modèle. Il serait également pertinent d'appliquer l'étude des isocontours fixes sur les données issues des projections climatiques en termes de longueur de contour, d'amplitude, de HAD et de distance entre contours (malgré que cette métrique reste encore incertaine, pour avoir un aperçu de l'écoulement dans le futur) mais aussi sur les contours centrés pour ces deux dernières métriques. L'un des enjeux serait d'étudier les liens des différents processus (comme l'AA) avec les métriques mais aussi de comprendre l'incertitude multi-modèle. Ainsi, il est possible de s'interroger concernant ces derniers et se demander si les modèles qui simulent le plus grand resserrement du contour

sont ceux qui montrent le plus grand réchauffement tropical ou polaire. Il serait intéressant de chercher si la réponse future des modèles est liée à leur comportement présent et d'étudier la possibilité de contraindre cette réponse en ne gardant que les meilleurs modèles en présent pour étudier le futur. Enfin, il serait pertinent de compléter l'ensemble de l'étude avec une métrique supplémentaire comme le vent à 200hpa pouvant servir de base à la définition de la trajectoire su jet stream. De nombreux travaux peuvent encore être réalisés.

Références bibliographiques

Barnes E. A. (2013), Revisting the evidence linking Artic amplification to extreme weather in midlatitudes, Geophysical research letters, **40**, p. 4734-39. DOI : 10.1002/grl.50880.

Barnes E. A. et Polvani L. M. (2015), CMIP5 projections of Arctic amplification, of the North American/North Atlantic circulation, and of their relationship, Journal of Climate, **28**, p. 5254-5271. DOI : 10.1175/JCLI-D-14-00589.1.

Black E., Blackburn M., Harrison G., Hoskins B. and Methven J. (2004), Factors contributing to the summer 2003 European heatwave, Weather, **17**, p. 4080-88. DOI : 10.1256/wea.74.04.

Butler A. H., Thompson D. W. J. and Heikes R. (2010), The Steady-State Atmospheric Circulation Response to Climate Change like Thermal Forcings in a Simple General Circulation Model, Journal of Climate, **23** (13), p. 3474–96, DOI : 10.1175/2010JCLI3228.1.

Cattiaux J., Vautard R., Cassou C., Yiou P., Masson-Delmotte V. and Codron F. (2010), Winter 2010 in Europe : A cold extreme in a warming climate, Geophysical research letters, **37**, L20704, DOI : 10.1029/2010GL044613.

Cattiaux J., Douville H., Peings Y. (2013), European temperatures in CMIP5 : origins of present-day biases and future uncertainties, Climate Dynamics, **41**, p. 2889–2907. DOI: 10.1007/s00382-013-1731-y.

Cohen J., Screen J. A., Furtado J. C., Barlow M., Whittleston D., Coumou D., Francis J., Dethloff K., Entekhabi D., Overland J., Jones J. (2014), Recent Artic Amplification and extreme mid-latitude weather, Nature Geoscience, **7**, p. 627-37. DOI: 10.1038/NGEO2234.

Coumou D. and Rahmstorf S. (2012), A decade of weather extremes, Nature Climate Change, **2**, p. 491–96. DOI : 10.1038/nclimate1452.

Dole R. et al. (2011), Was there a basis for anticipating the 2010 Russian heat wave ?, Geophysical research letters, **38**, L06702, DOI : 10.1029/ 2010GL046582.

Francis J. A., and S. J. Vavrus (2012), Evidence linking Artic amplification to extreme weather in midlatitudes, Geophysical research letters, **39**, L06801, DOI : 10.1029/2012GL051000.

Francis J. A. and S. J. Vavrus (2015), Evidence for a wavier jet stream in response to rapid Artic warming, Environmental Research Letters, **10**, DOI : 10.1088/1748-9326/10/1/014005.

Fu Q., Hohanson C. M., Wallace J. M., Reicher T. (2006), Enhanced Mid Latitude Tropospheric Warming in Satellite Measurements, Science, **312**, 5777, p. 1179. DOI: 10.1126/science.1125566.

Hassanzadeh P., Kuang Z. and Farrell B. F. (2014), Responses of mid-latitude blocks and wave amplitude to changes in the meridional temperature gradient in an idealized dry gcm. Geophysical Research Letters, in press. DOI : 10.1002/2014GL060764.

Hu Y. and Fu Q. (2007), Observed poleward expansion of the Hadley circulation since 1979, Atmospheric Chemistry and Physic, **7**, p. 5229-36,www.atmos-chem-phys.net/7/5229/2007/.

Kintisch E. (2014), Into the maelstrom, Science, **344** (6181), p. 250-3. DOI**:** 10.1126/science.344.6181.250pmid:24744355

Kim B-M., Son S-W., Min S-K., Jeong J-H., Kim S-J., Zhang X., Shim T. and Yoon J-H. (2014), Weakening of the stratospheric polar vortex by Arctic sea ice loss, Nature Communication, **5**, 4646, DOI: 10.1038/ncomms5646.

Lejenas H. and H. Okland, (1983), Characteristics of Northern Hemisphere blocking as determined from a long time series of observational data. Tellus , **35A**, p. 350-62 , DOI: 10.1111/j.1600-0870.1983.tb00210.x.

Liu J., J.A. Curry, H. Wang, M. Song and R.M. Horton (2012), Impact of declining Arctic sea ice on winter snowfall, Proceedings of the National Academy of Sciences USA, **109**, p. 4074–79, DOI: 10.1073/pnas.1114910109.

Lu J., Vecchi A. G., Reicher T. (2007), Expansion of the Hadley cell under global warming, Geophysical Research Letters, **34**. DOI : 10.1029/2006GL028443.

Meehl G. A., Stock T. F., Collins W. D., Friedlingstein P., Gaye A. T., Gregory J. M., Kitoh A., Knutti R., Murphy J. M., Noda A., Raper S. C. B., Watterson I. G., Weaver A. J., Zhao A. J., Internation Panel on Climate Change (2007), Global climate projections, in Climate Change 2007 : The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, **10**, Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, USA.

Osborn T. (2006), Recent variations in the winter North Atlantic Oscillation, Weather, **61**(12), p. 353-55, DOI : 10.1256/wea.190.06.

Overland J. E. and M. Wang (2010), Large-scale atmospheric circulation changes are associated with the recent loss of Arctic sea ice, Tellus, Ser. A, **62**, p. 1-9. DOI: 10.1111/j.1600-0870.2009.00421.x.

Péguy C.P. (1986), Climatologie et société, un domaine d'approche systémique. Revue de Géographie de Lyon, **61**, p. 309-13.

Petoukhov V. and Semenov V. A. (2010), A link between reduced Barents-Kara sea ice and cold winter extremes over northern continents, Journal of Geophysical Research, **115**, D21111. DOI : 10.1029/2009JD013568.

