



HAL
open science

L'activité dépressionnaire et anticyclonique hivernale des moyennes latitudes du Pacifique Nord

Alice Favre

► **To cite this version:**

Alice Favre. L'activité dépressionnaire et anticyclonique hivernale des moyennes latitudes du Pacifique Nord. Climatologie. Université de Bourgogne, 2007. Français. NNT: . tel-00454118

HAL Id: tel-00454118

<https://theses.hal.science/tel-00454118>

Submitted on 8 Feb 2010

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Université de Bourgogne



THESE DE DOCTORAT

Spécialité Géographie – Option Climatologie

L'activité dépressionnaire et anticyclonique hivernale des moyennes latitudes du Pacifique Nord 1950-2100

Alice FAVRE

Soutenue publiquement le 19 janvier 2007

Devant le jury composé de :

Pierre CAMBERLIN
Bernard FONTAINE
Alexandre GERSHUNOV
Claude KERGOMARD
Hervé LE TREUT
Vincent MORON
Yves RICHARD
Jean-François ROYER

Directeur de Thèse
Examineur
Examineur
Examineur
Rapporteur
Rapporteur
Co-directeur de Thèse
Examineur

Remerciements

Je voudrais exprimer ici ma reconnaissance aux personnes qui m'ont soutenue et qui ont contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce travail de thèse.

Mes remerciements sont destinés tout d'abord à mes deux directeurs de thèse, Pierre Camberlin et Yves Richard, Maîtres de Conférences à l'Université de Bourgogne, pour avoir encadré ce travail. Ils m'ont témoigné un grand soutien et leurs nombreuses corrections, conseils et suggestions m'ont permis de progresser dans mes analyses.

Je remercie Messieurs Hervé Le Treut, Directeur du LMD, et Vincent Moron, Professeur à l'Université d'Aix-Marseille 1, de porter un intérêt à mon travail et d'avoir accepté d'en être les rapporteurs, ainsi que Bernard Fontaine, Directeur du CRC de Dijon, Claude Kergomard, Professeur à l'ENS, et Jean-François Royer, chercheur au CNRM, de participer au jury de cette thèse.

Ce travail n'aurait pu être réalisé comme tel sans la participation d'Alexandre Gershunov, chercheur à SCRIPPS, qui m'a beaucoup appris au plan méthodologique et théorique. Sa large contribution à l'élaboration de l'algorithme et les discussions des résultats ont permis de poser les fondements de ce travail. Je le remercie également de participer au jury de cette thèse.

Merci à Hervé Douville, chercheur au CNRM, pour avoir fourni les données et répondu à toutes mes questions concernant le modèle CNRM-CM3 avec grande gentillesse.

Un grand merci à ma famille, ma fille, mes parents, ma sœur, Laurent et aussi à mes amis pour leur enthousiasme et leur soutien indéfectible.

Je ne pourrais achever ces remerciements sans avoir une pensée amicale envers mes camarades du laboratoire de climatologie de l'Université Lyon 3 (Yohan, Raluca, Miraella, Nathalie, Pascal, Laïla, Lionel, Alexis, Anne, Yves, Guilhem et tous les autres) où j'ai passé mes années de maîtrise et de DEA. Je tiens à remercier Chantal Gérard, bibliothécaire de l'UMR 5600, pour avoir porté intérêt à mes recherches et Olivier Chaire pour son aide en informatique. Enfin, je voudrais témoigner de ma gratitude au Professeur Marcel Leroux pour m'avoir incité à continuer mes recherches en climatologie après le DEA.

Résumé

En utilisant un nouveau schéma automatique, les trajectoires des dépressions et des anticyclones synoptiques des moyennes latitudes du Pacifique Nord ont été construites à partir des données de la pression au niveau de la mer (PNM) moyenne journalière (Réanalyses NCEP-NCAR). La fréquence, l'intensité ainsi que les caractéristiques des trajectoires de ces systèmes transitoires ont été synthétisées en séries temporelles moyennes mensuelles, couvrant la période 1950-2001. L'étude de la climatologie des dépressions et des anticyclones montre que durant la saison hivernale (estivale), les dépressions sont plus (moins) creusées, circulent fréquemment (rarement) sur la région des Aléoutiennes et concernent davantage l'Est (Ouest) du Pacifique Nord, alors que les anticyclones présentent une pression centrale plus (moins) forte et concernent plus souvent l'Ouest (Est) du Pacifique Nord.

Sur l'Est du Pacifique Nord, la force des anticyclones hivernaux diminue graduellement et leur fréquence devient plus variable au cours de ces 50 dernières années, pendant que les dépressions s'intensifient brutalement et présentent des trajectoires plus méridionales à partir du milieu des années 70. Ces changements synoptiques se traduisent par des PNM hivernales anormalement faibles au niveau de la dépression des Aléoutiennes, en accord avec la phase positive de l'Oscillation Nord Pacifique, induisant des anomalies positives de la température de surface océanique (TSO) le long de la côte ouest de l'Amérique du Nord et des anomalies négatives de la TSO sur le centre du Pacifique Nord. Un lien entre l'activité dépressionnaire / anticyclonique et les TSO tropicales existe également, mais ce lien n'est significatif qu'à partir du milieu des années 1970. L'intensification des dépressions associée à des trajectoires plus méridionales, à partir du milieu des années 70, est défavorable à l'activité anticyclonique. Ceci étant l'explication physique de l'anti-corrélation entre l'activité dépressionnaire et anticyclonique. Ces changements dans l'activité transitoire influencent directement les températures et les précipitations sur l'Ouest de l'Amérique du Nord, et sont associés à des conditions généralement plus chaudes, particulièrement pour les températures nocturnes, et plus humides, le long de la côte ouest depuis l'Alaska jusqu'au Mexique, ainsi que sur le Sud-Ouest des Etats-Unis.

Selon les simulations du Modèle global Couplé du Centre National de Recherches Météorologiques version 3 (CNRM-CM3), la fréquence hivernale des dépressions des moyennes latitudes pourrait être significativement réduite dans un contexte de forte augmentation des gaz à effet de serre, et plus spécifiquement sur l'Est du Pacifique Nord. Cette modification pourrait être favorable aux conditions anticycloniques sur l'Est, induisant une pondération du réchauffement le long de la côte ouest nord-américaine et une réduction / augmentation des précipitations sur les régions se situant au sud et au nord de 45°N respectivement. La circulation atmosphérique pourrait moduler régionalement le réchauffement d'origine anthropique, avec des advections d'air froid plus fréquentes le long de la côte ouest nord-américaine.

Mots-clés :

dépression – anticyclone – moyennes latitudes – Pacifique Nord – températures – précipitations – hiver – Amérique du Nord-Ouest – trajectoire – synoptique – pression au niveau de la mer – fréquence – intensité – dépression des Aléoutiennes – Oscillation Nord-Pacifique – température de surface océanique – modèles couplés – gaz à effet de serre.

Abstract

Using a new automated scheme, synoptic mid-latitudes cyclone and anticyclone trajectories have been constructed over the North Pacific from mean daily sea level pressure (SLP) data (NCEP-NCAR Reanalysis). Frequency, intensity and trajectory characteristics of these transient systems have been summarized to monthly mean time series, covering the period 1950-2001. The study of cyclones' and anticyclones' climatology shows that during the winter (summer) season, cyclones are deeper (less deep), circulate frequently (rarely) over the Aleutians region and inhabit eastern (western) limits of the North Pacific, while anticyclones exhibit higher (lower) central pressure and inhabit the western (eastern) reaches of the basin.

Over the North-Eastern Pacific, the strength of anticyclones gradually diminished and their frequency became more variable, while cyclones abruptly intensified and presented further southerly trajectories since the mid-1970s. These synoptic changes averaged out into anomalously low winter mean SLP in the Aleutian Low region, consistent with the positive phase of the North Pacific Oscillation, inducing positive sea surface temperature (SST) anomalies along the west coast of North America and negative in the central North Pacific Ocean. A link between cyclonic / anticyclonic activity and tropical SST anomalies also exists, but this link only becomes significant after the mid-seventies. The cyclone intensification associated with more southerly trajectories from the mid 70s, discourage anticyclonic activity. This is the physical basis for the observed anticorrelation between cyclonic and anticyclonic activities. Observed changes in transient activity directly impact surface air temperatures and precipitation over North-Western America, and are associated with generally warmer (especially nighttime) temperature and more precipitation along the west coast from Alaska to Mexico as well as over Southwestern United States in general.

According to the Centre National de Recherches Météorologiques Coupled global climate Model version 3 (CNRM-CM3) simulations, the enhanced of greenhouse gases could significantly reduce the frequency of midlatitude cyclones over the North-East Pacific. These modifications of synoptic dynamics could favor anticyclonic conditions in that region, reducing the warming along the west coast of North America and decreasing / increasing precipitation to the south / north of 45°N respectively. Such possible dynamical modulation of anthropogenic regional warming would be associated with more frequent wintertime cold air outbreaks along the west coast of North America.

Key-words:

North Pacific – mid-latitudes – cyclone – anticyclone – temperature – precipitation – North-Western America – synoptic – trajectory – sea level pressure – frequency – intensity – winter – Aleutian Low – North Pacific Oscillation – sea surface temperature – coupled models – greenhouse gases.

Table des matières

Introduction générale.....	1
 PARTIE I	
Quantification et présentation de la climatologie de l'activité transitoire des moyennes latitudes du Pacifique Nord.....	6
 Chapitre 1 : Etablissement des trajectoires des dépressions et des anticyclones des moyennes latitudes du Pacifique Nord.....	
9	
1.1. Présentation des Réanalyses NCEP/NCAR et détermination de l'espace géographique considéré.....	10
1.1.1. Les Réanalyses NCEP/NCAR : choix des données.....	11
1.1.2. Détermination de l'espace géographique considéré.....	14
1.2. Schéma automatique de construction des trajectoires des dépressions et des anticyclones.....	26
1.2.1. Les postulats de départ.....	27
1.2.2. Détermination des minima et maxima locaux de pression.....	29
1.2.3. Connexion inter-journalière des minima et de maxima locaux de pression... 33	
1.3. Quantification des caractéristiques des dépressions et des anticyclones des moyennes latitudes du Pacifique Nord.....	37
1.3.1. Filtre spatial et temporel.....	37
1.3.2. Constitution des séries temporelles.....	40
 Chapitre 2 : Climatologie des dépressions et des anticyclones des moyennes latitudes du Pacifique Nord.....	
42	
2.1. Informations générales sur les trajectoires des dépressions et des anticyclones du Pacifique Nord.....	42
2.1.1. Les dépressions.....	43
2.1.2. Les anticyclones.....	46
2.2. Variations inter-mensuelles moyennes des caractéristiques des dépressions et des anticyclones.....	50
2.2.1. Paramètres de fréquence et intensité.....	50
2.2.2. Paramètres de durée des trajectoires, distance parcourue et vitesse de déplacement.....	52
2.2.3. Paramètres spatiaux en latitude et longitude.....	54
2.3. Description de la saisonnalité de l'activité dépressionnaire / anticyclonique.....	57
2.3.1. Détermination de la saisonnalité.....	57
2.3.2. Saison hivernale.....	59
2.3.3. Saison estivale.....	60

2.3.4. Saisons de transition.....	61
PARTIE II	
Relations entre l'activité dépressionnaire / anticyclonique hivernale et le climat du secteur Pacifique Nord / Amérique du Nord-Ouest.....	
66	
Chapitre 3 : Caractéristiques hivernales des dépressions et des anticyclones ayant atteint le Pacifique Nord-Est.....	
69	
3.1. Statistiques générales des caractéristiques hivernales des dépressions et des anticyclones ayant atteint le Pacifique Nord-Est.....	70
3.1.1. Climatologie hivernale des dépressions.....	70
3.1.2. Climatologie hivernale des anticyclones.....	72
3.2. Analyse temporelle des caractéristiques hivernales des dépressions et des anticyclones ayant atteint le Pacifique Nord-Est.....	74
3.2.1. Variabilité inter-annuelle et relations entre les caractéristiques des dépressions	74
3.2.2. Variabilité inter-annuelle et relations entre les caractéristiques des anticyclones.....	78
3.2.3. Relations entre les caractéristiques des dépressions et des anticyclones.....	81
3.3. Indices de l'activité transitoire hivernale du Pacifique Nord-Est.....	83
3.3.1. Indice de l'activité dépressionnaire.....	83
3.3.2. Indice de l'activité anticyclonique.....	84
3.3.3. Indice de l'activité dépressionnaire / anticyclonique.....	85
Chapitre 4 : L'activité dépressionnaire / anticyclonique hivernale dans le Pacifique Nord-Est et le climat global.....	
89	
4.1. La circulation de surface.....	90
4.1.1. Dans le Pacifique Nord et la zone inter-tropicale.....	90
4.1.2. A l'échelle globale.....	92
4.2. La circulation dans la moyenne et la haute troposphère.....	94
4.2.1. Dans la moyenne troposphère (à 500 hPa).....	95
4.2.2. Dans la haute troposphère (à 200 hPa).....	97
4.3. Les modes climatiques du Pacifique.....	99
4.3.1. Les modes de la température de surface océanique PDO et ENSO : définition.....	100
4.3.2. Modes climatiques atmosphériques NPI et PNA : définition.....	102
4.3.3. Relations avec les indices de l'activité dépressionnaire et anticyclonique.....	103
Chapitre 5 : Les températures et précipitations hivernales en Amérique du Nord-Ouest.....	
106	
5.1. Températures et précipitations hivernales en Amérique du Nord-Ouest : caractéristiques moyennes.....	107
5.1.1. Présentation des données in situ.....	107
5.1.2. Description du relief et du climat hivernal de l'Amérique du Nord-Ouest....	109
5.2. Températures et précipitations hivernales en Amérique du Nord-Ouest : analyse spatio-temporelle.....	113
5.2.1. Variation spatio-temporelle des températures.....	113

5.2.2. Variation spatio-temporelle des précipitations.....	117
5.3. Relations entre l'activité dépressionnaire / anticyclonique hivernale du Pacifique Nord-Est et les températures / précipitations sur l'Amérique du Nord-Ouest.....	121
5.3.1. Températures minimales /maximales et amplitude thermique diurne.....	122
5.3.2. Evènements extrêmes chauds et extrêmes froids diurnes et nocturnes.....	125
5.3.3. Cumuls des précipitations et fréquence des jours de pluie.....	127
 Partie III	
Evolution des caractéristiques des dépressions et des anticyclones hivernaux dans le Pacifique Nord en réponse au réchauffement climatique global... 131	
 Chapitre 6 : Climatologie de l'activité transitoire hivernale du Pacifique Nord : Comparaison entre les Réanalyses NCEP-NCAR et la simulation historique du modèle CNRM-CM3.....	
134	
6.1. Conditions atmosphériques moyennes.....	134
6.1.1. Présentation des données utilisées provenant du modèle CNRM-CM3.....	135
6.1.2. Comparaison des champs moyens (JFM) issus de la simulation historique du modèle et des Réanalyses.....	136
6.2. Climatologie hivernale de l'activité dépressionnaire et anticyclonique.....	140
6.2.1. Construction des champs moyens de l'occurrence et de l'intensité des dépressions et des anticyclones.....	141
6.2.2. Caractéristiques moyennes de l'activité dépressionnaire.....	144
6.2.3. Caractéristiques moyennes de l'activité anticyclonique.....	147
 Chapitre 7 : Variabilité inter-annuelle de l'activité transitoire hivernale du Pacifique Nord : Comparaison entre les Réanalyses NCEP-NCAR et la simulation historique du modèle CNRM-CM3.....	
152	
7.1. Caractéristiques moyennes de la variation inter-annuelle de l'activité dépressionnaire et anticyclonique du Pacifique Nord.....	153
7.1.1. Variation inter-annuelle moyenne de l'activité transitoire.....	153
7.1.2. Relations entre les caractéristiques des dépressions et des anticyclones.....	157
7.2. Les modes de variabilité de l'activité dépressionnaire dans le Pacifique Nord.....	159
7.2.1. Les modes de variabilité de la fréquence des dépressions.....	160
7.2.2. Les modes de variabilité de l'intensité des dépressions.....	166
7.3. Les modes de variabilité de l'activité anticyclonique dans le Pacifique Nord.....	169
7.3.1. Les modes de variabilité de la fréquence des anticyclones.....	170
7.3.2. Les modes de variabilité de l'intensité des anticyclones.....	175
 Chapitre 8 : L'activité transitoire dans la simulation de type A2 du modèle CNRM-CM3: Conséquences possibles du réchauffement climatique global sur le climat du Pacifique Nord et de l'Amérique du Nord-Ouest.....	
181	
8.1. Conditions moyennes projetées par le modèle CNRM-CM3 selon le scénario SRES-A2.....	182
8.1.1. Champs climatiques moyens en surface et proche de la surface : comparaison entre les simulations XX1 et SRES-A2.....	182
8.1.2. Évolution de la climatologie hivernale de l'activité transitoire selon le scénario SRES-A2.....	185

8.2. Évolution des modes de la variabilité spatio-temporelle des caractéristiques des transitoires dans la simulation SRES-A2 du modèle CNRM-CM3 : impacts possibles sur le climat du Pacifique Nord et de l'Amérique du Nord-Ouest.....	189
8.2.1. Évolution des modes de la fréquence et de l'intensité des dépressions.....	190
8.2.2. Évolution des modes de la fréquence et de l'intensité des anticyclones.....	192
Conclusion générale.....	196
Bibliographie.....	206
Liste des figures.....	217
Liste des tableaux.....	224

Annexes (cf. <http://www.u-bourgogne.fr/climatologie>)

Introduction générale

Au cours de la seconde moitié du 20^{ème} siècle, des modifications importantes ont été observées dans le climat de l'Amérique du Nord-Ouest particulièrement au cours de la saison hivernale. Comme pour la plupart des régions des moyennes latitudes du Globe et en raison de l'augmentation des gaz à effet de serre (GES) d'origine anthropique, les températures tendent à augmenter, et plus fortement les températures nocturnes que diurnes, ainsi, l'amplitude thermique diurne diminue (Karl et al., 1984, 1986, 1993 ; Easterling, 2002 ; Groisman et al., 2004). Cette tendance à la hausse des températures génère une réduction des précipitations sous forme de neige (Karl et al., 1993 ; Mote et al., 2005) et un accroissement de la précocité de la fonte des neiges (ex : Stewart et al., 2005 ; Hamlet et al., 2005).

Surimposée à ce réchauffement général, une rupture climatique s'est manifestée au milieu des années 70, accentuant régionalement l'augmentation des températures et influençant le régime des précipitations. A partir de 1977, une augmentation brutale des températures et des précipitations s'est manifestée en Alaska (ex : Hartmann et Wendler, 2005). Une accentuation du réchauffement s'est également produite sur l'Ouest des Etats-Unis induisant une arrivée plus précoce du printemps et de la floraison des lilas et chèvrefeuilles (Cayan et al., 2001). A cause de l'élévation de la limite pluie / neige et de la précocité de la fonte des neiges, dues au réchauffement des températures, les systèmes glaciologiques et hydrologiques de l'Ouest des Etats-Unis ont été profondément affectés (ex : Cayan et Peterson 1989, Dettinger et Cayan 1995, Bitz et Battisti 1999). Il a également été observé une augmentation de la fréquence des événements de fortes précipitations sur le Sud-Ouest des Etats-Unis (Gershunov et Cayan, 2003), générant, entre autre, une accentuation de l'érosion (ex : D'Odorico et al. 2001).

Cette rupture climatique du milieu des années 70, qui a affecté l'Ouest de l'Amérique du Nord, est en accord avec un changement substantiel de la circulation de l'océan et de l'atmosphère du Pacifique Nord qui s'est opéré au cours des hivers 1976-77, en connexion avec l'Oscillation Nord-Pacifique (ou Pacific Decadal Oscillation (PDO) : Mantua et al. 1997, cf. figure A). Beaucoup d'études documentent cette modification soudaine, dans la seconde moitié des années 70, tant au point de vue de l'océan que de l'atmosphère (ex : Nitta et Yamada, 1989 ; Trenberth, 1990 ; Chen et al., 1992 ; Miller et al., 1994ab ; Trenberth et Hurrell, 1994 ; Latif et Barnett, 1996 ; Mantua et al., 1997 ; Nakamura et Yamagata, 1997 ; Overland et al., 1999b ; Schneider et Cornuelle, 2005).

Dans le Pacifique Nord, le mode PDO synthétise la variation des anomalies des températures de la surface océanique (TSO). La structure spatiale de PDO présente des anomalies de TSO sur le centre du Pacifique Nord qui varient en opposition avec celles le long de la côte ouest de l'Amérique du Nord depuis le Sud de la Californie jusque dans le Golfe de l'Alaska. L'indice PDO varie sur les échelles décennales (20-30 ans), et, entre 1976 et 1977, il a brutalement changé de signe, passant d'une phase plus froide le long de la côte ouest nord-américaine à une phase plus chaude et inversement sur le centre du Pacifique Nord. Le changement de phase des TSO extra-tropicales est accompagné par des modifications de la circulation et des caractéristiques de surface de l'océan (ex : Miller et al.

1994, Deser et al. 1996, Overland et al. 1999a), des écosystèmes marins (ex : Venrick et al. 1987, Ware et Thompson, 1991 ; Beamish et Bouillon 1993, Polovina et al. 1995, Roemmich et McGowan 1995, Mantua et al. 1997) et des dynamiques littorales (ex : Seymour 1996, Ruggiero et al. 1997, Inman et Jenkins 1997, Allen et Komar, 2000).

Plusieurs études ont montré que le changement de phase de PDO coïncide avec le réchauffement des TSO tropicales du Pacifique depuis le milieu des années 70, associé à une recrudescence des événements El Niño (ex : Trenberth, 1990 ; Graham et al., 1994 ; Trenberth et Hurrell, 1994 ; Schneider et Cornuelle, 2005).

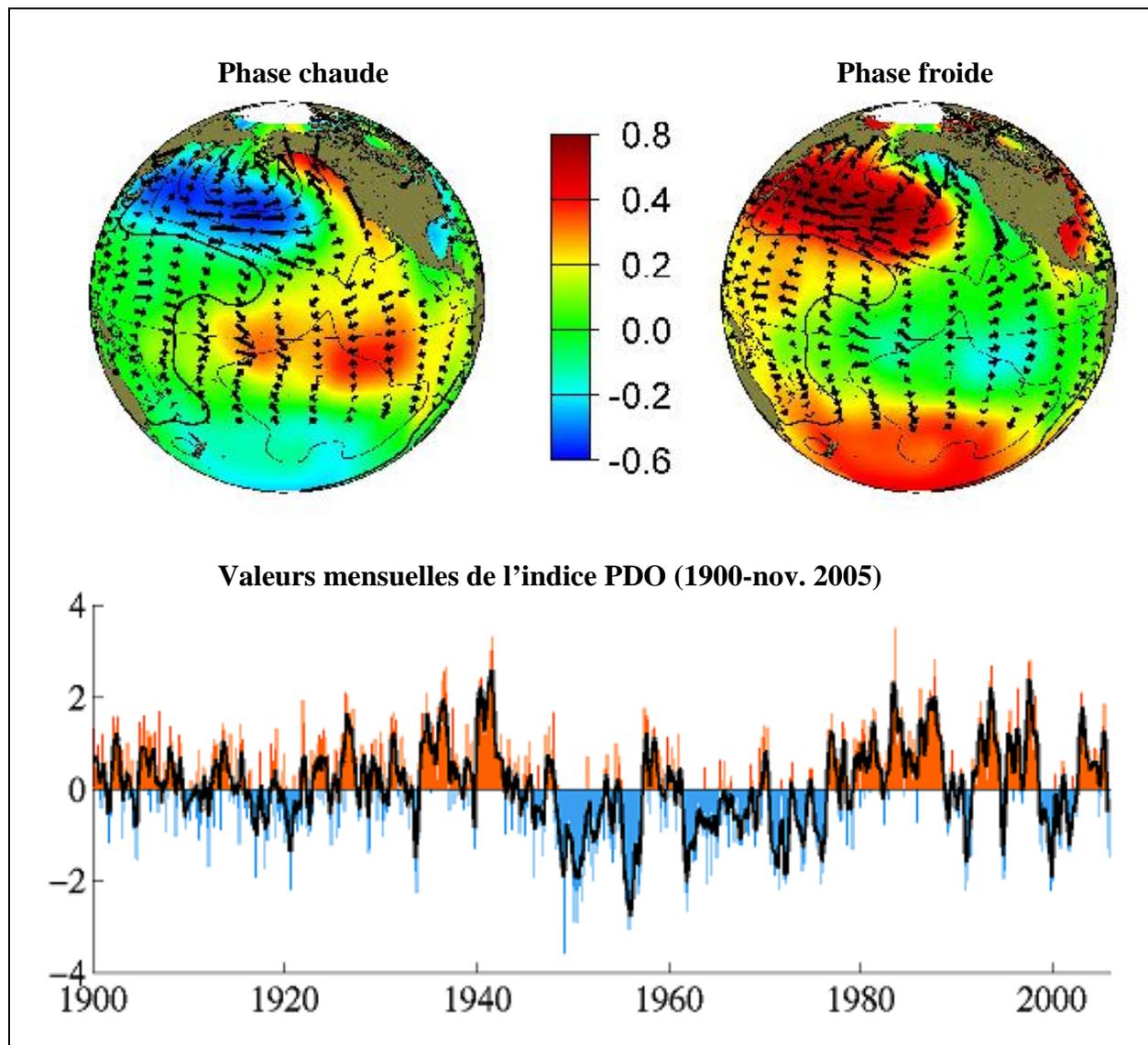


Figure A : Anomalies de la température de la surface océanique (couleurs), de la pression au niveau de la mer (contours) et de la tension du vent (flèches) associées aux phases hivernales typiques de PDO, chaude (en haut à gauche) et froide (en haut à droite). Valeurs mensuelles de l'indice PDO de janvier 1900 à novembre 2005 (en bas). (Mantua et al., 1997, <http://jisao.washington.edu/pdo/>)

En synchronisation avec ce changement de phase du mode PDO, la circulation atmosphérique hivernale du Pacifique Nord s'est profondément modifiée. La caractéristique majeure du changement atmosphérique est l'intensification et le décalage vers l'est de la dépression statistique des Aléoutiennes à partir de 1977 (ex : Trenberth, 1990 ; Trenberth et Hurrell, 1994 ; Miller et al., 1994, Graham et al., 1994), associée à un renforcement des vents

de sud et des transports de chaleur latente le long de la côte occidentale de l'Amérique du Nord. L'intensification et le décalage vers l'est de la dépression statistique des Aléoutiennes sont également associés à des dépressions extra-tropicales (d'ordre synoptique) qui tendent à avoir des trajectoires plus méridionales à partir du milieu des années 70 (ex : Trenberth et Hurrell, 1994). Ainsi, l'activité synoptique semble avoir subi également certaines modifications en lien avec le changement climatique du milieu des années 70. Cependant, peu de travaux documentent l'évolution des caractéristiques des systèmes atmosphériques transitoires (fréquence intensité, durée de vie...) comme les dépressions et plus particulièrement les anticyclones, dans le Pacifique Nord, au cours de ces 50 dernières années. A l'échelle de l'Hémisphère Nord, les études menées sur l'évolution observée de la fréquence et de l'intensité des cyclones extra-tropicaux (dépressions) restent encore insuffisantes et les résultats n'aboutissent pas tous aux mêmes conclusions selon l'IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2001). Cependant, il semblerait admis qu'au cours des dernières décennies, l'activité dépressionnaire s'est en moyenne intensifiée en Europe, sur une partie de l'Amérique du Nord et dans le Pacifique Nord (ex : Schinke, 1993 ; Gulev et al., 2001 ; Graham et Diaz, 2001).

La majeure partie des travaux sur la variabilité climatique hivernale dans le Pacifique Nord, repose principalement sur l'analyse de champs climatiques moyens saisonniers des paramètres atmosphériques tels que la pression, la température, le vent... Or, pour compléter les analyses antérieures et mieux comprendre la nature des changements climatiques qui ont affecté le Pacifique Nord et l'Ouest de l'Amérique du Nord, il est important de reconnaître que la variabilité climatique aux échelles moyennes (inter-annuelle, décennale ou multi-décennale), est intimement liée aux fluctuations transitoires, d'ordre synoptique, qui sont associées aux dépressions et aux anticyclones migrants des moyennes latitudes (Graham et Diaz, 2001). En effet, comme le rappellent Sinclair et Watterson (1999), le climat des moyennes latitudes est largement déterminé par le passage régulier des dépressions et des anticyclones migrants.

A l'échelle synoptique, la circulation au sein de la basse troposphère, qui se situe à « l'interface » entre la circulation d'altitude et les caractéristiques de surface, est organisée comme une succession de dépressions et d'anticyclones migrants qui se déplacent dans les moyennes latitudes, guidés par les ondes baroclines (ex : Wallace et al., 1988 ; Kindson et Sinclair 1995). Schématiquement, dans le Pacifique Nord, les dépressions se forment fréquemment à l'est du Japon puis adoptent des trajectoires zonales d'ouest en est avec une composante méridienne sud-nord et fusionnent au niveau de la dépression statistique des Aléoutiennes (ex : Pettersen, 1956 ; Klein, 1957 ; Wallace et al., 1988 ; Xiaoje et al., 2006). Les anticyclones transitoires (migrants) se forment à l'arrière des dépressions, adoptent également des trajectoires zonales d'ouest en est mais avec une composante méridienne nord-sud et fusionnent avec l'anticyclone sub-tropical (ex : Pettersen, 1956 ; Klein, 1957 ; Wallace et al., 1988). Ces perturbations transitoires influencent le processus d'échange de chaleur sensible entre l'océan et l'atmosphère, l'évaporation et le transport de chaleur latente (ex : Namias, 1973 ; Peixoto et Oort, 1992 ; Trenberth et Hurrell, 1994 ; Hurrell et Van Loon, 1997). Ainsi, les dépressions et les anticyclones transitoires contribuent aux échanges méridiens de chaleur: l'air chaud et humide des basses latitudes étant advecté par les dépressions en direction du Pôle et l'air froid et sec, des hautes latitudes en direction de l'Equateur par les anticyclones. Puisque les dépressions et les anticyclones jouent un rôle déterminant dans les advections en provenance du sud et en provenance du nord, ils sont donc associés régionalement à des conditions plus chaudes et plus humides et plus froides et plus sèches respectivement, au cours de la saison hivernale.

Ainsi, l'un des objectifs de ce travail est de déterminer dans quelle mesure les variations des caractéristiques des dépressions et des anticyclones des moyennes latitudes du Pacifique Nord influencent les températures et les précipitations hivernales sur l'Ouest de l'Amérique du Nord. Cette étude nous donne également l'opportunité de vérifier si des changements de l'activité des anticyclones transitoires se sont manifestés et s'ils coïncident ou non avec ceux observés pour les dépressions dans le Pacifique Nord.

L'intensification des cyclones extra-tropicaux du Pacifique Nord au cours de ces 50 dernières années, associée à des trajectoires plus méridionales à partir du milieu des années 70, est-elle un témoignage régional de l'influence globale des activités anthropiques, de l'augmentation du forçage radiatif induit par les GES, sur la circulation atmosphérique du Pacifique Nord? Selon l'IPCC (2001) les études à partir des simulations de modèles ne sont pas encore suffisantes pour pouvoir affirmer que l'augmentation des GES influence l'évolution de la circulation atmosphérique observée depuis ces 50 dernières années.

Afin de contribuer aux recherches en cours sur ce sujet, le second objectif de ce travail est d'estimer l'évolution possible de l'activité dépressionnaire et anticyclonique des moyennes latitudes du Pacifique Nord dans un contexte d'augmentation des GES. Cette étude nous permettra d'une part de vérifier si l'évolution observée au cours de ces 50 dernières années coïncide avec les simulations des modèles et d'autre part de d'identifier quels pourraient être les impacts d'un fort réchauffement global sur la circulation transitoire des moyennes latitudes du Pacifique Nord et sur les températures et les précipitations sur l'Ouest de l'Amérique du Nord.

L'articulation de ce travail s'organise en 8 chapitres regroupés en trois parties :

- la première partie est consacrée à la présentation de l'activité dépressionnaire / anticyclonique des moyennes latitudes du Pacifique Nord. Après avoir décrit les données que nous avons utilisées, nous présenterons l'algorithme de construction des trajectoires des dépressions et des anticyclones des moyennes latitudes du Pacifique Nord, que nous avons élaboré. Les bases de données, quantifiant les caractéristiques des dépressions et des anticyclones migrants, telles que la fréquence, l'intensité, la durée de vie, la vitesse de déplacement des systèmes transitoires, couvrent la période 1950-2001 (Chapitre 1). A partir de ces informations, nous présenterons la climatologie de l'activité transitoire des moyennes latitudes du Pacifique Nord (Chapitre 2).

- la deuxième partie présente la variation inter-annuelle de l'activité dépressionnaire / anticyclonique hivernale, et ses liens avec les températures / précipitations sur l'Ouest de l'Amérique du Nord. Dans cette partie, nous nous sommes concentrés sur les systèmes dépressionnaires et anticycloniques des moyennes latitudes du Pacifique Nord qui ont affecté le plus directement l'espace atmosphérique du Pacifique Nord-Est / Amérique du Nord-Ouest. Nous analyserons tout d'abord l'évolution de leurs caractéristiques sur la période 1950-2001 (Chapitre 3). Dans le chapitre 4, nous établirons les liens entre la variabilité de l'activité dépressionnaire / anticyclonique et, d'une part, les conditions climatiques moyennes de surface et en altitude dans le Pacifique, et d'autre part, les modes climatiques qui régissent le Pacifique Nord tels que PDO, ENSO (El Niño Southern Oscillation) et PNA (Pacific North America Pattern). Ce chapitre nous permettra notamment de mieux comprendre comment les anomalies des caractéristiques de l'activité transitoire hivernale (d'ordre synoptique) se traduisent en terme de structures des anomalies des paramètres moyens comme la pression, la température, le vent, l'altitude des géopotentiels, beaucoup mieux connues. Enfin, nous

estimerons l'influence de l'activité dépressionnaire et anticyclonique hivernale sur les températures et les précipitations in situ en Amérique du Nord-Ouest (Chapitre 5).

- la troisième partie a pour objectif d'étudier l'évolution possible de l'activité dépressionnaire et anticyclonique des moyennes latitudes du Pacifique Nord dans un contexte de réchauffement climatique global dû aux activités anthropiques, et d'estimer quels pourraient être les impacts sur les températures et les précipitations en Amérique du Nord-Ouest. Nous avons travaillé à partir de simulations de la troisième version du Modèle global Couplé du Centre National de Recherches Météorologiques (CNRM-CM3). A partir de la simulation historique, nous vérifierons tout d'abord la capacité du modèle CNRM-CM3 à reproduire la climatologie hivernale observée de l'activité dépressionnaire et anticyclonique des moyennes latitudes du Pacifique Nord (Chapitre 6). Ensuite, la procédure de vérification sera consacrée à la variabilité inter-annuelle des caractéristiques de fréquence et d'intensité des dépressions et des anticyclones dans le Pacifique Nord (Chapitre 7). Enfin, le dernier chapitre (8) présentera les modifications possibles que pourront subir les dépressions et les anticyclones des moyennes latitudes du Pacifique dans un contexte de forte augmentation des gaz à effet de serre et quels pourront être les conséquences de la modification de la circulation atmosphérique sur le climat de l'Amérique du Nord-Ouest.

**PARTIE I : Quantification et présentation
de la climatologie de l'activité transitoire
des moyennes latitudes du Pacifique Nord**

Les premières études systématiques des trajectoires et des caractéristiques des dépressions¹ et anticyclones² extra-tropicaux (fréquence, intensité, durée de vie...) sont attribuées à Pettersen (1956) et Klein (1957). A partir des cartes synoptiques de surface et à l'échelle de l'hémisphère Nord, le premier a étudié leurs fréquences (occurrences / maille / saison) et leur région de formation. Klein a poursuivi les analyses de Pettersen en déterminant, à partir des trajectoires, les zones moyennes de passage³ des dépressions et des anticyclones transitoires⁴, et c'est en 1958 qu'il compara ces résultats avec le vent moyen zonal à 700 hPa. A la même période, d'autres articles furent consacrés en particulier à la climatologie régionale des dépressions, comme par exemple Hurley (1954) pour la moitié Ouest des Etats-Unis et Hosler et Gamage (1956) pour l'ensemble des Etats-Unis. L'étude approfondie de la climatologie des cyclones extra-tropicaux fut relativement plus importante que celle des anticyclones extra-tropicaux dans les années 1960 et 1970. Pour les anticyclones, Taljaard (1967) a étudié la distribution saisonnière de la fréquence des anticyclones (et des cyclones extra-tropicaux) de l'Hémisphère Sud, Holzworth (1962) et Korshover (1967), ont examiné le nombre de jours de persistance d'anticyclones sur l'Ouest des Etats-Unis, pour le premier, et l'Est des Rocheuses pour le second. Pour les dépressions, Reitan (1974) s'est focalisé sur l'étude des changements dans la distribution des fréquences des cyclones extra-tropicaux en Amérique du Nord, par rapport aux résultats de Pettersen et Klein. Chung et al (1976) se sont intéressés aux fréquences des dépressions sur l'Est des Montagnes Rocheuses canadiennes et en Asie orientale (régions « sous le vent ») et Colucci (1976) a analysé la fréquence des systèmes dépressionnaires en hiver à l'est du Mississippi jusque sur l'Ouest de l'Atlantique, au cours de la période 1964-73. En 1978, Brennan et Smith ont complété les résultats antérieurs en examinant les cyclones et anticyclones extra-tropicaux sur l'Ouest des Etats-Unis et Zishka et Smith (1980) sur l'ensemble de l'Amérique du Nord et les océans environnants.

Jusque dans les années 1980, toutes les analyses reposent sur des établissements manuels de trajectoires, à partir des cartes synoptiques de surface, où la position (latitude / longitude) des centres de basses et hautes pressions est relevée, ainsi que d'autres informations comme les valeurs des pressions centrales... Ces traitements étaient longs et fastidieux, et induisaient également une subjectivité dans les choix des connexions inter-journalières (dans le but d'établir les trajectoires) des centres des systèmes dépressionnaire

¹ Dans la zone extra-tropicale Nord (au nord de 30°N) et au niveau de la mer, la dépression est un système atmosphérique de basse pression inférieure à 1013 hPa. Dans un champ de pression, les lignes isobares sont fermées autour d'un centre qui correspond au minimum local de pression. Autour de ce centre, les vents sont organisés en circulation cyclonique, c'est à dire tourbillonnaire (vortex) dans le sens inverse des aiguilles d'une montre (vortex dépressionnaire). En milieu extra-tropical la dépression peut-être nommée cyclone extra-tropical en référence au caractère dépressionnaire, à la circulation des vents qui lui sont associés et à sa genèse. Dans ce travail, nous utiliserons indifféremment les termes de dépressions et cyclones extra-tropicaux.

² L'anticyclone est un système atmosphérique caractérisé par un champ de pression élevée, supérieure à 1013 hPa en surface. Dans un anticyclone les isobares sont fermées autour d'un centre où la pression est la plus forte (maximum local de pression). Ils forment des « dômes » de pression (isobares circulaires) plus ou moins allongés. A l'intérieur d'un anticyclone, les vents circulent dans le sens anticyclonique, c'est à dire dans le sens des aiguilles d'une montre dans l'Hémisphère Nord.

³ Cf. figure 1 à propos de la différence entre les notions de fréquence et nombre de passages.

⁴ Dans la zone extra-tropicale, les dépressions et les anticyclones dynamiques se forment, s'intensifient et se déplacent (en général mais pas toujours) avec le courant général d'ouest, et déclinent puis disparaissent. A partir du moment où les dépressions et les anticyclones se déplacent significativement, ces systèmes atmosphériques sont dits migrants ou transitoires. Nous utiliserons indifféremment les termes de migrants et transitoires dans ce travail.

et/ou anticyclonique. Actuellement, grâce à la mise à disposition de bases de données homogènes dans l'espace et le temps, recouvrant le globe, à des pas de temps journaliers, (voire toutes les 6h), sur plusieurs décennies, et ceci pour de nombreux paramètres atmosphériques, il est possible d'appliquer un schéma automatique d'établissement des trajectoires des dépressions et des anticyclones transitoires ayant circulé dans les moyennes latitudes du Pacifique Nord (Chapitre 1) et d'en étudier la climatologie générale de leurs caractéristiques (Chapitre 2).

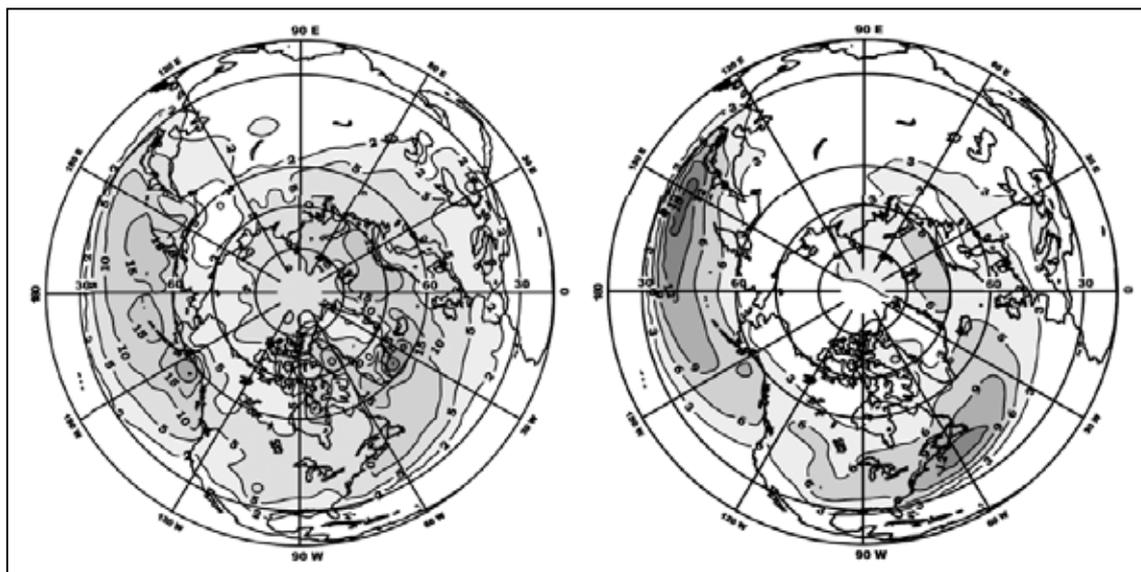


Figure B : Climatologie hivernale (JFM) de la fréquence (occurrence / hiver) des cyclones extra-tropicaux (à gauche) et du nombre de cyclones extra-tropicaux (nombre de passages / hiver, à droite) établie sur la période 1958-1999 à partir des données Réanalysées NCEP-NCAR de la pression au niveau de la mer (PNM) au pas de temps de 6h. Zolina et Gulev, 2002. Exemple : lorsqu'un cyclone extra-tropical ne s'est pas déplacé entre 0h et 18 h, 4 occurrences seront enregistrées, en revanche, seulement 1 passage sera comptabilisé. Ainsi, en considérant simultanément les figures de gauche et de droite, on peut avoir une approximation de la vitesse de déplacement des cyclones extra-tropicaux.

Chapitre 1 : Etablissement des trajectoires des dépressions et des anticyclones des moyennes latitudes du Pacifique Nord

A partir de bases de données de pression au niveau de la mer (et/ou à différentes altitudes de géopotential) à l'échelle synoptique, les zones de passage des systèmes transitoires peuvent être localisées et leurs caractéristiques étudiées en analysant les fluctuations temporelles en haute fréquence (ex : pas de temps journalier, ou 48 h...) de la pression (ex : Blackmon et al., 1984 ; Wallace et al., 1988 ; Lau, 1988 ; Trenberth, 1991 ; Ayrault et al., 1995 ; Branstator, 1995 ; Christoph et al., 1997 ; Rogers, 1997). L'analyse de la variance, qui augmente à chaque passage de creux et de crête dans le courant général d'ouest, aboutit à une indication sur la position moyenne (maximum de variance) des systèmes transitoires. A l'issue du traitement, cette méthode fournit des informations à l'échelle du point de grille qui permettent de cartographier et d'analyser les zones moyennes de fréquence de passages des systèmes transitoires. Cette méthode présente cinq limites :

- selon Ayrault (1995), Gulev (1997) et Gulev et al. (2001), l'analyse de l'activité synoptique à partir de la variance, à différents pas de temps (ex : 6h, 24h, 48h...) peut révéler différentes structures spatiales de la variabilité inter-annuelle ;
- selon Sinclair et Watterson (1999), elle ne permet pas de distinguer les dépressions des anticyclones si elle ne distingue pas les fluctuations positives et négatives ;
- selon Sinclair et Watterson (1999), cette méthode ne permet pas d'enregistrer correctement les systèmes transitoires en fonction de leur intensité (ex : une dépression très creuse qui se déplace très lentement ne correspondra pas nécessairement à une forte valeur de la variance) ;
- elle ne permet pas de déterminer les régions de formation et de déclin des systèmes atmosphériques ;
- elle ne permet pas l'étude des systèmes au cours de leur trajectoire, comme la variation de la pression, leur durée d'existence ou leur vitesse de déplacement (Gulev et al., 2001).

L'alternative est donc d'individualiser les trajectoires des systèmes atmosphériques en élaborant un algorithme. Il existe plusieurs procédures automatiques appliquées à la reconnaissance et connexion des centres dépressionnaires et/ou anticycloniques (ex : Lambert, 1988 ; Alpert et al., 1990 ; Le Treut et Kalnay, 1990 ; Murray et Simmonds, 1991 ; Jones et Simmonds, 1993 ; Koenig et al., 1993 ; Hodges, 1994 ; Sinclair, 1994, 1995, 1996, 1997 ; Sinclair et al. 1997 ; Serreze, 1995 ; Serreze et al., 1997 ; Blender et al., 1997 ; Sinclair et Watterson, 1999 ; Sinclair et Revell, 2000 ; Gulev, 2001 ; Geng et Sugi, 2001, 2003 ; Hoskins et Hodges, 2002 ; Hodges et al., 2003 ; Pezza et Ambrizzi, 2003). La plupart de ces algorithmes ne sont pas adaptés à l'établissement des trajectoires des anticyclones. En effet, les systèmes anticycloniques sont plus larges et sont moins cohérents dans l'espace que les dépressions. Ces dernières sont généralement identifiées comme étant les maxima locaux de

vorticité du vent. La position de ces maxima correspond généralement à celle des minima locaux de pression ; cependant pour les anticyclones les maxima (absolus) de vorticité n'apparaissent pas au niveau des noyaux de plus haute pression, là où les vents sont très faibles (Sinclair et Watterson, 1999). Selon Jones et Simmonds (1994), Sinclair (1996), Sinclair et Watterson (1999) il est plus approprié d'identifier les anticyclones comme les maxima locaux de pression.

Dans le but d'étudier à la fois les systèmes dépressionnaires et anticycloniques, nous avons élaboré notre propre procédure automatique qui identifie les centres de basse et haute pression, définis comme des minima et maxima locaux de pression, et qui suit leur progression dans l'espace. Notre méthode présentée dans Favre et Gershunov (2006), s'apparente à celles, par exemple, de Serreze (1995) appliquée à l'Arctique, de Serreze et al. (1997), Gulev et al. 2001, Geng et Sugi (2001, 2003), appliquée à l'Atlantique Nord et au Globe, de Jones et Simmonds (1994), Simmonds et Murray (1999), Sinclair (1996), Sinclair et Watterson (1999), Pezza et Ambrizzi (2003), pour l'Hémisphère Sud et à celle de Graham et Diaz (2001) appliquée aux cyclones extra-tropicaux du Pacifique Nord. A partir des champs de données Réanalysées des pressions au niveau de la mer NCEP/NCAR et pour l'espace du Pacifique Nord (section 1.1), nous établirons les trajectoires des dépressions et des anticyclones au niveau de la mer au cours de la période 1950-2001 (section 1.2) et synthétiserons leurs caractéristiques sous forme de séries temporelles (section 1.3).