Rivière G. (2011), A dynamical interpretation of the poleward shift of the jet streams in global warming scenarios. Journal of the Atmospheric Science, American Meteorological Society, **68**, p. 1253-72. DOI : 10.1175/2011JAS3641.1.

Robert J. A. and Sherwood S. C. (2008), Warming maximum in the tropical upper troposphere deduced from thermal winds, Nature geoscience, **1**, p. 399-403, DOI: 10.1038/ngeo208.

Screen J. A. and Simmonds, I. (2010), The central role of diminishing sea ice in recent Arctic temperature amplification, Nature, **464**, p. 1334–37. DOI : 10.1038/nature09051.

Screen J. A. and Simmonds I. (2013), Exploring links between Artic amplification and mid-latitude weather, Geophysical research letters, **40**, p. 959-64. DOI : 10.1002/GRL.50174.

Screen J. A., Simmonds I., Deser C. and Tomas R. (2013), The atmospheric response to three decades of observed Arctic sea ice loss, Journal of Climate, **26**, p. 1230-48, DOI: 10.1175/JCLI-D-12-00063.1.

Screen J. A. and Simmonds I. (2014), Amplified mid-latitude planetary waves favour particular regional weather extremes, Nature Climate Change, p. 4704–9. DOI: 10.1038/nclimate2271.

Serreze M. C. and Barry R.G. (2011), Processes and impacts of Arctic Amplification : A research synthesis, Global Planetetary Change, **77**, 85. DOI: 10.1016/j.gloplacha.2011.03.004.

Schneider T., Bischoff T. and H. Plotka (2015), Physics of changes in synoptic midlatitude temperature variability, Journal of Climate, **28**, p. 2312–31, DOI : 10.1175/JCLI-D-14-00632.1.

Simmonds I. (2015), Comparing and contrasting the behavior of Arctic and Antarctic sea ice over the 35 year period 1979–2013, Annals of Glaciology 56(69), DOI: 10.3189/2015AoG69A909.

Stroeve J. C., Serreze M. C., Holland M. M., Kay J. E., Malanik J. and Barrett A. P. (2012), The Arctic's rapidly shrinking sea ice cover : a research synthesis, Climate Change, 110, p. 1005-27, DOI : 10.1007/s10584-011-0101-1.

Tibaldi S. and Molteni F. (1990), On the operational predictability of blocking. Tellus, **42A**, p. 343–65.

Thompson D. W. and Wallace J. M. (2001), Regional climate impacts of the Northern Hemisphere annular mode, Science, **293**, p. 85 –9, DOI : 10.1126/science.1058958.

Van Vuuren D. P. et al. (2011), The representative concentration pathways : An overview, Climate Change, **109**, p. 5–31, DOI : 10.1007/s10584-011-0148-z.

Woollings T., Harvey B. and Masato G. (2014), Arctic warming, atmospheric blocking and cold European winters in CMIP5 models, Environmental Research Letters, **9**, DOI: 10.1088/1748-9326/9/1/014002.

Webographie

Computational and Information Systems Laboratory Research Data Archive (CISL RDA)

Page : NCEP/DOE Reanalysis 2 (R2)
URL : http://rda.ucar.edu/datasets/ds091.0/#metadata/detailed.html?_do=y
Consultation : Avril-Mai 2015.

Consortium sur la climatologie régionale et l'adaptation aux changements climatiques (Ouranos)

Page : Qu'est-ce qu'un modèle physique de climat ?
URL : http://www.ouranos.ca/fr/faq/fiche3Fr.php
Page : Que sont les réanalyses ?
URL : http://www.ouranos.ca/fr/FAQ/fiche6Fr.php
Consultation : Mai 2015.

Coupled Model Intercomparison Project (CMIP5)

Page : CMIP5 – Coupled Model Intercomparison Project Phase 5 - Overview
URL : http://cmip-pcmdi.llnl.gov/cmip5/index.html?submenuheader=0
Page : CMIP5 – Data Acess Availability
URL : http://cmip-pcmdi.llnl.gov/cmip5/availability.html
Consultation : Mai 2015.

European Center for Medium-Range Weather Forcasts (ECMWF)

Page : ERA-Interim
URL : http://www.ecmwf.int/en/research/climate-reanalysis/era-interim
Consultation : Avril-Mai 2015.

Hurrell James & National Center for Atmospheric Research Staff (NCAR)

Page : The Climate Data Guide: Hurrell North Atlantic Oscillation (NAO) Index (station based)
URL: https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/hurrell-north-atlantic-oscillation-nao-index-station based.
Consultation : Mai 2015.

NOAA National Weather Service, Climate Prediction Center

Page : NCEP/DOE AMIP-II Reanalysis
URL : http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/wesley/reanalysis2/
Consultation : Mai 2015.

NOAA National Weather Service, JetStream – Online School for weather

Page : The Jet Stream

URL : www.srh.noaa.gov/jetstream/global.jet.htm

Consultation : Avril-Mai 2015.

Osborn Tim & University of East Anglia, Climate Research Unit

Page : North Atlantic Oscillation (NAO)

URL : http://www.cru.uea.ac.uk/~timo/datapages/naoi.htm

Consultation : Mai 2015.

Table des figures

Figure 1. Représentation schématique de la circulation atmosphérique latitudinale à l'échelle de l'hémisphère nord. Source : www.srh.noaa.gov/jetstream/global.jet. htm..... 7

Figure 2. Réponse multi-modèle de la différence de température moyenne entre 2076-2099 et 1980-2004 en hiver selon le scénario RCP8.5 à l'échelle de l'hémisphère nord. La ligne pointillée représente la position moyenne multi-modèle du jet stream aux moyennes latitudes dans la région nord Atlantique/Amérique du nord. La vitesse d'écoulement du jet mesurée sur cette région est représentée par intervalle de 5m/s en commençant à 5m/s. Deux phénomènes sont observables : un réchauffement de la haute troposphère au niveau des tropiques (en altitude) et un réchauffement de la basse troposphère au niveau du pôle (en surface). Source : Barnes et Polvani, 2015. 8

Figure 3. Réponse des vents zonaux (contours en m/s) et du flux tourbillonnant (ombrage en m^2/s^2) de l'Hémisphère Nord (b) à un réchauffement de la haute troposphère au niveau des tropiques (a, K/day). Les lignes noires représentent la hauteur de la tropopause lors du run de contrôle. Ce réchauffement à l'équateur et aux tropiques se traduit par un renforcement et un déplacement vers le nord des vents zonaux au niveau des moyennes latitudes. Source : Butler et al., 2015. 9

Figure 4. Réponse des vents zonaux (contours en m/s) et du flux tourbillonnant (ombrage en m^2/s^2) de l'Hémisphère Nord (b) à un réchauffement de la basse troposphère au niveau du pôle (a, K/day). Les lignes noires représentent la hauteur de la tropopause lors du run de contrôle. Ce réchauffement au pôle se traduit par un affaiblissement et un déplacement vers le sud des vents zonaux au niveau des moyennes latitudes. Source : Butler et al., 2015..... 10

Figure 5. Moyenne des anomalies de température de surface (°C) entre 0 - 60° N (en noir) et 60-90°N (en rouge) avec un lissage sur 5 ans (respectivement en noir et rouge pointillé). Une anomalie de température d'environ +2°C est observable au niveau des hautes latitudes à partir de la fin des années 1990. Source : Cohen *et al.*, 2014. 10

Figure 6. Anomalies saisonnières dans l'épaisseur de géopotentiel entre 1000 et 500hPa au-delà de 40°N sur la période 2000-2010 par rapport à 1970-1999 en automne (OND, a), en hiver (JFM, b), au printemps (AMJ, c) et en été (JAS, d). Les astérisques indiquent une significativité supérieure à 95%. Les données utilisées sont les réanalyses NCEP/NCAR. Des anomalies marquées sont observables en OND et JFM particulièrement au-dessus de la région Nord Atlantique mais aussi au niveau de la région Nord Pacifique et en Asie à des latitudes plus basses. Source : FV12. 11

Figure 7. Présentation des deux phases de la NAO et leurs impacts sur le jet stream. La phase positive (a) est caractérisée par un renforcement de la dépression islandaise et de l'anticylone des Açores qui se traduit par un renforcement et une trajectoire moins sinueuse du jet stream. La phase négative (b) se caractérise par un affaiblissement de ces deux centres d'actions et par un affaiblissement et une trajectoire plus sinueuse du jet stream cela pouvant mener à des épisodes de blocages. Source : Evelyn Browining Garris, http://almanac.com, 2012. 12

Figure 8. Schéma récapitulatif des différents processus et enjeux selon deux ordres temporels : le temps long (décennal à centennal) et le temps court (interannuel à décennal). 13

Figure 9. Carte de prévision météorologique basée sur le Z500. Adaptée de : http://www.wetterzentrale.de. 14

Figure 10. Présentation de deux dispositions du Jet Stream : forte intensité, sinuosité et amplitude réduite (a) ; faible intensité, sinuosité et amplitude forte (b). Adaptée de : http://skepticalscience.com/jetstream-guide.html 15

Figure 11. Schéma présentant le calcul de la distance entre deux contours successifs. 15

Figure 12. Émissions et concentration de CO2 selon les 4 scénarios RCP entre 2000 et 2100. Source : Van Vuuren, 2011. 17

Figure 13. Domaines géographiques et longitudes associées. 18

Figure 14. Hauteurs géopotentielles (a), longueur de contour (b) et distance entre contours successifs (c) par saison pour le domaine Nord-Atlantique (NA) sur la période 1979 – 2014. Chaque boîte à moustaches regroupe 36 saisons. Le cycle saisonnier du géopotentiel se retrouve sur ces trois graphiques. 18

Figure 15. Relation bivariée entre la longueur de contour et l'amplitude (a), la distance entre contours successifs et l'amplitude (b) et la longueur de contour et la distance entre contours (c) par saison pour le domaine Nord Atlantique (NA) sur la période 1979 – 2014. Chaque point représente une saison. Ces trois graphiques montrent que ces 3 variables sont dépendantes entre elles. 19

Figure 16. Relation bivariée entre la longueur de contour (a), la distance entre contours sucessifs (b) et l'indice NAO (Osborn) en hiver (JFM) pour le domaine Nord-Atlantique (NA) sur la période 1979 – 2014. Chaque point représente une saison. Ces deux graphiques mettent en évidence la corrélation entre la longueur de contour et la distance entre contours successifs avec l'indice NAO. 20

Figure 17. Écarts à la moyenne de la longueur de contour en JFM et en OND pour le domaine Nord-Atlantique (NA) sur la période 1979 – 2014. La moyenne est calculée sur l'ensemble de la période. L'année 2010 se démarque particulièrement du point de vue de ces deux métriques. 20

Figure 18. Relation bivariée entre la longueur de contour par mois (a), par saisons (b), la distance entre contours successifs en JFM (c) et l'indice de blocage pour le domaine Nord-Atlantique (NA) sur la période 1979 – 2014. Chaque point représente un mois (a), une saison (b et c). La longueur de contour et la distance entre contours successifs sont corrélées à l'indice de blocage. 21

Figure 19. Relation entre la longueur de contour (a), la distance entre contours successifs (b) et les indices de blocage et de NAO (Hurrel) pour le domaine Nord-Atlantique (NA) en hiver sur la période 1979 – 2014. Les courbes de longueur, de distance et de blocage sont opposées à celle de la NAO.. 22

Figure 20. Longueur de contour sur le domaine Nord-Pacifique (NP) selon les réanalyses NCEP2 sur la période 1979 – 2014 (a), et selon les réanalyses ERA-Interim sur la période 1979 – 2012 (b) et 1979 –

2014 (c). Les tendances sont significatives à 95%. Ces dernières dépendent avant tout de la période étudiée. 23

Figure 21. Longueur de contour par saison à l'échelle de l'Hémisphère Nord (NH) sur la période 1979 – 2014. Aucune tendance particulière n'est mise en avant durant chacune des saisons. 24

Figure 22. Longueur de contour (a), amplitude (b), latitude minimale (c) et latitude maximale (d) pour le mois de septembre en Europe (EU) sur la période 1979 – 2014. Les tendances représentées sont significatives à plus de 95%. La longueur de contour, l'amplitude et la latitude maximale augmentent alors que la latitude minimale diminue. Ces tendances suggèrent un élargissement du jet stream vers le nord et le sud. 26

Figure 23. Amplitude (a), latitude minimale (b) et latitude maximale (c) en JAS pour l'Hémisphère Nord (NH) sur la période 1979 – 2014 à partir de contours centrés (1ere ligne) et de contours fixes (2e). Les tendances représentées sont significatives à 95%. Les tendances mises en avant changent selon le type de contour utilisé. 30

Figure 24. Valeurs moyennes des réanalyses ERA-Interim sur la période 1979 – 2014 (croix), moyennes historiques et changement relatif en pourcentage de la période future (2070 – 2099) par rapport à la période historique (1979 – 2008, boîtes à moustaches) des 24 modèles CMIP5 en termes d'isocontour (centré) par saison. L'isocontour sélectionné augmente dans le futur pour chaque saison ce qui concorde avec l'élévation thermique du géopotentiel attendue dans un contexte de changement climatique. 33