1.1. Présentation des Réanalyses NCEP/NCAR et détermination de l'espace géographique considéré

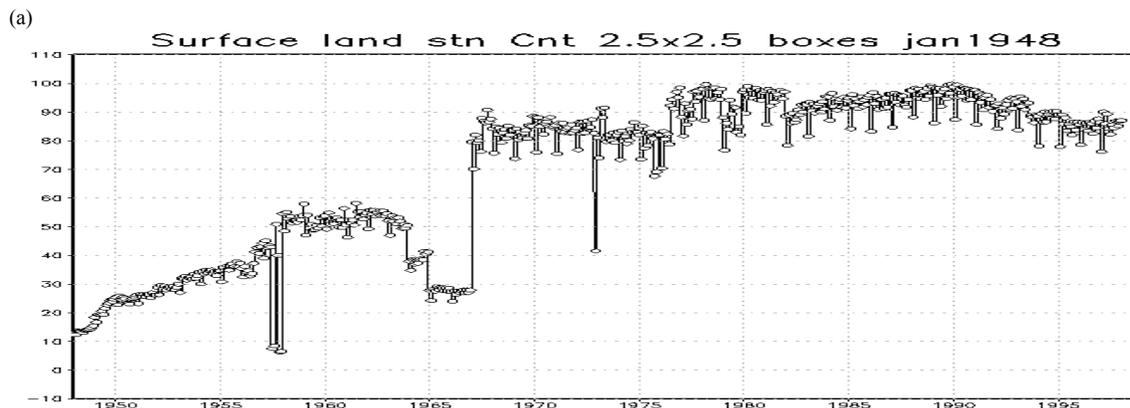
Actuellement, il existe deux grands types de bases de données homogènes et recouvrant la totalité du globe : celles issues des modèles climatiques globaux et celles issues des Réanalyses. Les Réanalyses sont des données issues des observations qui sont hétérogènes dans l'espace et dans le temps et également au point de vue de leur source. Les données issues des modèles ne correspondent pas aux observations synoptiques. Deux organismes majeurs produisent des données réanalysées: en Europe, les données réanalysées ECMWF (European Center for Medium-Range Weather Forecasts), et aux Etats-Unis, les données réanalysées NCEP/NCAR (National Center for Environmental Prediction/National Center for Atmospheric Research). Nous avons choisi les données réanalysées NCEP/NCAR pour d'une part, la grande facilité d'accès (gratuites via internet) et d'autre part, une profondeur temporelle plus longue (de 1948 à aujourd'hui), les données ERA 40 du ECMWF étant plus difficiles d'accès et ayant une profondeur temporelle moindre, de 1957 à 2002. Ce travail de thèse repose sur les données Réanalyses NCEP-NCAR et également sur les données du modèle couplé global du CNRM, utilisées dans la troisième partie.

Dans un premier temps, nous ferons une description générale des Réanalyses NCEP/NCAR, et du choix des données que nous allons utiliser (section 1.1.1). Puis en prenant connaissance de la circulation atmosphérique moyenne annuelle, saisonnière et journalière dans le Pacifique Nord, nous déterminerons l'espace géographique à l'intérieur duquel nous appliquerons le schéma automatique d'établissement des trajectoires des dépressions et anticyclones (section 1.1.2).

1.1.1. Les Réanalyses NCEP/NCAR : choix des données

Le projet NCEP/NCAR Reanalysis, regroupe deux organismes, le National Center of Environmental Prediction (NCEP) et le National Center for Atmospheric Research (NCAR) qui coopèrent afin de produire des réanalyses des champs atmosphériques à l'échelle de la planète de janvier 1948 à aujourd'hui (Kalnay et al., 1996; Kistler et al., 2001). Les réanalyses utilisent des données d'observation issues des stations météorologiques de surface, des navires, des bouées, des radiosondages, des radars, des avions, des satellites... Ces données subissent un contrôle de qualité, puis sont assimilées en utilisant un système d'assimilation fixe c'est à dire inchangé au cours de l'ensemble de la période, garantissant des données de bonne qualité et éliminant en principe les sauts et autres ruptures temporelles, pouvant être interprétés comme des changements climatiques. Enfin, la troisième étape est l'archivage des données réanalysées.

La collecte des données brutes d'observation, auprès des organismes nationaux et internationaux, est une étape importante réalisée majoritairement par le NCAR. Dans un premier temps, les données sont préparées pour la réanalyse. L'objectif est d'utiliser les données existantes issues des analyses opérationnelles originales du NCEP (à partir de 1962), puis d'ajouter des autres bases contenant des données antérieures à cette date, jusqu'en 1948. Les données des stations synoptiques de surface continentale (Figure 1.1.a) et de radiosondage (Figure 1.1.b) représentent les principales sources d'observation en surface continentale et en altitude. Les navires, bouées fixes ou dérivantes sur l'eau ou la glace (Figure 1.1.c), fournissent les observations de surface marine pour l'ensemble du globe et proviennent des fichiers COADS (Comprehensive Ocean-Atmosphere Data Set). D'autres observations à partir des avions, des satellites (Figure 1.1.d)... complètent les bases de données. La quantité d'observations varie dans l'espace et le temps. La figure 1.1 montre l'évolution temporelle moyenne de la densité des observations stations de surface continentale, radiosondages, navires et bouées, satellites, de janvier 1948 à janvier 1998, à l'échelle globale par boîte de $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$. A la fin des années 1960 et à la fin des années 1970, l'introduction massive de données de surface et satellitaires, respectivement, contribue à augmenter la fiabilité des Réanalyses tout en créant certaines discontinuités temporelles. Ces discontinuités temporelles sont plus ou moins fortes selon les régions et les paramètres étudiés (ex : Pocard, 2000 ; Pocard et al., 2000) et peuvent être problématiques lors de leur exploitation. En ce qui concerne la pression atmosphérique, il est communément admis que ce



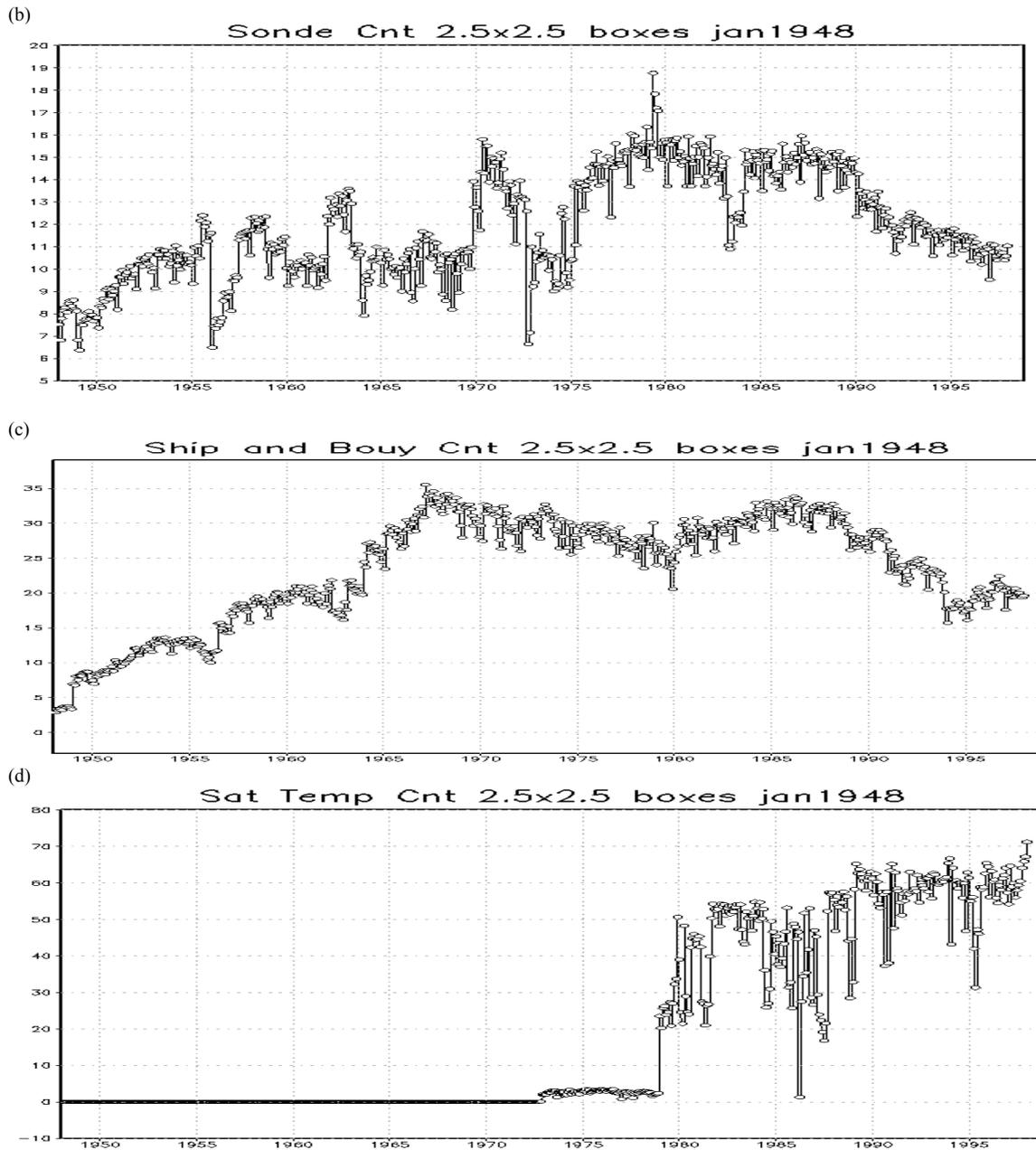


Figure 1.1. Nombre moyen mensuel des observations assimilées par les Réanalyses NCEP-NCAR par boîte de $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ (a) stations de surface continentale, (b) radiosondages, (c) navires et bouées et (d) satellites, de janvier 1948 à janvier 1998. Source : <http://nomad3.ncep.noaa.gov>

paramètre est le plus homogène. Selon Gulev et al. (2001) la fréquence des observations, depuis les années 1950, dans les moyennes latitudes du Pacifique Nord et de l'Atlantique Nord, assure des pressions au niveau de la mer (PNM) réanalysées de qualité suffisante pour ne pas affecter la climatologie des cyclones extra-tropicaux.

La première étape du module de pré-traitement des réanalyses est de reformater des données d'observation de diverses sources au format de représentation universel binaire (BUFR : Binary Universal Format Representation) de l'Organisation Météorologique Mondiale (OMM). Tous les types d'observation sont donc codés selon la table BUFR afin de faciliter leurs transferts, traitements... Puis, dans le but de détecter des problèmes dans les données (mauvaises dates ou coordonnées...) et de pouvoir les corriger, la deuxième étape

effectue un pré-traitement d'une ou plusieurs années, avant que le module de réanalyse s'exécute à une vitesse de traitement d'un mois par jour. Le système de contrôle automatique de qualité est basé, entre autres, sur des tests climatiques à trois dimensions pour chaque mois.

Comme nous l'avons déjà évoqué, les données utilisées dans le projet de réanalyses sont hétérogènes à la fois dans leur type, dans l'espace et le temps. Pour palier les discontinuités spatio-temporelles, les données sont interpolées en utilisant la méthode d'interpolation statistique spectrale (SSI : spectral Statistical Interpolation) du NCEP (Parrish et Derber, 1992 ; Derber et al., 1991). Le système d'assimilation des données utilise le modèle spectral global T62/28-niveaux (cf. NOAA/NMC Development Division, 1988 ; Kanamitsu, 1989 et Kanamitsu et al., 1991, pour les informations dynamiques et physiques relatives au modèle). La résolution T62 correspond à une grille de 192 longitudes par 94 latitudes, représentant approximativement une résolution horizontale de 210 km à l'Equateur, sur 28 niveaux de l'atmosphère. La structure verticale du modèle couvre l'atmosphère du niveau de pression 1000 hPa jusqu'au géopotential 10 hPa.

Les données issues de l'observation, après avoir été analysées, sont assimilées en utilisant un modèle atmosphérique de prévision à 6h. Les observations sont alors croisées avec les données issues du modèle (le terme de réanalyse signifie que les données sont donc analysées de nouveau et a posteriori). Ainsi, les valeurs aberrantes, celles qui sont trop éloignées de la production du modèle, en fonction de certains seuils prédéterminés, sont éliminées. Il en résulte ainsi un état de l'atmosphère cohérent et homogène, plus facilement exploitable (ex : Kalnay et al., 1996 ; Pocard, 2000).

Les réanalyses NCEP/NCAR se présentent sous forme de champs en point de grille de résolution horizontale (longitude*latitude) variable (ex : $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$, $1.9^{\circ} \times 1.9^{\circ}$) qui recouvrent l'ensemble du globe en surface mais également à différents niveaux de géopotentiels (ex : niveaux de pression standards en hPa, 1000, 925, 850, 700, 500, 400, 300, 250, 100, 150, 100, 70, 50, 30, 20, 10).

Plus la densité des observations est faible, dans l'espace et le temps, plus les données sont influencées par le modèle, et ceci en fonction des variables traitées. Ainsi les champs de données réanalysées sont regroupés en 4 classes, de A à D, rendant compte du niveau d'influence du modèle :

- la classe **A** regroupe les variables qui sont fortement influencées par les observations (ex : pression au niveau de la mer, altitude des géopotentiels...);
- la classe **B** indique que les variables sont à la fois influencées par les observations et le modèle (ex : température de l'air à 2 mètres (Ta2m), composante zonale et méridienne du vent à 10 mètres (u10m et v10m)...);
- la classe **C** signifie que les variables ne sont pas affectées de manière directe par les observations mais sont dérivées des champs du modèle. Ces champs sont forcés par l'assimilation des données et restent proches des principes de la physique de l'atmosphère (ex : précipitations, nuages...);
- la classe **D** comprend les champs qui sont fixés par des valeurs climatologiques et qui ne dépendent pas du modèle (ex : résistance des plantes, concentration de glace...).

Dans le cadre de notre travail, visant à étudier les caractéristiques de surface des systèmes transitoires, nous avons besoin de données de pression au niveau de la mer (PNM), paramètre atmosphérique le plus couramment employé pour étudier les phénomènes

atmosphériques de surface⁵, continues dans l'espace, à un pas de temps d'au moins 24 heures et couvrant plusieurs décennies. Pour les PNM, les Réanalyses NCEP/NCAR (de classe A donc très proches des observations) ont une résolution spatiale de 2.5°*2.5° et sont disponibles à des pas de temps de 6 h ou en moyenne journalière de janvier 1948 à aujourd'hui. Afin de ne pas à avoir à traiter de très grands jeux de données (indispensables pour une étude très précise de l'évolution dans l'espace et le temps des caractéristiques des dépressions et des anticyclones, mais pas nécessaire pour l'étude de leur variabilité inter-annuelle à partir de moyennes saisonnières), nous décidons, comme Gulev et al. (2001), Graham et Diaz (2001), Geng et Sugi (2001, 2003), Lambert et Fyfe (2006), d'opter pour les pressions moyennes journalières⁶. Comme nous l'avons mentionné dans l'introduction de ce chapitre, l'algorithme que nous avons développé pour établir les trajectoires des dépressions et des anticyclones, est fondé en premier lieu, sur la détection des minima et maxima locaux de pression. Ainsi, nous avons choisi de travailler à partir des pressions moyennes journalières qui ont l'avantage de réduire la variabilité spatio-temporelle de la pression (sorte de lissage) en comparaison à un pas de temps de 24h (cf. section 1.2.2). Enfin, la période que nous allons traiter débute au 1^{er} janvier 1950 et se termine le 31 décembre 2001, en raison de la couverture temporelle des données in situ de températures et précipitations sur l'Amérique du Nord-Ouest, qui nous ont été mises à disposition (cf. deuxième partie).

1.1.2. Détermination de l'espace géographique considéré

Après avoir déterminé la résolution spatio-temporelle des données, nous devons définir l'espace géographique à l'intérieur duquel nous allons appliquer le schéma automatique de construction des trajectoires des systèmes transitoires. Pour cela, nous devons tout d'abord prendre connaissance de la circulation atmosphérique, aux échelles moyennes et journalières, du Pacifique Nord ainsi que sur les continents environnants.

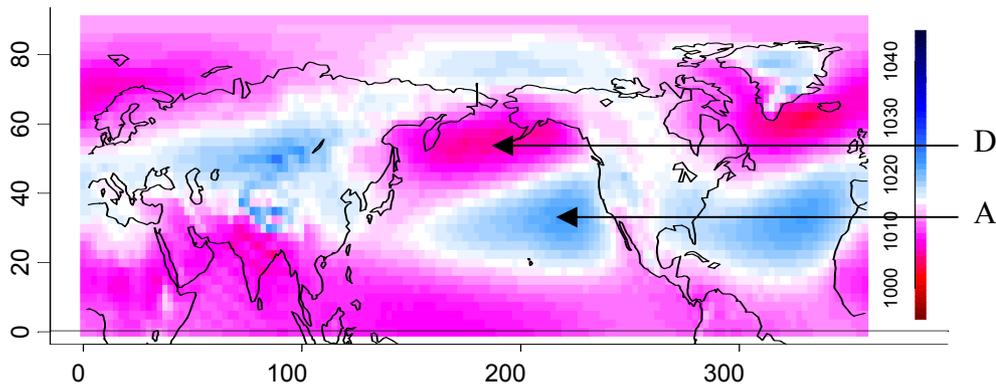
- Echelles moyennes

A l'échelle moyenne annuelle, la circulation atmosphérique de surface du Pacifique Nord est organisée par la dépression des Aléoutiennes, dont la zone d'influence s'étend de la Mer d'Okhotsk jusque dans le Golfe de l'Alaska et par l'anticyclone subtropical centré au large de la Californie, vers 35°N (Figure 1.2). Dans les moyennes latitudes du Pacifique Nord, la direction du vent moyen est généralement d'ouest en est avec une composante méridienne sud-nord davantage prononcée sur le secteur oriental et surtout dans le Golfe de l'Alaska. Le long de la côte ouest de l'Amérique du Nord et aux environs de 40°N, l'alizé tropical souffle en direction du sud puis s'incurve vers l'ouest (à la latitude de Hawaii approximativement), et se dirige vers le continent asiatique. L'intensité et l'aire d'extension de la dépression des Aléoutiennes et de l'anticyclone sub-tropical varient au cours de l'année.

⁵ Le paramètre de référence couramment utilisé pour décrire le plus simplement une dépression ou un anticyclone est la PNM (par exemple on qualifiera une dépression de très creuse ou intense si sa pression centrale est inférieure à 960 hPa au niveau de la mer).

⁶ Les données réanalysées NCEP-NCAR sont directement téléchargeables en moyenne journalière.

(a) Moyenne annuelle (PNM)



(b) Moyenne annuelle (Ta2m & vent10m)

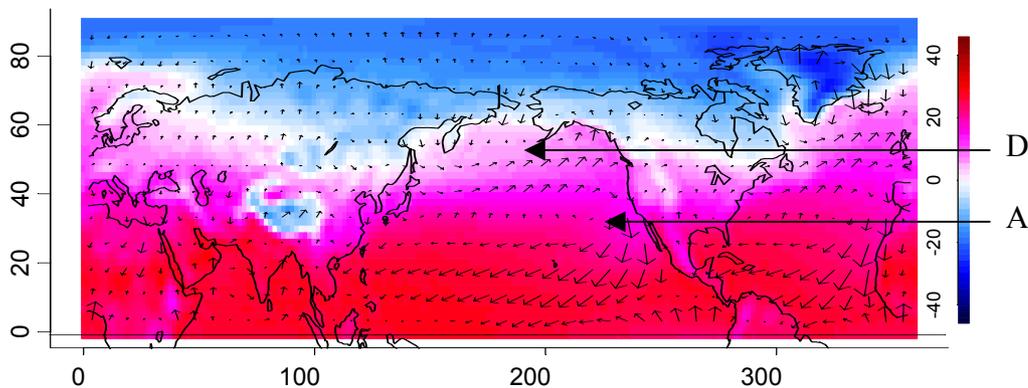


Figure 1.2. Moyenne annuelle (a) des pressions au niveau de la mer (PNM en hPa), (b) des températures de l'air à 2 mètres (Ta2m, en °C) et vent à 10m (v10m, en m/s), de 1950 à 2001. D= dépression des Aléoutiennes, A = anticyclone sub-tropical.

En hiver (Figure 1.3), le déficit thermique dans les hautes latitudes, favorise l'intensité des échanges méridiens de chaleur (l'air froid se déplaçant en direction de l'Equateur et l'air chaud en direction du Pôle) dans les moyennes latitudes. L'enneigement du sol (via l'albedo) contribue au développement et à l'accentuation des sources d'air froid sur les continents comme en Amérique du Nord ou en Eurasie. En Sibérie, région la plus froide de l'Hémisphère Nord en hiver, les températures très faibles favorisent la formation du vaste et puissant anticyclone de Sibérie (pressions supérieures à 1030 hPa), centré en moyenne sur le Lac Baïkal. Cette zone de haute pression influence directement le climat de l'Asie orientale avec une dominance des vents de nord, froids et secs, qui soufflent jusque dans les régions sub-tropicales, c'est la « mousson hivernale ». L'Anticyclone thermique de Sibérie est un centre d'action semi-permanent et quasi-stationnaire. Il se forme au cours du mois d'octobre et se dissipe en avril. Au cours de cette période, il influence également le climat du Pacifique Nord via la circulation troposphérique (ex : Clark et Serreze 2000, Saito et al. 2001, Jhun et Lee 2004, Panagiotopoulos 2005). En revanche, sur le centre et l'est de la zone extra-tropicale du Pacifique Nord, région océanique donc moins froide en hiver, la dépression des Aléoutiennes (environ 1000 hPa) s'intensifie et influence l'ensemble du Pacifique Nord, ainsi que l'Ouest de l'Amérique du Nord (Walker et Bliss 1937, Trenberth et Hurrell 1994, Bogard et al. 2002).

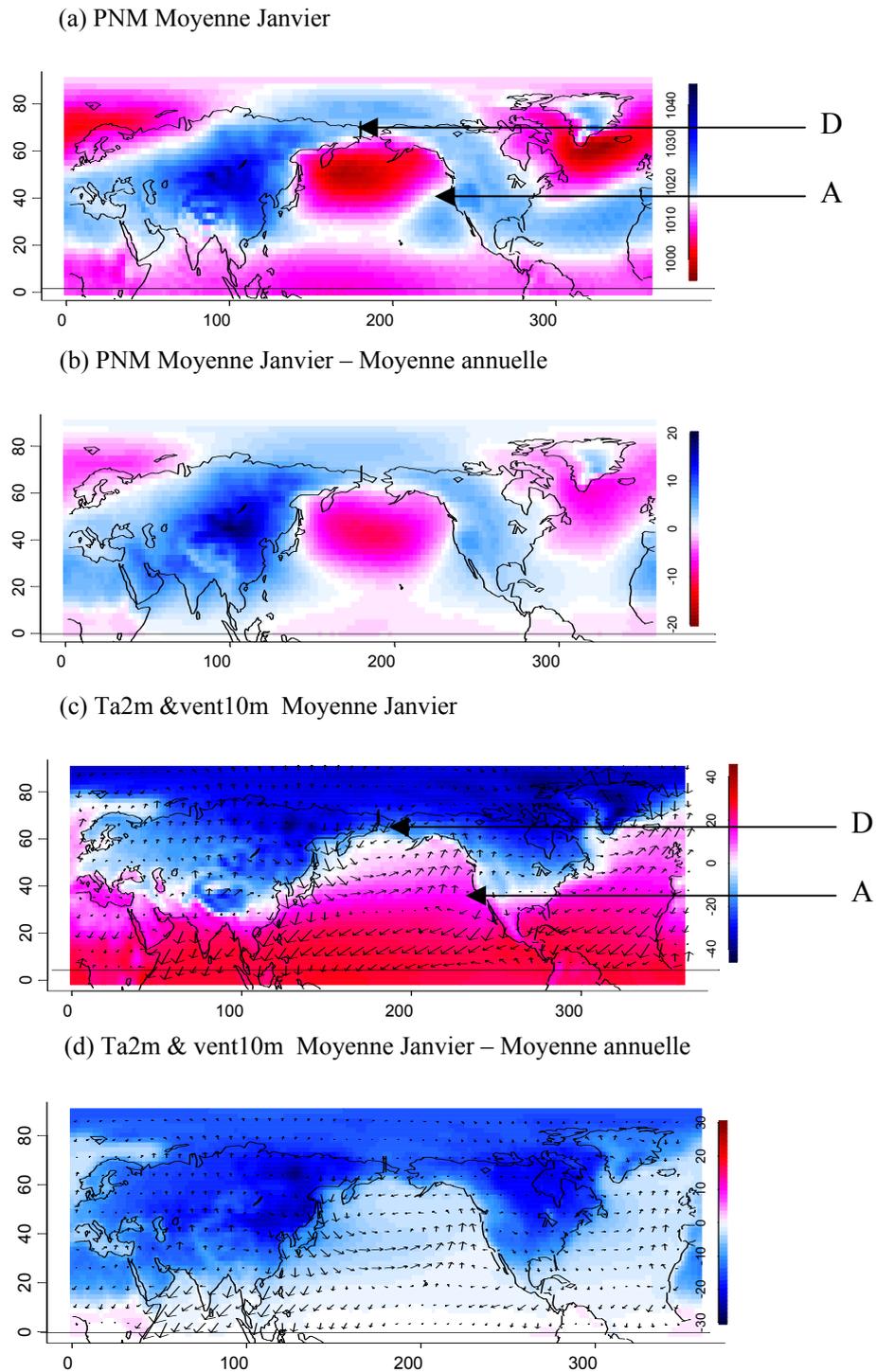


Figure 1.3. (a) moyenne des PNM de janvier, (b) différence entre les PNM moyennes de janvier et les PNM moyennes annuelles, (c) moyenne des Ta2m et vent10m en janvier, (d) différence entre les Ta2m et vent10m moyens de janvier et les Ta2m et vent10m moyens annuels, de 1950 à 2001.

En raison de la position plus méridionale qu'en moyenne annuelle de la zone de convergence inter-tropicale (ZCIT), l'anticyclone sub-tropical (associé à la branche subsidente de Hadley), au large de la Californie, est décalé vers le sud (vers 30°N) et son aire d'influence est plus restreinte.

Cette configuration atmosphérique moyenne hivernale est associée, dans la partie extra-tropicale du Pacifique Nord, à un renforcement de circulation des vents dans le sens

cyclonique qui se manifeste sur l'ensemble de la zone extra-tropicale. Entre 30°N et 40°N, les vents d'ouest sont plus forts et leur composante sud est accentuée sur l'Est du secteur, jusque dans le Golfe de l'Alaska. Ainsi, le long de la côte ouest nord-américaine et au nord de 40°N, les vents sont majoritairement de composante sud, limitant significativement le refroidissement hivernal des températures. Inversement, au niveau de la Mer de Béring et le long de la côte asiatique, les vents dominants sont de secteur nord et accompagnent des températures plus froides. Ces vents de nord soufflant sur le Japon et le long du littoral chinois jusqu'aux Philippines, sont en rapport avec l'anticyclone de Sibérie et forment la « mousson hivernale » (ne correspondant pas à un flux trans-équatorial dans ce cas). Sur le Pacifique Nord-Est, et au sud de 40°N, l'anticyclone subtropical étant moins fort et moins étendu, qu'en moyenne annuelle, il est associé à une circulation alizéenne affaiblie au large de la côte californienne et mexicaine. Au sud de 20°N, les alizés, de composante nord-est, se propagent en direction de la ZCIT. Notons qu'en hiver, la circulation alizéenne est réduite dans la région de Hawaï jusqu'au large de la Californie et par contre est intensifiée dans le secteur des Philippines (ainsi que sur l'Océan Indien).

Durant l'été (Figure 1.4), le gradient thermique nord / sud (Pôle Nord / Equateur) est plus faible et le gradient ouest / est (continent asiatique / Océan Pacifique) est inversé ou équilibré. Par conséquent, les échanges méridiens de chaleur sont réduits dans les moyennes latitudes. La dépression des Aléoutiennes n'est plus apparente. En revanche, l'anticyclone subtropical occupe la quasi-totalité du Pacifique Nord. La position davantage septentrionale de la ZCIT décale vers le nord l'anticyclone sub-tropical (associé à la branche subsidente de Hadley), qui est alors centré au large des Etats-Unis et est beaucoup plus étendu qu'en hiver, depuis le Sud du Golfe de l'Alaska jusqu'à Hawaï. Sur le continent asiatique, les basses pressions dominent et concernent également la bordure occidentale du Pacifique Nord.

Ainsi la circulation moyenne s'organise dans le sens anticyclonique sur la quasi-totalité du Pacifique Nord. Les vents de nord s'écoulent le long de la côte ouest des Etats-Unis et le long de la Basse Californie (Mexique), limitant le réchauffement estival des températures. Dans la région de Hawaï, les alizés adoptent une trajectoire zonale en direction de l'ouest. Sur la partie occidentale du Pacifique Nord, les vents s'incurvent vers le nord et prennent une composante sud-ouest jusqu'en Alaska.

En été, la zone de convergence inter-tropicale a une position plus septentrionale permettant la pénétration des flux trans-équatoriaux sur les régions tropicales de l'Asie et de l'Amérique du Nord (ex : Ho et Wang 2002, Hales 1974, Meehl 1987, Wang 1994).

Cette description de la circulation moyenne de surface montre comment l'intensité et l'extension des centres d'actions atmosphériques varient selon les saisons et influencent le climat du Pacifique Nord. Lors de la saison hivernale, lorsque les gradients thermiques nord / sud et ouest / est sont plus forts, la dépression des Aléoutiennes est intensifiée et les hautes pressions sub-tropicales sont plus faibles et décalées vers le sud-est. Ainsi, le caractère dépressionnaire domine dans les moyennes latitudes du Pacifique Nord. A l'ouest, le déficit thermique hivernal accompagné de fortes pressions sur le continent asiatique tend à influencer la frange occidentale du Pacifique Nord. Inversement, en été, le caractère anticyclonique domine dans le Pacifique Nord alors que sur le continent asiatique et la bordure occidentale du Pacifique Nord, le caractère dépressionnaire est largement dominant.

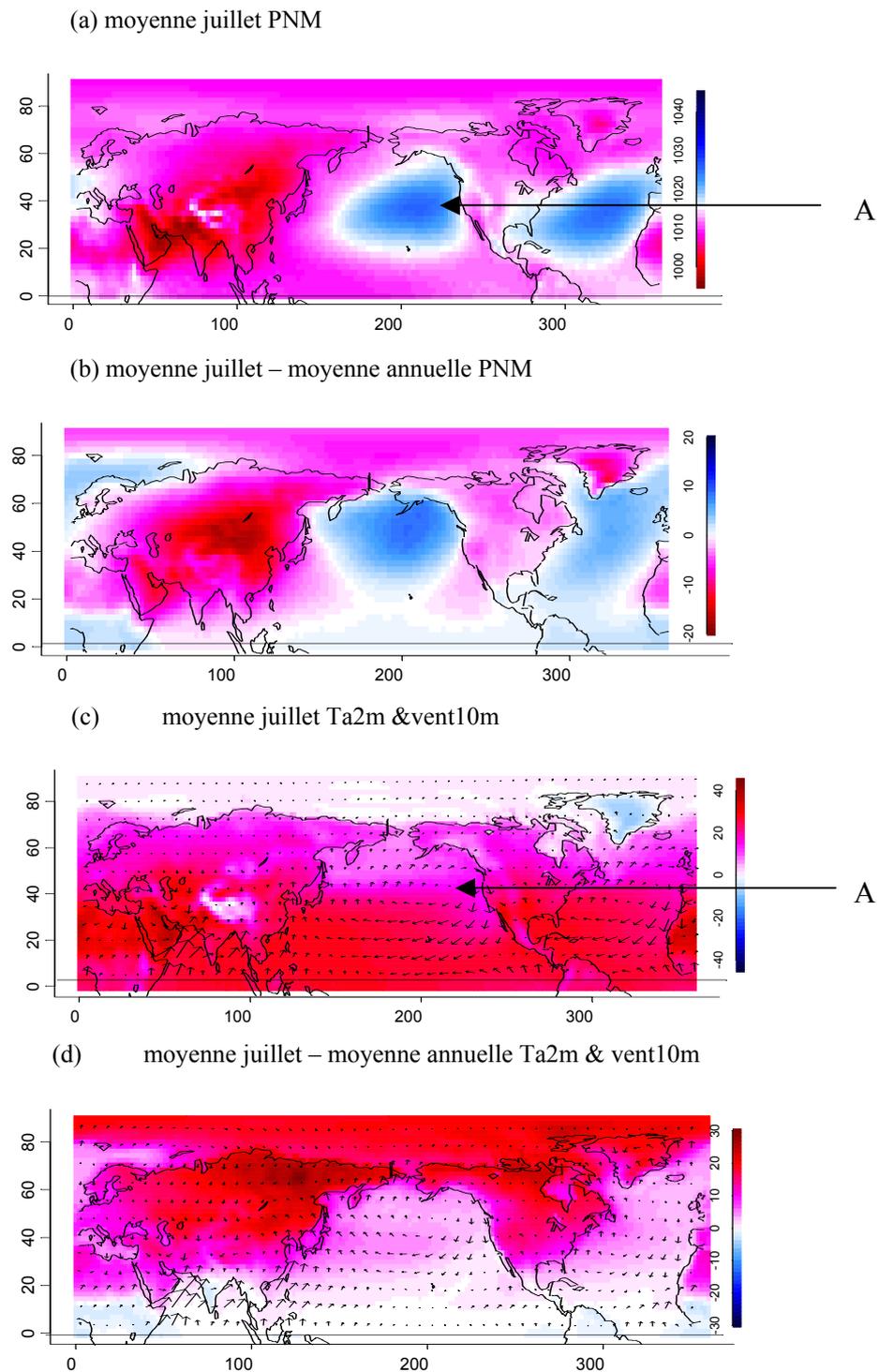


Figure 1.4. (a) moyenne des PNM de juillet, (b) différence entre les PNM moyennes de juillet et les PNM moyennes annuelles, (c) moyenne des Ta2m et vent10m en juillet, (d) différence entre les Ta2m et vent10m moyens de juillet et les Ta2m et vent10m moyens annuels, de 1950 à 2001.

- A l'échelle journalière

Au pas de temps journalier, la circulation atmosphérique de surface dans les moyennes et hautes latitudes est rythmée par la succession de dépressions et anticyclones extra-tropicaux

qui se déplacent d'ouest en est (ex : Pettersen, 1956 ; Klein, 1958) guidés par les ondes baroclines (Wallace et al., 1988). De manière générale, les dépressions circulent vers l'est avec une composante sud et les anticyclones avec une composante nord (ex : Pettersen, 1956 ; Klein, 1958 ; Wallace et al., 1988 ; cf. figure 1.5).

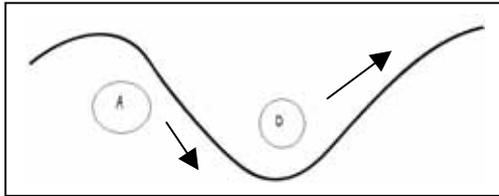


Figure 1.5. Déplacement schématique des dépressions (D) et des anticyclones (A) transitoires dans l'Hémisphère Nord.

Les conditions de surface d'une région sont en étroite relation avec la circulation atmosphérique en altitude. Dans la zone extra-tropicale et à l'échelle synoptique, le gradient thermique nord / sud induit une circulation en altitude qui se réalise sous forme d'ondes transitoires (courtes), qui se propagent généralement d'ouest en est et d'ondes stationnaires (longues) dont la configuration peut durer de quelques jours à quelques semaines.

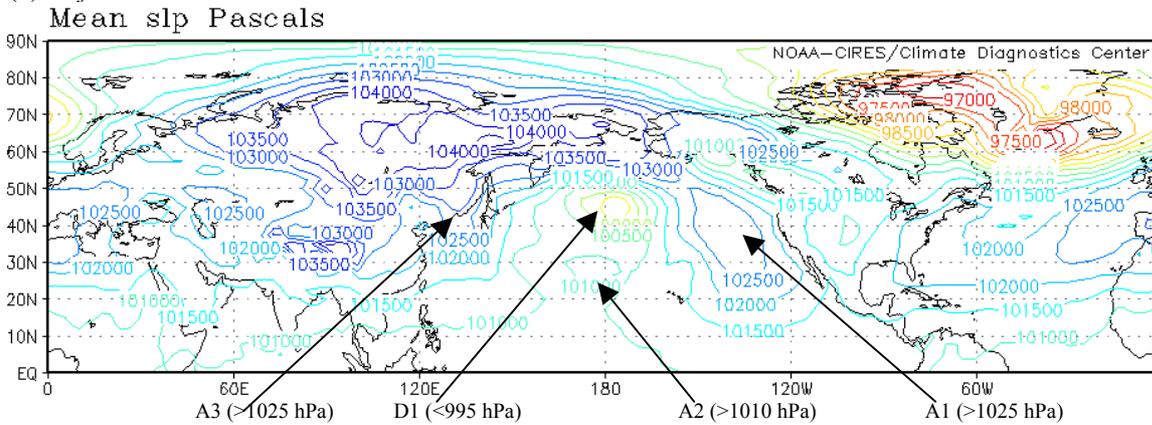
C'est dans les moyennes latitudes et particulièrement en hiver, que le gradient thermique nord / sud est le plus fort. La zone de gradient maximal est matérialisée, schématiquement, par le « front polaire » qui sépare, l'air froid au nord, qui se déplace en direction de l'Equateur, dévié généralement vers l'ouest (Coriolis), et l'air chaud, au sud se déplaçant en direction du Pôle et dévié généralement vers l'est (Coriolis). Le « front polaire » oscille et forme une succession de dorsales et de talwegs. En surface, les centres anticycloniques se situent à l'ouest des talwegs d'altitude et les centres dépressionnaires à l'ouest des dorsales d'altitude. Ces ondes transitoires (visibles sur les cartes de 850 hPa ou 700 hPa), se déplacent rapidement et sont surimposées à des ondes plus vastes (visibles vers 300 hPa ou 200 hPa) nommées ondes stationnaires ou planétaires. Les variations de la sinuosité de ces ondes planétaires font varier l'écoulement général de l'air : une faible sinuosité correspond à une circulation zonale accentuée, en revanche, une forte sinuosité génère une circulation méridienne accrue avec un fort développement de talwegs froids (associé à un écoulement de l'air du nord vers le sud) et de dorsales chaudes (induisant un écoulement de l'air du sud vers le nord). Ces ondulations répondent au gradient de température dans la troposphère mais surtout à celui des basses couches. Pour simplifier, en hiver, au-dessus des vastes zones froides continentales (ex : Amérique du Nord) est associée, en moyenne, un talweg et au-dessus des océans plus chauds, une dorsale. En revanche, en été, l'écoulement général de l'atmosphère est davantage zonal, les « méandres » étant moins prononcés mais plus nombreux.

C'est au voisinage du « front polaire », là où le gradient thermique est le plus fort, que les vents d'ouest sont les plus intenses. La circulation de ces vents est quasi-géostrophique et l'écoulement de l'air s'effectue à des vitesses beaucoup plus rapides qu'en surface pouvant atteindre 100 m/s au niveau du courant jet polaire qui circule à une altitude d'environ 10000 mètres. La zone où le gradient thermique est le plus fort forme un axe d'instabilité barocline le long duquel se forment et se propagent les dépressions (storm-track). Il est d'ailleurs plus juste de parler de zone barocline que de « front polaire » car il s'avère que ce dernier n'est pas continu dans l'espace et dans le temps, c'est-à-dire que l'on observe plutôt des discontinuités thermiques limitées dans l'espace et le temps (Joly 1995).

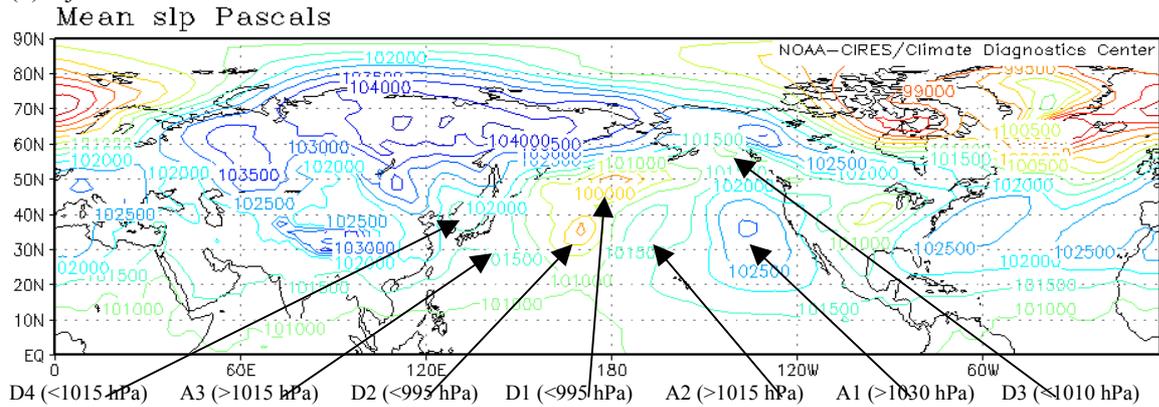
Dans les latitudes sub-tropicales, le jet sub-tropical (appelé East Asian Jet Stream sur l'Ouest du Pacifique Nord) circule en moyenne vers 30°N et oscille très peu (relativement

linéaire et par conséquent visible sur les cartes moyennes d'altitude). Il se situe au niveau de la discontinuité thermique entre l'air équatorial-tropical et l'air plus froid des moyennes latitudes. Au niveau du courant jet sub-tropical se forment et se propagent des systèmes dépressionnaires, comme par exemple à l'est du Japon ou encore sur le centre du Pacifique Nord (en hiver), certains cyclones extra-tropicaux se forment au nord de Hawaii et se propagent vers l'est avec une composante sud plus ou moins forte. Lorsque la trajectoire de ces dépressions est quasi zonale, elles atteignent les côtes californiennes rapidement et génèrent des précipitations torrentielles.

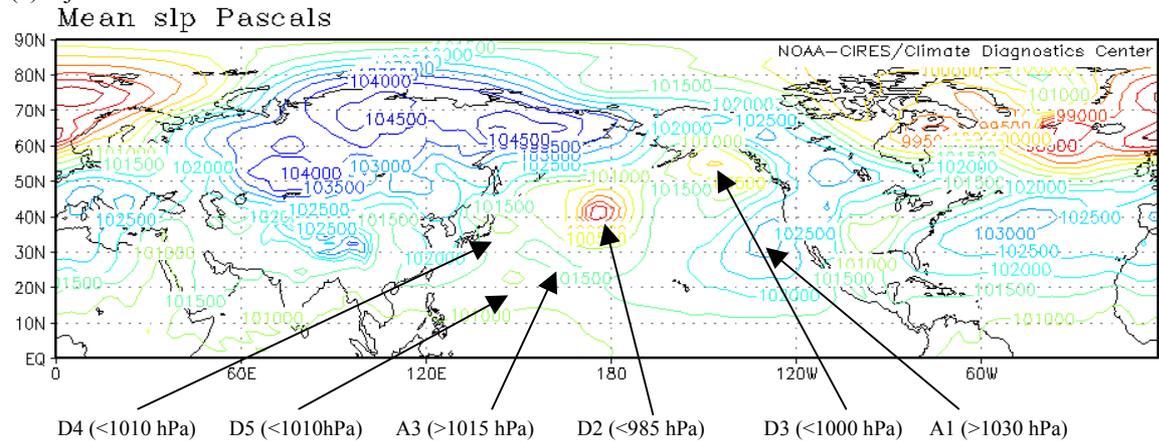
(a) 1^{er} janvier 2000



(b) 2 janvier 2000

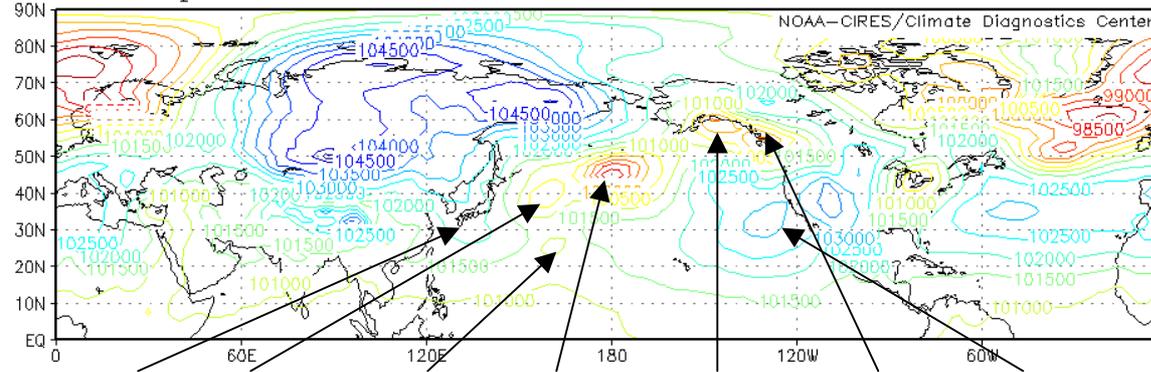


(c) 3 janvier 2000



(d) 4 janvier 2000

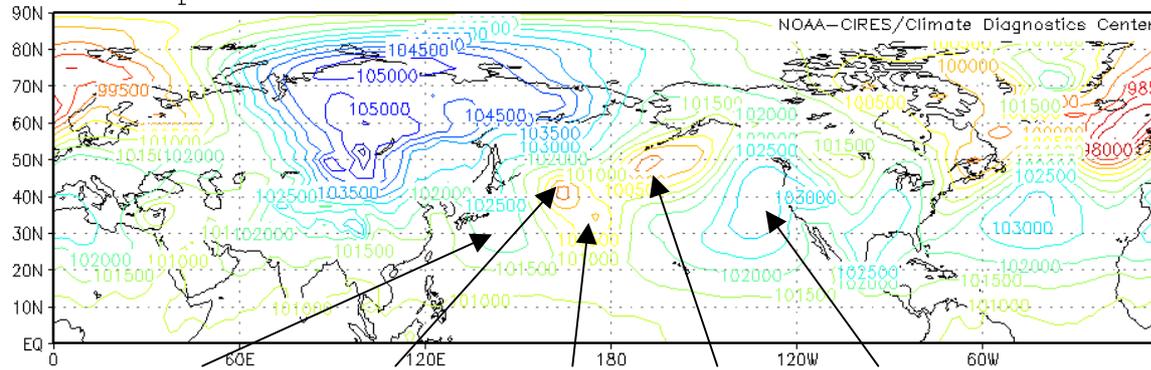
Mean slp Pascals



A4 (> 1020 hPa) D4 (<1005 hPa) D5 (<1010 hPa) D2 (<985 hPa) D3' (<995 hPa) D3'' (<995hPa) A1 (>1030 hPa)

(e) 5 janvier 2000

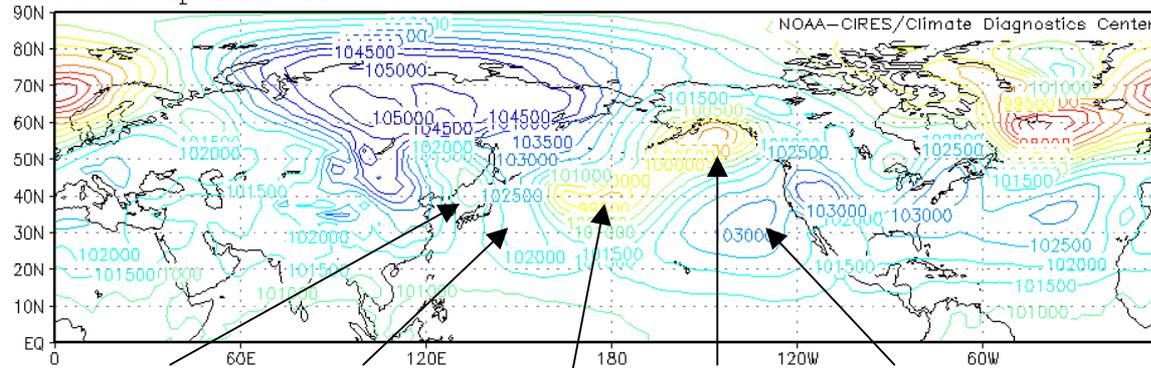
Mean slp Pascals



A4 (>1020 hPa) D4 (<995 hPa) D5 (<1000 hPa) D2 (<995 hPa) A1 (>1030 hPa)

(f) 6 janvier 2000

Mean slp Pascals



D6 (<1010 hPa) A4 (>1020 hPa) D4.5 (<990 hPa) D2 (<985 hPa) A1 (>1030 hPa)

Figure 1.6. De (a) à (f), pression moyenne journalière au niveau de la mer du 1^{er} au 6 janvier 2000.