Figure 25. Valeurs moyennes des réanalyses ERA-Interim sur la période 1979 – 2014 (croix), moyennes historiques et changement relatif en pourcentage de la période future (2070 – 2099) par rapport à la période historique (1979 – 2008, boîtes à moustaches) des 24 modèles CMIP5 en termes de longueur de contour, d'amplitude, de latitude minimale et de latitude maximale en hiver (JFM) pour le domaine AM. La longueur de contour, l'amplitude et la latitude maximale augmentent alors que la latitude minimale diminue ce qui suggère un étirement du jet stream dans ce domaine. 33

Figure 26. Même graphiques que la figure 23 pour le mois de septembre en Europe (EU). La longueur de contour, l'amplitude et la latitude maximale diminuent alors que la latitude minimale augmente ce qui suggère un resserrement du jet stream. 34

Figure 27. Valeurs moyennes des réanalyses ERA-Interim sur la période 1979 – 2014 (croix), moyennes historiques et changement relatif en pourcentage de la période future (2070 – 2099) par rapport à la période historique (1979 – 2008, boîtes à moustaches) des 24 modèles CMIP5 en terme de longueur de contour (1ère ligne), d'amplitude (2e ligne), de latitude minimale (3e ligne) et de latitude maximale (4e ligne) par saison pour l'Hémisphère Nord (NH). Globalement, la longueur de contour et l'amplitude diminuent durant chaque saison (sauf en JFM) alors que la latitude minimale augmente. La latitude maximale semble légèrement diminuer en JAS et en OND mais ne semble pas changer particulièrement en JFM et en AMJ. Ces tendances suggèrent un déplacement vers le nord de la partie équatoriale du jet stream, un resserrement de ce dernier sur une bande latitudinale plus restreinte et une trajectoire moins sinueuse. 35

Table des tableaux

Tableau 1. Présentation des données de réanalyses. 16

Tableau 2. Domaines géographiques et longitudes associées. 17

Tableau 3. Changement relatif en pourcentage du nombre de HAD calculé à partir de contours centrés sur la période 1990-2014 (90-14), 1995-2014 (95-14) et 2000-2014 (00-14) par rapport à la période 1979-1994 (période pré-AA selon FV15) par domaine et par saison. Une augmentation des HAD est constatée en OND sur l'ensemble des domaines étudiés ainsi qu'une augmentation durant chaque saison pour le domaine AM, durant le printemps en NP et en été en EU. 25

Tableau 4. Fréquences avec des tendances significatives par variable et par domaine pour le mois de septembre sur la période 1979 – 2014. Les domaines ne présentant pas de tendances pendant ce mois ne sont pas représentés. Les hachures correspondent à une absence de tendances. Globalement, il est possible d'observer une augmentation (diminution) de la longueur, de la distance, de l'amplitude et de la latitude maximale dans les domaines atlantiques (pacifiques) et une diminution (augmentation) de la latitude minimale se traduisant par un étalement (resserrement) du jet stream. 27

Tableau 5. Récapitulatif des réanalyses, des périodes et des méthodes utilisées par étude. 28

Tableau 6. Changement relatif en pourcentage du nombre de HAD calculé à partir de contours fixes sur la période 1990-2014 (90-14), 1995-2014 (95-14) et 2000-2014 (00-14) par rapport à 1979-1994 (période pré-AA selon FV15) par domaine et par saison. Une augmentation des HAD est constatée sur l'ensemble des domaines étudiés en OND, pour les domaines plutôt atlantiques en JFM et en JAS (NA, AT, EU, AM) et les domaines pacifiques (AS, NP) en AMJ. Au contraire, une diminution est observable en AMJ en Europe et en JAS en Asie..... 31

Tableau 7. Changement relatif en pourcentage du nombre de HAD sur la période 1990-2014 (colonne de gauche), 1995-2014 (colonne du milieu), et 2000-2014 (colonne de droite) par rapport à la période 1979 – 2014 (période pré-AA) par saison et par domaine. Une augmentation des HAD est observable durant chaque saison pour le domaine atlantique et nord-américain et sur l'ensemble des domaines étudiés en OND mais également en AMJ de manière moins marquée (sauf en Europe et à l'échelle de l'hémisphère). Au contraire, les HAD diminuent en JAS en Asie et en JFM dans la région Pacifique. Source : FV15. 32

Annexes

Annexe 1. Présentation et détails des études bibliographiques comparatives……49

Annexe 2. Schéma présentant un exemple de contour selon deux situations successives…..50

Annexe 3. Présentation des modèles CMIP5 et résolution associée……53

Annexe 4. Tableau de corrélation entre la longueur de contour, la distance entre contours et les indices de NAO et de blocage par saison pour les domaines atlantiques……..54

Annexe 5. Nombre de fréquences avec des tendances significatives par variable, par domaine et par saison sur la période 1979-2014……55

Annexe 6. Tableau présentant la comparaison des résultats sur la période récente selon les différentes études réalisées……..57

Annexe 7. Moyennes multi-modèles du changement relatif en pourcentage de la période future (2070 – 2099) par rapport à la période historique (1979 – 2008) par statistiques, par saison et par domaine……58

Annexe 8. Valeurs moyennes des réanalyses ERA-Interim sur la période 1979 – 2014 (croix), moyennes historiques et changement relatif en pourcentage de la période future (2070 – 2099) par rapport à la période historique (1979 – 2008, boîtes à moustaches) des 24 modèles CMIP5 en terme de longueur de contour, d'amplitude, de latitude minimale et maximale en AMJ pour le domaine NP.……59

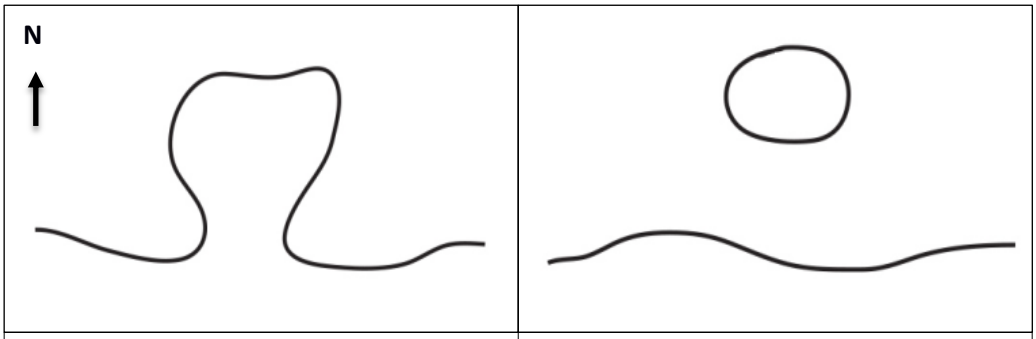
Annexe 1 : Présentation et détails des études bibliographiques comparatives.

But de l'étude	Méthodologie employée	Résultats
A. Screen, I. Simmonds (2013) - Exploring links between Artic amplification and mid-latitude weather.		
Recherche de liens entre l'AA et les conditions météorologiques des moyennes latitudes notamment concernant les extrêmes	Période : 1979-2011	Augmentation de la significativité de l'amplitude méridionale (AM) au-delà de l'Europe
		Diminution significativité de l'amplitude zonale (AZ) à l'échelle de l'hémisphère, en Europe et en Asie
		Lien entre la disposition des ondes de Rosby et les conditions météorologiques des latitudes moyennes : méandre plus au sud (Europe, USA), méandre plus au nord (Canada)
	Utilisation du z500 à toutes les longitudes	Augmentation de l'amplitude méridionale en automne et hiver, diminution au printemps et en été mais peu de significativité. Globalement, 70 % de tendance à la hausse et 30 % à la baisse (absence de significativité).
	4 régions : Amérique du nord-Atlantique nord (140°W - 0°), Europe-Atlantique nord (60°W - 60°E), Amérique du nord-Pacifique ouest (180°W - 60°W), Asie-Pacifique Est (60°E - 180°E)	Diminution de l'amplitude zonale pour toutes les saisons mais significativité que pour JFM et JAS. Globalement 60 % de baisse, 40 % de hausse si on met de côté la significativité.
Mise en avant de différentes longueurs d'ondes pour déterminer si les ondes ou si une échelle spatiale particulière mettent en avant des changements de significativité		Les structures longitudinales composées de 1 à 10 ondes expliquent 90 % de la variance longitudinale journalière de l'isocontour 0 et 97 % de celle du géopotentiel z500
		Amérique du nord-Atlantique nord : augmentation AM (OND la plus marquée) et diminution AZ toutes saisons comme FV12 mais pas de significativité
	Deux amplitudes pour caractériser les ondes : amplitude méridionale (nord-sud) et l'amplitude zonale (ouest-est)	Europe-Atlantique nord : augmentation AM en JAS et en OND (pas de significativité), diminution AZ toutes saisons mais significativité juste pour JAS
		Amérique du nord-Pacifique ouest : diminution globale AZ mais pas de tendances significatives ni pour AM
	Isoplètes : 5400 (JFM), 5500(AMJ), 5700 (JAS) et 5600 (OND)	Asie-Pacifique est : pas de tendances significatives pour AM, diminution AZ en JAS et OND, significativité en JAS
		Opposition entre les deux amplitudes dans le cas de l'AA, déplacement des méandres vers le pôle mais déplacement pas égal à toutes les longitudes (pas de changement dans l'amplitude zonale si le déplacement vers le nord est égal à toutes les longitudes)
Identification de tendances dans l'amplitude des ondes	Régression linéaire et de tests de significativité	Tendances AM pour certaines saisons et secteurs, néanmoins AA pas seul facteurs influençant
		Mêmes résultats que FV12 mais pas de significativité. changements au niveau de l'étendue des méandres plus petits. Changements statistiquement significatifs limités à certaines métriques, saisons et domaines géographiques

<table>
<tr><th colspan="3">J. Francis, S. Vavrus (2012) - Evidence linking Artic amplification to extreme weather in mid-latitudes.</th></tr>
<tr><td rowspan="7">Montrer comment l'AA peut augmenter l'amplitude et réduire la vitesse de propagation des ondes</td><td>Réanalyses : NCEP, (ERA-40)</td><td>Différence entre les hautes et basses latitudes : le réchauffement arctique favorise les conditions météorologiques persistances aux latitudes tempérées. La diminution du gradient au pôle provoque des vents zonaux plus faible et la hausse du géopotentiel 500hPa au niveau des latitudes moyennes (élongation des sommets de crêtes vers le nord et augmentant l'amplitude des ondes) entrainant un lent déplacement vers l'est de la propagation des ondes</td></tr>
<tr><td>Période : 1979-2011</td><td>Diminution de la différence de gradient entre les hautes et basses latitudes depuis 1980 dans toutes les saisons particulièrement en automne et hiver (environ 10 %, significatif)</td></tr>
<tr><td>Utilisation du z500 (journalier)</td><td>Anomalies statistiquement significatives de température de proche surface au-delà de 40°N pendant l'automne et l'hiver avec une anomalie particulièrement marquée au-dessus de l'Atlantique nord.</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Région : Amérique nord-Atlantique nord (140-0°W)</td><td>Diminution significative de 14 % depuis 1979 des vents zonaux diminution en hiver depuis les années 90</td></tr>
<tr><td rowspan="3">Elongation des crêtes vers le nord liée à l'AA (forte corrélation négative significative à 99 %) : peut être une réponse à l'augmentation du réchauffement et à la fonte des neiges précoces des hautes latitudes</td></tr>
<tr><td rowspan="3">Isoplètes ± 50m : JFM : 5400m JAS : 5700m OND : 5600m</td></tr>
<tr><td>Latitude maximale de l'isoplète en OND lié à l'étendue de la banquise en septembre</td></tr>
<tr><td>JFM et OND : crête vers l'ouest de l'Amérique du nord et partie est de l'Atlantique nord, tendance positive concernant l'amplitude des ondes à toutes les longitudes (particulièrement au centre AM et NA)</td></tr>
<tr><th colspan="3">E. Barnes (2013) - Revisting the evidence linking Artic amplification to extreme weather in mid-latitudes.</th></tr>
<tr><td rowspan="4">Lien entre AA, ondes et conditions météorologiques des latitudes moyennes</td><td>3 réanalyses : ERA-Interim, NCEP, MERRA</td><td>SMM : augmentation (étirement important des ondes) depuis 30 ans en JAS (significative) et en OND (pas de significativité)</td></tr>
<tr><td>Période : 1980-2011</td><td>DMM : pas de tendances significatives en JAS et en OND</td></tr>
<tr><td>Utilisation des moyennes journalières du Z500 et v250, et des moyennes mensuelles pour u500</td><td>Différence entre les deux métriques : SMM isoplète non associé aux ondes individuelles mais à l'extrême saisonnier d'un isoplète. Les tendances mises en avant dans l'étirement dépendent de la méthodologie employée</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Régions : Amérique du nord/Atlantique nord (30-70°N, 230-350°E = -130,-10)</td><td>En JAS, l'isoplète 5500m connaît la plus grande variation vers le sud avec les deux métriques sur 1980-1995 ; même constat pour l'iso 5620m sur la période 1996-2011</td></tr>
<tr><td>Montrer si la fréquence des épisodes de conditions météorologiques persistantes augmente</td><td>En OND, l'isoplète 5320m connait la plus grande variation vers le sud sur la période 1980-1995 avec les deux métriques ; de même pour l'isoplèe 5340 sur la période 1996-2011 avec SMM, 5390m avec DMM</td></tr>
</table>