Source : <http://www.cdc.noaa.gov>

Toujours dans le but de déterminer les limites spatiales de l'espace géographique à l'intérieur duquel nous allons construire les trajectoires des dépressions et des anticyclones, nous allons analyser le déplacement des systèmes atmosphériques extra-tropicaux dans le

cadre de 2 épisodes synoptiques⁷. La première séquence, de type hivernal, se déroule du 1^{er} au 6 janvier 2000 et la seconde, de type estival, se déroule du 1^{er} au 6 juillet 2000. Plus haut, nous avons observé qu'à l'échelle moyenne, l'anticyclone (thermique) semi-permanent de Sibérie tend à influencer la côte Pacifique de l'Asie en hiver. Sur la partie orientale, la dépression des Aléoutiennes, et plus au sud, l'anticyclone sub-tropical voient leur extension limitée à l'est par la Cordillère nord-américaine. En étudiant les situations atmosphériques à l'échelle journalière, nous allons observer d'une part comment la circulation des systèmes transitoires s'organise sur le Pacifique Nord et d'autre part, dans quelle mesure l'agencement des continents et des reliefs environnants influence leurs caractéristiques et/ou déplacement.

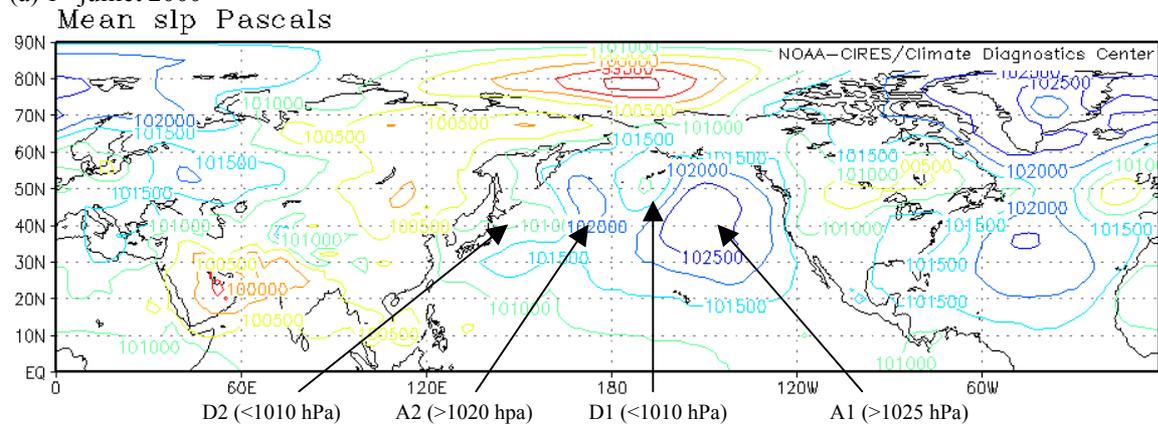
L'épisode se déroulant du 1^{er} au 6 janvier 2000 est un exemple de transit de dépressions et anticyclones sur le Pacifique Nord en hiver (Figure 1.6). Le 1^{er} janvier, une dépression (D1<995 hPa) est centrée au sud des Aléoutiennes. A l'est, un vaste anticyclone (A1>1025 hPa) s'étire le long de la côte nord-américaine. Sur le continent asiatique, les hautes pressions occupent l'ensemble de l'espace et tendent à déborder sur l'océan, en particulier sur la Mer du Japon en formant une crête anticyclonique (A3>1025 hPa). Dans les basses latitudes (30°N), un noyau anticyclonique de faible intensité (A2>1010 hPa) est localisé vers 180°. Le lendemain cet anticyclone s'est décalé vers le nord-est et sa pression a augmenté légèrement (+5 hPa approximativement). Il se rapproche de l'anticyclone A1 qui lui glisse en direction du sud, formant une masse plus organisée avec une pression centrale excédant 1030 hPa. La dépression D1 (995 hPa) se dirige lentement vers le Nord et atteint les Aléoutiennes. Un sur-creusement s'est développé au niveau de son couloir formant ainsi un nouveau centre dépressionnaire (D2<995 hPa). Sur l'Ouest du secteur étudié la poussée anticyclonique sur le Japon se poursuit en direction du sud-est mais perd de son intensité (A3>1015 hPa). A l'arrière, sur la Mer du Japon, une nouvelle dépression se forme (D4<1015 hPa). Le 3 janvier, la dépression D4 se développe (<1010 hPa) et atteint désormais le Japon. Un sur-creusement apparaît dans son couloir dépressionnaire (D5<1010 hPa). L'anticyclone A3 (>1015 hPa) est désormais un système fermé et continue sa progression vers le sud-est. Sur le centre du Pacifique Nord, la dépression D1 s'est comblée dans le même temps que D2 s'est creusée (pression centrale est inférieure à 985 hPa) et s'est déplacée en direction du nord. Dans le Golfe de l'Alaska la dépression D3, ayant entamé sa formation la veille, se développe et sa pression centrale est inférieure à 1000 hPa. Dans le même temps, l'anticyclone A1 (>1030 hPa) continue sa translation vers le sud et son centre atteint désormais les côtes californiennes et va stagner durant les 3 prochains jours. Le 4 janvier, la zone de basses pressions D3, dans le Golfe de l'Alaska, est formée de 2 centres dépressionnaires (D3'<995 hPa et D3''<995 hPa) qui vont fusionner le lendemain et franchir les Rocheuses puis circuler sur le Sud du Canada (le 6 janvier). La dépression D1.2 (<985 hPa), localisée sur les Aléoutiennes, continue sa progression vers le nord-est et atteint le Golfe de l'Alaska le 6 janvier. Elle est suivie par les dépressions D4 et D5, qui fusionnent au centre

La seconde séquence, de type estival, se déroule du 1^{er} au 6 juillet 2000 (Figure 1.7). Le 1^{er} juillet, un vaste anticyclone (A1>1025 hPa) s'étale sur le Pacifique Nord-Est et va persister tout au long de l'épisode présenté. Une dépression de faible intensité (D1<1010 hPa), est centrée sur l'est des Aléoutiennes. Elle est bordée au sud-ouest, par un anticyclone(A2) dont la pression est supérieure à 1020 hPa. A l'est d'Hokkaido, la dépression D2 (<1010 hPa) est en phase de formation. Elle progresse vers l'est et le lendemain sa structure est fermée. Dans le même temps, au nord, l'anticyclone A2 (>1020 hPa) stagne et

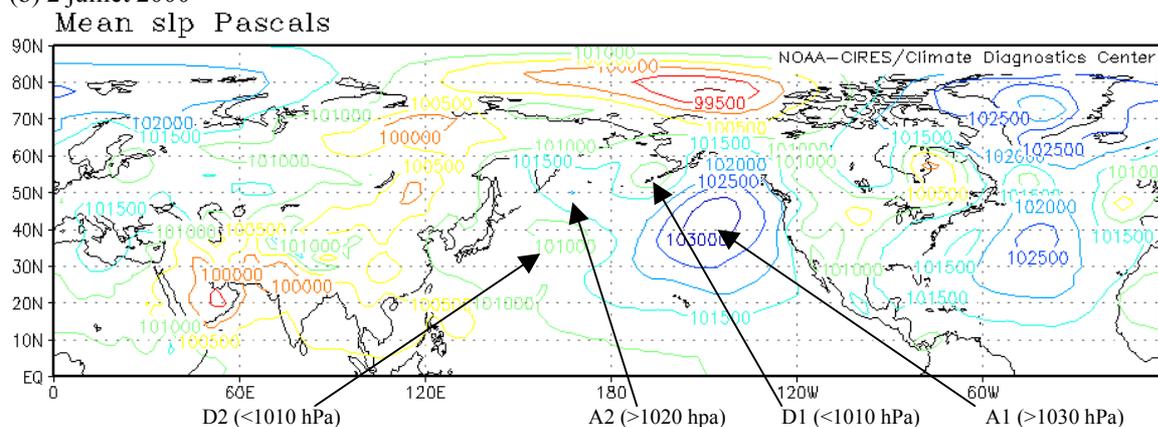
⁷ Nous avons examiné un nombre plus important de situations synoptiques. Ces deux épisodes sont présentés pour illustrer nos propos.

est progressivement déstructuré. Entre le 2 et le 3 juillet, la dépression D1 (<1010 hPa), qui se décale lentement sur la Péninsule de l'Alaska, est en phase de comblement (le 4 juillet elle a totalement disparu). Le 4 juillet, la dépression D2 est bien développée (<1000 hPa) et se déplace en direction des Aléoutiennes. Un nouvel anticyclone (A3 >1020 hPa) s'est organisé au sud du Kamchatka et entame une translation vers le sud-est. Il s'étale progressivement et sa pression centrale augmente les jours suivants (>1025 hPa le 6 juillet). Entre le 5 et le 6 juillet, la dépression se comble sur la Péninsule de l'Alaska.

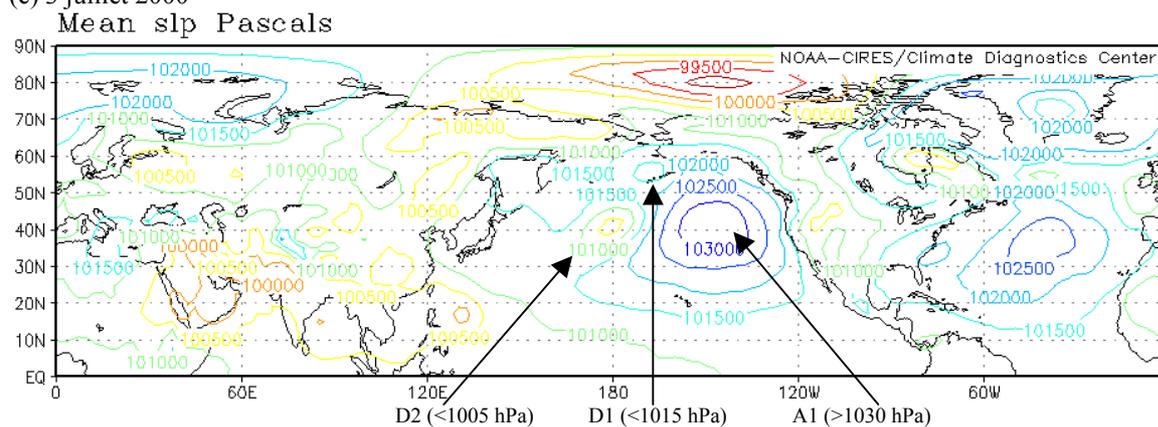
(a) 1^{er} juillet 2000



(b) 2 juillet 2000

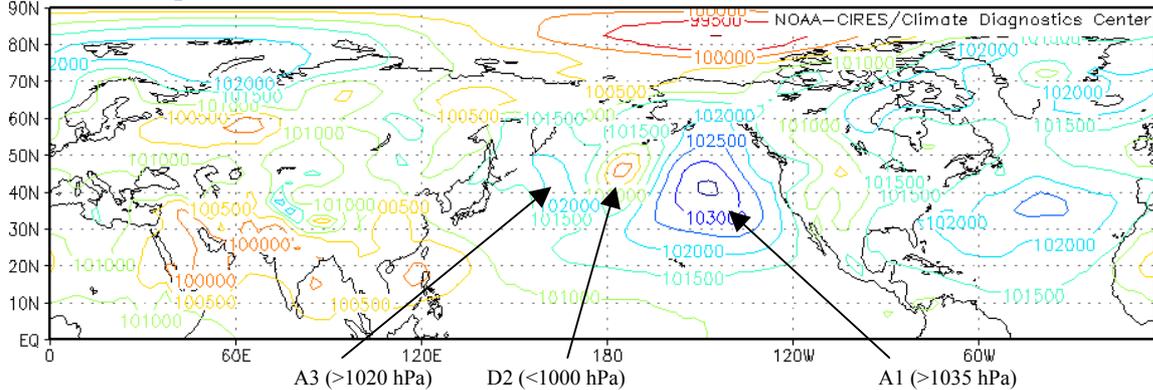


(c) 3 juillet 2000



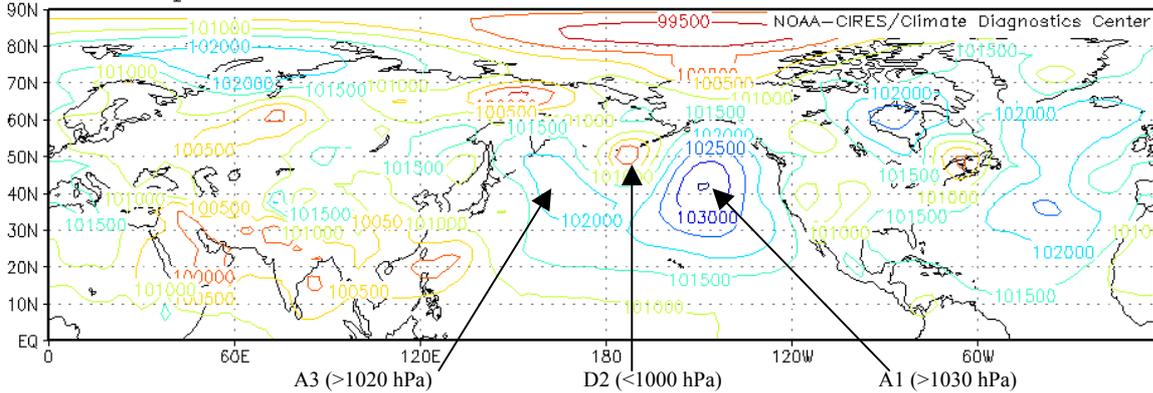
(d) 4 juillet 2000

Mean slp Pascals



(e) 5 juillet 2000

Mean slp Pascals



(f) 6 juillet 2000

Mean slp Pascals

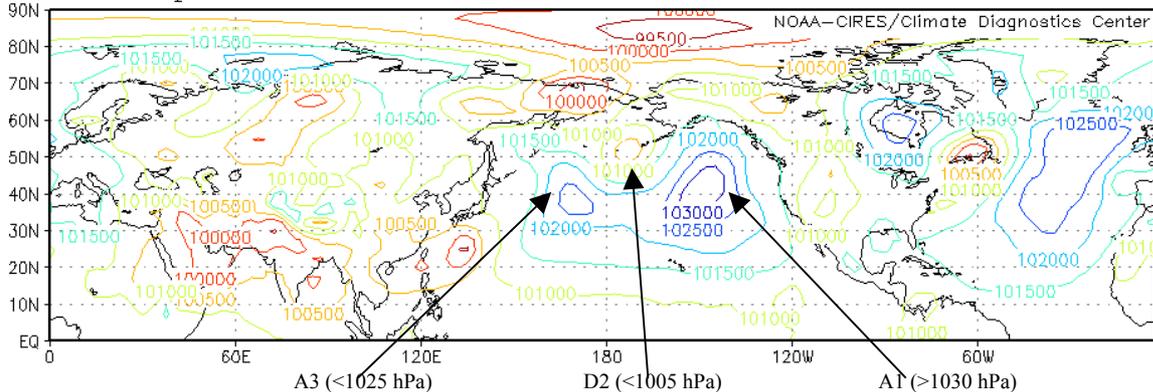


Figure 1.7. De (a) à (f), pression moyenne journalière au niveau de la mer du 1^{er} au 6 juillet 2000.

Source : <http://www.cdc.noaa.gov>

du Pacifique Nord le 6 janvier. Durant les 4 et 5 janvier, une nouvelle poussée anticyclonique (A4) s'effectue sur la région du Japon sous forme d'une crête qui évolue en système fermé le 6 janvier.

Dans le cadre de l'étude de ces deux épisodes synoptiques, nous avons observé qu'à l'échelle journalière, les dépressions et les anticyclones se déplacent vers l'est avec une composante nord et sud respectivement, mais pas toujours. En effet, le premier exemple

choisi montre qu'entre le 1^{er} et le 2 janvier, l'anticyclone A2 s'est déplacé vers l'est avec une composante sud-nord. Parfois les anticyclones peuvent avoir temporairement des trajectoires « rétrogrades » vers l'ouest (ex : Boyle et Bosart, 1983, 1986). Ce phénomène est également possible pour les dépressions qui peuvent adopter temporairement des trajectoires en direction du sud ou vers l'ouest.

De manière générale, les dépressions et les anticyclones transitent sur l'ensemble de la zone extra-tropicale du Pacifique Nord. A l'Est, le déplacement des systèmes transitoires est souvent perturbé par la présence de la Cordillère nord-américaine qui favorise les blocages atmosphériques tant pour les dépressions que pour les anticyclones. Cependant, les dépressions peuvent la franchir mais difficilement alors que les anticyclones des basses couches de l'atmosphère sont bloqués. A l'Ouest, et particulièrement durant la saison hivernale, la plupart des noyaux anticycloniques restent confinés sur le continent asiatique, mais certains peuvent se détacher et atteindre l'Ouest du Pacifique Nord. Par conséquent, sur la frange occidentale du Pacifique Nord, la circulation atmosphérique asiatique, de caractère continental, tend à interférer avec la circulation atmosphérique du Pacifique Nord.

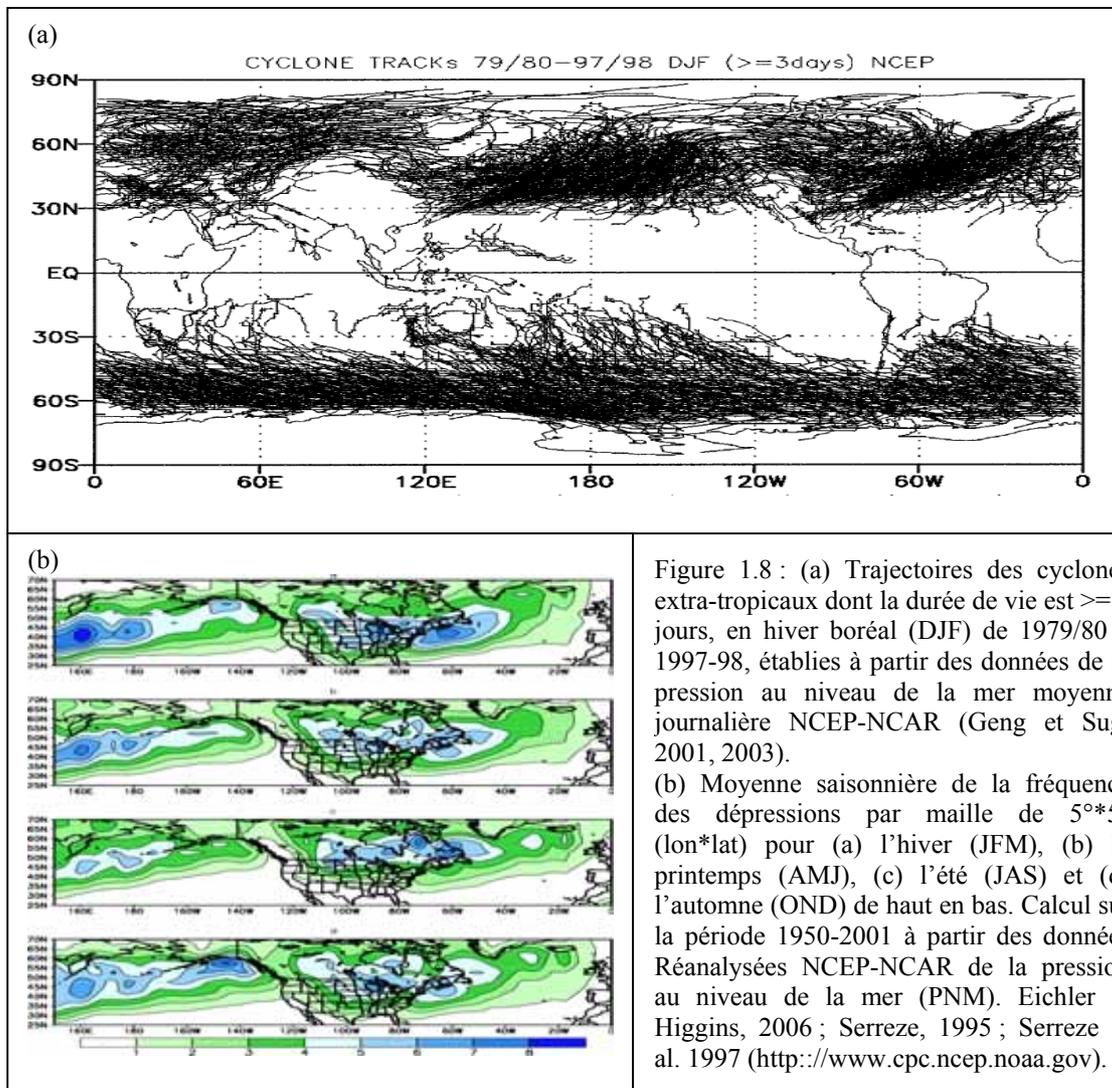


Figure 1.8 : (a) Trajectoires des cyclones extra-tropicaux dont la durée de vie est ≥ 3 jours, en hiver boréal (DJF) de 1979/80 à 1997-98, établies à partir des données de la pression au niveau de la mer moyenne journalière NCEP-NCAR (Geng et Sugi 2001, 2003).

(b) Moyenne saisonnière de la fréquence des dépressions par maille de $5^\circ \times 5^\circ$ (lon*lat) pour (a) l'hiver (JFM), (b) le printemps (AMJ), (c) l'été (JAS) et (d) l'automne (OND) de haut en bas. Calcul sur la période 1950-2001 à partir des données Réanalysées NCEP-NCAR de la pression au niveau de la mer (PNM). Eichler et Higgins, 2006 ; Serreze, 1995 ; Serreze et al. 1997 (<http://www.cpc.ncep.noaa.gov>).

Afin de capturer les systèmes atmosphériques d'origine asiatique qui circulent sur le Pacifique Nord, il semble nécessaire d'inclure une partie du continent à notre espace

géographique de départ (Pacifique Nord). La limite orientale de notre domaine, quant à elle, sera fixée par la Cordillère nord-américaine. En effet, elle représente une « barrière » atmosphérique, difficilement franchissable par les dépressions (Figures 1.8) et les anticyclones (ex : Zishka et Smith, 1980 ; Seluchi et al., 1998 (exemple des Andes)), modifiant fortement leurs caractéristiques. De plus nous décidons de ne pas capturer les systèmes ayant transité exclusivement à l'est de ces reliefs car ils n'influencent pas directement la circulation atmosphérique de surface du Pacifique Nord, mais davantage celle de l'Atlantique Nord.

Par conséquent, le domaine géographique qui nous intéresse se situe entre 80° Est et 110° Ouest et du Pôle à l'Equateur car :

- la région d'origine la plus occidentale des systèmes transitoires ayant circulé sur le Pacifique Nord et en particulier en hiver pour les anticyclones est la Sibérie orientale (limite occidentale à 80°E),
- les dépressions et anticyclones peuvent traverser le Pacifique Nord et atteindre la Cordillère occidentale de l'Amérique du Nord qui représente une « limite » entre les domaines du Pacifique Nord, à l'ouest, et l'Atlantique Nord, à l'est (limite orientale 110°O),
- ils peuvent circuler temporairement dans les hautes et basses latitudes, la limite Nord étant représentée par le Pôle (90°N), la limite sud, par l'Equateur (0°, car on ne connaît pas exactement la limite méridionale absolue).

Après avoir présenté les Réanalyses NCEP/NCAR, nous avons décidé d'utiliser des données moyennes journalières de pression au niveau de la mer, de résolution spatiale de 2.5°*2.5°, à partir desquelles le schéma automatique établira les trajectoires des dépressions et des anticyclones extra-tropicaux. La prise de connaissance de la circulation atmosphérique de surface moyenne annuelle, en janvier et en juillet ainsi que journalière dans le Pacifique Nord, nous a permis de délimiter le domaine géographique à l'intérieur duquel nous allons déterminer et analyser les caractéristiques des transitoires. Cet espace se situe entre 80°E-110°O / 0-90°N, incluant ainsi une partie du continent asiatique. Cependant, nous devons noter que nous étudierons seulement les systèmes transitoires des moyennes latitudes, ayant atteint le Pacifique Nord (cf. section 1.3, filtrage spatial). Enfin, en raison de la couverture temporelle des données in situ de températures et précipitations sur l'Amérique du Nord-Ouest dont on a pu disposer (cf. deuxième partie), la période traitée débute au 1^{er} janvier 1950 et se termine le 31 décembre 2001.

1.2. Schéma automatique de construction des trajectoires des dépressions et des anticyclones

A partir de postulats sur les caractéristiques des systèmes transitoires, établis sur la base des travaux antérieurs (section 1.2.1), nous allons identifier dans un premier temps les minima et maxima locaux de pression (section 1.2.2) en tant qu'indicateurs des centres des dépressions et des anticyclones respectivement (ex : Jones et Simmonds, 1994 ; Sinclair, 1996 ; Sinclair et Watterson, 1999 ; Gulev et al., 2001 ; Geng et Sugi 2001, 2003). Puis nous connecterons ces centres jour après jour afin d'individualiser les trajectoires (section 1.2.3).

1.2.1. Les postulats de départ

Comment reconnaître le centre d'un système atmosphérique, telle qu'une dépression ou un anticyclone, dont les caractéristiques varient dans l'espace et le temps ? Il est nécessaire de présenter tout d'abord, les critères de départ (Tableau 1.1) sur lesquels repose le schéma automatique d'établissement des trajectoires, qui sont d'une part les paramètres de pression et d'autre part les paramètres de déplacement. Ces critères nous permettront de reconnaître les systèmes et d'établir leur connexion inter-journalière.

Les centres des dépressions et des anticyclones se distinguent comme étant des minima et des maxima locaux de pression respectivement avec des valeurs centrales inférieures à 1005 hPa pour les premières et supérieures à 1015 hPa pour les seconds. Ces seuils ont été choisis (après de nombreuses expérimentations) afin de capturer les systèmes à partir de leur phase de naissance et de déclin, autant que possible. Certains centres dépressionnaires ou anticycloniques présentent une pression légèrement supérieure ou inférieure respectivement à ces seuils, notamment lors de la naissance et de la fin de vie des systèmes mais ce qui nous intéresse c'est la phase de « relative maturité », c'est-à-dire à partir du moment où ils présentent une pression marquée par rapport à la moyenne des PNM, considérée approximativement comme 1013 hPa (1012 hPa en moyenne dans les Réanalyses NCEP/NCAR à l'échelle du Globe de 1950 à 2001). Le choix des seuils de pression déterminera évidemment les fréquences des systèmes atmosphériques. Comme l'ont montré Pezza et Ambrizzi (2003), lorsque les trajectoires des transitoires sont établies en fonction de seuils de pression différents, la somme des fréquences est évidemment différente et sur les échelles inter-annuelles, la variabilité et les tendances peuvent être différentes. Par exemple, Graham et Diaz (2001) ont établi les trajectoires des dépressions inférieures à 1000 hPa dans le Pacifique Nord (comme Gulev et al., 2001, mais pour l'Hémisphère Nord) et ont montré que la fréquence des cyclones extra-tropicaux très creux (< 975 hPa) augmente dans le Pacifique Nord en hiver, au cours de la période 1948-2000. Ceci peut signifier que la pression des centres dépressionnaires tend à diminuer sans nécessairement que la fréquence des dépressions augmente en général. Dans notre travail, afin de rendre indépendantes les notions de fréquence et d'intensité autant que possible, nous avons choisi des seuils de pression peu contraignants. Ainsi, nous parviendrons plus aisément à distinguer la variation des fréquences et de l'intensité des transitoires.

La variation de pression entre 2 temps⁸ (24 heures) ne doit pas dépasser 20 hPa pour les dépressions et 15 hPa pour les anticyclones. Il a été observé que les dépressions dans le Pacifique Nord ont un taux de creusement moyen de l'ordre de 9 à 11 hPa en 24h (Gyagum et al., 1989) et inférieur à 5 hPa/ 6 h pour plus de 85% des systèmes observés (Gulev et al., 2001). C'est dans le Pacifique Nord-Ouest qu'il est le plus fort, lorsque les dépressions atteignent la région du Kuroshio (courant marin chaud de circulation sud-nord le long du continent asiatique). Ainsi, au contact des eaux chaudes de surface, leur pression centrale diminue subitement (-15 hPa / 24 h en moyenne), leur développement devenant explosif : c'est le lieu de formation des « bombes », cyclones extra-tropicaux très intenses (ex : Sanders et Gyakum, 1980 ; Roebber, 1984 ; Rogers et Bosard, 1986 ; Sanders, 1986 ; Gyakum et al.,

⁸ Ce critère aide à la décision de connexion inter-journalière lorsque plusieurs possibilités se présentent (ex : plusieurs centres dépressionnaires ou anticycloniques sont proches les uns des autres comme au niveau des Aléoutiennes pour les premiers et au niveau du continent asiatique pour les seconds, en hiver).

1989 ; Roebber, 1989 ; Gulev et al., 2001 ; Lim et Simmonds, 2002). Ce type de phénomène peut également survenir dans le Pacifique Nord-Est (Reed et Albright, 1986).

En revanche, les anticyclones ont une variabilité inter-journalière plus faible que celle des dépressions, d'après les observations de Pettersen (1956). Les plus fortes variations de pression inter-journalières se localisent en particulier sur l'Ouest du Pacifique Nord et en hiver. Au niveau du continent asiatique, l'Anticyclone de Sibérie est traversé par plusieurs noyaux dont la pression excède souvent 1040 hPa. Lorsque ces crêtes de hautes pressions et/ou ces noyaux anticycloniques se décalent vers l'Est et débouchent sur l'Océan Pacifique, au contact des eaux chaudes de surface, ils peuvent perdre environ 10 hPa / 24 h en moyenne. Par conséquent, sachant que nous utilisons des données de PNM moyennes journalières (réduction de la variabilité inter- journalières), les seuils de variation de la pression d'un jour à l'autre sont suffisamment grands pour capturer la plupart des dépressions (+ ou - 20 hPa / 24 h) et des anticyclones (+ ou - 15 hPa / 24 h).

	Dépressions = Minima locaux de pression	Anticyclones = Maxima locaux de pression
Seuil de pression	< 1005 hPa	> 1015 hPa
Variation inter- journalière de la pression	+/- 20 hPa	+/- 15 hPa
Distance inter- journalière parcourue	< 2000 km	< 2000 km
Déplacement préférentiel zonal	ouest / est	ouest / est
Déplacement préférentiel méridien	sud / nord	nord / sud

Tableau 1.1. Critères de départ pris en compte dans le schéma d'établissement automatique des trajectoires des dépressions et des anticyclones.

Comme nous l'avons déjà évoqué, les systèmes transitoires adoptent des trajectoires préférentiellement zonales d'ouest en est avec une composante méridienne en direction du Pôle pour les dépressions et en direction de l'Equateur pour les anticyclones (Pettersen, 1956; Klein, 1957; Taljaard, 1967 ; Zishka et Smith, 1980; Harman, 1987; Wallace et al., 1988 ; Jones et Simmonds 1993, 1994 ; Sinclair et al. 1997) mais parfois, ils peuvent être contraints par le relief ou l'environnement atmosphérique (ex : zone de blocage...) et donc se déplacer temporairement vers l'ouest et / ou vers le sud pour les dépressions ou le nord pour les anticyclones (Boyle et Bosart, 1983, 1986).

Pour être retenus dans l'étude, les cyclones et anticyclones extra-tropicaux peuvent circuler sur l'ensemble du domaine géographique pré-déterminé (80°E-110°O / 0°-90°N) mais doivent transiter dans la zone tempérée du Pacifique Nord (30°N-60°N / 120°E-120°O), durant au moins un jour. Les centres des dépressions et des anticyclones peuvent fusionner et les anticyclones se scinder (ex : Taljaard, 1967 ; Zishka et Smith, 1980 ; Drijfhout, 2003). La distance maximale parcourue en 24 h est fixée à 2000 km, ce qui représente une vitesse moyenne de déplacement strictement inférieure à 83 km/h. A titre indicatif, le phénomène exceptionnel des tempêtes de décembre 1999 qui ont touché l'Europe occidentale, a révélé des vitesses de déplacement pouvant atteindre 100 km/h temporairement. Ces phénomènes étant relativement rares, le seuil que nous avons choisi est légèrement inférieur.

En résumé, d'après les critères de départ, à l'intérieur de l'espace $80^{\circ}\text{E}-110^{\circ}\text{O} / 0^{\circ}-90^{\circ}\text{N}$, nous allons établir les trajectoires des minima (dépression) et maxima (anticyclones) locaux de pression au niveau de la mer inférieure à 1005 hPa et supérieure à 1015 hPa avec une variation inter-journalière maximum de ± 20 hPa et de ± 15 hPa respectivement. Leur vitesse de déplacement ne doit pas excéder 83 km/h. Les dépressions et les anticyclones doivent atteindre la zone $30^{\circ}\text{N}-60^{\circ}\text{N}$ durant au moins un jour. Dans la section suivante et dans le cadre d'exemples, nous apporterons des précisions sur l'utilisation des critères précédemment énumérés.

1.2.2. Détermination des minima et maxima locaux de pression

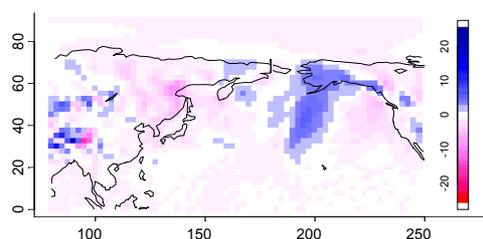
Suivant les postulats précédents, la première étape de la routine est de localiser les centres des dépressions et des anticyclones à l'intérieur de chaque champ de pression atmosphérique moyenne journalière au niveau de la mer, comme étant respectivement les minima inférieurs à 1005 hPa (dépressions) et maxima supérieurs à 1015 hPa (anticyclones) locaux de pression.

Ce premier traitement se déroule en trois temps :

- détermination de la position moyenne journalière des minima et maxima locaux de pression, dans les quatre directions (est, ouest, nord, sud) ;
- détermination des minima et maxima locaux de pression devant présenter une pression inférieure à 1005 hPa et supérieure à 1015 hPa respectivement ;
- détermination des minima et maxima locaux de pression la plus faible et la plus forte respectivement, dans un rayon de 500 km.

A l'intérieur de chaque champ de pression au niveau de la mer journalier, nous déterminons la position de tous les minima et maxima locaux de pression. Un minimum ou un maximum local de pression, ne correspond pas à une valeur de pression absolue mais relative à celle de son environnement proche. Par exemple tous les points dont la pression est supérieure ou égale à 1015 hPa ne représentent évidemment pas tous des centres d'anticyclones et de même, tous les points de valeur inférieure à 1005 hPa ne correspondent pas tous à des centres de dépression (cf. Annexes, Figure A1.1). De ce fait, pour chacun des points de la matrice, nous devons toujours observer la valeur de la pression de leurs points contigus dans les quatre directions.

(a) Variation PNM ouest – est (hPa)



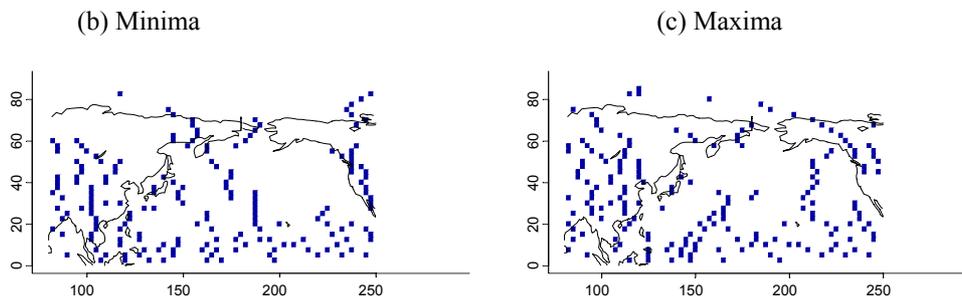


Figure 1.9. (a) champs de variation de la pression d'ouest en est, (b) minima locaux de pression par bande de latitude, (c) maxima locaux de pression par bande de latitude (01/01/1950).

En commençant à 80°E de longitude et 0° de latitude, pour chaque latitude, nous calculons, les dérivées partielles en longitude. Nous obtenons alors un champ de variation de la pression de l'ouest vers l'est de notre espace géographique pour chacun des jours (Figure 1.9). Nous obtenons alors un champ de variation zonale (d'ouest en est) de la pression. A chaque changement de signe dans les dérivées, du négatif vers le positif et du positif vers le négatif, on valide les coordonnées de ces points comme étant des minima (creux) et maxima (crêtes) locaux de pression respectivement.

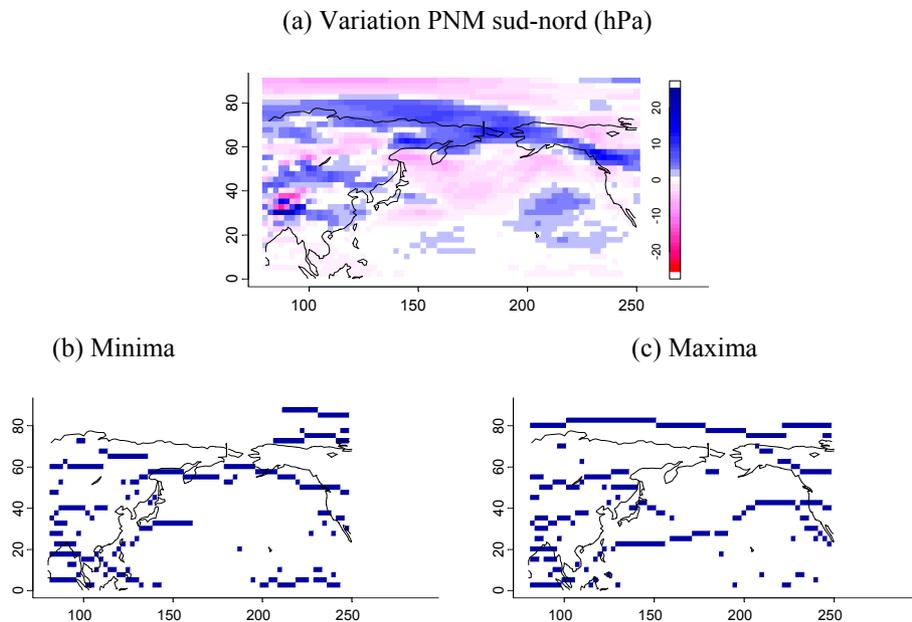


Figure 1.10. (a) champs de variation de la pression du sud vers le nord, (b) minima locaux de pression par bande de longitude, (c) maxima locaux de pression par bande de longitude (01/01/1950).

Nous répétons la procédure en calculant la valeur des dérivées partielles de pression pour chaque longitude en latitude. Nous obtenons un champ de variation méridionale de la pression (du sud vers le nord) de notre espace géographique pour chacun des jours (Figure 1.10). De même que précédemment, à chaque changement de signe dans les dérivées du négatif vers le positif et du positif vers le négatif, on valide les coordonnées de ces points comme étant des minima (creux) et maxima (crêtes) locaux de pression en latitude respectivement.

Puis, nous considérons l'intersection des champs de variation de la pression dans le sens méridien et zonal. Ainsi, nous couplons les champs de variation de la pression en longitude pour chaque latitude et en latitude pour chaque longitude afin de déterminer la position des points dont la valeur de pression est la plus faible (minima) et la plus forte (maxima) dans les quatre directions ouest, est, sud, nord (Figure 1.11).

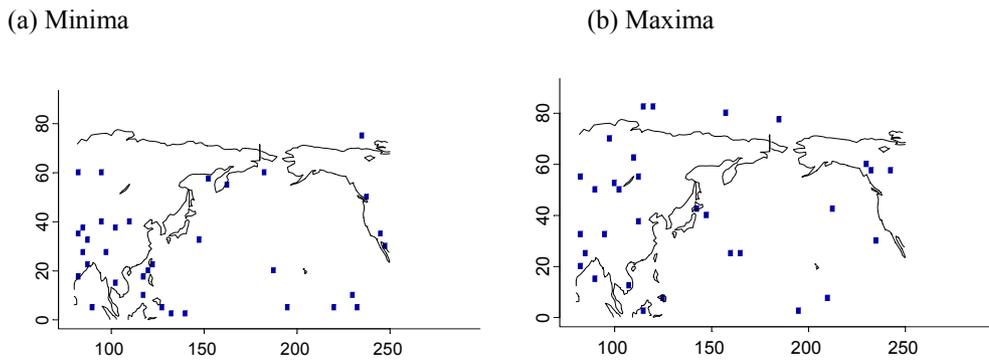


Figure 1.11. (a) minima et (b) maxima locaux de pression dans les quatre directions : ouest, est, sud, nord (01/01/1950).

Nous remarquons dans la figure 1.11, la présence de nombreux minima et maxima locaux de pression dans la zone tropicale, qui ne représentent pas forcément des systèmes atmosphériques organisés en dépressions et en anticyclones. Au sud de 20°N, les pressions moyennes au niveau de la mer se situent approximativement vers 1010 hPa. Afin d'exclure en partie ces points, nous couplons les matrices des minima / maxima avec les données de pression de départ et nous validons les points correspondant à des minima locaux de pression inférieure à 1005 hPa pour les dépressions et à des maxima locaux de pression supérieure à 1015 hPa pour les anticyclones (Figure 1.12).

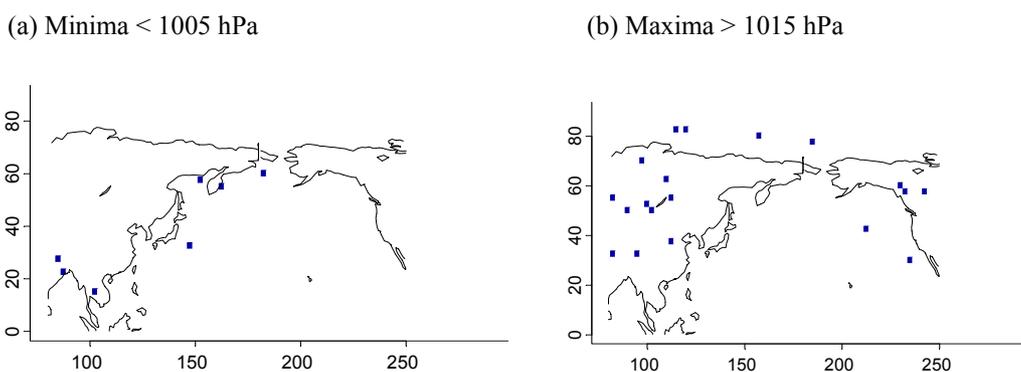


Figure 1.12. (a) minima < 1005 hPa et (b) maxima > 1015 hPa locaux de pression (01/01/1950).

Nous pouvons observer sur la figure 1.12.b, d'une part une série de points très proches signalant une zone de forte variabilité spatiale de la pression, notamment sur le continent asiatique (cf. Annexes Figure A1.1) et d'autre part la présence de plusieurs maxima locaux de pression dans les régions montagneuses, par exemple au niveau de l'Himalaya. Par conséquent, il existe une grande quantité de points « secondaires », c'est-à-dire qui ne sont pas réellement des centres de systèmes atmosphériques mais qui témoignent de légères

variations de la pression au sein de ces systèmes. De plus, nous nous intéressons principalement aux phénomènes atmosphériques de surface. Afin de supprimer les minima et maxima locaux de pression secondaires nous utiliserons une fenêtre mobile de filtrage de 500 km de rayon et nous introduisons un modèle numérique d'altitude (MNA) pour supprimer les maxima locaux de pression dans les régions de hautes altitudes.

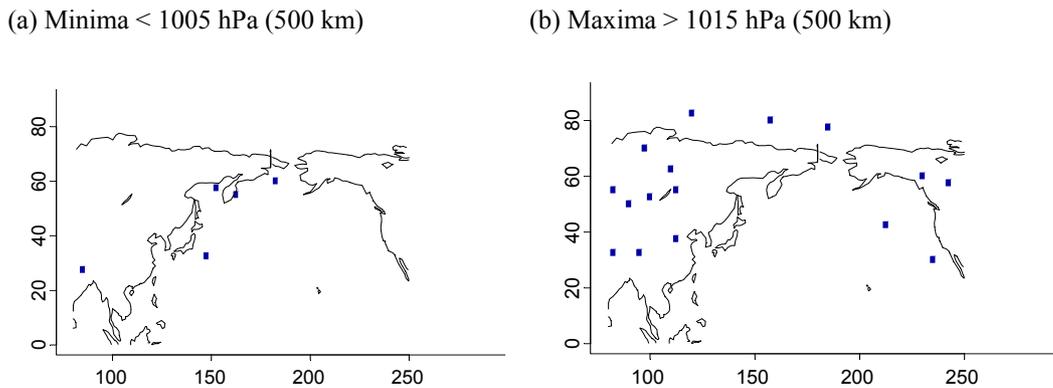


Figure 1.13. (a) minima < 1005 hPa et (b) maxima > 1015 hPa locaux de pression, séparés d'au moins 500 km (01/01/1950).

Nous faisons glisser, de 2.5 degrés, une « fenêtre circulaire » de 500 km de rayon et nous validons les points dont la pression est la plus faible (minima) et la plus forte (maxima) à l'intérieur de cette fenêtre (Figure 1.13). Si nous sommes en présence de points dont la pression est égale, nous validons les deux points.

Le MNA a été élaboré à partir des données de pression standard moyenne annuelle de 2001 (résolution $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$, NCEP-NCAR). La figure 1.14.a montre que la courbe de 976 hPa délimite approximativement les zones de relief supérieur à 500 mètres d'altitude. Par conséquent, nous codons 1 les points présentant une pression standard supérieure ou égale à 976 hPa et nous codons les points dont la pression standard est inférieure à ce seuil, par un coefficient décroissant vers 0 proportionnellement à la diminution de la pression qui atteint 508 hPa au minimum au-dessus de l'Himalaya (Figure 1.14.b). Nous obtenons alors un MNA de résolution $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ dont les valeurs s'échelonnent entre 0 et 1 et pour l'ensemble de notre secteur. Puis, nous pondérons les champs de pression au niveau de la mer (champs d'origine) par le MNA, et enfin, nous couplons les champs de PNM pondérés avec les champs de points correspondant à la position des minima et maxima locaux de pression, et nous validons les points étant des maxima supérieurs à 1015 hPa (les minima restent inchangés). Par conséquent, tous les maxima locaux de pression se situant sur les montagnes sont exclus de notre étude.

Ces deux procédures nous ont permis d'une part de conserver les minima et maxima locaux de pression inférieurs à 1005 hPa et supérieurs à 1015 hPa, séparés les uns des autres d'au moins 500 km et d'autre part, de supprimer les centres anticycloniques au-dessus des montagnes.