	2 métriques : quantification des méandres saisonniers (SeaMaxMin) journaliers (DayMaxMin)	Intensité de sinuosité inchangée. Augmentation de l'isoplète le plus sinueux. Les résultats sont différents en fonction de l'isoplète choisi
Montrer si l'amplitude des ondes a augmenté durant les 30 dernières années		Déplacement méridien des ondes dû au déplacement de l'activité sinueuse d'un isoplète à un autre avec des ondes constantes. Cela montre un réchauffement dans le champ de géopotentiel des hautes latitudes
	3 isoplètes : 5650, 5700, 5750m pour JAS, 5550, 5600, 5650m pour OND	Désaccord avec les résultats de FV12 sur les tendances de l'été, du printemps et de l'automne. La métrique de FV12 (latitude maximale d'un isoplète, nombre de points de grille d'un isoplète au-delà de 50°N) est impactée par le déplacement au pôle du z500. Leurs résultats sont en partie biaisés (artefact du déplacement vers le pôle du géopotentiel lié au réchauffement climatique). Pour éviter les biais : ne pas interpréter un mouvement de champs géopotentiel comme un changement d'étendue des ondes
Montrer si les ondes à grandes échelles connaissent une vitesse de propagation plus lente	Etendue méridionale de chaque onde pour chaque jour de la saison + moyenne saisonnière	
	Conditions météorologiques persistantes : 5 jours ou plus (Barnes *et al.*, 2012)	Statistiquement, pas d'augmentation significative de la fréquence des épisodes de conditions météorologiques persistantes, pas d'observations robustes ni de tendances significatives concernant le ralentissement des ondes (sauf en OND)
J. Francis, S. Vavrus (2015) - Evidence for a wavier jet stream in response to rapid Artic warming,		
Détection de changements dans la fréquence des configurations de grande amplitude du jet stream	Climatologie de référence : 1979-1994 (pré-AA-era)	L'automne se détache dans tous les domaines (diminution de 10 % des vents zonaux depuis 1979 à 500hPa aux latitudes tempérées dû à l'AA et à la diminution du gradient)
	3 périodes : 1990-2013, 1995-2013, 2000-2013	Atlantique : fréquence plus importante HAD toute l'année mais surtout en JAS et OND. Faible augmentation en AMJ
	2 contours : 5300 et 5600 à 500hPa	
Étude des impacts régionaux de l'AA sur l'épaisseur du gradient au niveau du pôle, sur la vitesse des vents zonaux et sur le jet stream	Plusieurs domaines : Hémisphère Nord, Amérique du Nord (140°W - 70°W) Atlantique Nord (75°W - 60°E) Europe (-15°W - 45°E) Asie (30°E - 150°E) Pacifique Nord (150°E - 120°W)	Amérique du nord : fréquence plus importante de HAD toute l'année mais surtout en JAS
		Europe : fréquence plus importante en OND surtout durant les dernières années. Légère augmentation durant les dernières années en AMJ
		Asie : légère augmentation des HAD en AMJ et forte augmentation en OND. Diminution en JAS
	Paramètres étudiés pour chaque période par rapport à la climatologie de référence : fréquence saisonnière des jours de grande amplitude (HAD, amplitude > 35° de latitude)	Pacifique : diminution des HAD en JFM et augmentation en AMJ et OND
		Hémisphère nord : augmentation OND et légère diminution en JAS durant les dernières années
		Corrélation négative entre les changements de l'épaisseur du gradient avec les changements de fréquence des ondes extrêmes
Détection de ondes dites extrêmes	Indice de circulation méridionale (MCI) calculé à partir des vents zonaux et méridiens (MCI = 0 : vents zonaux, MCI = 1 : vents méridiens vers le sud, MCI = -1 : vents méridiens vers le nord)	Flux plus méridien dans chaque zone et chaque saison où le gradient a diminué dû à l'AA
Importance de la période utilisée : comparaison de différentes périodes par rapport à la climatologie de référence		Changement de fréquence : augmentation du nombre de HAD, amplification dû à AA
		Augmentation de la fréquence d'occurrence des configurations de grandes amplitudes du jet stream par rapport à la pré-AA-era, donc si AA augmente à l'avenir, alors événements extrêmes plus fréquents

Annexe 2 : Schéma présentant un exemple de contour selon deux situations successives.



Contour à l'instant t	Contour à l'instant t + 1

Afin d'assurer la continuité entre deux pas de temps successifs et ne pas enregistrer de brutale diminution de longueur de contour dans certaines situations, plusieurs contours peuvent être détectés et leur longueur additionnée pour un même pas de temps comme nous le montre la figure à l'instant + 1.

Annexe 3 : Présentation des modèles CMIP5 et résolution associée.

Short name	Originating group(s)	Model version	Atmospheric resolution
ACCS0	CSIRO/BOM, Australia	access1-0	192 x 145, L38
ACCS3		access1-3	192 x 145, L38
BCC	BCC, Beijing, China	bcc-csm1-1	128 x 64, L26
BCCm		bcc-csm1-1-m	320 x 160, L26
CCCMA 5	CCCMA, Victoria, Canada	canesm2	128 x 64, L3
CNRM	CNRM/CERFACS, Toulouse, France	cnrm-cm5	256 x 128, L31
CSIRO	CSIRO/QCCCE, Australia	csiro-mk3-6-0	192 x 96, L18
FIO	FIO, Qingdao, China	fio-esm	128 x 64, L26
GFDL	NOAA/GFDL, Princeton, USA	gfdl-esm2m	144 x 90, L24
GFDLg		gfdl-esm2g	144 9 90, L24
GFDLc		gfdl-cm3	144 x 90, L48
GISS	NASA/GISS, New York, USA	giss-e2-r	144 x 90, L40
IAP	IAP, Beijing, China	fgoals-g2	128 x 60, L26
IAPs		fgoals-s2	128 x 108, ?
ICHEC	EC-Earth Consortium, Europe	ec-earth	320 x 160, L62
INGV	INGV/CMCC, Italy	cmcc-cm	480 x 240, L31
INGVe		cmcc-cesm	96 x 48, L39
INGVs		cmcc-cms	192 x 96, L95
INM	INM, Moscow, Russia	inmcm4	180 x 120, L21
IPSL	IPSL, Paris, France	ipsl-cm5a-lr	96 x 96, L39
IPSLm		ipsl-cm5a-mr	144 x 143, L39
IPSLb		ipsl-cm5b-lr	96 x 96, L39
MIROC	AORI/NIES/JAMSTEC, Japan	miroc5	256 x 128, L40
MIROCe		miroc-esm	128 x 64, L80
MIROCc		miroc-esm-chem	128 x 64, L80
MOHC	MOHC, Exeter, UK	hadgem2-es	192 x 145, L38
MOHCc		hadgem2-cc	192 x 145, L60
MPIM	MPIM, Hamburg, Germany	mpi-esm-lr	192 x 96, L47
MPIMm		mpi-esm-mr	192 x 96, L95
MRI	MRI, Tsukuba, Japan	mri-cgcm3	320 x 160, L48
NCAR	NCAR, Boulder, USA	ccsm4	288 x 192, L26
NCARe		cesm1-bgc	288 x 192, ?
NCC	NCC, Oslo, Norway	noresm1-m	144 x 96, L26

Adapté de Cattiaux *et al.*, 2013. Les lignes grisées sont les modèles non utilisés dans cette étude.