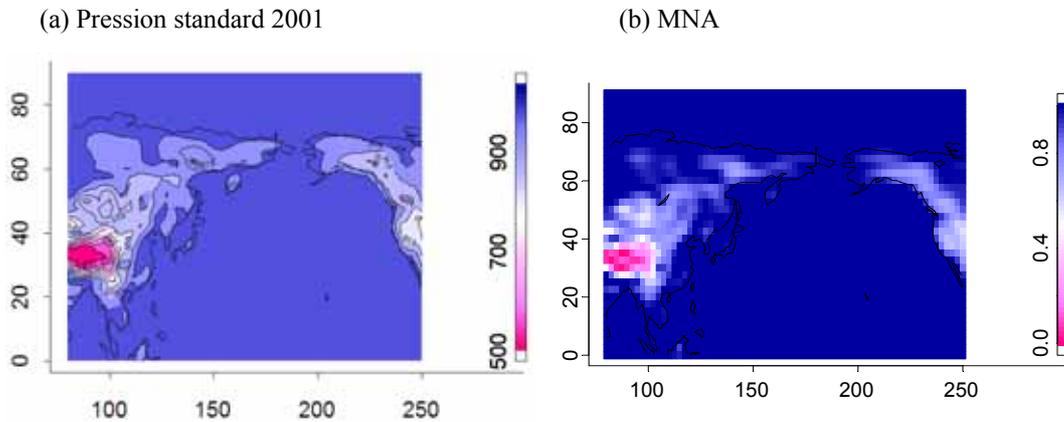


Figure 1.14. (a) pression standard moyenne annuelle en 2001, (b) modèle numérique d'altitude.

Nous avons donc déterminé les coordonnées des points pouvant être potentiellement des centres dépressionnaires et anticycloniques. Nous insistons sur « potentiellement » car l'étape suivante sera décisive dans la validation définitive des centres. C'est leur évolution spatio-temporelle qui validera ou non ces points comme étant respectivement des centres de dépressions et d'anticyclones persistants.

1.2.3. Connexion inter-journalière des minima et de maxima locaux de pression

Selon les critères de départ, les dépressions et les anticyclones parcourent une distance maximale en 24 heures de 2000 km, chaque point doit être connecté, le jour suivant, avec un point devant se situer à une distance strictement inférieure à 2000 km. En raison de la forte variabilité de pression et en particulier au sein des anticyclones, les possibilités de connexion d'un jour sur l'autre, sont souvent supérieures à 1. Ainsi, nous devons fixer des conditions de connexion.

Pour les dépressions, dans un rayon de 2000 km autour de chaque point, on teste chaque possibilité de connexion le jour suivant et retenons tous les points ayant une différence de pression inférieure à +/- 20 hPa.

Puis, s'il existe au moins une possibilité de connexion en direction de l'est :

- on connecte avec le point le plus proche ;
- si plus de 1 point répondent à cette condition (équidistance), on connecte avec le point qui présente une valeur de pression la plus proche ;
- si plus de 1 point répondent à cette condition, on connecte avec le point qui se situe le plus au nord (cette possibilité n'apparaît que dans les très rares cas où plusieurs points sont à équidistance et ont la même pression).

S'il n'existe pas de possibilité de connexion en direction de l'est, dans un rayon de 1000 km, on réalise les trois étapes précédemment exposées mais en direction de l'ouest. Dans le cas où d'un jour à l'autre, on constate la présence d'un minimum local de pression fixe dans

l'espace, on établit la connexion que s'il n'y a pas d'autre possibilité de connexion à l'est. Enfin, si aucun point ne répond à ces conditions, aucune connexion n'est établie : la trajectoire est définitivement interrompue. Cette procédure est répétée pour chaque point, ainsi, la fusion entre deux dépressions est possible.

Pour les anticyclones, dans un rayon de 2000 km autour de chaque point, on teste chaque possibilité de connexion le jour suivant et retenons tous les points ayant une différence de pression inférieure à +/- 15 hPa. Puis, s'il existe au moins une possibilité de connexion en direction de l'est :

- on connecte avec le point le plus proche ;
- si plus de 1 point répondent à cette condition (équidistance), on connecte avec le point qui présente une valeur de pression la plus proche ;
- si plus de 1 point répondent à cette condition, on connecte avec 2 points s'il n'y a que 2 points (la trajectoire se scinde), sinon, on connecte avec le point qui se situe le plus au sud.

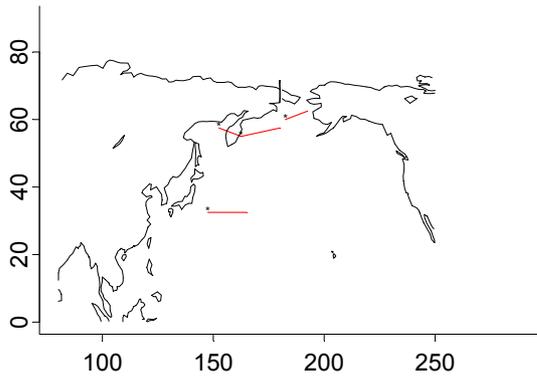
S'il n'existe pas de possibilité de connexion en direction de l'est, dans un rayon de 1000 km, on réalise les trois étapes précédemment décrites mais en direction de l'ouest. Dans le cas où d'un jour à l'autre on constate la présence d'un maximum local de pression fixe dans l'espace, on n'établit la connexion que s'il n'y a pas d'autre possibilité de connexion à l'est. Enfin, si aucun point ne répond à ces conditions, aucune connexion n'est établie : la trajectoire est définitivement interrompue. Cette procédure est répétée pour chaque point, ainsi, la fusion entre deux anticyclones est possible.

Selon l'algorithme, les connexions entre les minima (maxima) d'un jour à l'autre s'établissent préférentiellement en direction de l'est. Par conséquent, le mouvement vers l'est est favorisé et la stagnation ainsi que les trajectoires « rétrogrades », en direction de l'ouest, ne sont pas favorisées (mais pas impossibles). Ceci a pour conséquence finale l'interruption des trajectoires notamment sur l'Est du secteur d'étude.

Le choix et l'ordre des conditions, précédemment exposé, a été fixé après avoir testé toutes les combinaisons sur un échantillon de 3 mois. En contrôlant chaque connexion (visuellement), nous avons estimé que de manière générale, 80% et 75 % des connexions des dépressions et des anticyclones respectivement, sont correctes. Evidemment le contrôle apparaît comme étant subjectif. Cependant les études statistiques qui seront menées dans les chapitres suivants, mettront en lumière les différents inconvénients de notre méthode (effets des seuils...), mais confirmeront la validité générale de l'algorithme. En confrontant nos résultats avec ceux issus des études antérieures (ex : Pettersen, 1956 ; Zhang et Wang, 1997 ; Gulev et al., 2001 ; Geng et Sugi, 2001, 2003 ; Pezza et Ambrizzi, 2003), notre schéma automatique d'établissement des trajectoires des dépressions et des anticyclones apparaît satisfaisant.

Après avoir établi les connexions (Figure 1.15), nous avons créé un fichier répertoriant toutes les trajectoires des minima (dépressions) et un autre pour les maxima (anticyclones) locaux de pression (connectés ou non, c'est dire que les points non connectés sont, dans un premier temps, considérés comme des trajectoires) pour chaque année au cours de la période 1950 à 2001. Pour chaque trajectoire, nous avons enregistré leur position et leur pression centrale journalière.

(a) Connexion minima 01-02/01/1950



(c) Trajectoires A 01-02/01/1950

```

[[1]]:
  [,1] [,2] [,3] [,4]
feature 112.5 37.5 1018.82 1
[[2]]:
  [,1] [,2] [,3] [,4]
feature 212.5 42.5 1036.50 1
feature 212.5 42.5 1040.55 2
[[3]]:
  [,1] [,2] [,3] [,4]
feature 90.0 50.0 1034.95 1
feature 92.5 47.5 1032.90 2
[[4]]:
  [,1] [,2] [,3] [,4]
feature 100 52.5 1039.25 1
feature 110 50.0 1038.55 2
[[5]]:
  [,1] [,2] [,3] [,4]
feature 112.5 55 1036.02 1
[[6]]:
  [,1] [,2] [,3] [,4]
feature 82.5 55 1025.35 1
[[7]]:
  [,1] [,2] [,3] [,4]
feature 242.5 57.5 1037.85 1
[[8]]:
  [,1] [,2] [,3] [,4]
feature 230 60 1047.52 1
feature 245 55 1042.32 2
[[9]]:
  [,1] [,2] [,3] [,4]
feature 110.0 62.5 1028.87 1
feature 127.5 65.0 1021.62 2
[[10]]:
  [,1] [,2] [,3] [,4]
feature 97.5 70.0 1035.3 1
feature 95.0 67.5 1035.4 2
[[11]]:
  [,1] [,2] [,3] [,4]
feature 185 77.5 1040.6 1
[[12]]:
  [,1] [,2] [,3] [,4]
feature 157.5 80 1042.22 1
[[13]]:
  [,1] [,2] [,3] [,4]
feature 120 82.5 1043.9 1
feature 120 80.0 1044.1 2
    
```

(b) Trajectoires D 01-02/01/1950

```

[[1]]:
  [,1] [,2] [,3] [,4]
feature 147.5 32.5 1004.27 1
feature 165.0 32.5 1003.60 2
[[2]]:
  [,1] [,2] [,3] [,4]
feature 162.5 55.0 984.92 1
feature 180.0 57.5 994.80 2
[[3]]:
  [,1] [,2] [,3] [,4]
feature 152.5 57.5 988.10 1
feature 162.5 55.0 996.45 2
[[4]]:
  [,1] [,2] [,3] [,4]
feature 182.5 60.0 995.20 1
feature 192.5 62.5 1000.27 2
[[5]]:
  [,1] [,2] [,3] [,4]
feature 147.5 47.5 1004.65 2
[[6]]:
  [,1] [,2] [,3] [,4]
feature 145 57.5 1001.87 2
    
```

(d) Connexion maxima 01-02/01/1950

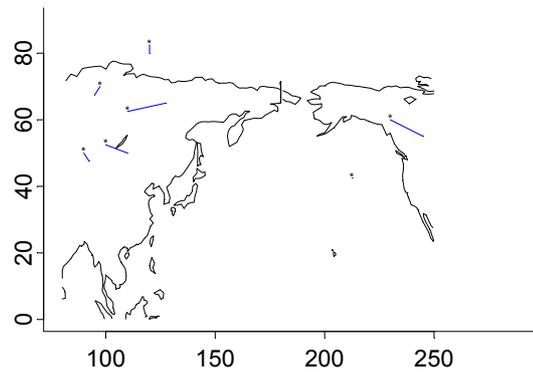


Figure 1.15. Connexion des minima (a, b) et maxima (c, d) locaux de pression, extrait du fichier répertoire des trajectoires des dépressions (b) et des anticyclones (c) entre le 01/01/1950 et le 02/01/1950. Les points non connectés ne sont pas représentés sur les cartes a et d.

Les fichiers répertoires comprennent:

- le rang de la trajectoire,
- la position journalière en longitude (en degré),
- la position journalière en latitude (en degré),
- la pression atmosphérique journalière (en hPa),
- le jour de l'observation (de 1 à 365 ou 366).

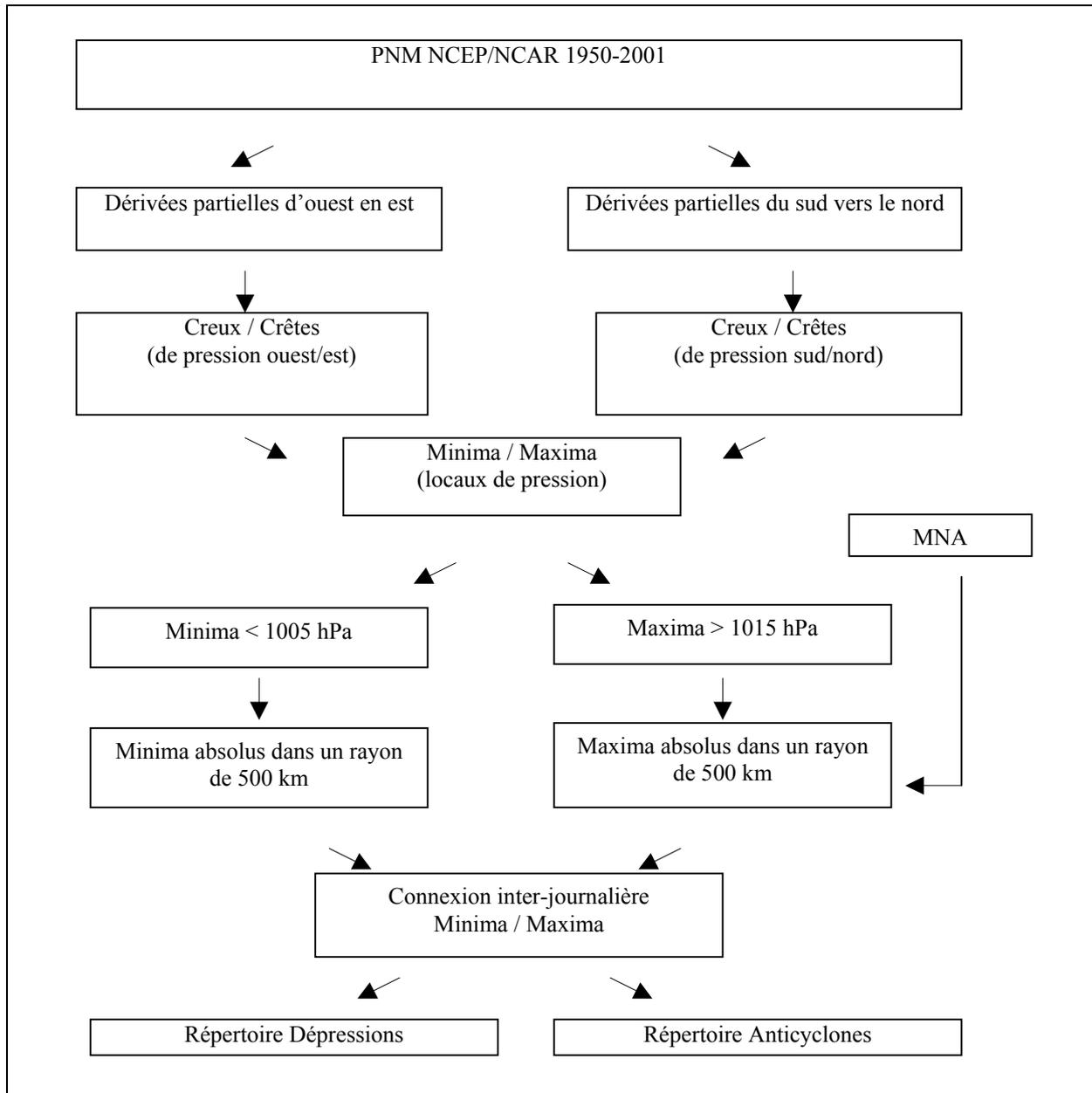


Figure 1.16. Schéma de synthèse de la routine d'établissement des trajectoires.

En résumé, nous avons élaboré un schéma automatique de reconnaissance et d'établissement des trajectoires, des dépressions et des anticyclones (Figure 1.16). A partir des pressions au niveau de la mer moyennes journalières nous avons défini la position spatiale des centres dépressionnaires inférieurs à 1005 hPa et anticycloniques supérieurs à 1015 hPa.

Puis, nous avons connecté jour après jour ces centres afin de déterminer leurs trajectoires, dans l'espace géographique 0° - 90° N / 80° E- 110° O et durant la période 1950-2001.

1.3. Quantification des caractéristiques des dépressions et des anticyclones des moyennes latitudes du Pacifique Nord

Dans le but de réaliser une étude statistique des dépressions et des anticyclones ayant circulé dans les moyennes latitudes du Pacifique Nord, nous devons filtrer les trajectoires, afin de ne conserver que celles qui feront l'objet de notre analyse (section 1.3.1). Enfin, pour faciliter l'exploitation des différentes informations que nous avons recensées, nous synthétiserons les caractéristiques (fréquence, pression, durée de vie, position spatiale..) des cyclones et des anticyclones extra-tropicaux sous forme de séries temporelles (section 1.3.2).

1.3.1. Filtre spatial et temporel

A l'intérieur des fichiers répertoires, nous avons enregistré les caractéristiques de la totalité des centres de basse et haute pression, connectés jour après jour ou non. La fréquence des minima et maxima locaux de pression détectés est relativement bien équilibrée. Par exemple, pour l'année 1950 le nombre de minima et de maxima est de 3895 (~ 11/jour) et de 3704 (~ 10/jour) respectivement sur l'ensemble de l'espace 0° - 90° N / 80° E- 110° O. La figure 1.17 montre que la durée de vie des systèmes détectés (sur notre espace d'étude) pour l'année 1950 varie de 1 à plus de 10 jours pour les dépressions (20 jours maximum) et les anticyclones (19 jours maximum) respectivement. 65% des minima et 80% des maxima ont été connectés. Le plus fort taux de connexion des maxima est dû, d'une part, au fait que les masses anticycloniques sont plus étendues et d'autre part, présentent une plus forte variation spatiale de la pression contrairement aux dépressions qui présentent des gradients de pression plus marqués autour de leur centre. Par conséquent, les maxima locaux de pression supérieurs à 1015 hPa détectés par l'algorithme tendraient à être proches les uns et autres, ainsi, les possibilités de connexions sont plus importantes, d'un jour à l'autre, pour les maxima que pour les minima, ce qui explique notamment le fait que les durées de vie des anticyclones sont plus longues que celles des dépressions.

Les connexions successives forment des trajectoires dont la durée de vie est donc d'au moins 2 jours. La figure 1.18 présente les fréquences des trajectoires $>$ ou $=$ à 2 jours... $>$ ou $=$ à 5 jours. La décroissance des fréquences, en même temps que la durée des trajectoires augmente, est similaire pour les dépressions et pour les anticyclones. Le choix d'un seuil de durée des trajectoires va donc déterminer la taille des échantillons que nous allons analyser (fréquence). A partir des cartes synoptiques, Klein (1958) a montré que la durée de vie moyenne des dépressions de l'Hémisphère Nord est de 4.6 jours et de 5.6 pour les anticyclones. Gulev et al. (2001) ont montré que la majorité des cyclones extra-tropicaux du Pacifique Nord se forment à l'Est du Japon et ceux-ci ont une durée de vie de 4 à 8 jours en moyenne. Pour les analyses menées dans les chapitres 2, 3, 4 et 5, nous avons décidé d'étudier uniquement les systèmes ayant une durée de vie strictement supérieure à 3 jours (pour la

troisième partie, les chapitre 6, 7 et 8 présentent des analyses basées sur l'ensemble des trajectoires (durée de vie de 2 jours minimum) et nous justifierons ce choix dans le chapitre 6).

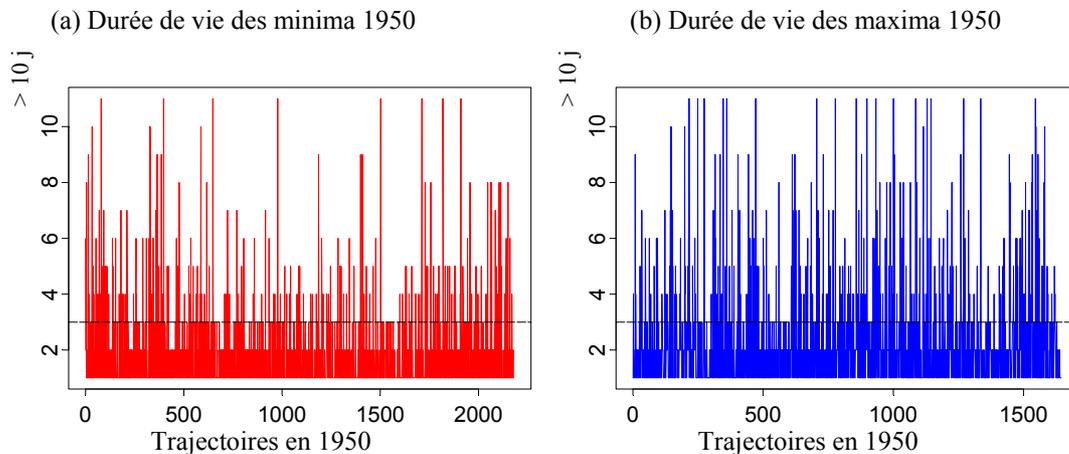


Figure 1.17. Durée de vie des minima (a) et maxima (a) de pression au cours de l'année 1950.

De plus, dans ce travail, nous souhaitons considérer uniquement les trajectoires des dépressions et anticyclones ayant circulé dans les moyennes latitudes du Pacifique Nord. Par conséquent, nous excluons tous les systèmes qui ont :

- circulé exclusivement au sud de 30°N (phénomènes uniquement tropicaux) ;
- circulé exclusivement au nord de 60°N (phénomènes uniquement arctiques) ;
- circulé exclusivement à l'ouest de 120°E (systèmes n'ayant pas atteint le Pacifique Nord) ;
- circulé exclusivement à l'est des Rocheuses (à l'est de 120°O , systèmes n'ayant pas atteint le Pacifique Nord).

Ainsi, nous conservons les trajectoires ayant circulé durant au moins un jour de leur existence, entre 30°N et 60°N (moyennes latitudes) et dans la région 120°E - 120°O (Pacifique Nord).

Durant l'année 1950, selon l'algorithme, le nombre de systèmes (+de 3 jours d'existence) ayant atteint les moyennes latitudes du Pacifique Nord est de 121 dépressions (1 tous les 3 jours) et 175 anticyclones (1 tous les 2 jours). Comme nous l'avons évoqué ci-dessus, les fréquences des trajectoires des anticyclones sont plus élevées que celles des dépressions. Pezza et Ambrizzi (2003) ont montré qu'à l'échelle de l'Hémisphère Sud, le nombre de trajectoires des anticyclones est sensiblement supérieur à celui des dépressions avec en moyenne 584 anticyclones par an contre 529 dépressions (sans restriction de pression). Pour l'Hémisphère Nord, nous n'avons pas trouvé d'information sur les fréquences moyennes annuelles des systèmes atmosphériques de surface dérivées d'un schéma automatique d'établissement de trajectoires. Nous ne savons donc pas s'il doit y avoir équilibre approximatif ou non. Dans tous les cas, les seuils de pression choisis dans l'algorithme ainsi que l'espace géographique considéré déterminent le rapport entre les

fréquences des dépressions et des anticyclones. Par exemple, dans la région des Aléoutiennes, les dépressions sont plus nombreuses que les anticyclones et le rapport est inversé dans la région du Japon. Nous verrons également dans le chapitre suivant que ce rapport varie selon les saisons et selon les régions.

Trajectoires des dépressions et des anticyclones en 1950
(fréquence / durée)

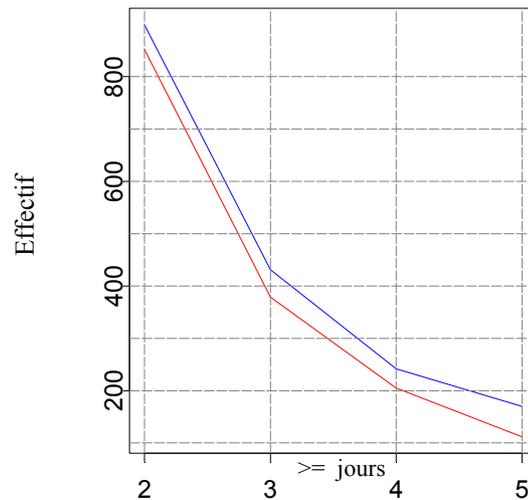


Figure 1.18. Fréquence des trajectoires supérieures ou égales à 2, 3, 4, et 5 jours, en 1950. Rouge=dépressions, Bleu=anticyclones. Nous avons vérifié pour l'ensemble de la période 1950-2001 que le nombre d'anticyclones était toujours supérieur à celui des dépressions.

La figure 1.19 montre les trajectoires des centres des dépressions et anticyclones inférieurs à 1005 hPa et supérieurs à 1015 hPa respectivement, ayant une durée de vie supérieure à 3 jours et ayant circulé dans la zone tempérée (30°N et 60°N) du Pacifique Nord (120°E-120°O) durant au moins un jour, au cours de l'année 1950 (cf. aussi Annexes, figure A1.2 pour les trajectoires $\geq 10j$). Nous observons sur ces deux cartes que les zones de densité de circulation des systèmes dépressionnaires et anticycloniques sont relativement conformes au champ moyen de PNM pour la même période. La zone de fréquence maximale des cyclones extra-tropicaux s'étire sous forme d'une « diagonale » d'axe sud-ouest / nord-est. Cette zone est relativement large sur l'Ouest du secteur, s'étendant de la région du Japon jusqu'au Kamtchatka, puis a tendance à se rétrécir en direction de l'est, sur la région des Aléoutiennes et jusqu'en Alaska.

L'aire de fréquentation maximale des anticyclones extra-tropicaux se situe, plus au sud, proche de la zone sub-tropicale, entre 50°N et 30°N, approximativement. Deux régions préférentielles de transit apparaissent : l'une s'étend de l'Est du continent asiatique jusque sur le secteur du Japon et la seconde, le long du continent nord-américain, du secteur Mer de Béring / Golfe de l'Alaska, jusqu'au large de la Californie où les densités de fréquentation apparaissent relativement fortes. Ces observations spatiales sont, de manière générale, conformes aux études antérieures (ex : Pettersen, 1956 ; Klein, 1957 ; Wallace et al., 1988 ; Bell et Bosart, 1989 ; Parker et al., 1989 ; Anderson et Gyakum, 1989 ; Graham et Diaz, 2001 ; Gulev et al., 2001).

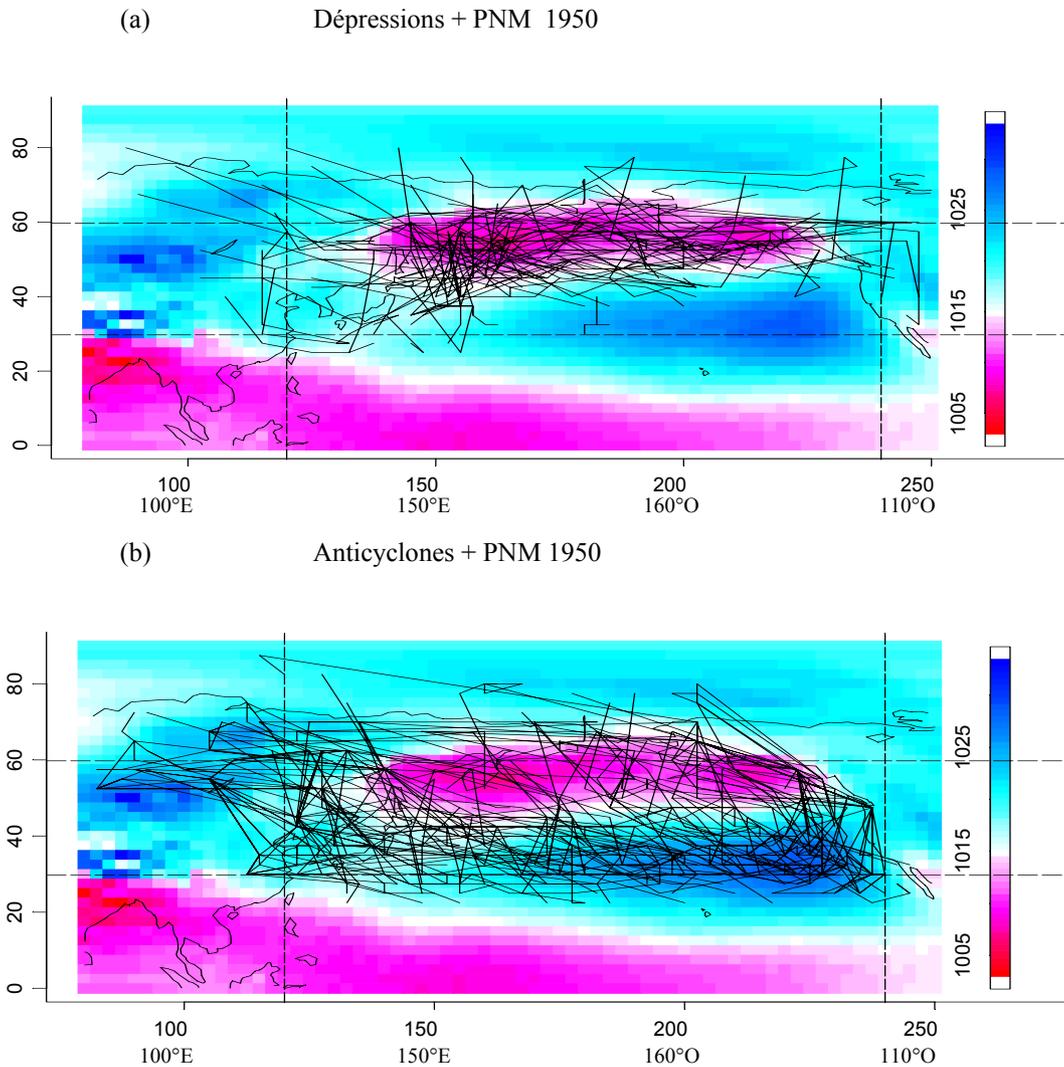


Figure 1.19. Trajectoires des dépressions (a) et des anticyclones (b) et PNM moyenne annuelle en arrière-plan, en 1950.

1.3.2. Constitution des séries temporelles

Afin de réaliser une étude climatologique des dépressions et des anticyclones de surface dans les moyennes latitudes du Pacifique Nord, nous synthétisons les caractéristiques des dépressions et anticyclones sous forme de séries temporelles. A partir des fichiers répertoriant les trajectoires des systèmes dépressionnaires et anticycloniques (d'une durée de vie supérieure à 3 jours) des moyennes latitudes ayant atteint le Pacifique Nord, et en fonction des caractéristiques retenues, on crée des séries temporelles mensuelles (de 30 jours) où chaque trajectoire est classée dans le même mois que le jour de son apparition :

- **fréquence** des trajectoires (**F**),
- **pression moyenne, minimale** atteinte et **maximale** atteinte, au cours des trajectoires (**Pmoy**, **Pmin**, **Pmax** respectivement) en hPa,
- **durée** d'existence totale des trajectoires (**Dur**) en jours,
- **distance** parcourue totale au cours des trajectoires (**Dist**) en km,
- **vitesse** de déplacement moyenne au cours des trajectoires (**V**) en km/h,

- **latitude moyenne, minimale et maximale** atteinte, et **amplitude latitudinale** des trajectoires (**Latmoy, Latmin, Latmax, Latampl** respectivement) en °N,
- **longitude moyenne, minimale et maximale** atteinte, et **amplitude longitudinale** des trajectoires (**Lonmoy, Lonmin, Lonmax, Lonampl** respectivement) en °E.

Les fréquences sont cumulées, alors que les caractéristiques de pression, durée d'existence, distance parcourue, vitesse de déplacement et les positions spatiales (en longitude et latitude) sont moyennées (minimale, maximale et moyenne au cours des trajectoires). Les amplitudes des trajectoires en latitude et en longitude sont obtenues en soustrayant les valeurs minimales aux valeurs maximales (ex : $Latampl = Latmax - Latmin$, $Lonampl = Lonmax - Lonmin$).

Nous avons construit les trajectoires des dépressions et des anticyclones extra-tropicaux grâce à une procédure automatique qui connecte jour après jour les minima (inférieurs à 1005 hPa) et maxima (supérieurs à 1015 hPa) locaux de pression respectivement. Les trajectoires des systèmes transitoires ayant une durée de vie supérieure à 3 jours et ayant atteint le Pacifique Nord durant au moins 1 jour ont été répertoriées sur l'ensemble de la période 1950 2001. Leurs caractéristiques ont été synthétisées sous forme de séries temporelles moyennes mensuelles afin d'établir la climatologie générale des dépressions et anticyclones dans le Pacifique Nord.

Chapitre 2 : Climatologie des dépressions et des anticyclones des moyennes latitudes du Pacifique Nord

Au cours de l'année, la fluctuation du bilan radiatif aux différentes latitudes induit des modifications de la circulation atmosphérique dans les moyennes latitudes. A l'échelle synoptique, les influences saisonnières se traduisent par une activité des systèmes dépressionnaires et anticycloniques transitoires plus intense en hiver et moins en été. Dans le domaine géographique du Pacifique Nord, la climatologie de surface des dépressions extra-tropicales est relativement bien documentée contrairement à celle des anticyclones qui fut étudiée seulement par Pettersen (1956), Klein (1957, 1958), Zishka et Smith (1980) pour le Pacifique Nord-Est, et Zhang et Wang (1997) en hiver.

L'étude climatologique des dépressions et des anticyclones est établie à partir de chacune des caractéristiques des dépressions et des anticyclones (fréquence, pression, durée, distance parcourue, vitesse de déplacement, domaine spatial de circulation en latitude et longitude) au cours de leurs trajectoires. Dans un premier temps, nous analyserons les statistiques moyennes annuelles, à partir de l'ensemble des trajectoires sur la période 1950-2001, de chacun des paramètres descriptifs des systèmes atmosphériques transitoires du Pacifique Nord (section 2.1). Puis, après avoir étudié la variation moyenne inter-mensuelle de chaque caractéristique (section 2.2), nous déterminerons la saisonnalité de l'activité dépressionnaire / anticyclonique sur notre espace géographique (section 2.3). Nous rappelons que l'un des objectifs de la thèse est d'estimer l'influence de l'activité dépressionnaire / anticyclonique sur les températures et les précipitations hivernales en Amérique du Nord-Ouest. Par conséquent, cette section 2.3 nous permettra d'identifier précisément la saison hivernale de l'activité transitoire du Pacifique Nord.

2.1. Informations générales sur les trajectoires des dépressions et des anticyclones du Pacifique Nord

A partir des fichiers répertoriant les trajectoires des dépressions et des anticyclones (> 3j) ayant circulé dans les moyennes latitudes du Pacifique Nord, nous allons présenter les statistiques générales des caractéristiques (pression, durée, distance parcourue, vitesse de déplacement, espace couvert en latitude et en longitude) relatives aux dépressions (section 2.1.1) et aux anticyclones (section 2.1.2). L'étude suivante est basée sur l'ensemble des trajectoires ayant circulé durant au moins un jour dans la zone tempérée (30°N / 60°N) du Pacifique Nord (120°E / 120°O) représentée par la figure 2.1, au cours de la période 1950-2001.

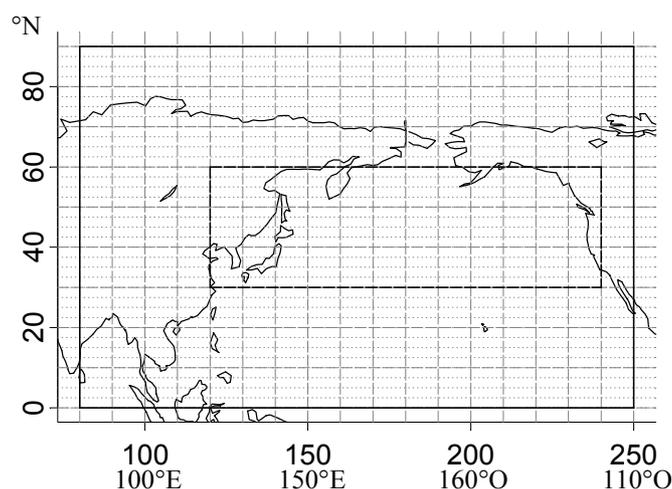


Figure 2.1. Limites de l'espace géographique à l'intérieur duquel les trajectoires des systèmes transitoires ont été établies (lignes pleines noires), limites de l'espace géographique à l'intérieur duquel les systèmes transitoires ont circulé durant au moins 1 jour (lignes en tiret noires, 30°N-60°N / 120°E-120°O ou 120-240 en °E par rapport au méridien de Greenwich).

2.1.1. Les dépressions

De janvier 1950 à décembre 2001, 6664 dépressions strictement inférieures à 1005 hPa et d'une durée de vie supérieure à 3 jours ont circulé durant au moins un jour dans la zone tempérée (30°N / 60°N) du Pacifique Nord (120°E / 120°O). Ce qui signifie la formation et/ou l'incursion d'une dépression tous les 3 jours environ sur notre espace.

	min	Q25	Q50	Q75	max
PmoyD	963	989	996	1000	1005
PminD	937	978	987	995	1005
PmaxD	971	1001	1004	1005	1005
DurD	4	4	5	6	24
DistD	0	3256	4495	5983	26400
VD	0	28	36	45	83
LatmoyD	21	46	51	56	84
LatminD	15	37	42.5	50	80
LatmaxD	30	52.5	60	65	87.5
LatamplD	0	10	15	22	60
LonmoyD	83	151	176	200	247.5
LonminD	82.5	125	150	177.5	247.5
LonmaxD	120	170	202	230	247.5
LonamplD	0	25	42	65	165

Tableau 2.1. Paramètres de dispersion des caractéristiques trajectoires des dépressions : minimum (min), premier (Q25), deuxième (Q50), troisième (Q75) quartiles et maximum (max), au cours de la période 1950-2001.

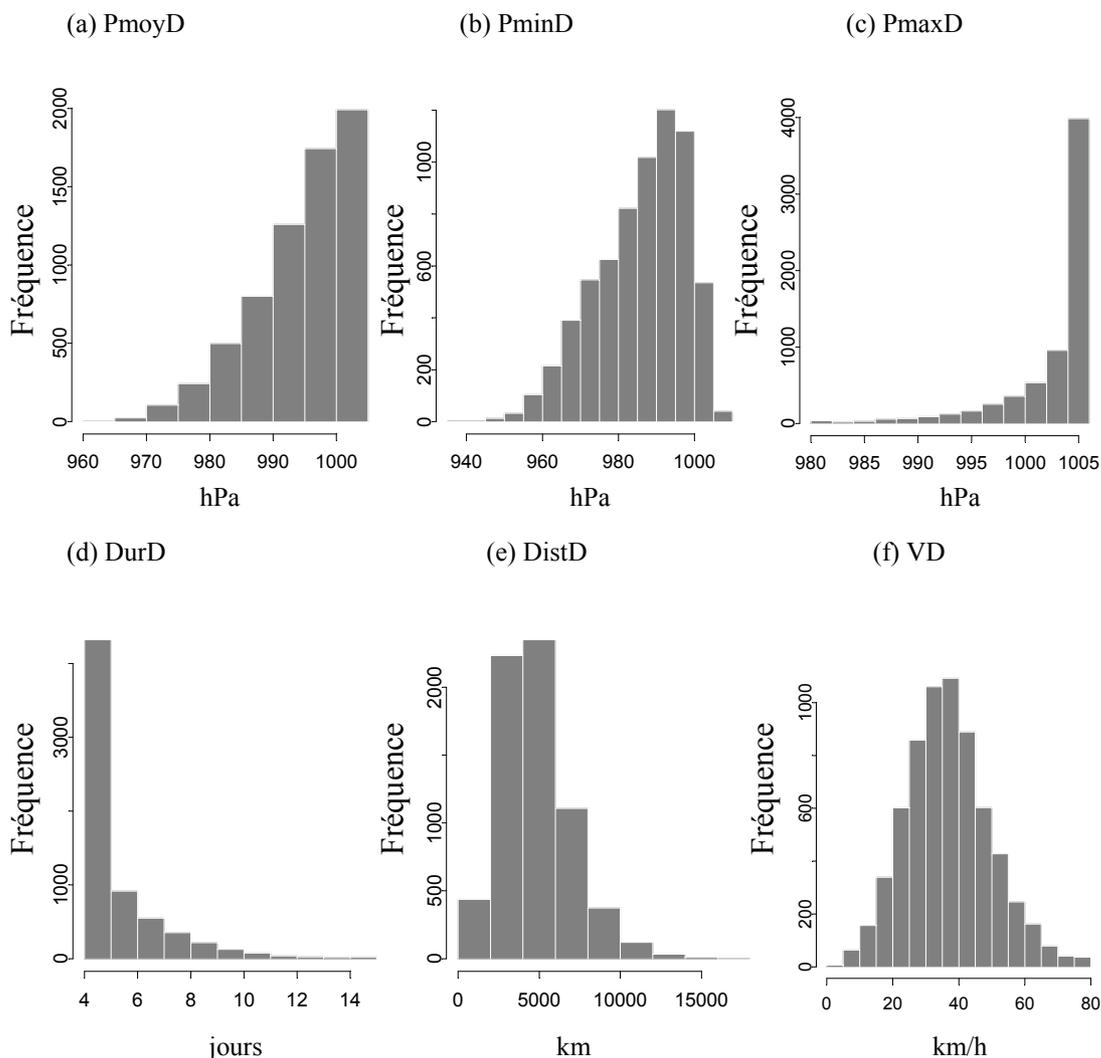
L'intensité moyenne des dépressions (PmoyD) varie majoritairement entre 989 hPa et 1000 hPa (Tableau 2.1) avec un creusement (PminD) variant entre 978 hPa et 995 hPa (la dépression la plus creuse enregistrée au cours de la période 1950-2001 est de 937 hPa et est

apparue le 21 décembre 1981 dans la région des Aléoutiennes). Le seuil de sélection de 1005 hPa influence bien sûr les valeurs moyennes de pression de chaque système détecté.

La durée d'existence des dépressions (DurD) varie peu, entre 4 et 6 jours avec une valeur médiane de 5 jours. Evidemment le minimum observé est de 4 jours en raison du seuil choisi qui affecte plus de 60% des trajectoires. Seulement 18 systèmes dépressionnaires ont eu une durée de vie supérieure ou égale à 15 jours dont un ayant atteint 24 jours.

Au cours de leur déplacement, la plupart des systèmes dépressionnaires parcourent des distances (DistD) allant de 3200 km à 6000 km (médiane = 4495 km) environ. Le minimum observé est de 0 km, et correspond à des systèmes qui ne se sont pas déplacés (3 dépressions totalement stationnaires ont été détectées au cours de la période). La distance parcourue maximale observée est de 26 400 km et correspond au système dépressionnaire ayant eu la durée de vie la plus longue (24 jours).

L'espace parcouru par les dépressions est réalisé à une vitesse (VD) de 28 à 45 km/h. La vitesse maximale observée est de 83 km/h (2000 km en 24h) correspondant au seuil de distance maximale pouvant être parcourue par les systèmes, introduit dans la routine d'établissement des trajectoires. Sept dépressions présentent des vitesses de déplacement moyen ayant atteint ce seuil de 83 km/h (ces trajectoires ne sont vraisemblablement pas justes car elles doivent confondre au moins 2 systèmes dépressionnaires).



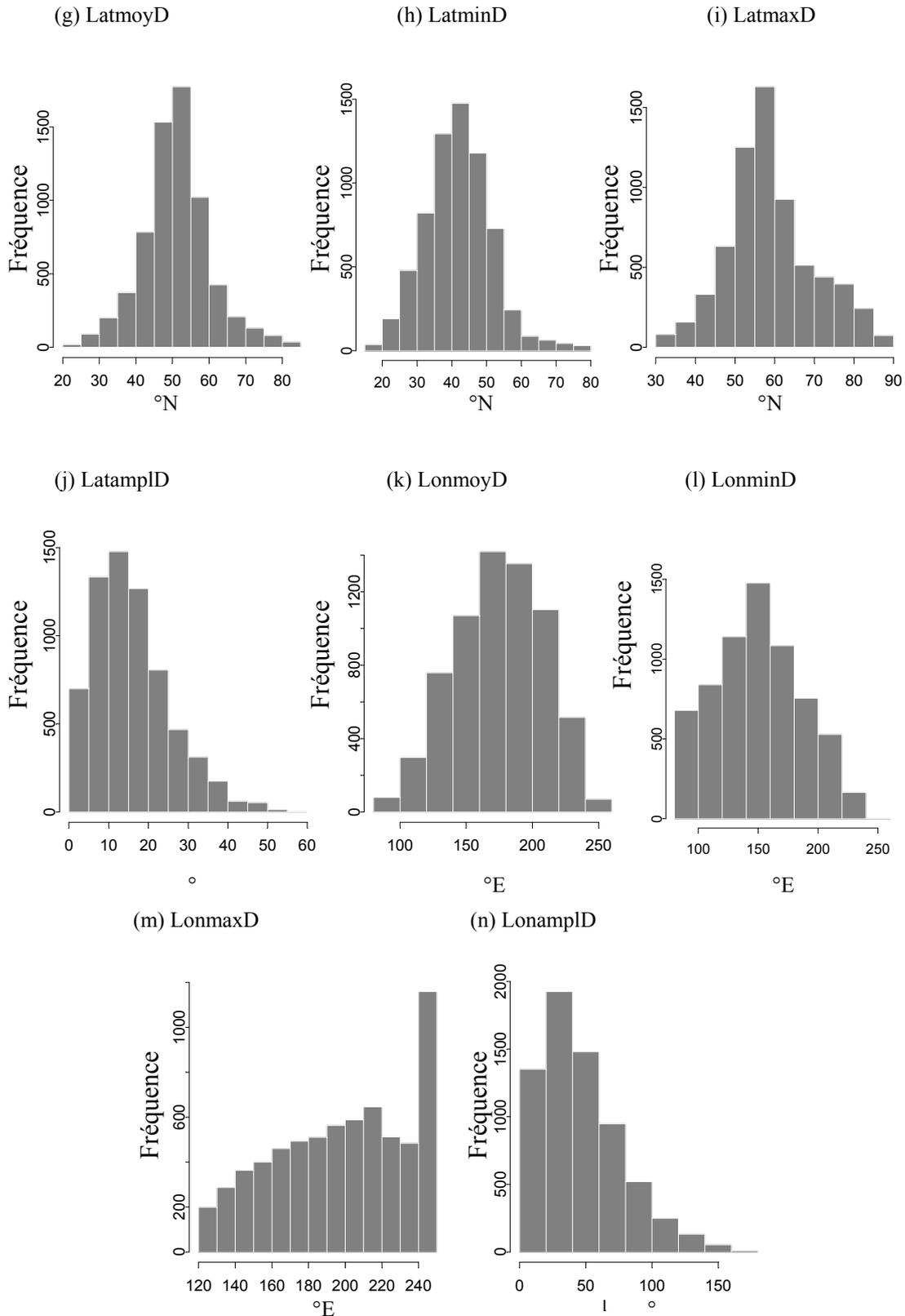


Figure 2.2. Histogrammes des caractéristiques des dépressions

Les caractéristiques spatiales en latitude montrent que les centres des dépressions concernent les régions relativement septentrionales. Les latitudes moyennes (LatmoyD) couvertes varient entre 46°N et 56°N (médiane = 51°N), avec des latitudes minimales (LatminD) atteintes se situant entre 37°N et 50°N et des latitudes maximales (LatmaxD) entre

52.5°N et 65°N (maximum=87.5°N). Les latitudes minimales atteintes les plus faibles (inférieures à 25°N) résultent généralement des cyclones tropicaux déviés dans les moyennes latitudes par la circulation extra-tropicale. L'amplitude latitudinale des trajectoires (LatampID) varie en moyenne entre 10 et 22° (médiane = 15°) avec un minimum absolu observé de 0° correspondant aux systèmes stationnaires.

Les caractéristiques spatiales relatives à l'espace couvert en longitude montrent que les dépressions circulent en moyenne (LonmoyD) entre 150°E et 200°E (médiane = 176°E), avec des longitudes minimales (LonminD, information sur le début des trajectoires) se situant pour la plupart sur l'Ouest et le centre du Pacifique Nord, entre 125°E et 177.5°E, et des longitudes maximales (LonmaxD, fin de trajectoire), sur le centre et l'Est du Pacifique Nord, entre 170°E et 230°E. L'amplitude longitudinale des trajectoires des dépressions (LonampID) varie généralement entre 25 et 65° (médiane = 42°). Les caractéristiques spatiales en longitude sont évidemment déterminées par l'espace géographique à l'intérieur duquel nous avons établi les trajectoires mais également par les filtres spatiaux en longitude (120°E-250°E) que nous avons appliqués. L'influence est plus forte pour les longitudes des fins de trajectoire (LonmaxD, Figure 2.2.m) que pour celles de début (LonminD, Figure 2.2.l), car la limite orientale du filtre est identique à celle de l'espace géographique de départ (80°E-250°E). Dans la réalité, il est vrai que la plupart des dépressions du Pacifique Nord se combent au contact de la Cordillère nord-américaine, spécifiquement dans le Golfe de l'Alaska (ex : Gulev et al. 2001), mais certaines d'entre elles franchissent les reliefs puis traversent le continent. En revanche, à l'ouest de notre secteur, le filtre spatial est de 40 degrés plus à l'est que la limite occidentale de l'espace géographique de départ, par conséquent, l'influence du seuil de filtrage est nettement plus faible.