Annexe 4 : Tableau de corrélation entre la longueur de contour, la distance entre contours et les indices de NAO et de blocage par saison pour les domaines atlantiques

			NAO Osborn						NAO Hurrel						Indice de blocage					
			1	2	5	7	14	Mois	1	2	5	7	14	Mois	1	2	5	7	14	Mois
NA	Longueur	JFM	-0,76	-0,74	-0,69	-0,70	-0,52	-0,48	-0,79	-0,77	-0,68	-0,69	-0,47	-0,35	0,74	0,72	0,68	0,65	0,45	0,28
		AMJ	-0,55	-0,55	-0,56	-0,50	-0,37	-0,48	-0,59	-0,59	-0,58	-0,51	-0,51	-0,42	0,48	0,48	0,51	0,45	0,24	0,35
		JAS	-0,34	-0,31	-0,31	-0,28	-0,41	-0,36	-0,26	-0,22	-0,30	-0,37	-0,35	-0,33	0,64	0,62	0,64	0,53	0,37	0,09
		OND	-0,78	-0,78	-0,72	-0,73	-0,62	-0,65	-0,68	-0,67	-0,65	-0,71	-0,54	-0,59	0,59	0,59	0,58	0,56	0,46	0,45
	Distance	JFM	-0,62	-0,63	-0,78	-0,66	-0,50	#N/A	-0,62	-0,70	-0,82	-0,69	-0,57	-0,53	0,51	0,64	0,72	0,67	0,58	#N/A
		AMJ	-0,16	-0,15	-0,14	-0,21	-0,28	-0,31	-0,14	-0,23	-0,27	-0,24	-0,39	-0,38	-0,03	0,12	0,30	0,38	0,49	0,59
		JAS	0,08	0,10	0,13	-0,02	-0,10	-0,19	0,19	0,29	0,03	0,02	-0,06	-0,32	0,02	0,08	0,47	0,37	0,19	0,29
		OND	-0,50	-0,69	-0,62	-0,66	-0,46	-0,29	-0,41	-0,57	-0,53	-0,60	-0,54	-0,44	0,38	0,50	0,49	0,54	0,55	0,45
AT	Longueur	JFM	-0,83	-0,83	-0,79	-0,79	-0,67	-0,43	-0,81	-0,80	-0,77	-0,78	-0,66	-0,39	0,78	0,78	0,74	0,73	0,63	0,44
		AMJ	-0,41	-0,45	-0,49	-0,40	-0,41	-0,26	-0,18	-0,25	-0,28	-0,16	-0,26	-0,04	0,31	0,33	0,38	0,21	0,16	0,28
		JAS	-0,16	-0,14	-0,16	-0,20	-0,18	-0,26	0,13	0,14	0,05	0,07	0,10	-0,08	0,29	0,31	0,32	0,37	0,12	0,17
		OND	-0,79	-0,79	-0,70	-0,65	-0,48	-0,55	-0,63	-0,63	-0,56	-0,59	-0,45	-0,38	0,69	0,70	0,65	0,63	0,62	0,58
	Distance	JFM	-0,37	-0,58	-0,78	-0,73	-0,70	-0,61	-0,30	-0,56	-0,75	-0,68	-0,66	-0,54	0,28	0,57	0,65	0,52	0,58	0,54
		AMJ	0,10	0,12	0,02	-0,22	-0,24	-0,03	0,16	0,15	0,00	-0,18	-0,32	-0,14	-0,24	-0,16	0,33	0,51	0,48	0,40
		JAS	-0,03	-0,03	0,09	0,03	-0,24	-0,21	0,22	0,23	0,14	0,12	0,09	0,00	-0,18	-0,21	0,17	0,12	-0,08	0,09
		OND	-0,38	-0,59	-0,56	-0,66	-0,36	-0,35	-0,34	-0,49	-0,40	-0,52	-0,25	-0,31	0,21	0,35	0,36	0,57	0,40	0,40

Significativité **99 %** **>95 %** **>90 %**

Annexe 5 : Nombre de fréquences présentant des tendances significatives par variable, par domaine et par saison sur la période 1979 – 2014 à l'aide des réanalyses ERA-Interim.

Saison	Domaine	Longueur de contour	Distance entre contours	Amplitude	Latitude maximale	Latitude minimale
JFM	NA					
	AT		1			
	AM					
	EU		1			
	AS		2			
	NP			1	1	
	NH					
AMJ	NA			1 2	2 4	
	AT	1		1 3	1	1
	AM				1	
	EU			1		2 3
	AS					
	NP	6	3	1		5 6
	NH		1 1			2
JAS	NA					
	AT	1	1	3 4	2 4	
	AM					
	EU		1	3 5	3 4	
	AS	1 2			1	3 4
	NP	1	1			3
	NH		1		1	2
OND	NA					
	AT					
	AM					
	EU					
	AS					
	NP		1			
	NH					

Tendance positive significative à : 90% 95%

Tendance négative significative à : 90% 95%

Annexe 6 : Tableau présentant la comparaison des résultats sur la période récente selon les différentes études réalisées