2.1.2. Les anticyclones

Au cours de la période d'étude, 9160 trajectoires de centres anticycloniques supérieurs à 1015 hPa, d'une durée de vie supérieure à 3 jours et ayant circulé sur le Pacifique Nord durant au moins 1 jour, ont été détectés. Le nombre de trajectoires est de 28% supérieur à celui des dépressions. Comme nous l'avons évoqué précédemment (cf. Chapitre 1) le rapport entre les fréquences des dépressions et des anticyclones est en fonction de l'espace géographique considéré et par le fait que le champ de pression au sein des masses anticycloniques n'est pas aussi homogène qu'au sein des vortex dépressionnaires. Les masses anticycloniques présentent donc une variabilité spatiale de leur pression, induisant souvent plusieurs maxima locaux de pression au sein d'une même masse. Cette réalité se manifeste grandement à l'échelle synoptique, en particulier au cours de la saison hivernale et sur le continent asiatique, par une énorme aire anticyclonique (anticyclone de Sibérie), composée de plusieurs noyaux. La plupart d'entre eux se propagent sur le Pacifique Nord-Ouest, à l'est de 120°E (cf. sections 3 et 4 de ce chapitre). Nous verrons dans le chapitre 3 que dans le Pacifique Nord-Est et au cours de la saison hivernale, les fréquences des dépressions et des anticyclones sont équilibrées en moyenne.

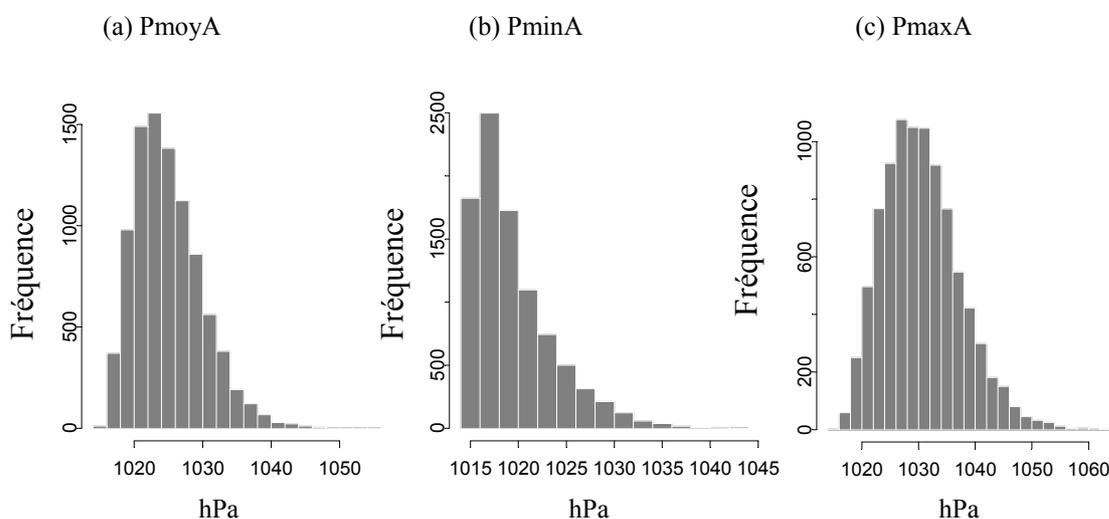
Les anticyclones présentent des pressions moyennes (PmoyA) variant majoritairement entre 1021 hPa et 1027 hPa (médiane = 1024 hPa) (Tableau 2.2). Les pressions maximales atteintes (PmaxA) avoisinent les 1029 hPa, comprises généralement entre 1025 hPa et 1034 hPa. Seulement 4 anticyclones ont atteint une pression supérieure ou égale à 1060 hPa et le maximum observé est de 1063 hPa le 13 janvier 1958 dans la région du Lac Baïkal. Les

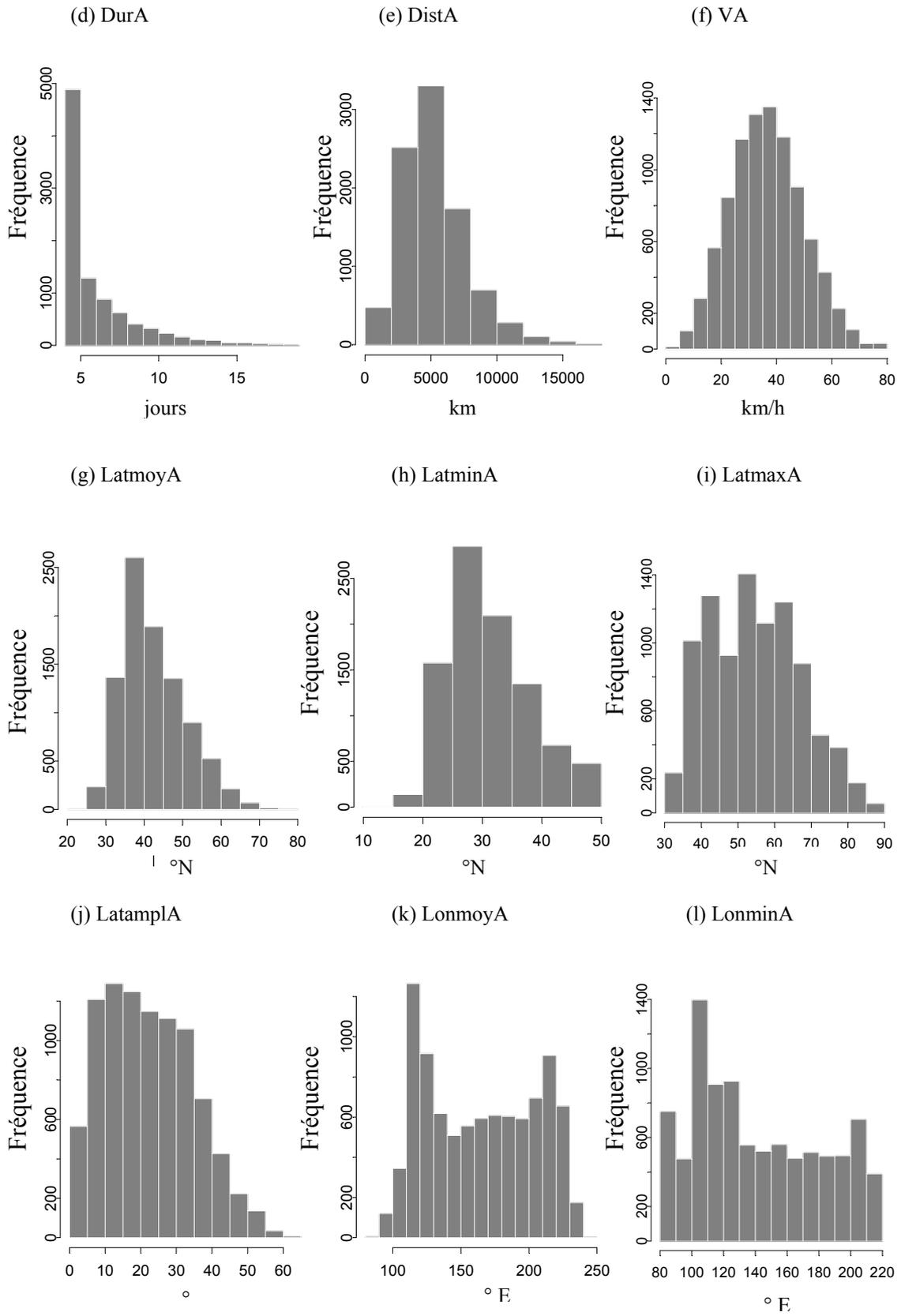
pressions minimales atteintes se situent généralement entre 1016 et 1021 hPa (comme pour les dépressions, le seuil de 1015 hPa choisi pour l'établissement des trajectoires des anticyclones influence les pressions minimales atteintes ainsi que les pressions moyennes au cours de trajectoires, Figure 2.3).

	min	Q25	Q50	Q75	max
PmoyA	1015	1021	1024	1027	1054
PminA	1015	1016	1018	1021	1042
PmaxA	1015	1025	1029	1034	1063
DurA	4	4	5	7	19
DistA	0	3593	4871	6474	18000
VA	0	27	36	45.23	83
LatmoyA	24	36	41	48	77
LatminA	12.5	27.5	32.5	37.5	47.5
LatmaxA	32.5	45	55	65	87.5
LatamplA	0	12.5	22.5	32.5	65
LonmoyA	88	125	164	202	240
LonminA	82.5	107.5	132.5	177.5	220
LonmaxA	115.5	140	186	222.5	247.5
LonamplA	0	20	35	55	162.5

Tableau 2.2. Paramètres de dispersion des caractéristiques des trajectoires des anticyclones : minimum (min), premier (Q25), deuxième (Q50), troisième (Q75) quartiles et maximum (max)

La durée moyenne des trajectoires des systèmes anticycloniques (DurA) est de l'ordre de 4 à 7 jours (médiane=5). Ils ont donc tendance à avoir une durée de vie légèrement supérieure à celle des dépressions (4 à 6 jours). La durée maximale observée est de 19 jours et 170 anticyclones (1.8%) ont une durée de vie supérieure ou égale à 15 jours. Le fait que la durée maximale des anticyclones ne dépasse pas les 19 jours pourrait paraître surprenant car il communément admis que certains noyaux anticycloniques peuvent persister toute une saison. Ceci est sans doute une limite de l'algorithme qui favorise le déplacement vers l'est et de manière induite l'interruption des trajectoires (cf. Chapitre 1 section 1.2.3).





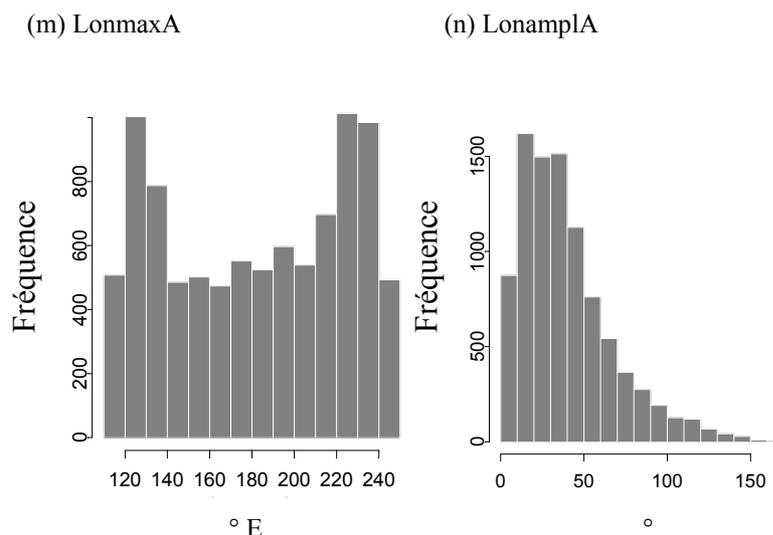


Figure 2.3. Histogrammes des caractéristiques des anticyclones

Les anticyclones parcourent généralement des distances (DistA) entre 3500 et 6500 km environ, légèrement supérieures à celles des dépressions (entre 3200 et 6000 km). Leur vitesse de déplacement (VA) est similaire à celle des dépressions, variant entre 27 et 45 km/h. Seulement 2 systèmes sont absolument stationnaires au cours de leur existence et 5 anticyclones présentent une vitesse égale à 83 km/h (seuil distance à 2000 km, comme pour les dépressions, ces trajectoires ne sont vraisemblablement pas justes car elles doivent confondre au moins 2 systèmes anticycloniques)

Le domaine de circulation en latitude des anticyclones (LatmoyA) est nettement plus méridional que celui des dépressions, avec des valeurs s'échelonnant majoritairement entre 36°N et 48°N et comme valeur médiane 41°N (contre 51°N pour les dépressions). Les latitudes minimales atteintes (LatminA, celles généralement de fin de trajectoire) varient en moyenne entre 25.5°N et 37.5°N et les latitudes maximales (LatmaxA) entre 45°N et 65°N. L'amplitude latitudinale des trajectoires des anticyclones (LatamplA) varie généralement entre 12.5 et 32.5° (médiane = 22.5°) et est donc plus forte que celles des dépressions (médiane = 15°).

Les caractéristiques moyennes en longitude (LonmoyA) nous informent que les anticyclones circulent surtout sur la partie occidentale du Pacifique Nord, entre 125°E et 202°E avec une valeur médiane de 164°E. Les longitudes minimales atteintes (LonminA), illustrant de manière générale l'origine des trajectoires, montrent que la plupart des anticyclones proviennent des régions se situant entre 107.5°E et 177.5°E (Asie orientale / Pacifique occidental). Les systèmes atteignent des longitudes maximales (LonmaxA) entre 140°E et 222.5°E. Les figures 2.3 k, l, m, montrent qu'il existe 2 domaines préférentiels de transit des anticyclones. Le premier à l'ouest de 140°E approximativement, correspond aux influences de l'Anticyclone semi-permanent de Sibérie et l'autre, à l'est de 200°E correspond aux anticyclones de trajectoires Béring/Alaska ainsi qu'à la présence fréquente, et surtout en été, de l'anticyclone sub-tropical dont la position se situe souvent dans les moyennes latitudes (entre 30°N et 60°N). Le domaine longitudinal (LonamplA) de transit des anticyclones s'étire majoritairement sur 20° à 55° (médiane = 35°) et est donc légèrement moins large que celui des dépressions (médiane = 42°).

De manière générale, sur notre espace géographique et selon l'algorithme, les dépressions ont une durée d'existence légèrement moins longue que celle des anticyclones et parcourent des distances moins grandes. En revanche leur vitesse de déplacement est similaire. Les dépressions circulent sur l'ensemble du Pacifique Nord mais à des latitudes plus septentrionales que les anticyclones. Cette observation rejoint les analyses antérieures (ex : Pettersen, 1956 ; Klein, 1957 ; Taljaard, 1967 pour l'Hémisphère Sud ; Zishka et Smith, 1980 ; Wallace et al., 1988). Deux espaces de transit préférentiel apparaissent pour les anticyclones, le premier se situe sur l'Ouest et le second sur l'Est du Pacifique Nord (ex : Pettersen, 1956 ; Zhang et Wang, 1997). Nous devons également rappeler que les statistiques des caractéristiques présentées, tant pour les dépressions que les anticyclones, sont déterminées par les critères choisis comme définissant les systèmes transitoires (cf. Chapitre 1). En revanche, la variabilité temporelle de ces caractéristiques ne dépend que faiblement du seuil de durée utilisé lors du filtrage des trajectoires (cf. Partie 3).

2.2. Variations inter-mensuelles moyennes des caractéristiques des dépressions et des anticyclones

La période couverte s'étend de janvier 1950 à décembre 2001 et comprend par conséquent 624 mois. L'analyse des paramètres de fréquence et intensité (section 2.2.1), de durée, de distance parcourue et de vitesse de déplacement (section 2.2.2) ainsi que des caractéristiques spatiales en latitude et longitude (section 2.2.3) des trajectoires, nous permettra de distinguer les fluctuations inter-mensuelles de l'activité des systèmes transitoires au cours de l'année.

2.2.1. Paramètres de fréquence et intensité

La fréquence des dépressions est en moyenne de 10.6 par mois (Tableau 2.3) et sa variation au cours de l'année est peu significative (Figure 2.4), les plus fortes valeurs oscillant entre 11.3 et 11.4 d'avril à juin et les plus faibles entre 8.9 et 9.9 en juillet et août. Klein (1958) a montré que les fréquences des dépressions varient faiblement au cours de l'année et selon ses analyses, elles sont légèrement plus nombreuses au printemps et en automne, à l'échelle de l'Hémisphère Nord.

La fréquence moyenne des anticyclones (14.5) est plus forte que celle des dépressions et varie davantage au cours de l'année. A partir de mai la fréquence diminue rapidement pour atteindre un minimum de 8.8 en juillet. A la fin de l'été (septembre) le nombre d'anticyclones augmente rapidement et c'est plus particulièrement en automne qu'ils sont les plus nombreux (supérieurs à 15 / mois) avec le maximum en octobre et en novembre (18.6 et 18.5). Puis, les valeurs moyennes oscillent entre 17 et 15 de décembre à avril.

L'amplitude annuelle des fréquences des dépressions est donc très faible et est estimée à 2.5 (différence entre juin et juillet), comparativement à celle des anticyclones qui excède 9 systèmes (octobre-juillet). Nous pouvons noter que de mai à août le nombre des dépressions et des anticyclones est relativement équilibré autour de 10 systèmes.

	Dépressions		Anticyclones	
	Moyenne	Ecart-type	Moyenne	Ecart-type
F	10.6	2.38	14.5	4.6
Pmoy	995.1	5.47	1025.1	2.2
Pmin	987.2	7.7	1019.8	1.4
Pmax	1002.3	3	1030.4	3.6
Dur	5.8	0.8	6.7	0.8
Dist	4548	819.1	5203	815.9
V	32.7	5.4	32.4	5.2
Latmoy	53.6	4.7	43.1	2.3
Latmin	45.8	4.8	33	2.4
Latmax	62.2	5.2	56	3.8
Latampl	16.4	3.9	22.9	4.5
Lonmoy	170	14.7	168.4	17
Lonmin	146.5	17.6	146.3	19
Lomax	191.8	15	186.4	15
Lonampl	45.3	14.1	40	9

Tableau 2.3. Statistiques moyennes mensuelles des caractéristiques des dépressions et anticyclones (1950-2001). Cf. Annexes, Tableau A2.1 et A2.2.

C'est de novembre à mars que les cyclones extra-tropicaux sont les plus intenses (Figure 2.5) présentant des pressions moyennes inférieures à 995 hPa (ex : 988 hPa en janvier), avec des pressions minimales atteintes inférieures à 987 hPa (ex : 978 hPa en janvier et février), en opposition au printemps et à l'été où les pressions moyennes sont supérieures à 995 hPa (ex : juin = 1000 hPa, juillet = 1002 hPa et août = 1001 hPa), et les pressions minimales atteintes supérieures ou égales à 987 hPa (ex : juin = 995 hPa, juillet = 998, août = 996 hPa). Au cours de l'année, l'amplitude des pressions (différence entre juillet et janvier) des cyclones extra-tropicaux est donc de 14 hPa en moyenne et de 20 hPa pour les minimales atteintes au cours des trajectoires.

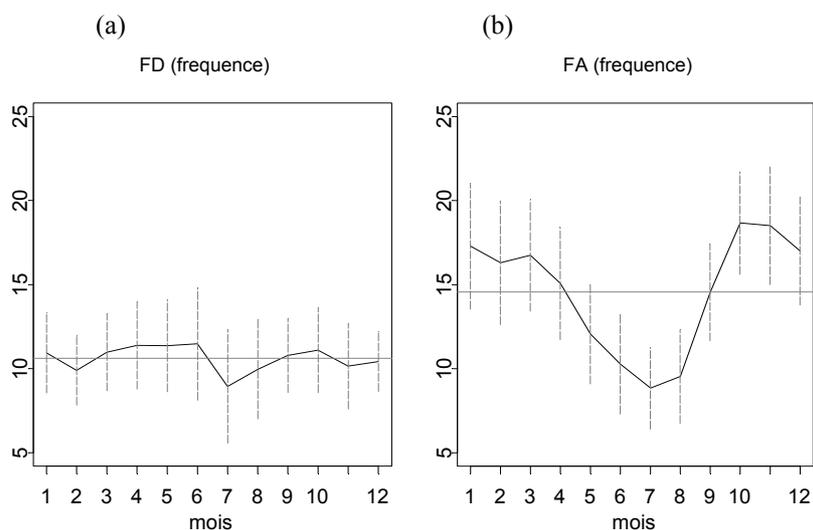


Figure 2.4. Fréquences moyennes mensuelles des dépressions (a) et des anticyclones (b). Segments verticaux=écart-type

Les anticyclones ont une pression en moyenne de 1025.1 hPa au cours de leur trajectoire, et présentent une plus forte intensité à partir de novembre jusqu'en mars (ex : 1028 hPa en décembre) avec des pressions maximales atteintes supérieures à 1030 hPa (ex : 1035 en décembre, janvier et février). La saison de plus faible intensité s'étend d'avril à octobre

avec un minimum en juin et en septembre (P_{moy} : 1023 hPa et P_{max} : 1027 hPa). Au cours de l'année, la pression des anticyclones varie moins fortement que celle des dépressions, d'environ 5 hPa en moyenne (contre 14 hPa pour les dépressions) et de 8 hPa pour les pressions maximales atteintes (contre 20 hPa pour les pressions minimales atteintes des dépressions).

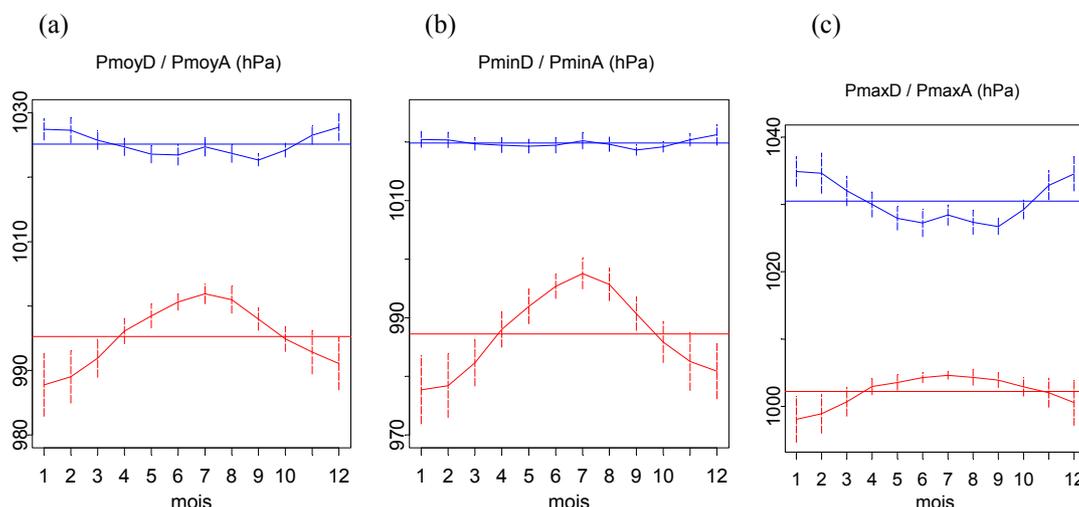


Figure 2.5. Pressions moyennes mensuelles des dépressions (rouge) et des anticyclones (bleu), (a) pression moyenne au cours des trajectoires, pression minimale (b) et maximale (c) atteinte. Segments verticaux=écart-type

2.2.2. Paramètres de durée des trajectoires, distance parcourue et vitesse de déplacement

La durée de vie moyenne des dépressions est de 5.8 jours et varie très faiblement. C'est à partir du mois de juin et jusqu'au mois de décembre que leur persistance est supérieure à la moyenne annuelle avec un maximum en décembre de 6.4 jours (Figure 2.6). Par contre, de janvier à mai, elles ont une durée de vie moins longue surtout en janvier avec 5.06 jours de persistance moyenne. Par conséquent, entre décembre et janvier, on a une différence de 1 jour environ.

La durée des anticyclones est légèrement supérieure à celle des dépressions en moyenne (6.7 jours), et varie également très peu au cours de l'année : 6.05 jours en janvier, le minimum, et 7.16 jours en juin le maximum. C'est de janvier à mars qu'ils ont une durée d'existence plus faible, puis, d'avril à décembre, leur persistance est légèrement supérieure ou égale à la moyenne annuelle.

La distance moyenne annuelle parcourue par les dépressions est de 4548 km et c'est au printemps (à partir du mois d'avril) jusqu'en automne (novembre) qu'elle est la plus forte, excédant 4800 km comme en juin (4945 km), juillet (4837 km) et septembre (4825 km). Inversement au cours du mois de décembre et jusqu'au mois de mars, les distances parcourues sont plus faibles avec un minimum de 4111 km en décembre. Entre les mois de juillet et décembre, on observe donc une différence de 834 km parcourus.

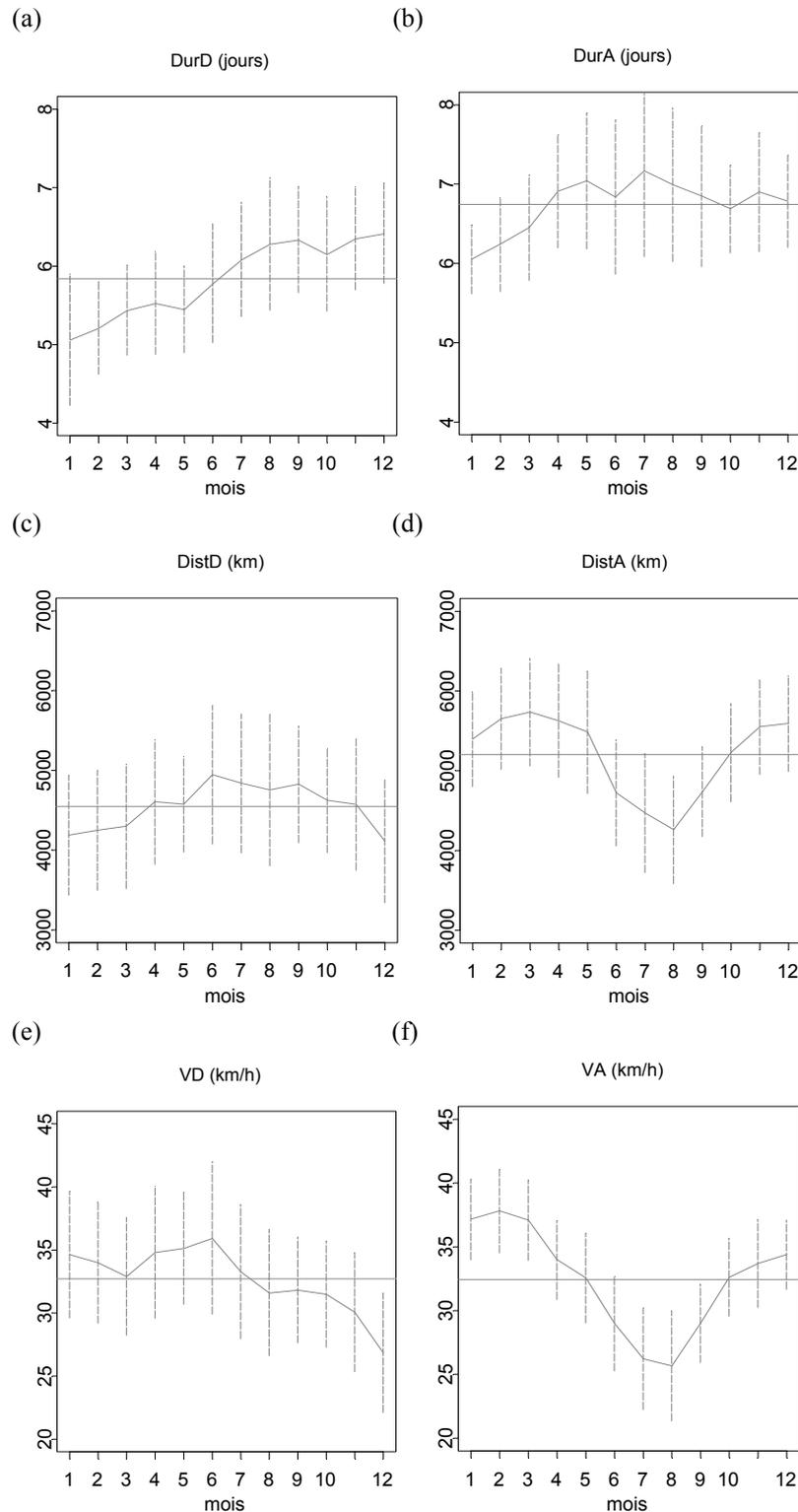


Figure 2.6. Durée moyenne mensuelle des trajectoires des dépressions et des anticyclones (a et b), distance parcourue (c et d), vitesse de déplacement (e et f). Segments verticaux=écart-type

Leur vitesse de déplacement est de 32,7 km/h en moyenne et c'est d'août à décembre qu'elles se déplacent le moins rapidement avec un minimum en décembre de 26.8 km/h, et à l'inverse, à partir du mois de janvier, les vitesses moyennes augmentent brutalement et atteignent leur maximum en mai et juin avec 35.1 et 35.9 km/h respectivement. L'amplitude de vitesse est donc de 9.1 km/h au cours de l'année (différence entre décembre et juin).

Les anticyclones parcourent des distances supérieures à celles des dépressions, avec 5203 km en moyenne, à une vitesse de 32.4 km/h (similaire à celle des dépressions). Les distances couvertes sont les plus fortes à partir de l'automne (octobre) jusqu'au printemps (mai) avec un maximum en mars (5732 km). En revanche, de juin à septembre, elles sont inférieures à la moyenne annuelle avec la plus faible valeur en août (4259 km). La différence est donc relativement importante entre les mois de mars et août, se chiffrant à 1473 km. Leur vitesse de déplacement est plus forte d'octobre à mai avec le maximum en février (37.8 km/h). A partir de ce mois, elle diminue progressivement pour atteindre le minimum en août avec 25.7 km/h. La différence de vitesse, entre les mois de février et d'août, est relativement importante : 12.1 km/h et cette variation est supérieure à celle des dépressions (9.1 km/h).

2.2.3. Paramètres spatiaux en latitude et longitude

Les dépressions circulent en moyenne à 53.5°N (LatmoyD), avec une extension moyenne de fréquentation s'étendant entre 45.8°N (LatminD) et 62.2°N (LatmaxD). C'est à partir du mois d'août et jusqu'en décembre que les cyclones extra-tropicaux ont en moyenne des trajectoires davantage septentrionales (Figure 2.7), avec un maximum en octobre de 57.7°N (49.7°N : LatminD et 66.4°N : LatmaxD).

A partir du mois de novembre, les dépressions commencent progressivement à adopter des trajectoires plus méridionales pour atteindre une latitude moyenne de 50.8°N et un espace de fréquentation se situant entre 43.4°N et 58.5 °N en moyenne en février. L'amplitude latitudinale du déplacement de chaque centre dépressionnaire couvre en moyenne 16.45° (LatamplD) et varie peu au cours de l'année. C'est en été qu'il est le plus large avec un maximum en juillet (18.9°). Inversement, à partir du milieu de l'automne et en hiver, l'espace est légèrement plus restreint avec un minimum en novembre et en janvier de 15°.

L'espace en latitude couvert par les anticyclones s'étire en moyenne de 56°N à 33°N (LatamplA = 23°) et est centré sur 43.1°N. C'est de novembre à mars que le déplacement latitudinal est le plus important, avec des trajectoires dont l'origine est davantage septentrionale et le déclin plus méridional, comme le mois de février (LatamplA=27.9°) où les LatminA sont de 30.9°N et les LatmaxA de 58.8°N. Inversement, d'avril à octobre, l'espace de fréquentation en latitude des anticyclones est plus restreint et légèrement décalé vers le nord : les LatmaxA sont légèrement plus faibles et les LatminA atteintes sont davantage septentrionales (exemple en août : LatampA=19°, LatmoyA=44.4°N).

Les caractéristiques spatiales en longitude, nous informent que l'activité dépressionnaire dans le Pacifique Nord se situe en moyenne annuelle à la longitude de 170°E (LonmoyD) avec un espace couvert allant de 146.5°E (LonminD) jusqu'à 168.2°O (LonmaxD). C'est à partir du mois d'octobre et jusqu'au mois de mars (Figure 2.8) que les dépressions ont un domaine de circulation plus oriental avec un maximum en février de 178°O en moyenne, compris entre 163°E (LonminD) et 161°O (LonmaxD). A partir du mois d'avril et jusqu'au mois de septembre, les trajectoires tendent à concerner davantage la partie occidentale du secteur en particulier pour le mois de juillet (LonmoyD=155°E, LonminD=129°E, LatmaxD=178°E). L'amplitude moyenne annuelle en longitude est de 45.3° et c'est à partir d'avril jusqu'en novembre qu'elle est la plus forte avec un maximum et octobre de 52.4°. Puis elle diminue rapidement pour atteindre 35.7° en février.

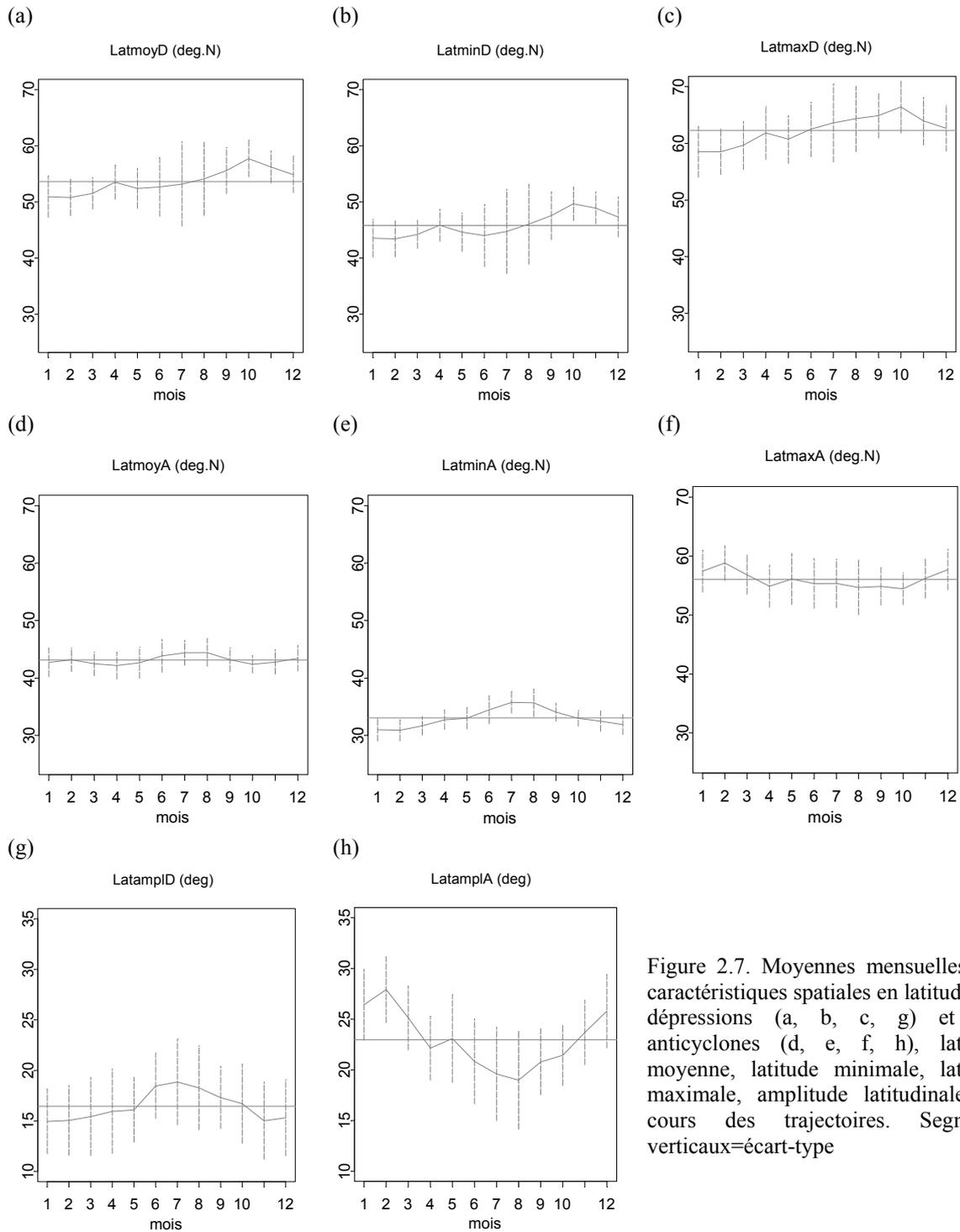


Figure 2.7. Moyennes mensuelles des caractéristiques spatiales en latitude des dépressions (a, b, c, g) et des anticyclones (d, e, f, h), latitude moyenne, latitude minimale, latitude maximale, amplitude latitudinale, au cours des trajectoires. Segments verticaux=écart-type

D’octobre à avril, l’activité anticyclonique concerne davantage le Pacifique Nord-Ouest. En janvier et février les trajectoires atteignent en moyenne 151°E et sont comprises dans un espace allant de $129^{\circ}\text{E}/128^{\circ}\text{E}$ (LonminA janvier/février) à $170^{\circ}\text{E}/169^{\circ}\text{E}$ (LonmaxA janvier/février respectivement). Mais c’est également au cours des mois d’octobre à avril que la couverture en longitude est le plus large (LonamplA $> 40^{\circ}$). Inversement, de juin à septembre, les trajectoires des anticyclones concernent un espace plus réduit et décalé vers l’Est avec une position la plus orientale spécifiquement au cours du mois de juillet (LonmoyA = 167°O , LonminA = 174.3°E , LonmxA = 153°O , LonamplA = 32.4°).

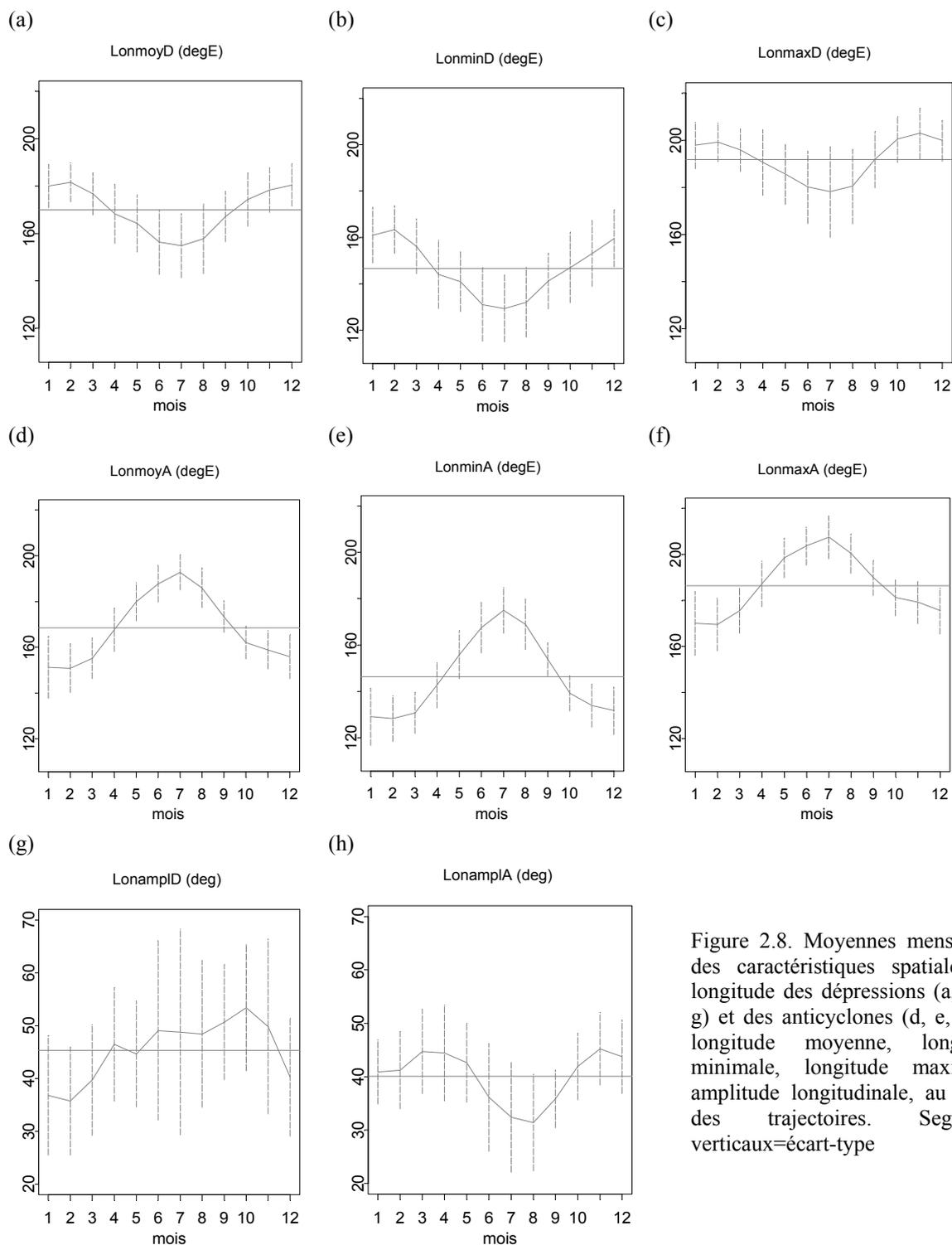


Figure 2.8. Moyennes mensuelles des caractéristiques spatiales en longitude des dépressions (a, b, c, g) et des anticyclones (d, e, f, h), longitude moyenne, longitude minimale, longitude maximale, amplitude longitudinale, au cours des trajectoires. Segments verticaux=écart-type

Au cours de l'année, les variations inter-mensuelles des caractéristiques des dépressions et des anticyclones des moyennes latitudes du Pacifique Nord ne sont pas toujours significatives. On ne distingue pas, par conséquent de cycle annuel (ex : fréquence des dépressions). Pour certaines caractéristiques comme les pressions ou l'espace couvert en longitude, l'évolution au cours de l'année apparaît en opposition entre les dépressions et les anticyclones. Dans la section suivante (2.3) nous allons étudier le cycle annuel de l'activité transitoire (dépressionnaire / anticyclonique) en considérant l'ensemble des paramètres précédemment exposés et tenter de déterminer la saisonnalité.

2.3. Description de la saisonnalité de l'activité dépressionnaire / anticyclonique

Les observations précédentes des caractéristiques des systèmes transitoires, nous ont permis de distinguer que de manière générale, au cours du mois de janvier, l'activité dépressionnaire et anticyclonique est intense (pression centrale moyenne), alors que le mois d'août se caractérise par une plus faible activité. Dans le but de déterminer plus précisément la saisonnalité de l'activité transitoire du Pacifique Nord, nous avons analysé simultanément l'ensemble des paramètres moyens mensuels relatifs aux dépressions et anticyclones (section 2.3.1), afin de définir les mois caractérisant la saison hivernale (section 2.3.2), estivale (section 2.3.3) et les saisons de transition (section 2.3.4).

2.3.1. Détermination de la saisonnalité

Nous avons standardisé les valeurs moyennes mensuelles de toutes les variables relatives aux dépressions et aux anticyclones ([moyenne mensuelle-moyenne annuelle] / écart-type moyen annuel), afin de faciliter d'une part la définition des mois dont les valeurs sont supérieures ou inférieures à la moyenne annuelle et d'autre part la comparaison des informations entre elles.

En comparant l'ensemble des paramètres relatifs aux dépressions et aux anticyclones, ce sont les mois de janvier (orange) et août (bleu) qui sont le plus fréquemment en opposition (Tableau 2.4) avec, par exemple, des dépressions plus creuses et des anticyclones plus forts en janvier qu'en août, associés à des vitesses de déplacement plus fortes et plus faibles respectivement. Les mois de février et mars présentent les mêmes caractéristiques que janvier à l'exception des fréquences des dépressions (pour février) et les pressions minimales atteintes par les anticyclones (pour mars). Etant donné que les fréquences des dépressions varient très peu au cours de l'année, ce paramètre, considéré indépendamment de la pression centrale des systèmes, ne nous permet pas de définir la saisonnalité. Février représente le deuxième mois où les dépressions sont les plus creuses et les autres paramètres révèlent une activité proche de celle de janvier (sauf pour la fréquence des dépressions qui est plus faible que la moyenne annuelle). Enfin, pour le mois de mars, les critères sont généralement en « phase hivernale », proche du mois de janvier.

A partir d'avril, les paramètres, tant pour l'activité dépressionnaire qu'anticyclonique, entrent dans la « phase estivale ». Cette période de transition est plus longue pour les dépressions (jusqu'en juin) que pour les anticyclones (jusqu'en mai). Le mois de juillet caractérise la « phase estivale » de l'activité anticyclonique mais, en considérant l'ensemble des paramètres, y compris ceux des dépressions, le mois d'août est le plus homogène, puis venant en deuxième position, septembre, et en troisième juillet. Enfin, à partir d'octobre, l'activité dépressionnaire / anticyclonique entre en « phase hivernale ». Cette transition est encore une fois plus progressive pour les dépressions (jusqu'en décembre) que pour les anticyclones dont les caractéristiques sont généralement en phase hivernale dès le mois de novembre.

(a) Dépressions

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
FD	0.4	-0.9	0.5	1.0	0.9	1.1	-2.2	-0.9	0.2	0.6	-0.6	-0.3
PmoyD	-1.6	-1.4	-0.7	0.2	0.7	1.2	1.4	1.2	0.6	-0.1	-0.6	-0.9
PminD	-1.4	-1.3	-0.7	0.1	0.7	1.2	1.5	1.3	0.5	-0.2	-0.7	-1.0
DurD	-1.7	-1.4	-0.9	-0.7	-0.8	-0.1	0.5	0.9	1.1	0.7	1.1	1.2
DistD	-1.4	-1.1	-0.9	0.2	0.1	1.5	1.1	0.8	1.0	0.3	0.1	-1.6
VD	0.8	0.5	0.1	0.9	1.0	1.3	0.2	-0.5	-0.4	-0.5	-1.1	-2.4
LatmoyD	-1.3	-1.4	-1.0	-0.1	-0.6	-0.5	0.0	0.2	0.9	2.0	1.3	0.6
LatminD	-1.1	-1.2	-0.8	-0.1	-0.6	-0.9	-0.5	0.1	0.9	1.9	1.5	0.7
LatmaxD	-1.6	-1.6	-1.1	-0.2	-0.7	0.1	0.5	0.8	1.1	1.7	0.7	0.2
LatampID	-1.1	-1.0	-0.7	-0.4	-0.3	1.5	1.7	1.3	0.6	0.2	-1.0	-0.8
LonmoyD	1.1	1.2	0.7	-0.2	-0.6	-1.4	-1.6	-1.3	-0.3	0.5	0.9	1.1
LonminD	1.2	1.5	0.8	-0.2	-0.5	-1.3	-1.5	-1.3	-0.5	0.0	0.6	1.1
LonmaxD	0.7	0.9	0.5	-0.2	-0.7	-1.4	-1.6	-1.3	-0.1	1.0	1.3	0.9
LonampID	-1.5	-1.7	-1.0	0.2	0.0	0.7	0.6	0.6	1.0	1.5	0.8	-0.9

(b) Anticyclones

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
FA	0.5	0.2	0.6	0.3	-0.6	-1.2	-1.7	-1.4	0.2	1.4	1.1	0.6
PmoyA	1.4	1.3	0.3	-0.3	-0.9	-1.0	-0.2	-0.9	-1.5	-0.6	0.8	1.6
PmaxA	1.5	1.4	0.5	-0.2	-0.8	-1.1	-0.7	-1.0	-1.3	-0.4	0.8	1.4
DurA	-2.2	-1.6	-0.9	0.5	0.9	0.3	1.3	0.8	0.3	-0.2	0.5	0.1
DistA	0.4	0.9	1.1	0.9	0.6	-1.0	-1.5	-1.9	-0.9	0.1	0.7	0.8
VA	1.2	1.4	1.2	0.4	0.0	-0.9	-1.6	-1.7	-0.9	0.0	0.3	0.5
LatmoyA	-0.6	-0.1	-0.9	-1.3	-0.7	1.0	1.7	1.8	0.0	-1.0	-0.5	0.4
LatminA	-1.3	-1.4	-0.9	-0.2	0.0	0.9	1.7	1.7	0.6	0.0	-0.4	-0.7
LatmaxA	1.0	2.1	0.6	-0.9	0.0	-0.5	-0.5	-1.0	-0.9	-1.2	0.1	1.2
LatampIA	1.3	1.8	0.8	-0.3	0.0	-0.8	-1.2	-1.5	-0.8	-0.6	0.3	1.0
LonmoyA	-1.2	-1.2	-0.9	-0.1	0.8	1.3	1.7	1.2	0.3	-0.4	-0.7	-0.9
LonminA	-1.1	-1.1	-1.0	-0.2	0.6	1.3	1.7	1.4	0.5	-0.4	-0.8	-0.9
LonmaxA	-1.3	-1.3	-0.9	0.1	0.9	1.3	1.6	1.1	0.3	-0.4	-0.6	-0.9
LonampIA	0.2	0.3	1.0	0.9	0.6	-0.8	-1.6	-1.9	-0.9	0.4	1.1	0.8

Tableau 2.4: Variation inter-mensuelle (standardisées) des caractéristiques des dépressions (a) et des anticyclones (b), couleur orange = période de plus forte activité, de type hivernal, basée sur le mois de janvier, couleur bleue = période de plus faible activité, de type estival, basée sur le mois d'août.

La pression maximale et minimale atteintes par les dépressions et les anticyclones respectivement ont été supprimées de l'analyse car ces paramètres ne révèlent en rien l'intensité générale (effet trop important du seuil de pression, cf. figures 2.2 et 2.3).

Ainsi :

- les mois de janvier, février et mars présentent une homogénéité pour l'ensemble des paramètres et constituent la saison hivernale ;
- les mois de juillet, août et septembre présentent également une homogénéité et constituent la saison estivale ;
- les mois d'avril, mai et juin forment la saison de transition entre l'activité hivernale et estivale et les mois d'octobre, novembre et décembre, la saison de transition entre l'activité estivale et hivernale.

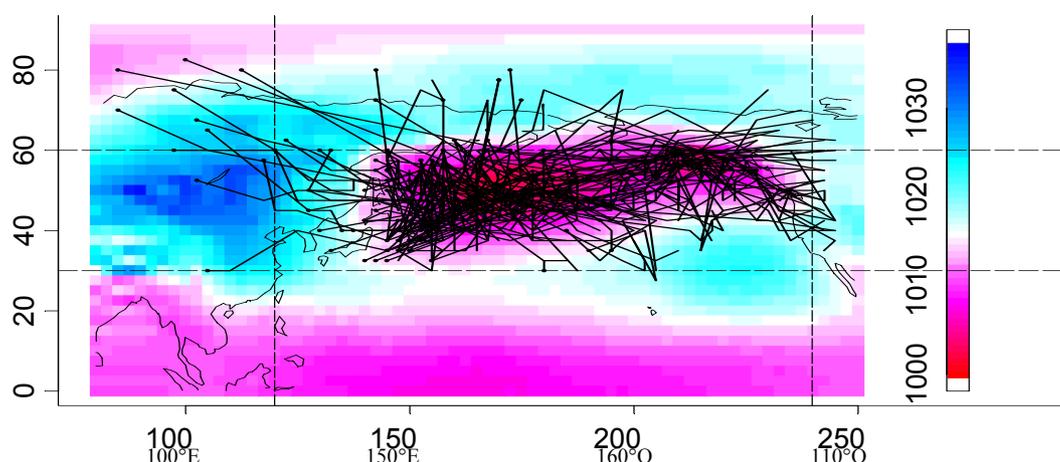
2.3.2. Saison hivernale

La saison hivernale est caractérisée par les mois de janvier à mars au cours desquels se manifeste une intensité plus forte des systèmes transitoires. Les dépressions et les anticyclones tendent à avoir une durée de vie plus courte et une vitesse de déplacement plus forte. Les dépressions couvrent des distances plus faibles alors que les anticyclones présentent des distances parcourues moyennes plus fortes. Les systèmes transitoires adoptent des trajectoires plus méridionales avec un espace couvert en latitude plus restreint pour les dépressions et au contraire plus large pour les anticyclones. Les cyclones des moyennes latitudes ont tendance à concerner la partie orientale de Pacifique Nord, avec un espace couvert en longitude plus réduit alors que celui des anticyclones est plus large et leurs trajectoires ont tendance à concerner davantage la partie occidentale de notre secteur (Japon).

La figure 2.9.a montre que les trajectoires des dépressions concernent fortement les secteurs allant de la région du Japon/Kamchatka jusque dans le Golfe de l'Alaska, avec une très forte fréquentation au niveau des Aléoutiennes. Peu de trajectoires sont observables sur le continent asiatique ainsi qu'aux latitudes supérieures à 60°N. Par conséquent, peu de dépressions ayant circulé sur le continent asiatique et/ou sur le Bassin Arctique, pénètrent dans le moyennes latitudes du Pacifique Nord. Nous remarquons également que certaines trajectoires prennent naissance à des latitudes relativement faibles, notamment au sud-est du Japon et au nord et nord-est de Hawaii (Pineapple Express, ex : Dettinger, 2004).

Durant la saison hivernale, les anticyclones concernent davantage la partie occidentale de notre secteur. Les trajectoires sont, en effet, très nombreuses sur le continent asiatique et se propagent jusqu'aux latitudes sub-tropicales, au niveau du Japon et de la Mer de Chine mais également plus à l'est, jusqu'à 180° environ. Les anticyclones adoptent, sur le continent, des trajectoires de composante méridienne nord-sud puis, au contact de l'océan, la composante devient davantage zonale, d'ouest en est. L'est du Pacifique est moins concerné par les trajectoires des anticyclones. Nous distinguons tout de même que ces trajectoires proviennent soit de l'ouest, via des latitudes inférieures à 45°N, soit par le Nord-Ouest de la Sibérie orientale et/ou de la région de Béring / Alaska. Enfin, nous remarquons que les trajectoires des anticyclones ne concernent que très peu la région des Aléoutiennes, qui elle, est fortement traversée par les centres dépressionnaires.

(a) Dépressions---JFM--- 1950-54



(b) Anticyclones---JFM---1950-54

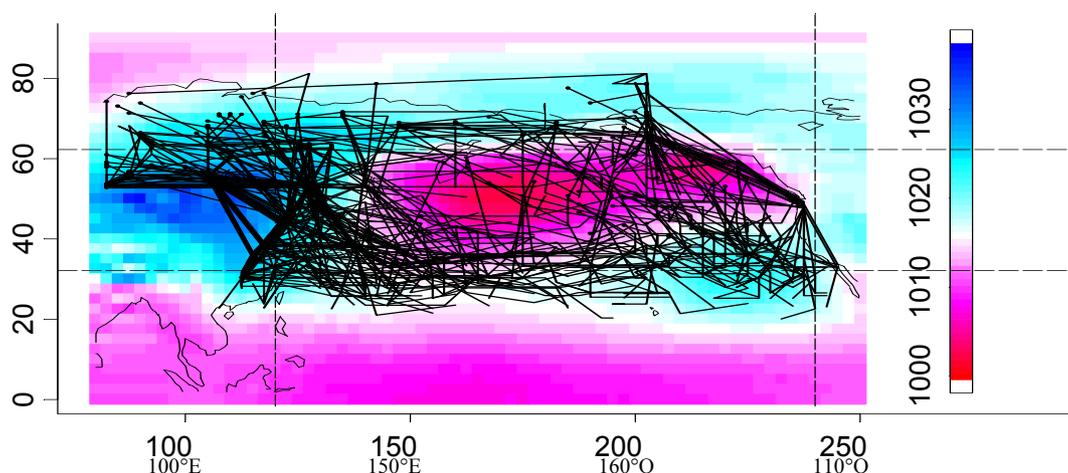
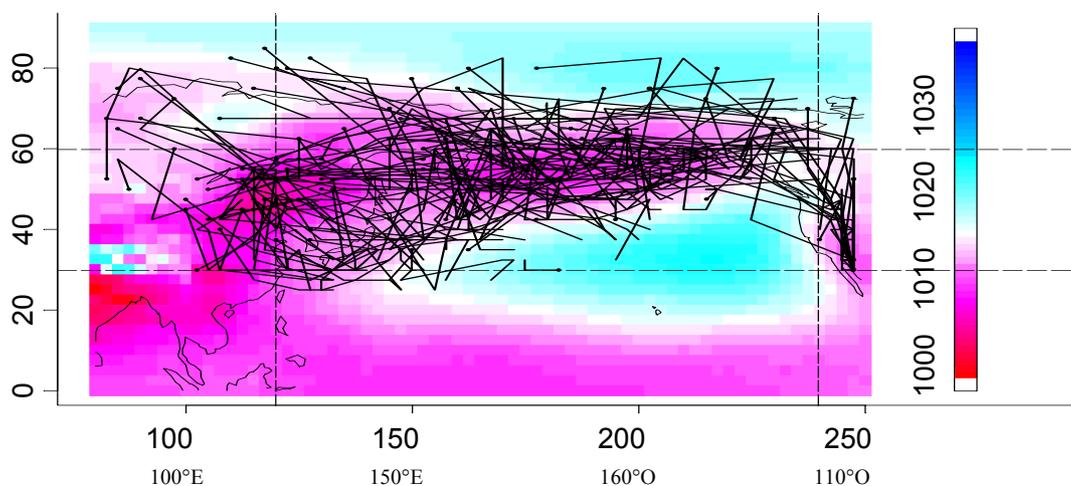


Figure 2.9. Exemples de trajectoires des dépressions (a) et des anticyclones (b), et PNM moyenne de 1950 à 1954 en JFM. Le symbole « * » matérialise le début de trajectoire.

2.3.3. Saison estivale

En juillet, août et septembre, l'activité dépressionnaire / anticyclonique est dans sa phase estivale. Les systèmes transitoires sont en général moins nombreux et moins intenses. Leur durée d'existence est plus longue et inversement leur vitesse de déplacement est plus faible. La distance parcourue au cours des trajectoires est plus grande pour les dépressions et plus courte pour les anticyclones. Leur transit est de manière générale plus septentrional (à l'exception du mois de juillet pour les dépressions). L'espace couvert en latitude et longitude est plus large pour les dépressions et inversement, moins large pour les anticyclones avec des trajectoires concernant davantage la partie occidentale du secteur pour les premières, et davantage la partie orientale pour les seconds.

(a) Dépressions---JAS--- 1950-54



(b) Anticyclones---JAS--- 1950-54

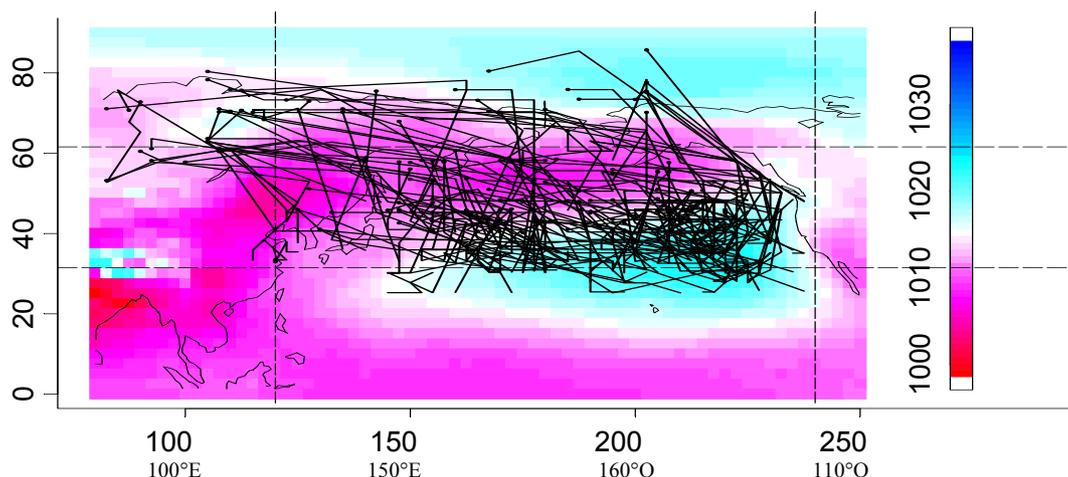


Figure 2.10. Exemples de trajectoires des dépressions (a) et des anticyclones (b), et PNM moyenne de 1950 à 1954 en JAS. Le symbole « * » matérialise le début de trajectoire.

En effet, la figure 2.10 montre que les dépressions prennent majoritairement naissance au sud du Japon et se propagent vers le nord jusqu'au niveau de la région des Aléoutiennes. L'origine de ces dépressions étant au sein des latitudes tropicales montre que nous capturons, en partie, les cyclones tropicaux qui se propagent jusque dans la zone tempérée (ex : Jones et al., 2003). La fréquence des trajectoires des dépressions est également plus importante qu'en hiver sur le continent asiatique.

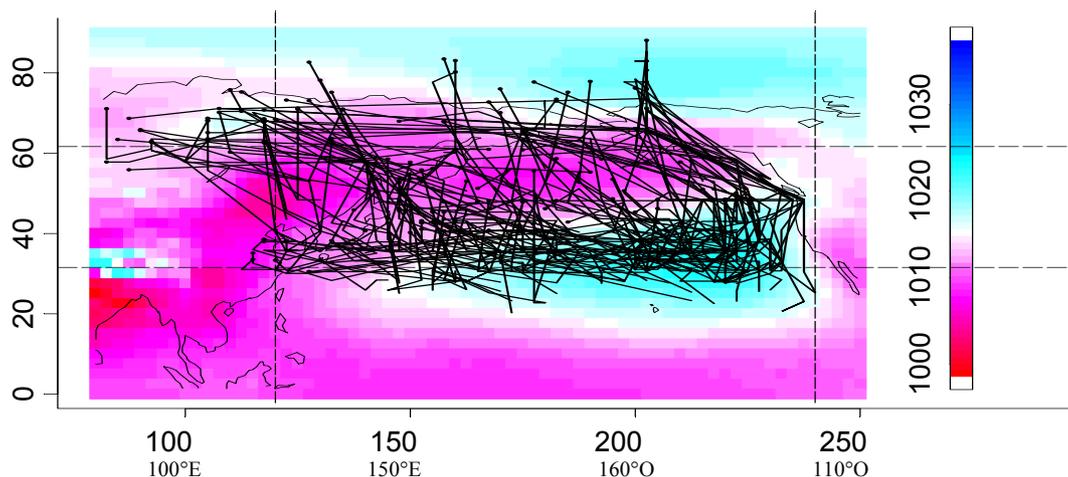
Comme l'ont observé Zishka et Smith (1980) sur l'Amérique du Nord et les océans environnants, les anticyclones adoptent des trajectoires plus zonales en été. Sur notre secteur, ils terminent quasiment tous leur trajectoire sur la partie orientale du Pacifique Nord, au niveau de l'anticyclone sub-tropical de Californie/Hawaii.

2.3.4. Saisons de transition

En avril, mai et juin, le caractère hivernal s'estompe progressivement pour les dépressions et beaucoup plus rapidement pour les anticyclones. Par exemple, les mois d'avril et mai, montrent que l'activité dépressionnaire reste proche de la moyenne annuelle alors que pour les anticyclones, le mois de mai montre une activité nettement plus faible (les fréquences des dépressions sont supérieures à la moyenne annuelle contrairement à la fréquence des anticyclones qui chute au cours du mois de mai. De plus, pour les dépressions, les durées d'existence sont plus longues, les vitesses de déplacement sont plus rapides, les trajectoires sont plus méridionales montrant une continuité du caractère hivernal persistant jusqu'en mai et juin, contrairement aux anticyclones qui entrent dans leur phase estivale dès le mois de juin).

La répartition spatiale des systèmes dépressionnaires et anticycloniques en AMJ (Figure 2.11) se rapproche de celle observée en JAS, avec des dépressions circulant sur le continent asiatique et des anticyclones concernant davantage la zone sub-tropicale du centre et de l'Est du Pacifique Nord.

(a) Dépressions AMJ 1950-54



(b) Anticyclones AMJ 1950-54

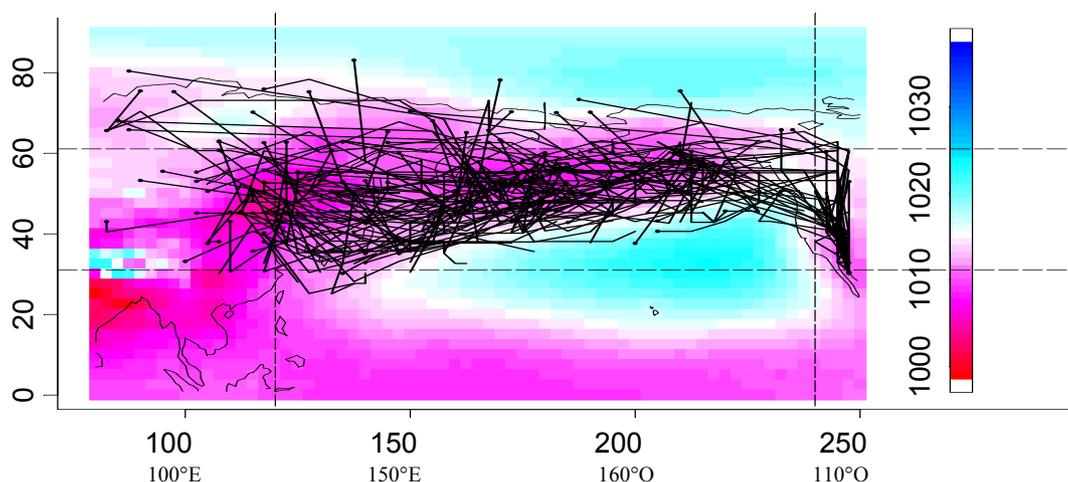


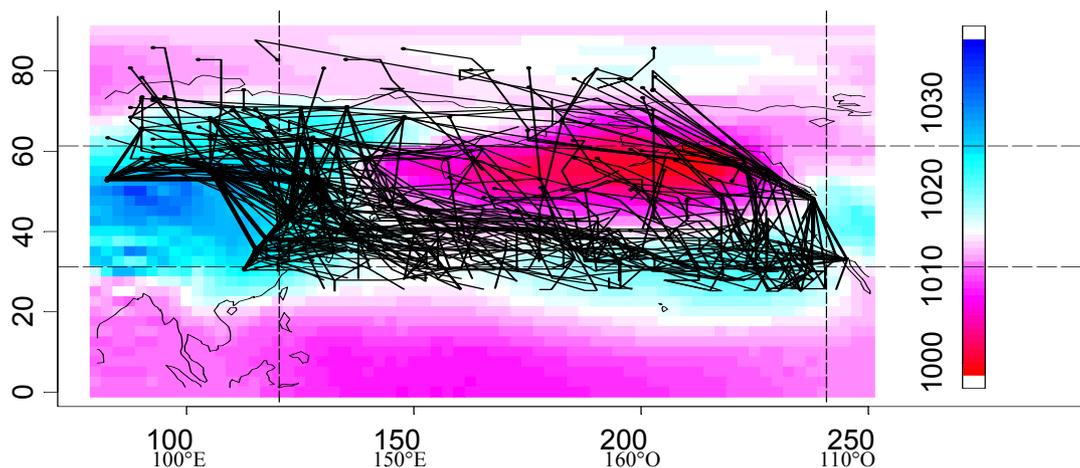
Figure 2.11. Exemples de trajectoires des dépressions (a) et des anticyclones (b), et PNM moyenne de 1950 à 1954 en AMJ. Le symbole « * » matérialise le début de trajectoire.

De manière générale, la persistance hivernale est beaucoup plus longue pour les caractéristiques des dépressions et inversement plus courte pour les anticyclones. Ainsi, pour le printemps, avril, mai et juin sont des mois de transition pour les dépressions et seulement les mois d'avril et mai pour les anticyclones. Cette réalité est également perceptible en automne avec une nette persistance du caractère estival de l'activité dépressionnaire, contrairement aux anticyclones qui entrent dans la saison hivernale beaucoup plus rapidement avec des fréquences et intensités très fortes dès les mois de novembre et décembre. Les anticyclones présentent donc une transition rapide, au cours du mois d'octobre, alors que l'activité dépressionnaire met 3 mois (OND) pour atteindre son caractère hivernal en particulier pour les paramètres de durée des trajectoires et vitesse de déplacement ainsi que pour les caractéristiques spatiales en latitude.

Les effets océaniques et continentaux semblent donc avoir un impact sur la saisonnalité des caractéristiques des dépressions et des anticyclones respectivement, car les dépressions circulent majoritairement sur l'océan alors que les anticyclones sont particulièrement sous l'influence du continent asiatique dès le mois d'octobre (formation de

l'Anticyclone de Sibérie). La zone de fréquentation maximale des dépressions (Figure 2.12) se concentre progressivement sur la région des Aléoutiennes et les anticyclones en provenance de Sibérie sont plus fréquents. La structure de circulation en OND se rapproche de celle de JFM et plus particulièrement pour l'activité anticyclonique.

(a) Dépressions OND 1950-54



(b) Anticyclone OND 1950-54

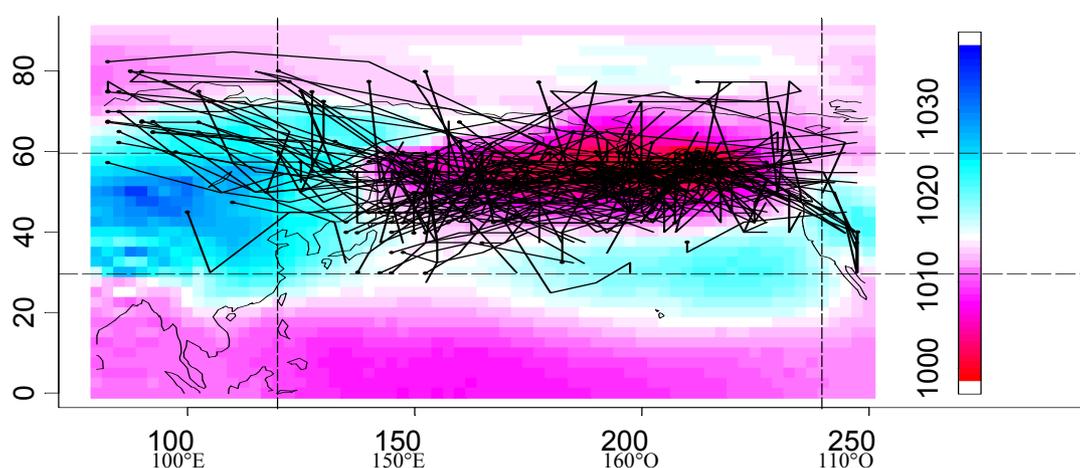


Figure 2.12. Exemples de trajectoires des dépressions (a) et des anticyclones (b), et PNM moyenne de 1950 à 1954 en OND. Le symbole « * » matérialise le début de trajectoire.

Au cours de la période de janvier 1950 à décembre 2001, l'étude climatologique des caractéristiques des systèmes transitoires montre que la fréquence des dépressions ayant atteint le Pacifique Nord durant au moins un jour, est plus faible que celle des anticyclones. Les seuils de pression, de durée des trajectoires et l'espace géographique utilisé pour identifier les systèmes atmosphériques des moyennes latitudes du Pacifique Nord, influencent les caractéristiques et particulièrement celles des fréquences.

La présence du continent asiatique à l'ouest de notre secteur, générant un fort déficit radiatif en hiver est associé à la présence de nombreux noyaux anticycloniques qui atteignent la façade occidentale de l'Océan Pacifique. En revanche, en été, les fréquences des dépressions et anticyclones tendent à s'équilibrer.

De manière générale, sur notre espace d'étude, l'activité transitoire montre un contraste fort entre l'hiver (JFM) et l'été (JAS). Durant la saison de type hivernal (estival), les systèmes atmosphériques sont généralement plus (moins) nombreux, surtout les anticyclones, et plus (moins) intenses. Les dépressions parcourent des distances plus réduites (grandes) et les anticyclones des distances plus grandes (réduites). Les systèmes transitoires ont une durée de vie plus courte (longue) et des vitesses de déplacement plus rapides (lentes). Ils adoptent des trajectoires plus méridionales (septentrionales, figure 2.13) et les dépressions ont un espace de couverture en latitude plus restreint (large) alors que celui des anticyclones est plus large (restreint). Les cyclones des moyennes latitudes concernent davantage le Pacifique Nord-Est (Nord-Ouest) avec un espace couvert en longitude plus restreint (large) et inversement les anticyclones circulent davantage sur le Pacifique Nord-Ouest (Nord-Est) avec un espace couvert en longitude plus large (restreint).

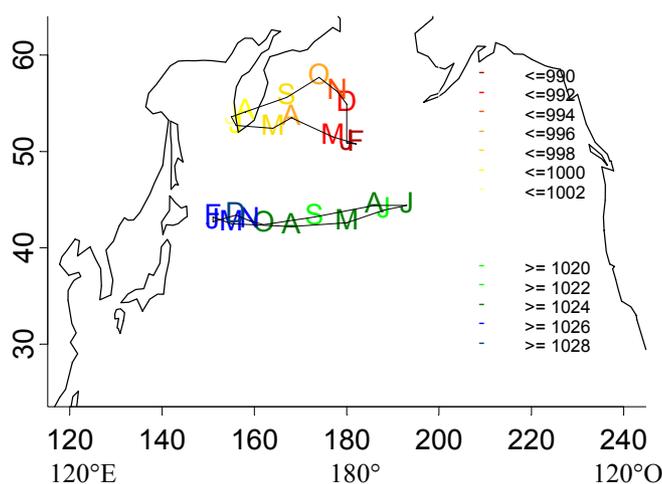


Figure 2.13. Position et intensité moyenne mensuelle de l'activité dépressionnaire et de l'activité anticyclonique. Les lettres représentent les mois et les couleurs la pression moyenne (en hPa).

Les caractéristiques moyennes saisonnières des dépressions et des anticyclones sont cohérentes avec la circulation moyenne saisonnières de surface et en altitude.

En hiver (été) :

- les dépressions circulent plus (moins) fréquemment sur le centre et l'Est du Pacifique Nord et en particulier sur la région des Aléoutiennes ;
- les dépressions sont plus (moins) creuses ;
- les anticyclones circulent plus fréquemment sur le continent asiatique et l'Ouest du Pacifique Nord (l'Est du Pacifique Nord) ;
- les anticyclones ont une pression centrale plus forte (faible).

Ceci est associé en surface à (cf. Annexes, figures A2.1, 2, 3) :

- une dépression des Aléoutiennes intensifiée (affaiblie) et décalée vers le sud-est (nord-ouest) ;
- un anticyclone de Sibérie intensifié (absent) ;
- une ZCIT et un anticyclone sub-tropical décalés vers le sud (nord) ;

et en altitude à (500 hPa, cf. Annexes, figures A2.4, 5, 6) :

- un courant jet sub-tropical intensifié (affaibli)
- une circulation méridienne renforcée (réduite) avec un talweg froid sur l'Est de l'Asie et une dorsale chaude sur le centre et l'Est du Pacifique Nord.

Nous devons également souligner que les effets océaniques et continentaux semblent avoir une influence sur la saisonnalité de l'activité dépressionnaire et anticyclonique

respectivement. Le caractère hivernal de l'activité dépressionnaire tend à persister au cours du printemps et le caractère estival tend à persister au cours de l'automne, contrairement à l'activité anticyclonique qui change de phase (hivernale/estivale) brutalement lors de ces mêmes saisons.

Selon Petterssen (1956), Klein (1957,1958), Zishka et Smith (1980), c'est au cours de la saison hivernale que le contraste est maximal entre l'activité dépressionnaire et anticyclonique. Nos résultats rejoignent cette observation. L'analyse du cycle annuel de l'activité transitoire (l'étude de l'ensemble des caractéristiques relatives aux dépressions et aux anticyclones) nous a permis de définir plus précisément la saison hivernale au sein du Pacifique Nord. L'hiver est principalement centré sur les mois de janvier, février et mars (JFM), excluant le mois de décembre qui comporte certaines influences automnales notamment au point de vue de la circulation des systèmes dépressionnaires. De plus selon Gulev et al. (2001), la variabilité inter-annuelle des caractéristiques des dépressions extra-tropicales, pour chacun de ces trois mois (JFM), présente une meilleure relation entre eux plutôt qu'avec le mois de décembre. Livezey et al. (1997) ont montré également que ces trois mois tendent à être plus consistants par rapport à la variation inter-annuelle de la circulation atmosphérique moyenne sur la région Pacifique Nord / Amérique du Nord.

Ainsi, au cours de l'hiver (JFM) l'activité dépressionnaire est fortement concentrée sur la région des Aléoutiennes et l'activité anticyclonique sur le continent asiatique. Dans les chapitres suivants, nous nous intéresserons uniquement à la saison hivernale (JFM). La période choisie de 1950 à 2001, recouvrant 52 hivers, est suffisamment longue pour étudier plus précisément la climatologie de l'activité dépressionnaire et anticyclonique hivernale, ainsi que pour estimer l'influence de la variabilité de leurs caractéristiques sur les températures et les précipitations hivernales en Amérique du Nord-Ouest.

**PARTIE II : Relations entre l'activité
dépressionnaire / anticyclonique hivernale
et le climat du secteur
Pacifique Nord / Amérique du Nord-Ouest**

Les relations entre la variabilité du climat de l'Amérique du Nord et la circulation atmosphérique associée aux températures de la surface océanique, dans le Pacifique Nord ont été étudiées massivement par Namias (1959, 1963, 1969, 1971, 1972, 1974, 1976b, 1978, 1979, 1986, 1988) et aussi Dickson et Namias (1976) Douglas et al. (1982). Namias a diagnostiqué à toutes les échelles de temps (de l'échelle synoptique à l'échelle décennale) dans quelle mesure les TSO, la circulation de la basse et de la haute troposphère du Pacifique Nord sont responsables, en aval, des anomalies de températures et précipitations (entre autre) sur le continent nord-américain. En revanche, il n'a pas été établi, à notre connaissance, de relation entre l'évolution des caractéristiques hivernales de l'activité transitoire (d'ordre synoptique) du Pacifique Nord et le climat de l'Amérique du Nord-Ouest, au cours de ces 50 dernières années.

Sur le centre et l'Est du Pacifique Nord et en hiver, la dépression des Aléoutiennes est plus intense et son aire d'influence est à son maximum pendant que l'anticyclone subtropical a une position davantage méridionale, permettant à la circulation tempérée de pénétrer dans des latitudes plus basses. Cette configuration atmosphérique moyenne révèle une propagation des systèmes perturbés à travers un grand domaine latitudinal, affectant directement le climat de surface de l'Amérique du Nord-Ouest, de l'Alaska jusqu'en Californie du Sud, ainsi qu'à l'intérieur du continent.

Le changement climatique qui s'est opéré au milieu de années 70 dans le Pacifique Nord, s'est traduit par une intensification et un décalage vers l'est de la dépression des Aléoutiennes ainsi que par des trajectoires plus méridionales des dépressions (ex : Trenberth, 1990 ; Trenberth et Hurrell, 1994). Graham et Diaz (2001) ont également observé une intensification graduelle des dépressions d'ordre synoptique dans le Pacifique Nord, qui se caractérise par une augmentation de la fréquence des dépressions profondes associées à un accroissement de la vorticité relative et des vitesses des vents, depuis les années 1950. Ainsi, les modifications climatiques observ es au sein du Pacifique Nord sont généralement classées en deux catégories : une tendance graduelle au cours des derniers 50 ans ou une rupture op r e vers les années 1976-77, l'une et l'autre r evolant une intensification de l'activité dépressionnaire, associ e à des changements climatiques de surface en Amérique du Nord-Ouest.

L'objectif de cette partie est d'étudier l'incidence de l'activité transitoire hivernale des moyennes latitudes du Pacifique Nord sur les conditions climatiques observ es en Amérique du Nord-Ouest. Nous focaliserons notre analyse sur les dépressions et les anticyclones ayant circulé sur le Pacifique Nord-Est, car ce sont, en effet, ces systèmes qui sont susceptibles d'influencer directement le climat de la partie occidentale de l'Amérique du Nord.

Dans un premier temps, nous analyserons l'évolution inter-annuelle de l'activité dépressionnaire et anticyclonique hivernale dans le Pacifique Nord-Est et déterminerons les indicateurs principaux reflétant la variabilité de la circulation transitoire sur notre secteur (chapitre 3). Puis, dans le chapitre 4, nous replacerons l'activité dépressionnaire / anticyclonique du Pacifique Nord-Est dans le contexte de la variabilité climatique planétaire en surface et en altitude (pression au niveau de la mer, altitude des géopotentiels 500 hPa / 200 hPa, température de l'air et le vent) et nous établirons de possibles connexions avec les modes climatiques régionaux tels que North Pacific Oscillation (NPO ou PDO), El Ni o Southern Oscillation (ENSO), North Pacific Index (NPI) et Pacific North-America Pattern (PNA). Enfin, nous identifierons plus précisément l'influence de l'activité transitoire du Pacifique Nord-Est sur les températures et les précipitations en Amérique du Nord-Ouest en établissant les relations entre les indices de la circulation des transitoires et les moyennes

saisonnères hivernales ainsi que les extrêmes froids et chauds des températures synoptiques nocturnes et diurnes, les totaux de précipitations et fréquences des jours de pluie observé in situ (chapitre 5).

Chapitre 3 : Caractéristiques hivernales des dépressions et des anticyclones ayant atteint le Pacifique Nord-Est

Au cours de la saison hivernale, le Pacifique Nord-Est est largement soumis à l'activité dépressionnaire, alors que les anticyclones concernent davantage le Pacifique Nord-Ouest (cf. Chapitre 2). L'intensité des systèmes transitoires est maximale et leur domaine de circulation en latitude est décalé vers le sud, concernant ainsi des latitudes plus basses en moyenne.

Afin d'estimer dans quelle mesure la variabilité de l'activité dépressionnaire (d'ordre synoptique) détermine la variabilité de l'intensité de la dépression des Aléoutiennes, Xioje et al. (2006) ont établi les trajectoires des dépressions du Pacifique Nord, puis ont retenu, pour leur analyse, toutes les dépressions ayant circulé dans la zone $40^{\circ}\text{N}-60^{\circ}\text{N} / 150^{\circ}\text{E}-140^{\circ}\text{O}$ (cf. Annexes, figure 3.1). Ils ont analysé la variabilité de leur fréquence, leur intensité, zone de formation et de déclin, les types de trajectoires qu'elles adoptent (zonales ou méridionales)...et diagnostiqué les liens avec la variation de l'intensité la dépression des Aléoutiennes.

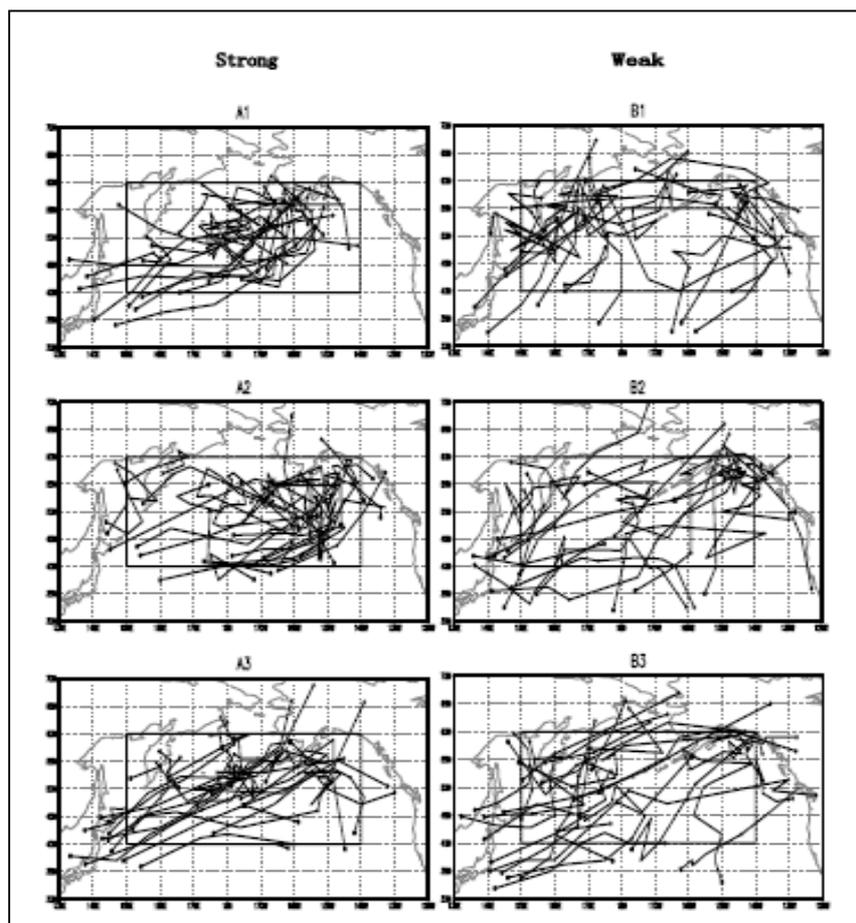


Figure 3.1. Trajectoires des dépressions ayant atteint la zone $40^{\circ}\text{N}-60^{\circ}\text{N} / 150^{\circ}\text{E}-140^{\circ}\text{O}$, au cours des mois de décembre – janvier – février (DJF), 1976-77 (A1), 1982-1983 (A2), 1986-1987 (A3), 1968-1969 (B1), 1970-1971 (B2), 1971-1972 (B3). A gauche, (A) correspondent les hivers durant lesquels la dépression des Aléoutiennes est intensifiée et à droite, (B) anormalement affaiblie. Xioje et al. (2006).

Notre méthode d'analyse sera similaire, en ce sens où, nous étudierons la variabilité des caractéristiques des dépressions et des anticyclones des moyennes latitudes du Pacifique Nord ayant circulé au moins un jour dans le Pacifique Nord-Est (à l'est de 170°O, cf. limite sur les figures 3.1 et 3.2), car c'est en effet les variations de circulation atmosphérique dans le Pacifique Nord-Est qui sont susceptibles d'affecter directement les températures et les précipitations sur l'Ouest de l'Amérique du Nord.

Afin d'analyser la variabilité inter-annuelle de l'activité transitoire dans le Pacifique Nord-Est, nous allons tout d'abord décrire la climatologie hivernale des caractéristiques des dépressions et des anticyclones sur cet espace (section 3.1) et présenter leur variation temporelle (section 3.2) au cours de la période 1950-2001. Enfin, nous créerons des indices hivernaux permettant de synthétiser et de faciliter l'examen de la variabilité inter-annuelle de l'activité dépressionnaire / anticyclonique dans le Pacifique Nord-Est (section 3.3).

3.1. Statistiques générales

Comme nous l'avons évoqué précédemment, la motivation de cette 2^{ème} partie est d'analyser l'impact de l'activité transitoire du Pacifique Nord-Est sur le climat hivernal de l'Amérique du Nord-Ouest. Ainsi, à partir des fichiers répertoriant l'ensemble des dépressions et des anticyclones d'une durée de vie supérieure à 3 jours, ayant transité dans les moyennes latitudes du Pacifique Nord durant au moins un jour (cf. Chapitre 1), nous filtrons les trajectoires et conservons uniquement celles ayant circulé dans le Pacifique Nord-Est (à l'est de 170°O, cf. limite sur les figures 3.2 et 3.3) durant au moins 1 jour, au cours de la saison hivernale (JFM) de 1950 à 2001. Cette limite spatiale est déterminée par les stations utilisées dans le chapitre 5, qui couvrent l'ensemble du secteur occidental de l'Amérique du Nord (à l'ouest de 100°O). Les stations se répartissent depuis l'Est des Aléoutiennes jusqu'au Mexique en passant par l'Alaska, la Colombie Britannique, la Californie et Hawaii. Les stations les plus à l'ouest se situent sur le secteur oriental des Aléoutiennes (170°O). A partir de l'ensemble des trajectoires des dépressions et des anticyclones ayant pénétré sur le Pacifique Nord-Est, nous dérivons des séries temporelles moyennes hivernales (JFM) pour chacune de leurs caractéristiques (fréquence, pression...). Nous présenterons tout d'abord la climatologie hivernale des caractéristiques des dépressions (section 3.1.1) puis celle des anticyclones (section 3.1.2) dans le Pacifique Nord-Est.

3.1.1. Climatologie hivernale des dépressions sur le Pacifique Nord-Est

Durant la saison hivernale (janvier – février – mars), en moyenne 18.67 dépressions transitent dans le Pacifique Nord-Est, ce qui représente environ 59 % des dépressions des moyennes latitudes du Pacifique Nord (120°E-120°O). Environ 65% des dépressions qui circulent dans le Pacifique Nord-Est se forment à l'ouest de 170°O, dans les secteurs du Kuroshio, au sud du Kamchatka et sur l'ouest des Aléoutiennes, puis elles transitent vers l'est, sur les Aléoutiennes et le Golfe de l'Alaska. Les autres dépressions (35%) se forment dans le Pacifique Nord-Est généralement entre 30°N-60°N, et plus fréquemment dans le Golfe de l'Alaska (Gulev et al. 2001). Quelques rares dépressions, se forment au nord de Hawaii, à des latitudes relativement basses, et partent en direction du continent nord-américain en

empruntant le « Pineapple Express ». Ces systèmes violents atteignent les côtes californiennes très rapidement et sont responsables de précipitations torrentielles (Dettinger 2004, 2005).

	Dépressions (JFM)			
	Moy	σ	Min	Max
F	18.7	3.2	13	26
Pmoy (hPa)	987.3	2.8	981.5	992.3
Pmin (hPa)	977.1	3.6	970.4	984
Pmax (hPa)	998.3	2	994.1	1001.8
Dur (j)	6.2	0.5	5.4	7.8
Dist (km)	4746	466	3544	5829
V (km/h)	31.9	2.2	25	36.4
Latmoy (°N)	51.2	2	46.4	54.7
Latmin (°N)	44.3	1.9	39.5	48
Latmax (°N)	58.5	2.1	54.1	62.9
Latampl (°)	14.2	1.7	11.1	18.3
Lonmoy (°E)	197.5	4.1	189.5	210.3
Lonmin (°E)	175.6	5.3	166.1	192.8
Lonmax (°E)	221	3.8	213.2	230
Lonampl (°)	45.4	5.1	36.2	57

Tableau 3.1. Statistiques moyennes hivernales (JFM) des caractéristiques des dépressions ayant circulé dans le Pacifique Nord-Est durant au moins 1 jour, de 1950 à 2001.

F : fréquence, **Pmoy** : pression moyenne, **Pmin** : pression minimale atteinte, **Pmax** : pression maximale atteinte, **Dur** : durée de vie, **Dist** : distance parcourue, **V** : vitesse de déplacement, **Latmoy** : latitude moyenne, **Latmin** : latitude minimale atteinte, **Latmax** : latitude maximale atteinte, **Latampl** : amplitude latitudinale, **Lonmoy** : longitude moyenne, **Lonmin** : longitude moyenne atteinte, **Lonmax** : longitude maximale atteinte, **Lonampl** : amplitude longitudinale.

La pression des cyclones des moyennes latitudes du Pacifique Nord-Est se situe aux environs 987.3 hPa, avec un minimum atteint de 977.1 hPa en moyenne. Ces dépressions sont, en général, plus creuses que la moyenne du Pacifique Nord, d'environ 2 hPa. Elles ont une durée d'existence plus longue (6.2 jours contre 5.2 pour le Pacifique Nord) parcourant des distances plus grandes (4745 km contre 4244 km). En revanche, leur vitesse de déplacement est légèrement plus lente (~32 km/h contre ~34 km/h en moyenne pour le Pacifique Nord).

Selon les caractéristiques spatiales, l'espace couvert en latitude par ces dépressions se situe en moyenne à 51°N, avec un domaine de circulation variant en moyenne entre 44°N (Latmin) et 58.5°N (Latmax) représentant une amplitude de 14.23° (Latampl). Ces informations sont conformes à la moyenne du Pacifique Nord. Les caractéristiques en longitude nous informent que l'aire de relative fréquentation de ces dépressions s'étend entre 176°E et 139°O avec une valeur moyenne située à 162.5°O. En couplant les informations des trajectoires en latitude et longitude, l'espace de fréquentation moyen des dépressions du Pacifique Nord-Est se situe donc dans le Golfe de l'Alaska.

Trajectoires--- Dépressions 1950

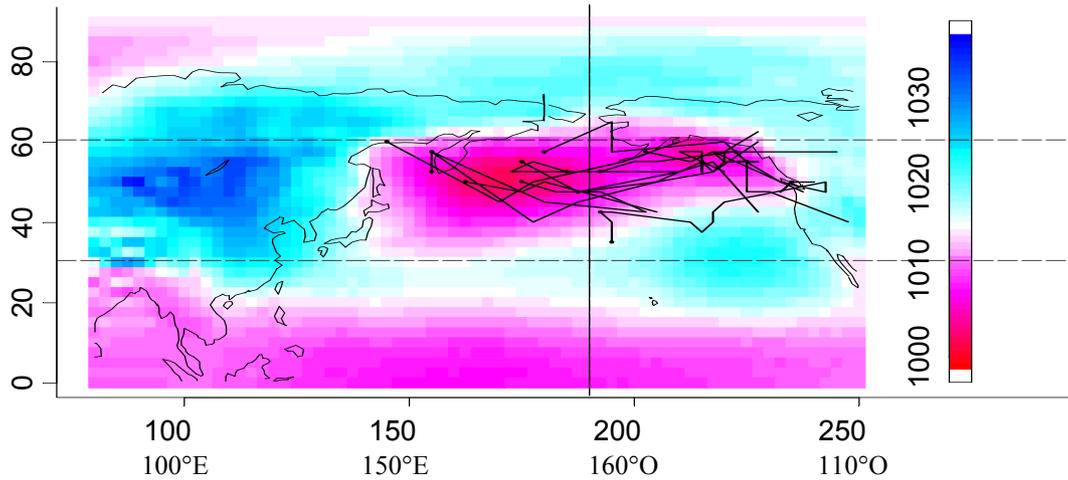


Figure 3.2. Exemple de trajectoires des dépressions ayant atteint le Pacifique Nord-Est en JFM (1950), PNM moyenne de la saison JFM 1950 (hPa), limites spatiales du filtrage (ligne pleine : 170°O ou 190°E). Cf. aussi figure 3.10 p.89.

3.1.2. Climatologie hivernale des anticyclones sur le Pacifique Nord-Est

La fréquence hivernale des anticyclones dans le Pacifique Nord-Est est quasiment similaire à celle des dépressions, avec 18.3 systèmes en moyenne. Ceux-ci représentent environ 40 % de l'ensemble des anticyclones du Pacifique Nord. Comme nous l'avons souligné précédemment (chapitre 2), en hiver, la majorité des anticyclones restent confinés sur le secteur occidental du Pacifique Nord. Environ 37% des anticyclones transitant sur le Pacifique Nord-Est proviennent de Sibérie orientale et/ou des mers bordières du continent

	Anticyclones (JFM)			
	Moy	σ	Min	Max
F	18.3	5.3	4	30
Pmoy (hPa)	1025.9	1.6	1021.7	1029.9
Pmin (hPa)	1019.9	1.3	1017.6	1024.2
Pmax (hPa)	1032.5	2.3	1026.7	1037.9
Dur (j)	8	0.98	6.2	11.2
Dist (km)	6997	839	4615	9611
V (km/h)	36.9	3.6	26.3	45.9
Latmoy (°N)	42.8	2.4	35.8	48.8
Latmin (°N)	31.5	1.9	27	37.1
Latmax (°N)	59	3.2	49.3	65.8
Latampl (°)	27.5	3.4	20	34.8
Lonmoy (°E)	202.8	7.5	172.4	214.1
Lonmin (°E)	167.6	11.5	122.4	190.5
Lonmax (°E)	227.5	5.4	211	237.5
Lonampl (°)	59.8	10	31.6	88.6

Tableau 3.2. Statistiques moyennes hivernales (JFM) des caractéristiques des anticyclones ayant circulé dans le Pacifique Nord-Est durant au moins 1 jour, de 1950 à 2001.

asiatique (Mer d'Okhotsk, Mer du Japon, Mer Jaune, Mer de Chine). Après avoir traversé le Pacifique Nord-Ouest, ces anticyclones pénètrent sur le secteur Nord-Est, à des latitudes relativement faibles, généralement inférieures à 45°N. La deuxième zone de transit préférentiel, représentant environ 36 % des anticyclones, concerne les systèmes provenant des hautes latitudes (supérieures à 60°N), originaires du Nord de la Sibérie orientale, de la Mer des Tchouktches, du Nord de la Mer de Béring et de l'Alaska. Ils atteignent les hautes latitudes du Pacifique Nord-Est puis se déplacent le long de la côte ouest du continent nord-américain. Enfin, 27 % des anticyclones se forment dans le Pacifique Nord-Est entre 30°N et 60°N. La quasi-totalité des trajectoires convergent dans la zone subtropicale, à l'ouest de la Californie et fusionnent avec l'anticyclone sub-tropical (Wallace et al. 1988).