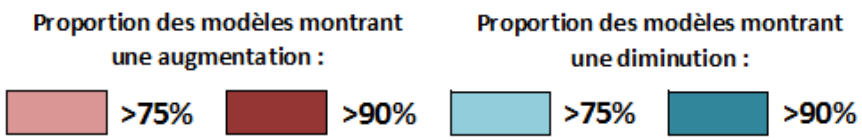
Domaine	Screen & Simmonds	Barnes	Francis & Vavrus	Cette étude
Amérique du nord (140°W – 70°W)			Augmentation des HAD toute l'année et surtout en JAS	AMJ : diminution latmax (1-5)
Amérique du nord - Atlantique nord (140°W – 0°) SS13 et FV12 (130°W – 10°W) B13 et pour cette étude	Augmentation AM toute saison (OND la plus marquée) et diminution AZ toutes saisons. Pas de significativité	OND : diminution significative vents zonaux	Baisse de la différence de gradient durant chaque saison, particulièrement en OND et JFM, affaiblissement des vents zonaux depuis 1979 (début des 1990's pour hiver	AMJ : diminution amplitude (1-5-2-10), latmax (2-5-4-10)
Amérique du nord - Pacifique Ouest (180°W – 60°W)	Diminution AM en JFM, augmentation en AMJ Diminution globale AZ			
Atlantique nord (75°W – 60°E)			Augmentation des HAD toute l'année particulièrement JAS	JFM : diminution c2c (1-5) AMJ : diminution cltot (1-5), amplitude (1-5-3-10), latmax (1-5), augmentation latmin (1-10) JAS : augmentation cltot (1-5) c2c (1-10), amplitude (3-5-4-10), latmax (2-5-4-10)
Europe (60°W – 60°E) SS13 (15°W – 45°E) FV15 et pour cette étude	JFM : diminution AZ AMJ : diminution AZ JAS : Augmentation significative AM, diminution significative AZ OND : augmentation AM		AMJ : Légère augmentation durant les dernières années OND : augmentation HAD	JFM : diminution c2c (1-5) AMJ : diminution amplitude (2-5-3-10), latmax (1-10), augmentation latmin (2-5-3-10) JAS : augmentation c2c (1-5), amplitude (3-5-5-10), latmax (3-5-4-10), diminution latmin (1-10)
Asie (60°E – 180°E) SS13 (30°E – 150°E) FV15 et cette étude	JAS : diminution significative AZ OND : diminution AZ		AMJ : légère augmentation HAD JAS : diminution HAD OND : forte augmentation HAD	JFM : diminution c2c (2-5) JAS : diminution cltot (1-5-2-10), augmentation latmin (3-5-4-10), latmax (1-5)
Hémisphère nord			JAS : légère diminution HAD durant les dernières années OND : augmentation HAD	AMJ : diminution c2c (1-5) / augmentation c2c (1-5), diminution latmin (2-5) JAS : Augmentation c2c (1-10), latmin (2-5) et latmax(1-10)

Pacifique (150°E – 120°W) FV15 (120°E – 120°W) cette étude			JFM : diminution HAD AMJ : augmentation HAD JAS : légère diminution HAD OND : augmentation HAD	JFM : diminution amplitude (1-10) et latmax (1-5) AMJ : augmentation cltot (6-5), c2c (3-5), amplitude (1-10), diminution latmin (5-5-6-10) JAS : diminution cltot (1-5), c2c (1-5), augmentation latmin (3-5) OND : diminution c2c (1-10)

Les cases grisées représentent des domaines géographiques non étudiés par l'étude concernée. Les abréviations signifient : AM = amplitude méridionale, AZ = amplitude zonale, cltot = longueur de contour, c2c = distance entre contours, HAD : jour de grande amplitude, latmax = latitude maximale, latmin = latitude minimale. La mention « (3-5-4-10) » signifie que 3 tendances sont significatives à 95% et 4 tendances à 90%.

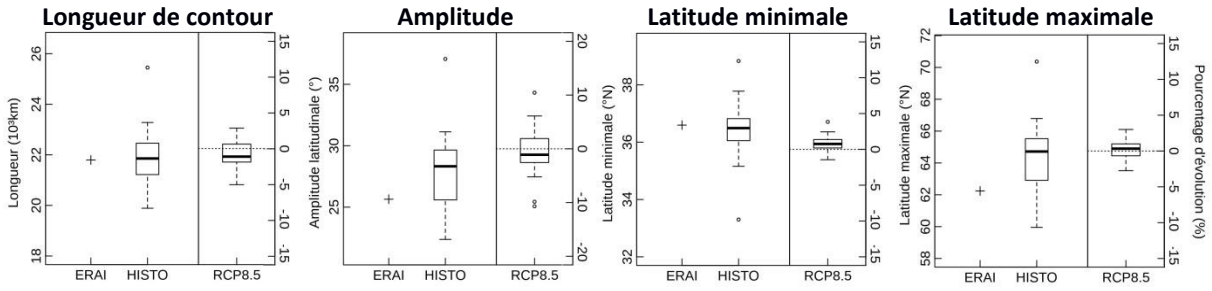
Annexe 7 : Moyennes multi-modèles du changement relatif en pourcentage de la période future (2070 – 2099) par rapport à la période historique (1979 – 2008) par statistiques, par saison et par domaine.

Saison	Domaine	Longueur de contour	Amplitude	Latitude minimale	Latitude maximale
JFM	NA	0,7	0,6	-0,4	0,0
	AT	-1,2	-2,3	0,4	-0,7
	AM	2,1	3,8	-0,9	0,9
	EU	-2,2	-4,7	1,1	-1,0
	AS	-1,1	-3,6	0,9	-1,1
	NP	-1,1	0,4	1,3	0,9
	NH	-1,1	-1,1	0,9	-0,1
AMJ	NA	-1,8	-3,5	1,5	-0,6
	AT	-2,2	-3,2	1,8	-0,4
	AM	-1,6	-3,6	1,0	-0,7
	EU	-2,3	-4,5	1,7	-0,7
	AS	-0,5	-0,7	0,9	0,2
	NP	-0,7	-0,5	0,8	0,2
	NH	-0,9	-0,9	1,2	0,1
JAS	NA	-4,2	-9,0	2,9	-1,0
	AT	-3,2	-7,0	2,3	-1,0
	AM	-3,2	-7,0	1,9	-0,6
	EU	-3,1	-7,1	1,9	-0,8
	AS	-0,9	0,6	0,1	0,0
	NP	-1,1	-0,2	0,0	-0,1
	NH	-0,9	-0,9	0,0	-0,5
OND	NA	-2,0	-7,4	2,1	-1,4
	AT	-2,8	-6,1	2,4	-0,9
	AM	-1,4	-5,3	1,7	-0,6
	EU	-2,8	-7,6	2,3	-0,9
	AS	-0,9	-5,1	1,4	-1,1
	NP	-2,8	-8,0	2,4	-1,7
	NH	-5,1	-5,1	2,3	-1,2



La distance entre contours n'est pas présentée car cette dernière nécessite de longs calculs. Ce tableau met en évidence une diminution de la longueur de contour, l'amplitude et la latitude maximale alors que la latitude minimale augmente. Ces tendances suggèrent un déplacement vers le nord de la partie équatoriale du jet stream, un resserrement de ce dernier sur une bande latitudinale plus restreinte et une trajectoire moins sinueuse.

Annexe 8 : Valeurs moyennes des réanalyses ERA-Interim sur la période 1979 – 2014 (croix), moyennes historiques et changement relatif en pourcentage de la période future (2070 – 2099) par rapport à la période historique (1979 – 2008, boîtes à moustaches) des 24 modèles CMIP5 en terme de longueur de contour, d'amplitude, de latitude minimale et maximale en AMJ pour le domaine NP.



La longueur de contour, l'amplitude et la latitude maximale ne semblent pas connaître d'évolution particulière ou diminuent légèrement (sauf pour la latitude maximale) alors que la latitude minimale augmente. Ces tendances suggèrent un déplacement vers le nord de la partie équatoriale du jet stream.