Les caractéristiques spatiales en latitude des anticyclones du Pacifique Nord-Est sont conformes aux observations établies à l'échelle de l'ensemble du Pacifique Nord. Nous pouvons tout de même souligner que leur domaine latitudinal moyen de circulation est plus au sud que celui des dépressions, se situant vers 42.8°N (contre 51.2°N), et plus large que celui des dépressions (Latampl = 27.5° contre 14.2°), s'étirant généralement entre 59°N (Latmax) et 31.45°N (Latmin). Les caractéristiques en longitude montrent que ces anticyclones circulent entre 168°E (Lonmin) et 132.5°O (Lonmax), c'est à dire légèrement plus à l'ouest que les dépressions.

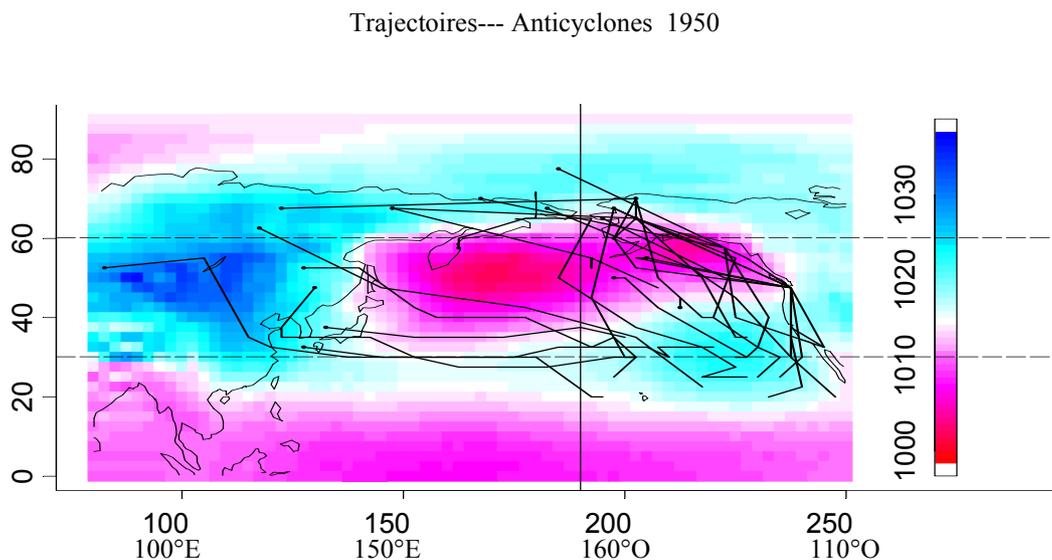


Figure 3.3. Exemple de trajectoires des anticyclones ayant atteint le Pacifique Nord-Est en JFM (1950), PNM moyenne de la saison JFM 1950 (hPa), limites spatiales du filtrage (ligne pleine : 170°O ou 190°E). Cf. aussi figure 3.10 p.89.

Durant leur trajectoire, leur pression moyenne est de 1025.9 hPa avec un maximum atteint de 1032.5 hPa en moyenne. Ces pressions sont légèrement moins fortes que la moyenne au sein du Pacifique Nord, de l'ordre de 1 à 1.5 hPa.

Leur durée de vie est de 8 jours environ et ils parcourent des distances d'environ 7000 km à une vitesse de 37 km/h. Ces anticyclones ont une durée d'existence plus longue et parcourent des distances plus grandes que la moyenne des systèmes anticyclonique du Pacifique Nord. En revanche, leur vitesse de déplacement est similaire. Les anticyclones des moyennes latitudes ayant atteint le Pacifique Nord-Est présentent quelques différences avec les dépressions, pour les caractéristiques précédemment décrites. Leurs durées de vie sont plus longues (8 j. contre 6 j. pour les dépressions), parcourent des distances plus grandes

(environ 7000 km contre 4700 km) à des vitesses légèrement supérieures à celles des dépressions (environ 37 km/h contre 32 km/h). Les anticyclones :

- se forment et se déplacent à l'arrière des systèmes dépressionnaires, à cause de flux de nord (à l'ouest du vortex), de la subsidence et donc de la relative stabilité atmosphérique successive aux dépressions ;

- ont des trajectoires zonales avec une composante méridienne nord-sud plus forte dans les moyennes latitudes devenant exclusivement zonales dans les latitudes proches des sub-tropiques ;

- fusionnent avec les hautes pressions sub-tropicales ;

ainsi, ils parcourent des distances plus grandes que les dépressions avec des vitesses de déplacement légèrement plus rapides et leur persistance est plus longue car notre algorithme établissant les trajectoires, considère toujours ces anticyclones après leur fusion avec les hautes pressions sub-tropicales.

3.2. Analyse temporelle

Ayant présenté la climatologie hivernale des systèmes transitoires sur le Pacifique Nord-Est, nous allons analyser la variabilité inter-annuelle des caractéristiques relatives aux dépressions (section 3.2.1) puis à celles relatives aux anticyclones (section 3.2.2). Enfin nous analyserons les relations statistiques entre les paramètres de l'activité dépressionnaire et de l'activité anticyclonique sur le Pacifique Nord-Est (section 3.2.3).

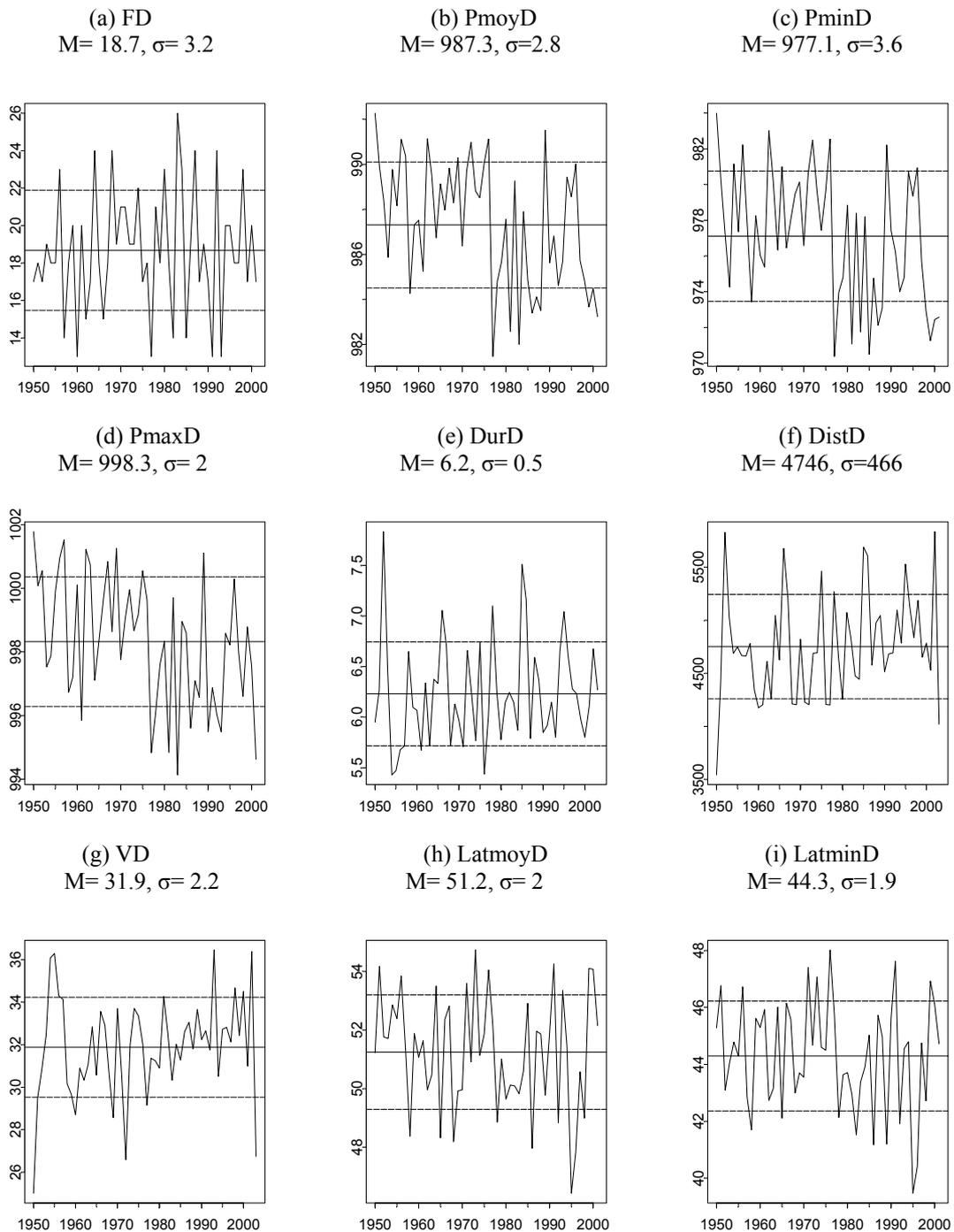
3.2.1. Variabilité inter-annuelle et relations entre les caractéristiques hivernales des dépressions

Les séries temporelles dérivées des caractéristiques des trajectoires montrent une forte variabilité inter-annuelle et inter-décennale de la fréquence des dépressions au cours de la période considérée, 1950-2001 (Figure 3.4). Le nombre maximal de dépressions (Figure 3.4.a) observé est de 26 en 1983, inversement le minimum, de 13 systèmes est observé en 1960, 1976, 1991 et 1993. A partir du milieu des années 1970 et jusqu'au milieu des années 1990, la fréquence des cyclones extra-tropicaux varie considérablement d'un hiver à l'autre, passant de 14 à 26 entre 1982 et 1983 ou de 13 à 24 entre 1991 et 1992 (var. 1950-1976 = 7.6, var. 1977-1994 = 17.8, diff. var. sig. > 95%, F-test).

Depuis le milieu des années 1970, les dépressions sont plus creusées (Figure 3.4.b.c.d): leurs pressions moyennes et surtout leurs pressions minimales atteintes, présentent un net décrochement entre 1976 ($P_{moy}=991$ hPa) et 1977 ($P_{moy}=981.5$ hPa) de l'ordre de 10 hPa en moyenne et de 12 hPa pour les pressions minimales atteintes. Ainsi, de 1950 à 1976, les pressions moyennes étaient de 988.8 hPa, puis, de 1977 à 2001, de 985.7 hPa (-3 hPa en pression moyenne et -4 hPa pour les minimales atteintes, approximativement, diff. sig. > 99%, t-test bilatéral). Par conséquent, dans le Pacifique Nord-Est, les dépressions sont, de manière abrupte, plus profondes à partir de 1977.

La durée des trajectoires et les distances parcourues (Figure 3.4.e.f.g) par les dépressions présentent une forte variabilité inter-annuelle et pas de tendance significative alors que leur vitesse de déplacement tend à augmenter entre 1972 (26.6 km/h) et 2000 (36.4 km/h) (+2.7 km/h, tendance linéaire 1972-2000, r sig. > 95%, t-test bilatéral).

L'amplitude latitudinale de circulation des dépressions augmente graduellement à partir de la fin des années 60 (+1.9°, tendance linéaire 1968-2001, r sig. > 90%, t-test bilatéral), phénomène associé en partie à des trajectoires atteignant des latitudes minimales plus basses à partir de 1977 (diff. 1977-2001&1950-76 = -1°, sig. > 90%, t-test bilatéral) alors que les latitudes maximales atteintes ne présentent ni tendance ni rupture (Figure 3.4.h.i.j.k).



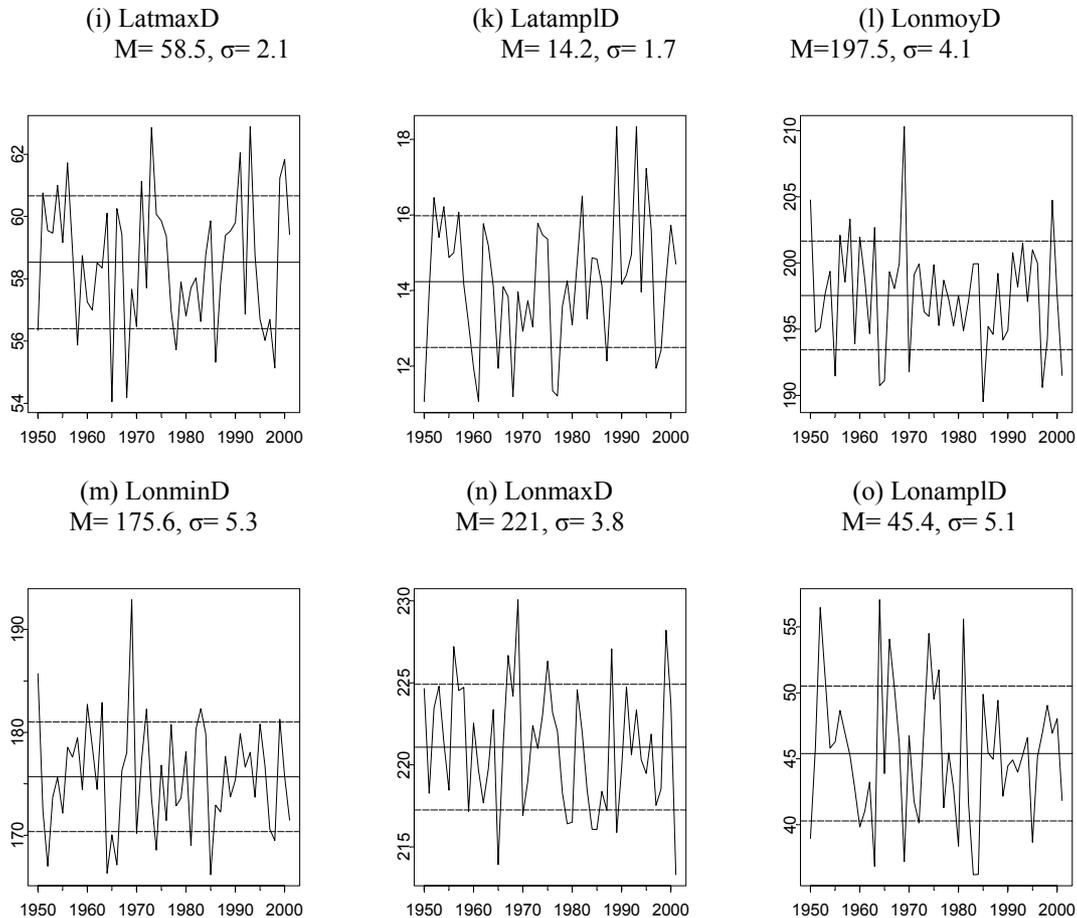


Figure 3.4. Séries temporelles des caractéristiques des dépressions ayant atteint le Pacifique Nord-Est en JFM de 1950 à 2001

Les caractéristiques du domaine de circulation en longitude (Ouest-Est) varient d'une année à l'autre mais ne montrent ni rupture, ni tendance au cours de la période (Figure 3.4.l.m.n.o).

L'étude des liens entre les caractéristiques des dépressions (Tableau 3.3) montre que les paramètres de fréquence et intensité des dépressions apparaissent comme n'étant pas corrélés entre eux. Pour les autres variables, nous pouvons tout de même noter que :

- lorsque les dépressions ont une durée d'existence plus longue, elles parcourent logiquement des distances plus grandes (DistD, $r = 0.73$, sig. > 99%). Ceci est associé au fait qu'elles ont une origine plus occidentale (LonminD, $r = -0.29$, sig. > 95%), augmentant l'espace couvert en longitude (LonamplD, $r = 0.28$, sig. > 95%). De plus, elles tendent à atteindre des latitudes moyennes et minimales plus méridionales (LatmoyD, $r = -0.29$, sig. > 95%, LatminD, $r = -0.37$, sig. > 99%).

- lorsque les dépressions parcourent des distances plus grandes, elles sont plus rapides (VD, $r = 0.54$, sig. > 99%). Les trajectoires prennent naissance davantage vers le sud (LatminD, $r = -0.35$, sig. > 99%). Des distances parcourues plus longues correspondent également à des trajectoires moyennes plus occidentales (LonmoyD, $r = -0.31$, sig. > 95%) dues à des origines plus occidentales (LonminD, $r = -0.55$, sig. > 99%). Ainsi, les caractéristiques spatiales révèlent un élargissement du domaine de circulation tant dans le

sens zonal (LonampID, $r = 0.57$, sig. > 99%) que méridien (LatampID, $r = 0.52$, sig. > 99%) et sont en accord avec des distances parcourues plus importantes.

	FD	PmoyD	PminD	PmaxD	DurD	DistD	VD	LatmoyD	LatminD	LatmaxD	LatampID	LonmoyD	LonminD	LonmaxD	LonampID
FD	1.00														
PmoyD	-0.09	1.00													
PminD	0.02	0.94	1.00												
PmaxD	-0.19	0.87	0.72	1.00											
DurD	-0.16	-0.09	-0.15	0.03	1.00										
DistD	-0.11	-0.19	-0.30	-0.09	0.73	1.00									
VD	0.04	-0.14	-0.21	-0.15	-0.18	0.54	1.00								
LatmoyD	-0.25	0.06	-0.04	0.08	-0.29	-0.13	0.15	1.00							
LatminD	-0.11	0.02	-0.02	0.01	-0.37	-0.35	-0.07	0.90	1.00						
LatmaxD	-0.27	0.16	0.05	0.15	-0.17	0.11	0.37	0.85	0.64	1.00					
LatampID	-0.21	0.18	0.08	0.17	0.20	0.52	0.52	0.05	-0.33	0.52	1.00				
LonmoyD	-0.08	0.19	0.18	0.24	-0.15	-0.31	-0.27	-0.05	0.01	0.04	0.04	1.00			
LonminD	-0.09	0.17	0.22	0.19	-0.29	-0.55	-0.43	-0.13	-0.05	-0.10	-0.07	0.85	1.00		
LonmaxD	-0.18	0.14	0.03	0.25	-0.04	0.00	0.03	0.26	0.23	0.28	0.09	0.65	0.41	1.00	
LonampID	-0.04	-0.08	-0.20	-0.01	0.28	0.57	0.47	0.33	0.22	0.31	0.14	-0.39	-0.73	0.32	1.00

Tableau 3.3 : Coefficients de corrélation linéaire entre les caractéristiques des dépressions ayant atteint le Pacifique Nord-Est en JFM de 1950 à 2001 (valeurs soulignées= sig. > 95% et en gras=sig. > 99%, t-test bilatéral).

- lorsque les dépressions circulent plus vite, elles ont des origines plus occidentales (LonminD, $r = -0.43$, sig. > 99%) et atteignent davantage les hautes latitudes (LatmaxD, $r = 0.37$, sig. > 99%). L'espace couvert en longitude (LonampID, $r = 0.47$, sig. > 99%) et en latitude (LatampID, $r = 0.52$, sig. > 99%) est alors plus grand.

- lorsque les dépressions circulent plus au nord, ceci est associé à un domaine en longitude plus large (LonampID, $r = 0.33$, sig. > 95%)⁹.

- lorsque les dépressions ont une origine davantage orientale, elles atteignent plus facilement le secteur Est (LonmaxD, $r = 0.41$, sig. > 99%), en revanche, l'espace couvert en longitude est plus restreint (LonampID, $r = -0.73$, sig. > 99%). Cette dernière observation est peut-être un artefact dû au fait que nous ne capturons plus les phénomènes au-delà de la bordure orientale de l'espace géographique considéré (110°O). Même si la cordillère nord-américaine limite fortement la pénétration vers l'est des dépressions, certaines d'entre elles la franchissent et pénètrent alors dans l'espace atmosphérique de l'Atlantique Nord. Par conséquent, lorsque les dépressions ayant atteint le Pacifique Nord-Est, se forment plus à l'est, il est hypothétiquement possible qu'elles tendent à pénétrer plus largement sur le continent nord-américain, au niveau du Canada notamment.

L'étude des relations entre les caractéristiques des dépressions montre que la fréquence et l'intensité des dépressions (pression) ne sont pas corrélées et ne présentent pas de relations significatives avec les autres paramètres.

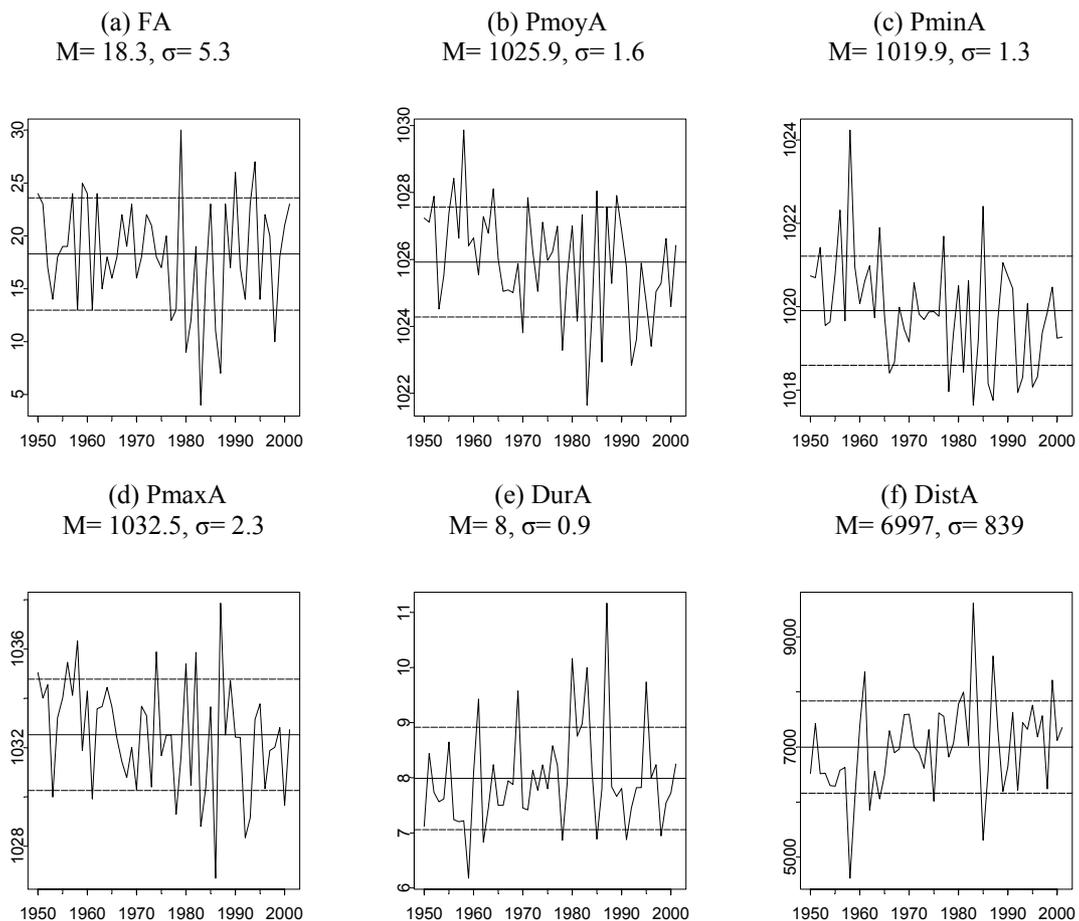
⁹ Nous pouvons rappeler que pour une même distance parcourue, l'espace couvert en longitude est plus grand dans les hautes latitudes que dans les basses latitudes.

3.2.2. Variabilité inter-annuelle et relations entre les caractéristiques hivernales des anticyclones

Pour les anticyclones, l'une des principales observations est que depuis la fin des années 1970, les fréquences (Figure 3.5.a) présentent une forte variabilité inter-annuelle (var. 1950-1976 = 12, var. 1977-2001 = 43.77, diff. var. sig. > 99%, F-test). En effet, durant la première moitié de la période observée, jusqu'en 1976, les fréquences s'échelonnent entre 13 et 25 anticyclones par hiver. Puis, dans la seconde moitié, les hivers apparaissent plus contrastés avec des années de forte fréquence, comme en 1979, 1990 et 1994 (30, 26 et 27 anticyclones respectivement) et des années de très faible fréquence comme en 1983, 1987 et 1998 (4, 7 et 10 anticyclones respectivement).

La pression moyenne des anticyclones (Figure 3.5.b) diminue graduellement au cours de l'ensemble de la période, d'environ 2 hPa (tendance linéaire, r sig. > 99%, t-test bilatéral). Notons également une forte variabilité inter-annuelle depuis la fin des années 1970 jusqu'au début des années 1990 (var. 1950-1977 = 1.73, var. 1978-1994 = 4.21, diff. var. sig. > 95%, F-test).

Les latitudes minimales atteintes par les anticyclones (Figure 3.5.i) diminuent de 2.4° au cours de la période 1950-2001 (tendance linéaire, r sig. > 99%, t-test bilatéral), traduisant des trajectoires atteignant des latitudes plus méridionales en particulier en 1983 (27°N) et 1987 (27.5°N). Ainsi, le domaine latitudinal de circulation (Figure 3.5.k) tend à augmenter plus ou moins linéairement d'environ 3.5° (tendance linéaire, r sig. > 95%, t-test bilatéral) tout en révélant une très forte variabilité au cours de la période.



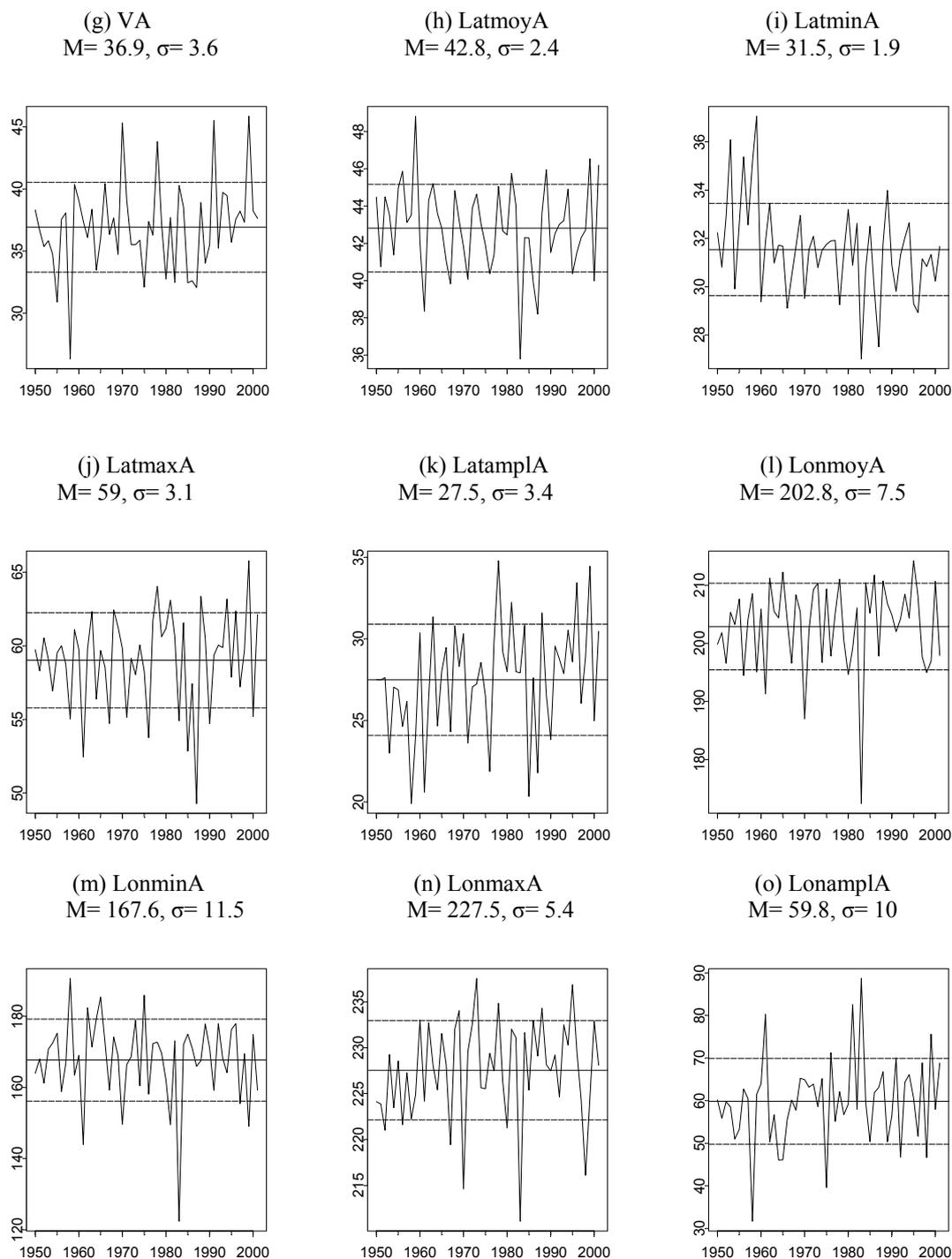


Figure 3.5. Séries temporelles des caractéristiques des anticyclones ayant atteint le Pacifique Nord-Est en JFM de 1950 à 2001

Le domaine de circulation couvert en longitude par les anticyclones (Figure 3.5.l.m.n.o), varie d'une année à l'autre mais aucune tendance ni de rupture ne sont décelables, ainsi que pour les caractéristiques de distance parcourue et de durée des trajectoires et de vitesse de déplacement (Figure 3.5.e.f.g).

Comme pour les dépressions les paramètres de fréquence et d'intensité (pression) des anticyclones ne sont pas corrélés de manière significative (Tableau 3.4). Nous pouvons préciser que pour les autres caractéristiques :

- lorsque les anticyclones sont plus fréquents, ils ont une durée d'existence moins longue (DurA, $r = -0.40$, sig. > 99%), ils parcourent des distances plus faibles (DistA, $r = -0.29$, sig. > 95%). Leur circulation moyenne est plus septentrionale (LatmoyA, $r = 0.37$, sig. > 99%) et pénètrent moins vers le sud (LatminA, $r = 0.29$, sig. > 95%). Leur zone de fréquentation est décalée vers l'est (LonmoyA, $r = 0.30$, sig. > 95%).

	FA	PmoyA	PminA	PmaxA	DurA	DistA	VA	LatmoyA	LatminA	LatmaxA	LatamplA	LonmoyA	LonminA	LonmaxA	LonamplA
FA	1.00														
PmoyA	0.22	1.00													
PminA	0.21	0.83	1.00												
PmaxA	0.10	0.87	0.55	1.00											
DurA	-0.40	-0.08	-0.32	0.16	1.00										
DistA	-0.29	-0.42	-0.55	-0.18	0.67	1.00									
VA	0.13	-0.43	-0.34	-0.36	-0.30	0.47	1.00								
LatmoyA	0.37	0.31	0.35	0.19	-0.50	-0.44	0.09	1.00							
LatminA	0.29	0.51	0.66	0.26	-0.36	-0.55	-0.29	0.63	1.00						
LatmaxA	0.18	-0.16	-0.06	-0.12	-0.30	0.00	0.39	0.69	0.20	1.00					
LatamplA	0.01	-0.44	-0.43	-0.26	-0.08	0.31	0.54	0.31	-0.37	0.84	1.00				
LonmoyA	0.30	0.09	0.05	0.21	0.24	0.20	-0.30	0.24	0.12	0.19	0.11	1.00			
LonminA	0.22	0.29	0.25	0.27	0.24	0.22	-0.52	0.24	0.24	0.05	-0.09	0.85	1.00		
LonmaxA	0.29	-0.06	-0.20	0.08	0.08	0.01	-0.05	0.21	-0.01	0.21	0.20	0.81	0.49	1.00	
LonamplA	-0.10	-0.36	-0.39	-0.27	-0.22	-0.24	0.57	-0.16	-0.27	0.06	0.21	-0.54	-0.88	-0.02	1.00

Tableau 3.4 : Coefficients de corrélation linéaire entre les caractéristiques des anticyclones ayant atteint le Pacifique Nord-Est en JFM de 1950 à 2001 (valeurs soulignées= sig. > 95% et en gras=sig. > 99%, t-test bilatéral)

- lorsqu'ils présentent des pressions plus fortes en moyenne, les distances parcourues sont plus faibles (DistA, $r = -0.42$, sig. > 99%) ainsi que leur vitesse de déplacement (VA, $r = -0.43$, sig. > 99%). Ainsi, leur domaine de circulation en latitude (LatamplA, $r = -0.44$, sig. > 99%) et longitude (LonamplA, $r = -0.36$, sig. > 99%) est plus restreint. Ceci correspond à des trajectoires davantage septentrionales (LatmoyA, $r = 0.31$, sig. > 95%) et surtout pour les latitudes minimales atteintes (LatminA, $r = 0.51$, sig. > 99%) et des origines en longitude minimales plus orientales (LonminA, $r = 0.29$, sig. > 95%).

- lorsqu'ils ont une durée de vie plus longue ils parcourent également des distances plus grandes (DistA, $r = 0.67$, sig. > 99%) mais à des vitesses plus lentes (VA, $r = -0.30$, sig. > 95%). Ils ont un domaine de circulation plus méridional (LatmoyA, $r = -0.50$, sig. > 99%, LatminA, $r = -0.36$, sig. > 99%, LatmaxA, $r = -0.30$, sig. > 95%).

- lorsqu'ils parcourent des distances plus grandes, inversement à l'observation précédente, leur vitesse de déplacement est plus forte (VA, $r = 0.47$, sig. > 99%) et leurs trajectoires atteignent des latitudes plus méridionales (Latmoy, $r = -0.44$, sig. > 99%, Latmin, $r = -0.55$, sig. > 99%) induisant un espace couvert en latitude plus large (LatamplA, $r = 0.31$, sig. > 95%).

- lorsqu'ils ont une vitesse de déplacement plus forte, l'origine des trajectoires est davantage septentrionale et les fins de trajectoire sont davantage méridionales (LatmaxA, $r = 0.39$, sig. > 99%, LatminA, $r = -0.29$, sig. > 95% respectivement) induisant un espace de

circulation en latitude plus large (LatamplA, $r = 0.54$, sig. > 99%). De plus, l'origine des trajectoires est plus occidentale (LonminA, $r = -0.52$, sig. > 99%), influençant directement la circulation moyenne en longitude (LonmoyA, $r = -0.30$, sig. > 95%), alors que les longitudes maximales atteintes restent inchangées, l'espace de circulation en longitude est donc plus large (LonamplA, $r = 0.57$, sig. > 99%).

- lorsque les anticyclones ont des trajectoires plus septentrionales, l'espace couvert en latitude est plus large (LatamplA, $r = 0.31$, sig. > 95%), cependant s'ils atteignent des latitudes minimales plus septentrionales, c'est à dire qu'ils pénètrent moins dans les basses latitudes, ceci diminue l'espace couvert en latitude (LatamplA, $r = -0.37$, sig. > 99%).

- lorsque les anticyclones circulent davantage vers l'est, l'espace couvert en longitude est plus restreint (LonamplA, $r = -0.54$, sig. > 99%), et notamment lorsque leur origine en longitude est plus orientale (LonamplA, $r = -0.88$, sig. > 99%).

3.2.3. Relations entre les caractéristiques des dépressions et des anticyclones

Nous avons observé précédemment que la fréquence moyenne par hiver des dépressions et des anticyclones est équilibrée sur le Pacifique Nord-Est, avec environ 18 systèmes respectivement. Cependant, la variabilité inter-annuelle de la fréquence des anticyclones ($\sigma = 5.3$) est clairement plus forte que celle des dépressions ($\sigma = 3.2$). A l'échelle inter-annuelle, les fréquences des dépressions et des anticyclones ayant transité sur le Pacifique Nord-Est sont anti-corrélées (FA, $r = -0.46$, sig. > 99%), par conséquent, lorsque les dépressions sont plus fréquentes, les anticyclones circulent plus rarement sur notre secteur. Des fréquences de dépressions plus fortes correspondent également à des durées des trajectoires des anticyclones plus longues (DurA, $r = 0.31$, sig. > 95%) et qui ont tendance à concerner davantage le secteur occidental (LonmoyA, $r = -0.35$, sig. > 99%, LonmaxA, $r = -0.30$, sig. > 95%).

L'intensité des dépressions (pression moyenne au cours des trajectoires) n'est pas liée à leur fréquence (comme nous l'avons évoqué précédemment) mais à la fréquence des anticyclones (FA, $r = 0.42$, sig. > 99%) et de manière secondaire à leur intensité (PmoyA, $r = 0.33$, sig. > 95%). Ainsi, lorsque les dépressions sont moins intenses (anomalies positives des pressions moyennes), les anticyclones sont plus nombreux sur le Pacifique Nord-Est et présentent des pressions plus fortes. De plus, des dépressions moins creusées correspondent à des distances parcourues par les anticyclones plus courtes (DistA, $r = -0.28$, sig. > 95%).

Des trajectoires moyennes plus septentrionales des dépressions sont associées à des anticyclones plus fréquents (FA, $r = 0.34$, sig. > 95%), présentant des pressions moyennes plus fortes (PmoyA, $r = 0.30$, sig. > 95%).

Lorsque les dépressions circulent davantage vers l'Est, la distance parcourue par les anticyclones est plus réduite (DistA, $r = -0.31$, sig. > 95%).

Enfin, lorsque l'espace couvert en longitude par les dépressions est plus large, les anticyclones ont une durée de vie plus longue (DurA, $r = 0.28$, sig. > 95%) et parcourant des distances plus grandes (DistA, $r = 0.57$, sig. > 99%).

	FA	PmoyA	PminA	PmaxA	DurA	DistA	VA	LatmoyA	LatminA	LatmaxA	LatampA	LonmoyA	LonminA	LonmaxA	LonampA
FD	-0.46	-0.22	-0.21	-0.12	<u>0.31</u>	0.19	-0.06	-0.16	-0.12	-0.13	-0.05	-0.35	-0.21	<u>-0.30</u>	0.08
PmoyD	0.42	<u>0.33</u>	0.17	0.38	-0.15	<u>-0.28</u>	-0.10	0.19	0.26	0.04	-0.10	0.22	<u>0.28</u>	0.13	-0.25
PminD	0.36	0.24	0.14	<u>0.28</u>	-0.11	<u>-0.23</u>	-0.08	0.17	0.24	0.07	-0.06	0.21	0.25	0.16	-0.20
PmaxD	0.41	0.42	0.23	0.45	-0.15	<u>-0.28</u>	-0.11	0.21	0.24	0.10	-0.04	0.21	<u>0.27</u>	0.08	<u>-0.27</u>
DurD	-0.01	-0.08	-0.01	-0.10	-0.18	<u>-0.28</u>	-0.15	0.03	-0.02	0.06	0.07	0.24	0.24	0.08	-0.23
DistD	-0.14	-0.20	-0.17	-0.19	-0.15	<u>-0.24</u>	-0.13	-0.04	-0.13	-0.03	0.04	0.20	0.22	0.01	-0.24
VD	-0.17	-0.19	-0.23	-0.14	0.00	-0.02	-0.02	-0.06	-0.15	-0.09	0.00	0.02	0.04	-0.06	-0.07
LatmoyD	0.34	<u>0.30</u>	0.26	0.14	-0.13	0.07	0.20	0.02	0.10	-0.24	<u>-0.28</u>	-0.16	-0.19	-0.05	0.19
LatminD	0.26	<u>0.27</u>	0.23	0.12	-0.06	0.20	<u>0.29</u>	-0.09	0.03	<u>-0.28</u>	<u>-0.28</u>	-0.26	<u>-0.30</u>	-0.09	<u>0.29</u>
LatmaxD	0.36	0.23	0.16	0.11	-0.17	-0.03	0.14	0.11	0.13	-0.11	-0.18	0.03	-0.03	0.10	0.09
LatampD	0.15	-0.01	-0.06	0.01	-0.14	-0.26	-0.15	0.23	0.14	0.17	0.08	0.33	<u>0.29</u>	0.22	-0.21
LonmoyD	-0.01	-0.06	-0.05	0.24	-0.15	<u>-0.31</u>	0.16	-0.03	-0.01	0.23	0.22	0.09	-0.04	0.14	0.13
LonminD	0.04	-0.04	-0.01	0.19	<u>-0.29</u>	-0.55	0.08	-0.05	0.03	0.18	0.15	0.06	-0.08	0.15	0.17
LonmaxD	0.14	0.06	0.12	0.25	-0.04	0.00	0.06	0.10	0.16	0.13	0.04	0.08	-0.04	0.08	0.09
LonampD	0.06	0.09	0.10	-0.01	<u>0.28</u>	0.57	-0.04	0.12	0.08	-0.08	-0.13	-0.01	0.05	-0.09	-0.11

Tableau 3.5 : Coefficients de corrélation linéaire entre les caractéristiques des dépressions et des anticyclones ayant atteint le Pacifique Nord-Est en JFM de 1950 à 2001 (valeurs soulignées= sig. > 95% et en gras=sig. > 99%, t-test bilatéral).

Pour synthétiser les informations précédentes, les fréquences des dépressions et les anticyclones ne sont pas corrélées avec leur intensité respective. Lorsque l'activité dépressionnaire des moyennes latitudes du Pacifique Nord-Est est plus forte (anomalies des fréquences positives et anomalies de pression négatives) les dépressions ont des trajectoires plus méridionales et ceci semble entraver la formation et/ou la pénétration des anticyclones sur notre secteur (anomalies des fréquences et des pressions négatives) induisant également des trajectoires plus méridionales des anticyclones. Nous pouvons noter par exemple que lors de l'hiver 1983 très peu d'anticyclones ont circulé sur le secteur alors que les dépressions sont très fréquentes dans le Golfe de l'Alaska (Figure 3.10.c), cet hiver correspondant également à des dépressions très creuses (Figure 3.4) et des anticyclones plus faibles (Figure 3.5). Inversement lorsque l'activité dépressionnaire est plus faible sur notre secteur avec des trajectoires de dépressions plus septentrionales, ceci est favorable à la propagation et/ou à la formation d'anticyclones avec des pressions plus fortes, sur le Pacifique Nord-Est et les trajectoires des anticyclones sont également davantage septentrionales.

Nous devons souligner que la fréquence des transitoires détermine la taille de l'échantillon saisonnier pour les caractéristiques comme, par exemple, la pression minimale ou maximale atteinte (pour la pression moyenne, la fréquence * la durée moyenne détermine la taille de l'échantillon). Ainsi, la variation de la taille de l'échantillon a un « effet stochastique » sur les statistiques saisonnières moyennes mais pas systématique. Cependant, cet effet d'échantillonnage doit certainement influencer les relations présentées ici. L'estimation de cet effet et de son influence est au-delà de l'objectif de notre travail, et nous ne le considérerons pas, mais nous devons être attentifs sur le fait qu'il existe.

3.3. Indices de circulation transitoire

Dans l'objectif de synthétiser et donc de décrire plus aisément la variabilité de l'activité dépressionnaire et/ou anticyclonique des moyennes latitudes du Pacifique Nord-Est, nous ne pouvons pas considérer les indices de fréquence et pression des systèmes transitoires indépendamment l'un de l'autre. Pezza et Ambrizzi (2003) parviennent à la même conclusion pour les transitoires de l'Hémisphère Sud. Précédemment, nous avons observé que dans le Pacifique Nord-Est, il n'existe pas de relation significative entre les fréquences et intensité pour les dépressions comme pour les anticyclones. Pourtant, ces deux caractéristiques décrivent l'activité. Par exemple, on qualifiera un hiver de forte activité dépressionnaire sur une région si elle a été traversée par beaucoup de systèmes qui ont présenté une pression anormalement basse. Par conséquent, nous allons combiner les statistiques des fréquences et des pressions moyennes afin de quantifier l'activité des dépressions et anticyclones.

3.3.1. Indice de l'activité dépressionnaire

Une activité dépressionnaire intensifiée correspond à la fois à des fréquences plus importantes et à des pressions centrales plus faibles, par conséquent, l'indice dépressionnaire¹⁰ (D) est défini de la manière suivante :

$$D = F \text{ dépressions} - P \text{ dépressions}$$

(F représente la fréquence et P la pression moyenne au cours des trajectoires. F et P ont été standardisés antérieurement.)

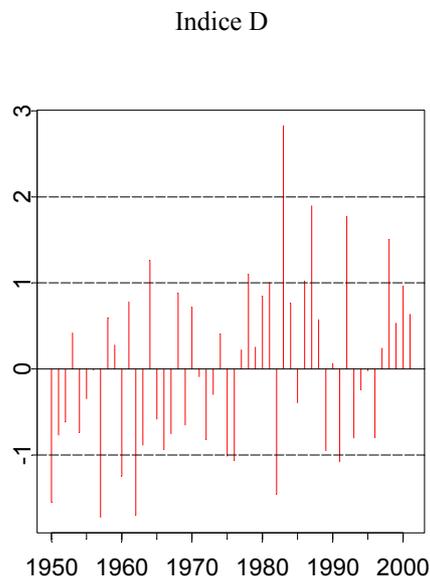


Figure 3.6. Indice standardisé de l'activité dépressionnaire (anomalies standardisées des fréquences – anomalies standardisées des pressions).

¹⁰ L'activité dépressionnaire est positive si F-P est positif.

La Figure 3.6 présente l'indice de l'activité dépressionnaire. De 1950 jusqu'au milieu des années 1970, il est majoritairement négatif, ainsi au cours de cette période, l'activité dépressionnaire a tendance à être faible, avec de fortes valeurs négatives pour les années 1950, 1957, 1960 et 1962. A partir de 1977, l'indice D montre une intensification de l'activité avec des valeurs généralement positives jusqu'en 2001, notamment pour les hivers 1978, 1981, 1983 et 1987 et 1998 (notons que l'hiver 1982 présente une activité dépressionnaire particulièrement faible).

3.3.2. Indice de l'activité anticyclonique

Une plus forte activité anticyclonique se traduit par des systèmes plus fréquents présentant des pressions plus fortes, par conséquent, l'indice anticyclonique¹¹ (A) est défini de la manière suivante :

$$A = F \text{ anticyclones} + P \text{ anticyclones}$$

Indice A

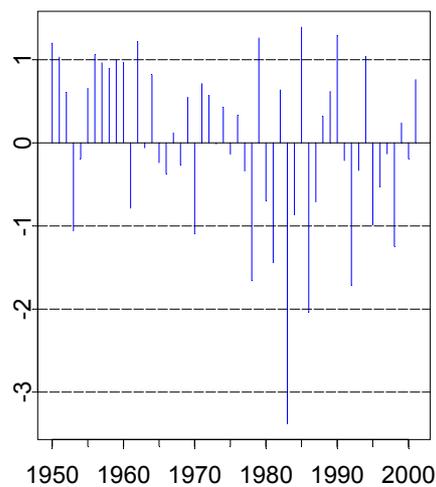


Figure 3.7. Indice standardisé de l'activité anticyclonique (anomalies standardisées des fréquences + anomalies standardisées des pressions).

L'indice A (Figure 3.7) représente l'activité anticyclonique. Au cours de la chronique 1950-2001, on peut distinguer 3 périodes. La première, de 1950 à 1964, est caractérisée par une forte activité anticyclonique dans le Pacifique Nord-Est avec seulement deux hivers présentant des valeurs négatives : 1953 et 1961. La deuxième période, de 1965 à 1976, montre une activité anticyclonique modérément positive. Enfin, la troisième période, de 1977 à 2001, se caractérise par un net affaiblissement de l'activité anticyclonique (indice A généralement négatif) avec des valeurs largement négatives au cours des hivers 1978, 1981, 1983, 1986, 1992 et 1998. De plus, cette période présente une très forte variabilité inter-annuelle car elle comprend également l'enregistrement de trois hivers de forte activité: 1979, 1985 et 1990.

¹¹ L'activité anticyclonique est positive si F+P est positif.

Le changement dans le milieu des années 1970 est moins marqué que pour l'indice D, tant au point de vue de la phase que de la magnitude. Cependant il est clair que depuis 1977, on observe une forte augmentation de la variabilité inter-annuelle de l'activité anticyclonique hivernale (Diff. var. sig. > 99%, F-test).

3.3.3. Indice de l'activité transitoire

Les indices D et A sont anti-corrélés avec $r = -0.62$ (sig > 99%) au cours de la période 1950-2001. Cependant, nous pouvons souligner que la relation est plus faible de 1950 à 1976 ($r = -0.37$, sig. > 90%) qu'au cours de la période 1977-2001 ($r = -0.67$, sig. > 99%). Par conséquent la force de la relation entre l'activité dépressionnaire et anticyclonique semble être modulée sur de plus grandes échelles temporelles.

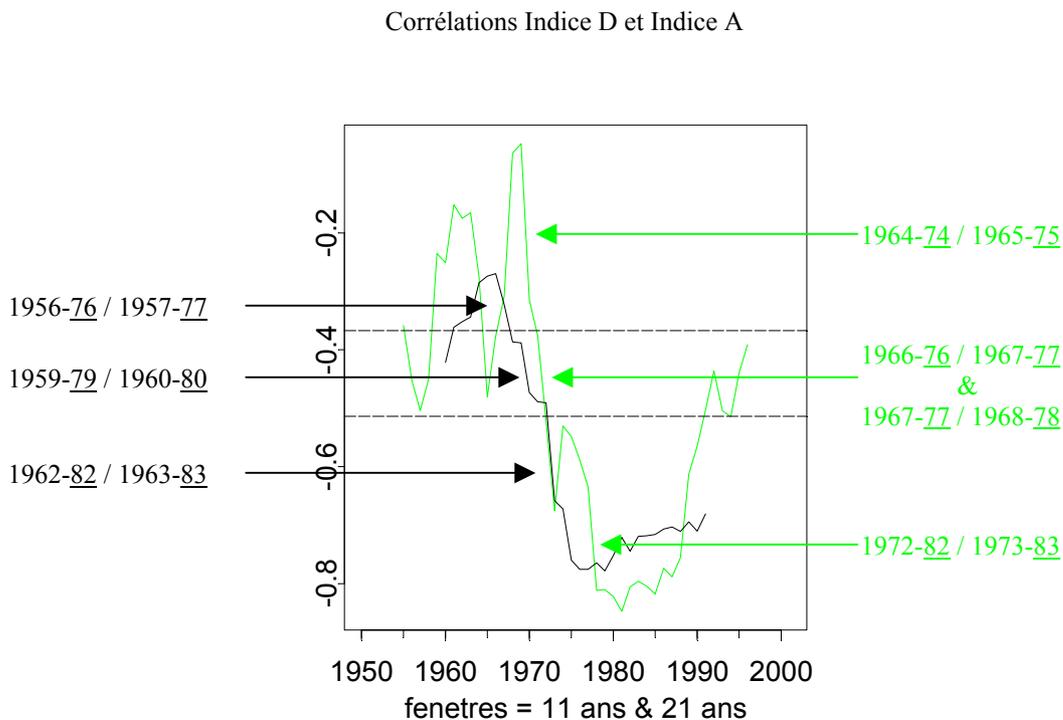


Figure 3.8. Corrélations glissantes entre l'indice D et l'indice A, dont la taille de la fenêtre est égale à 11 ans (vert) et égale à 21 ans (noir). Les lignes horizontales en tirets représentent les seuils de corrélation significative à 95% (t-test unilatéral) pour une période de 11 ans (-0.51) et de 21 ans (-0.36). Les principales périodes de décrochement d'après les fenêtres de 11 ans et de 21 ans sont mentionnées en vert et en noir respectivement.

En regardant plus précisément la variation sur les échelles décennales de la relation entre les indices D et A (Figure 3.8), nous remarquons deux périodes distinctes se caractérisant par des corrélations non ou peu significatives pour la première, et des coefficients plus forts pour la seconde. Ces deux périodes, sont séparées par une rupture relativement forte, réalisée en décrochements successifs. Les coefficients de corrélation calculés avec des fenêtres glissantes de 11 ans et 21 ans montrent que l'anti-phase entre l'activité dépressionnaire et anticyclonique devient significative après le milieu des années 70 et plus fortement au cours des années 1980.

Il semblerait que le changement climatique survenu entre 1976-1977 dans le Pacifique Nord soit en relation avec la modulation de l'anti-phase entre l'activité dépressionnaire et anticyclonique dans le Pacifique Nord-Est. De plus, l'hiver (JFM) 1983 (fenêtre 11 ans et

fenêtre 21 ans) correspondant à une phase excessivement chaude de ENSO, pourrait expliquer le très fort décrochement observable entre l'hiver 1982 et l'hiver 1983. Selon les indices D et A (Figures 3.6 et 3.7), l'hiver 1983 est très remarquable avec une activité dépressionnaire la plus forte et une activité anticyclonique la plus faible enregistrée sur la période 1950-2001 (JFM). Nous ne développerons pas pour le moment les relations entre l'activité dépressionnaire / anticyclonique du Pacifique Nord-Est et les différents modes climatiques qui influencent notre secteur car elles feront l'objet du chapitre suivant.

Nous devons rappeler, tout de même, que les variations de la taille de l'échantillonnage (ex : 11 ans, 21 ans ...) font varier la force de la relation (ex : Gershunov et al. 2001). Dans le cas de l'activité transitoire du Pacifique Nord-Est, l'anti-phase entre les indices D et A apparaît significative pour la chronique 1950-2001 et sa modulation au cours de la période étudiée n'est pas qu'exclusivement un « effet statistique » car cette association de l'activité des dépressions et anticyclones change significativement et en synchronisation avec le changement climatique de la fin des années 1970. Les raisons de cette modulation sur les échelles temporelles décennales sont sans doute dues à des forçages extérieurs qui, tendent à contraster plus ou moins l'activité dépressionnaire et anticyclonique sur la région étudiée.

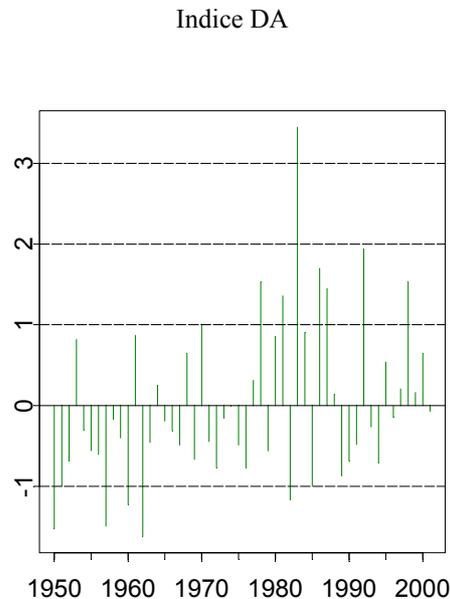


Figure 3.9. Indice standardisé de l'activité transitoire (Indice D standardisé – Indice A standardisé)

Pour avoir une perception plus synthétique de la variabilité de la circulation transitoire de la basse troposphère, nous avons combiné les deux indices précédents en un, représentant ainsi l'activité hivernale transitoire dans le Pacifique Nord-Est (Indice DA = Indice D - Indice A, Figure 3.9). Les hivers qui sont caractérisés par une activité dépressionnaire prépondérante, sont identifiés par la phase positive de l'indice DA, et inversement, une activité anticyclonique plus importante correspond à la phase négative de l'indice DA.

Au cours de la chronique 1950-2001, l'indice DA présente trois périodes :

- de 1950 à 1962, l'indice DA est généralement négatif car selon les indices D et A (figure 3.6 et 3.7) l'activité anticyclonique tend à dominer dans le Pacifique Nord-Est, avec de fortes valeurs en 1950, 1951, 1957, 1960 et 1962 ;

- de 1963 à 1976, l'indice DA est généralement négatif mais proche de la moyenne (neutre), reflétant un équilibre relatif entre l'activité dépressionnaire et anticyclonique ;

- de 1977 à 2001, l'indice DA est généralement positif, ainsi l'activité dépressionnaire tend à être prédominante avec de fortes valeurs positives en 1978, 1981, 1983, 1986, 1987, 1992 et 1998.

La figure 3.10 montre les trajectoires des dépressions et des anticyclones au cours de trois hivers où l'on observe une activité anticyclonique prépondérante (a), un équilibre entre les deux (b) et une activité dépressionnaire prépondérante (c), selon les indices D, A et DA (Figures 3.6, 3.7 et 3.9). La superposition des trajectoires hivernales sur les cartes des champs d'anomalies de PNM illustre l'action des transitoires synoptiques dans la détermination, plus familière, des moyennes saisonnières des champs de pression de surface.

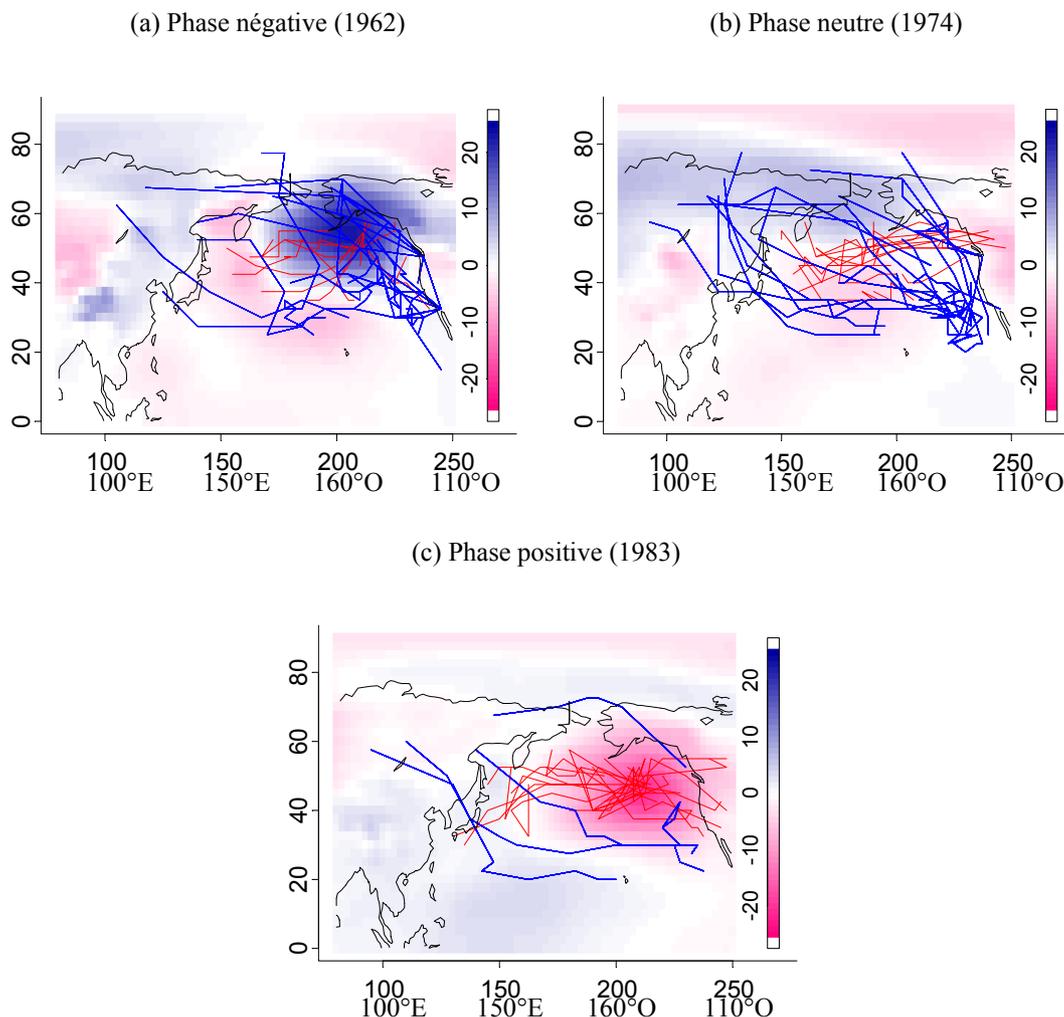


Figure 3.10. Anomalies des PNM et trajectoires des dépressions et des anticyclones en JFM 1962 (a) 1974 (b) et 1983. Ces hivers représentent un exemple de la phase négative, neutre et positive de l'indice DA respectivement.

L'activité transitoire a été quantifiée au sein du Pacifique Nord-Est, laissant apparaître une alternance entre les hivers de forte activité dépressionnaire et de faible activité anticyclonique et inversement, au cours de la période 1950-2001. Une rupture climatique relativement claire apparaît au milieu des années 1970, séparant une première période durant laquelle les anticyclones dominent dans le Pacifique Nord-Est, d'une seconde période

majoritairement dominée par l'activité dépressionnaire. Au cours de la période 1950-2001, l'activité anticyclonique tend à s'affaiblir : la pression centrale moyenne des anticyclones diminue d'environ 2 hPa et à partir de 1977, leur fréquence devient plus variable d'un hiver à l'autre. Réciproquement, l'activité dépressionnaire devient plus intense et de manière abrupte entre 1976 et 1977, avec des systèmes sensiblement plus creux. Evidemment, à ces larges variations est surimposée une forte variabilité inter-annuelle. Par exemple, la période 1977-2001, est caractérisée, de manière générale, par des pressions des dépressions inférieures à la normale, mais ponctuée par des hivers d'anomalies positives des pressions moyennes, c'est à dire par des dépressions moins creuses, comme en 1989-1990, 1994-96.

Ces observations confirment les résultats antérieurs qui mettent en évidence l'intensification de l'activité dépressionnaire dans le Pacifique Nord associée à des trajectoires de cyclones extra tropicaux plus méridionales et une extension ainsi qu'un déplacement vers l'Est de la dépression des Aléoutiennes (ex : Trenberth et Hurrell 1994; Graham et Diaz 2001, Schneider et Cornuelle 2005). Dans le chapitre suivant, nous allons relier les indices de l'activité transitoire du Pacifique Nord-Est avec le climat moyen global afin de rechercher les relations entre l'activité dépressionnaire / anticyclonique et les modes climatiques tel que North Pacific Oscillation (NPO) qui synthétise la variabilité climatique sur notre secteur d'étude.

Chapitre 4 : L'activité dépressionnaire / anticyclonique hivernale dans le Pacifique Nord-Est et le climat global

Les variations climatiques régionales et les téléconnexions à l'échelle globale sont l'objet d'un intérêt qui débuta dès la fin du 19^{ème} siècle, mais ce sont Walker et Bliss (1932) qui ont massivement investi le sujet et mis en lumière les grandes oscillations climatiques telles que North Atlantic Oscillation (NAO), North Pacific Oscillation (NPO) et Southern Oscillation (SO). Ces modes mettent en opposition des régions climatiques distinctes au sein d'un vaste espace atmosphérique. Pour NPO, et au cours de l'hiver, Walker et Bliss ont observé que les anomalies de la pression atmosphérique de surface sont généralement en opposition entre les régions de Hawaii (Honolulu) et de l'Alaska / Nord-Ouest du Canada (Sitka, Fort Simpson, Juneau, Dawson, Nome), mais aussi que les températures varient inversement dans les Aléoutiennes (Dutch Harbour) et au sud-ouest du Canada (Qu'Appelle, Calgary, Prince Albert). Ils ont ainsi défini NPO de la manière suivante :

$$\text{NPO} = \{\mathbf{P} \text{ Honolulu}\} + 1/3 \{\mathbf{T} \text{ Qu'Appelle} + \mathbf{T} \text{ Calgary} + \mathbf{T} \text{ Prince Albert}\} - 2/3 \{(\mathbf{P} \text{ Sitka}, \mathbf{P} \text{ Fort Simpson or Juneau}) + (\mathbf{P} \text{ Dawson}) + \mathbf{P} \text{ Nome}\} - \{\mathbf{T} \text{ Dutch Harbour}\}$$

Où **P** est la pression au niveau de la mer et **T** la température de l'air (cf. Annexes, figure A4.1).

La structure associée à cet indice montre l'opposition de la variation des pressions entre le secteur Alaska / Nord du Canada et la zone inter-tropicale du Pacifique occidental (Hawaii inclus). Il s'est avéré plus tard, avec les travaux de Rogers (1981), Wallace et Gutzler (1981) et Barnston et Livezey (1987), par exemple, que cette structure de la variation inter-annuelle de la pression atmosphérique n'est pas tout à fait exacte. A l'échelle de l'Hémisphère Nord (au nord de 20°N), les grandes structures spatiales de la variabilité climatique ont été identifiées, de manière objective, à partir des données de l'altitude du géopotential 500 mb ou 700 mb en effectuant une analyse en composantes principales simple (Wallace et Gutzler, 1981) ou avec rotation (Barnston et Livezey 1987). Ainsi, le mode PNA (Pacific North America pattern) explique les fluctuations climatiques aux échelles inter-annuelles sur le Pacifique Nord et l'Amérique du Nord.

Dans le chapitre précédant, nous avons montré l'association généralement négative entre l'activité dépressionnaire et anticyclonique dans le Pacifique Nord-Est ainsi que le changement de l'activité transitoire synoptique qui s'est opéré à la fin des années 1970, lorsque l'activité dépressionnaire s'est intensifiée au détriment de l'activité anticyclonique. Comment ces indices, dérivés de phénomènes qui n'existent qu'à l'échelle synoptique, peuvent-ils être connectés au climat moyen saisonnier beaucoup mieux connu? Dans ce chapitre, nous allons relier nos indices climatiques décrivant la variabilité inter-annuelle de l'activité transitoire synoptique dans le Pacifique Nord-Est, avec le climat moyen saisonnier à l'échelle globale en surface (section 4.1) et en altitude (section 4.2) et enfin avec les différents

modes climatiques qui sont en relation avec la variabilité basse fréquence de la circulation atmosphérique du Pacifique Nord-Est (section 4.3). Ainsi nous parviendrons à comprendre comment les anomalies des caractéristiques des systèmes transitoires (d'origine synoptique) se traduisent en terme d'anomalies climatiques moyennes.

4.1. La circulation de surface

Les variables globales de surface (ou proches de la surface) utilisées sont les pressions au niveau de la mer (PNM), les températures de l'air à deux mètres (Ta2m, étant une excellente approximation des températures de surface océaniques), et les composantes zonales et méridiennes du vent à dix mètres (u10m et v10m respectivement). Les données réanalysées proviennent de NCEP-NCAR (Tableau 4.1).

Pour établir les liens entre l'activité transitoire du Pacifique Nord-Est et les conditions climatiques globales de surface, nous allons calculer les coefficients de corrélation temporels linéaires entre les indices synthétisant l'activité dépressionnaire (D), anticyclonique (A) et transitoire (DA) et les champs moyens des variables précédemment énumérées, en hiver (JFM) pour la chronique 1950-2001¹². Nous décrirons dans un premier temps, les relations entre les indices D, A et AD et les conditions climatiques de surface et proches de la surface dans le Pacifique Nord et la zone équatoriale (section 4.1.1), puis dans les autres régions du Globe (section 4.1.2).

	Unité	Résolution	Couverture spatiale	Période
PNM	hPa	2.5°*2.5°	90°N-90°S / 0°E-357.5°E	JFM 1950-2001
Ta2m	°K	~1.9°*1.9° (T62)	88.542°N-88.542°S / 0°E-358.125°E	JFM 1950-2001
u10m	m/s	~1.9°*1.9° (T62)	88.542°N-88.542°S / 0°E-358.125°E	JFM 1950-2001
v10m	m/s	~1.9°*1.9° (T62)	88.542°N-88.542°S / 0°E-358.125°E	JFM 1950-2001

Tableau 4.1. Données réanalysées NCEP-NCAR utilisées pour l'analyse en surface (ou proche de la surface) en JFM de 1950 à 2001.

4.1.1. Dans le Pacifique Nord et la zone inter-tropicale

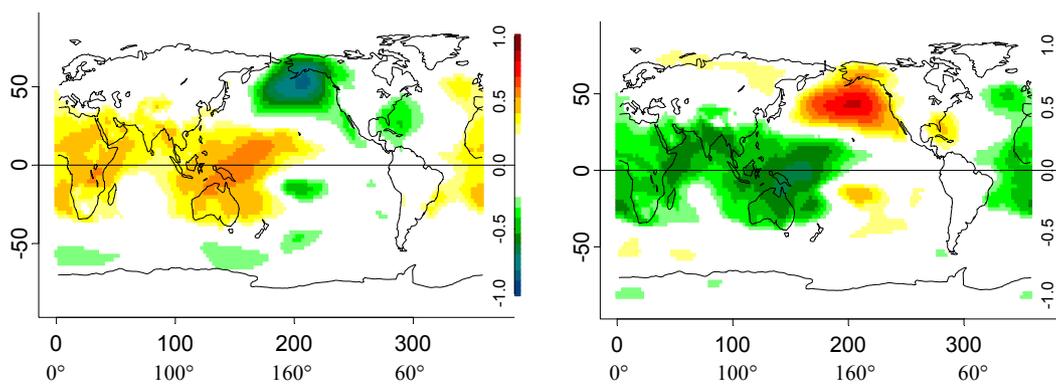
Dans la zone extra-tropicale du Pacifique Nord, lorsque l'activité dépressionnaire est prépondérante dans le Pacifique Nord-Est, une vaste zone de pressions anormalement basse, centrée vers 155°O et 47.5°N couvre le centre et l'est du Pacifique Nord et l'Alaska (Figure 4.1). Cette zone de plus faible pression s'étire vers le sud sous forme d'un appendice le long de la côte américaine jusqu'en Basse Californie. Cette aire de pression anormalement basse représente l'intensification de la dépression des Aléoutiennes, associée à une anomalie de circulation cyclonique sur l'ensemble de la zone extra-tropicale du Pacifique Nord (Figure

¹² Une analyse composite aurait permis un diagnostic précis. Ici nous aurons une approche plus générale, en tentant simplement d'identifier comment les anomalies de l'activité transitoire se traduisent en terme d'anomalies climatiques dérivées des champs moyens des PNM, Ta2m...

4.2). Les anomalies de vent de sud et des températures supérieures à la normale s'étendent le long de la côte ouest de l'Amérique du Nord, alors que des anomalies de vents de nord et des températures inférieures à la normale se manifestant sur le centre et l'Ouest du Pacifique Nord.

(a) Cor (Indice D, PNM.JFM) 1950-2001

(b) Cor (Indice A, PNM.JFM) 1950-2001



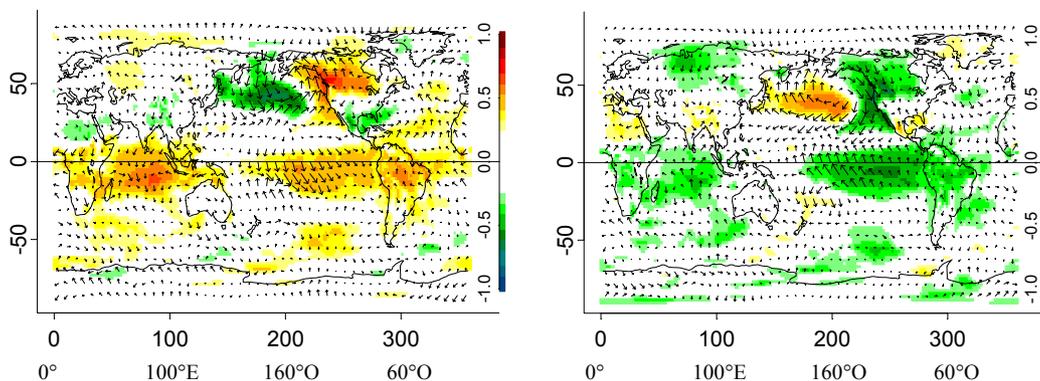
(c) Cor (Indice DA, PNM.JFM) 1950-2001

Figure 4.1. Cartes des coefficients de corrélation linéaire entre les pressions au niveau de la mer et l'indice D (a), l'indice A (b) et l'indice DA (c), JFM de 1950 à 2001 (couleurs=sig.>95%, t-test bilatéral).

Lorsque l'activité dépressionnaire est renforcée dans le Pacifique Nord-Est (Indices D et DA positifs), les influences de la circulation tempérée pénètrent plus au sud, dans la ceinture sub-tropicale et tropicale. Nous remarquons une claire diminution de l'intensité de l'anticyclone sub-tropical du Pacifique Nord-Est (PNM négative et anomalies de circulation de sud le long des côtes nord-américaines ainsi qu'au nord de Hawaii). Normalement, en hiver, cet anticyclone (zone de haute pression en moyenne) s'étend de la Californie à Hawaii et est associé à une circulation moyenne anticyclonique avec des alizés de composante nord sur l'ensemble de la zone tropicale du Pacifique Nord. Lors des hivers durant lesquels l'activité dépressionnaire est plus forte dans le Pacifique Nord-Est, l'anticyclone sub-tropical est décalé et comprimé vers l'Equateur, et les alizés sont affaiblis. Une anomalie de divergence des vents proches de la surface apparaît dans l'ensemble de la zone tropicale du Pacifique Nord (vers 15°N) et en particulier sur la région orientale (anomalie de divergence qui ne correspond pas à une anomalie positive des PNM). On remarque également des anomalies de vents de nord traversant l'Equateur et une anomalie de convergence dans la zone de convergence du Pacifique Sud (ZCPS). Plus précisément, dans la zone tropicale du Pacifique occidental une vaste zone d'anomalies positives des pressions est centrée le long de l'Equateur. Ce même secteur n'est pas associé à des anomalies de température ou de vent, mais à des anomalies positives de températures de l'air et des vents de composante nord dans la partie centrale et orientale de la zone équatoriale et sub-équatoriale du Pacifique (zone NINO). Ceci est également associé à une diminution de l'intensité de la circulation alizéenne

du Pacifique Sud, en lien avec le décalage vers le sud de la Zone de Convergence Inter-Tropicale (ZCIT) dans ce même secteur.

(a) Cor (Indice D, Ta2m&V10.JFM) 1950-2001 (b) Cor (Indice A, Ta2m&V10.JFM) 1950-2001



(c) Cor (Indice DA, Ta2m&V10.JFM) 1950-2001

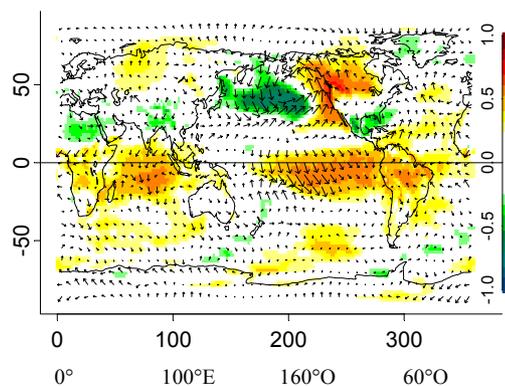


Figure 4.2. Cartes des coefficients de corrélation linéaire entre les températures de l'air à 2 mètres (couleurs), le vent à 10 mètres (vecteurs) et l'indice D (a), l'indice A (b) et l'indice DA (c), JFM de 1950 à 2001 (couleurs=sig.>95%, t-test bilatéral).

4.1.2. A l'échelle globale

Malgré la relation modérée entre l'indice DA et la circulation moyenne du Pacifique Sud, on observe une relative symétrie de part et d'autre de l'Equateur dans le Bassin Pacifique (Evans et al. 2001, Dettinger et al. 2001). Les hivers de forte activité dépressionnaire dans le Pacifique Nord-Est traduisent des anomalies négatives des PNM dans le centre et l'est du Pacifique Nord ainsi que des températures de l'air plus chaudes et des anomalies de vent de sud dans le Pacifique Nord-Est. Cette configuration dans le Pacifique Nord correspond à des anomalies négatives de pression sur le centre et l'est du Pacifique Sud, des températures plus chaudes et des anomalies de vents de nord au centre de la zone équatoriale et tropicale sud du Pacifique, révélant une intensification de la zone de Convergence du Pacifique Sud (ZCPS). Peut-être est-il possible qu'une circulation tempérée boréale se propageant davantage vers le sud, soit associée à un décalage vers le sud de l'anticyclone sub-tropical Nord. Ce décalage d'ensemble pourrait intensifier les transports trans-équatoriaux d'humidité en direction du sud générant des anomalies négatives de pression et un renforcement au niveau de la convergence dans la ZCPS. Cette ligne de pensée est purement spéculative, évidemment. Cependant, il existe des évidences tant au point de vue des observations que de la modélisation. Il a été observé que la convection tropicale estivale (au niveau de la ZCPS et son équivalente dans le Pacifique Nord, ZCPN) est entretenue par l'humidité évaporée et advectée depuis la zone tropicale et sub-tropicale de l'hémisphère d'hiver (Gershunov et Roca 2004). Par conséquent,

il pourrait exister un lien hydrodynamique direct entre la circulation tempérée, qui agirait en déplaçant l'anticyclone sub-tropical en direction de l'Equateur dans l'hémisphère d'hiver, et à l'inverse, en éloignant de l'Equateur, la convection tropicale dans l'hémisphère estival. Est-ce qu'à son tour, la ZCPS pourrait avoir des effets retro-actifs sur la circulation transitoire du Pacifique Nord ? Il est envisageable, qu'en contre-partie, elle soit également favorable à une anomalie de subsidence davantage méridionale dans la zone tropicale du Pacifique Nord, permettant ainsi aux systèmes dépressionnaires d'adopter des trajectoires plus méridionales.

L'activité transitoire de surface du Pacifique Nord-Est apparaît comme étant liée de manière cohérente avec l'ensemble des anomalies climatiques dans le Bassin Pacifique. Une symétrie, de part et d'autre de l'Equateur, se manifeste également dans la structure globale des anomalies de PNM. Une large zone d'anomalies positives des pressions s'étire de l'Atlantique oriental jusque dans la zone inter-tropicale du Pacifique occidental, couvrant l'Ouest de l'Europe, la Méditerranée et l'Afrique du Nord, le Nord de l'Océan Indien, le sub-continent Indien et l'Indonésie. Des températures de l'air à 2 mètres anormalement chaudes couvrent la plupart des régions de la zone équatoriale. Inversement, une aire de plus faibles pressions et de températures plus froides est centrée sur la Floride. Cette dernière observation correspond également à la phase positive de PDO et chaude de ENSO (ex : Gershunov et Barnett 1998).

Inversement, une activité anticyclonique prépondérante dans le Pacifique Nord-Est (au détriment de l'activité dépressionnaire) suggère une phase négative de PDO avec des anomalies de flux de nord et des températures plus froides le long de la côte ouest de l'Amérique du Nord, de possibles conditions favorables à La Niña dans le Pacifique Est équatorial, et des anomalies négatives de pression dans la région « Tropical Warm Pool », des vents de nord trans-équatoriaux plus faibles ou interrompus, et une ZCIT et ZCPS affaiblies et décalées vers le nord.

Comme nous l'avons montré dans le chapitre précédant, le changement climatique du milieu des années 1970 se traduit dans la circulation transitoire non seulement par une intensification de l'activité dépressionnaire au détriment de l'activité anticyclonique, mais également par une nette accentuation de l'anti-phase entre les indices D et A. Ainsi la magnitude de la relation négative entre ces deux indices devient plus forte après la rupture climatique 1976-77. Cette même observation peut être rapportée pour les relations établies entre les indices de la circulation transitoire du Pacifique Nord-Est et les PNM, Ta2m et V10m, avec des coefficients de corrélations nettement renforcés à partir de 1977 (cf. Annexes, Figures A4.2 et A4.3 et aussi Figures A4.4, A4.5, A4.6 et A4.7 qui présentent les corrélations entre les PNM, Ta2m&V10m et la fréquence et l'intensité des dépressions et des anticyclones). Nous constatons que contrairement à la période 1950-76, lors de laquelle les corrélations sont plus faibles et confinées dans les moyennes latitudes du Pacifique Nord, la période 1977 à 2001 montre des structures, tant pour les PNM que les Ta2m et V10m, spatialement plus larges avec des coefficients de corrélation plus forts dans le Pacifique Nord, en même temps qu'apparaît un lien significatif avec les conditions atmosphériques dans les tropiques ainsi que la symétrie de part et d'autre de l'Equateur. Ces observations suggèrent qu'à partir du milieu des années 1970, les conditions climatiques de la zone inter-tropicale présentent des liens plus forts avec celles des zones extra-tropicales Nord et Sud du Bassin Pacifique (Trenberth et Caron 2000). Ainsi, les structures de variabilité des PNM, Ta2m et V10m en lien avec l'activité transitoire du Pacifique Nord-Est sont grandement renforcées notamment sur le secteur Pacifique Nord / Amérique du Nord. C'est également après 1977 que l'activité transitoire et plus particulièrement l'activité anticyclonique du Pacifique Nord-

Est montre un lien modeste mais significatif avec les anomalies des Ta2m et V10m (mais pas avec les PNM) sur la Sibérie, peut-être en réponse à l'intensification de la dépression des Aléoutiennes. Ces remarques seront complétées et davantage discutées dans la section 4.3 ainsi que dans la 3^{ème} partie.

Lorsque l'activité dépressionnaire est renforcée au détriment de l'activité anticyclonique (Indice DA positif) dans le Pacifique Nord-Est, un dipôle dans les PNM se distingue avec d'une part la dépression des Aléoutiennes anormalement plus creusée et d'autre part, une aire de plus haute pression dans la zone inter-tropicale du Pacifique Occidental, dans la région « Warm pool ». Cette configuration, associée à une quasi-symétrie de part et d'autre l'Equateur est une caractéristique robuste des modes de la variabilité inter-annuelle et décennale du Pacifique (ex : Dettinger et al. 2001). La combinaison des phases chaudes de ENSO et de PDO (cf. description détaillée dans la section 4.3.1) est également visible dans les structures de variabilité des champs de températures et des directions du vent dans le Bassin Pacifique. La magnitude des coefficients de corrélation suggère que PDO est le mode dominant et que ENSO est secondaire, cependant, il n'est pas surprenant qu'ils soient tous les deux reliés à l'activité des transitoires dans le Pacifique Nord-Est, car leur interaction est bien connue comme étant reliée fortement et avec consistance aux signaux climatiques en Amérique du Nord (ex : Gershunov et Barnett 1998).

4.2. La circulation dans la moyenne et la haute troposphère

Les caractéristiques de surface des dépressions et des anticyclones sont en lien avec la circulation en altitude, les ondes baroclines déterminant notamment les trajectoires des systèmes perturbés (ex : Wallace et al. 1988). Il a été observé également, que les variations de la fréquence et de l'intensité des systèmes transitoires influencent partiellement la circulation atmosphérique en altitude car ils contribuent à renforcer et/ou à conserver les anomalies climatiques de la haute troposphère, maintenant ainsi les caractères de la variabilité de basse fréquence de la circulation des moyennes latitudes (ex : Holopainen 1983, Held et al. 1989, Ting et Held 1990, Cai et Van Den Dool 1992, Trenberth et Hurrell 1994).

	Unité	Résolution	Couverture spatiale	Période
G500	m	2.5°*2.5°	90°N-90°S / 0°E-357.5°E	JFM 1950-2001
Ta500	°C	2.5°*2.5°	90°N-90°S / 0°E-357.5°E	JFM 1950-2001
u500	m/s	2.5°*2.5°	90°N-90°S / 0°E-357.5°E	JFM 1950-2001
v500	m/s	2.5°*2.5°	90°N-90°S / 0°E-357.5°E	JFM 1950-2001
G200	m	2.5°*2.5°	90°N-90°S / 0°E-357.5°E	JFM 1950-2001
Ta200	°C	2.5°*2.5°	90°N-90°S / 0°E-357.5°E	JFM 1950-2001
u200	m/s	2.5°*2.5°	90°N-90°S / 0°E-357.5°E	JFM 1950-2001
v200	m/s	2.5°*2.5°	90°N-90°S / 0°E-357.5°E	JFM 1950-2001

Tableau 4.2. Données réanalysées NCEP-NCAR utilisées pour l'analyse en altitude (à 500 hPa et à 200 hPa) en JFM de 1950 à 2001.

Après avoir établi les liens entre l'activité dépressionnaire / anticyclonique du Pacifique Nord-Est et les conditions atmosphériques moyennes de surface et proche de la surface, nous allons analyser les relations avec la circulation globale en altitude. Pour cela, nous calculerons les coefficients de corrélation linéaires entre les indices D, A et AD et les champs globaux d'altitudes du géopotential (G), température de l'air (Ta) et les composantes zonale (u) et méridienne (v) du vent à 500 hPa (section 4.2.1) et à 200 hPa (section 4.2.2) issus des Réanalyses NCEP/NCAR, en JFM et pour la période 1950-2001 (Tableau 4.2).

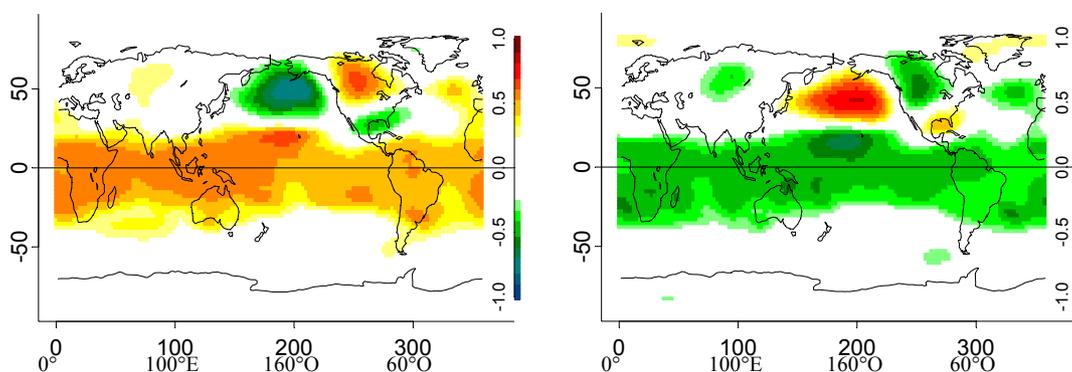
4.2.1. Dans la moyenne troposphère (à 500 hPa)

Lorsque l'activité dépressionnaire est renforcée dans le Pacifique Nord-Est, l'altitude du géopotential 500 hPa est plus basse dans la zone extra-tropicale du Pacifique Nord, ainsi que sur le Sud-Est des Etats-Unis (Figure 4.3). En revanche, elle est plus haute sur le continent nord-américain (sur l'Ouest du Canada) ainsi que dans la zone inter-tropicale à l'échelle globale et plus spécifiquement dans la région de Hawaii. Cette structure forme donc un quadri-pôle bien connu qui est appelé plus couramment PNA. Chacun de ces pôles est associé à une anomalie soit cyclonique (altitude du géopotential anormalement plus basse) soit anticyclonique (altitude du géopotential anormalement plus haute) de la circulation des vents. Ce quadri-pôle existe également dans les anomalies de températures (Figure 4.4). Les anomalies de vent de nord sont associées à des températures plus froides sur le centre et l'Ouest du Pacifique Nord, ainsi que sur le Sud-Est des Etats-Unis, et les anomalies de vent de sud sont associées à des températures plus chaudes sur le centre et l'Ouest du Canada, ainsi que dans la région de Hawaii.

Plus précisément pour le Pacifique Nord, la circulation des vents à 500 hPa est organisée dans le sens cyclonique, centrée vers 45°N-150°O, montrant une accentuation de la composante nord sur la frange occidentale du Pacifique Nord (talweg froid), une accélération de vent d'ouest dans la zone sub-tropicale correspondant à l'intensification du Jet subtropical Est Asiatique, et une accentuation de la composante sud des vents le long du continent nord-américain (dorsale chaude).

Dans la zone tropicale du Pacifique Nord, les anomalies de vent sont organisées en circulation dans le sens anticyclonique, centrée sur Hawaii. Plus à l'est, entre Hawaii et l'Amérique Centrale, les anomalies de composante nord de la circulation des vents, se prolonge jusqu'au niveau de la ZCIT et de la ZCPS.

(a) Cor (Indice D, G500.JFM) 1950-2001 (b) Cor (Indice A, G500.JFM) 1950-2001



(c) Cor (Indice DA, G500.JFM) 1950-2001

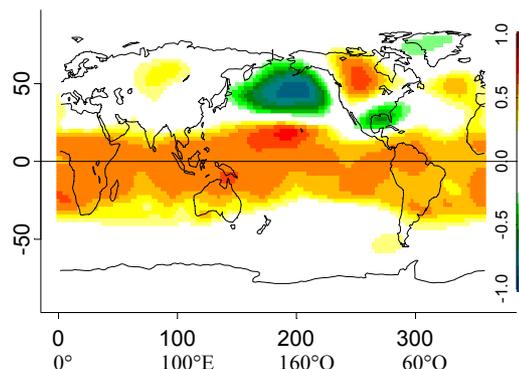
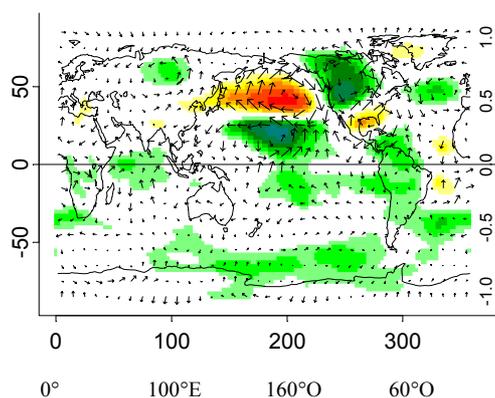
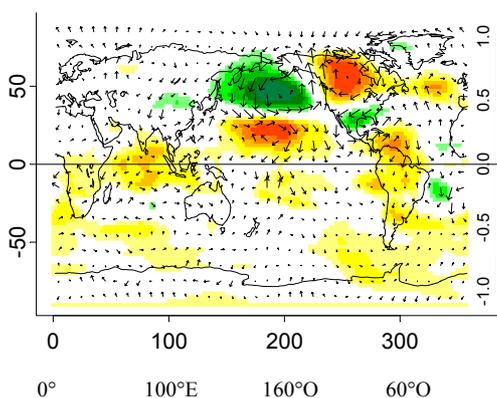


Figure 4.3. Cartes des coefficients de corrélation linéaire entre l'altitude du géopotential 500 hPa et l'indice D (a), l'indice A (b) et l'indice DA (c), JFM de 1950 à 2001 (couleurs=sig.>95%, t-test bilatéral).

Inversement lorsque l'activité anticyclonique est plus forte dans le Pacifique Nord-Est, l'altitude du géopotential 500 hPa est plus élevée et est associée à une anomalie de circulation anticyclonique induisant des températures plus élevées dans les moyennes latitudes du centre et de l'Ouest du Pacifique Nord (ainsi que sur le Sud-Est des Etats-Unis) et en revanche l'altitude du géopotential est plus basse et est associée à des anomalies de circulation cyclonique et des températures plus froides dans la région de Hawaii (et sur l'Ouest du Canada). Dans le Pacifique Nord, on note une diminution de l'intensité du Jet sub-tropical (30°N), associée à une réduction de la baroclinicité. Ainsi, la circulation des vents entre Hawaii et l'Amérique Centrale est ralentie.

(a) Cor (Indice D, Ta500&V500.JFM) 1950-2001

(b) Cor (Indice A, Ta500&V500.JFM) 1950-2001



(c) Cor (Indice DA, Ta500&V500.JFM) 1950-2001

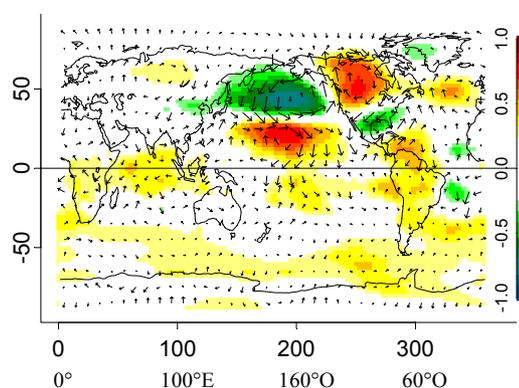


Figure 4.4. Cartes des coefficients de corrélation linéaire entre les températures (couleurs), le vent à 500 hPa (vecteurs) et l'indice D (a), l'indice A (b) et l'indice DA (c), JFM de 1950 à 2001 (couleurs = sig.>95%, t-test bilatéral).

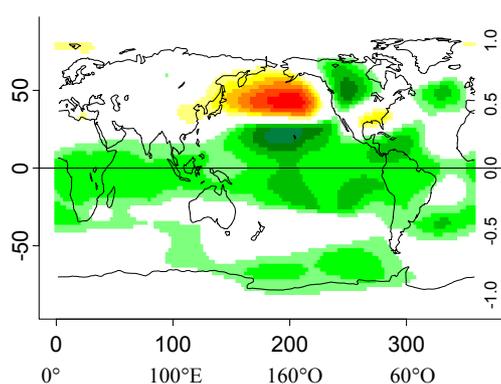
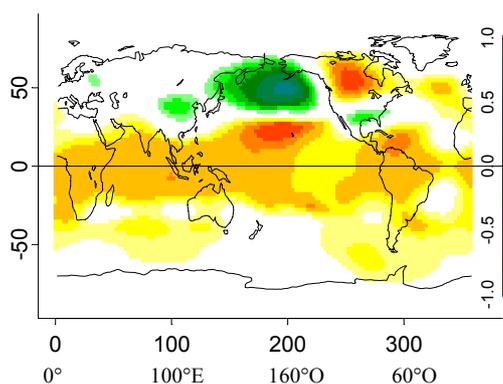
Comme nous l'avons observé en surface, les structures globales des anomalies à 500 hPa, associées à l'activité transitoire du Pacifique Nord-Est, sont renforcées après le changement climatique du milieu des années 70 (non montré). Les liens avec les conditions atmosphériques dans les tropiques deviennent significatifs ainsi que la symétrie inter-hémisphérique. Nous verrons maintenant que le même constat peut être fait pour les anomalies de la circulation moyenne à 200 hPa.

4.2.2. Dans la haute troposphère (à 200 hPa)

A 200 hPa, la structure des anomalies de l'altitude du géopotentiel est relativement similaire à celle de 500 hPa avec le quadri-pôle toujours visible (Figure 4.5). Cependant elle tend à être moins marquée sur l'Amérique du Nord alors que l'opposition entre le centre du Pacifique Nord et Hawaii est toujours aussi forte avec des anomalies de la circulation plus marquées dans la zone tropicale (Figure 4.6). Nous allons donc nous intéresser surtout au dipôle dans le Pacifique Nord.

(a) Cor (Indice D, G200.JFM) 1950-2001

(b) Cor (Indice A, G200.JFM) 1950-2001



(c) Cor (Indice DA, G200.JFM) 1950-2001

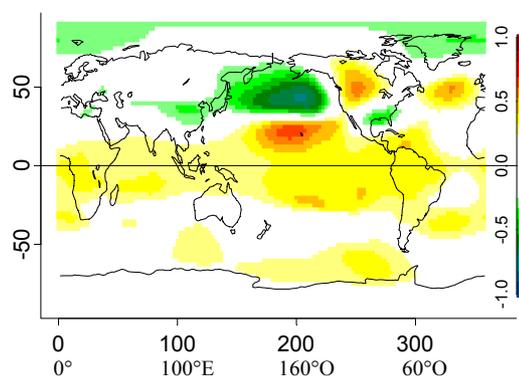
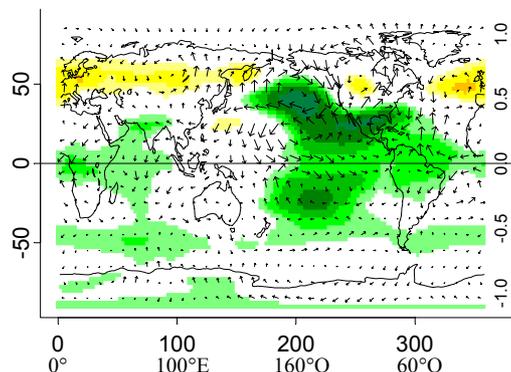
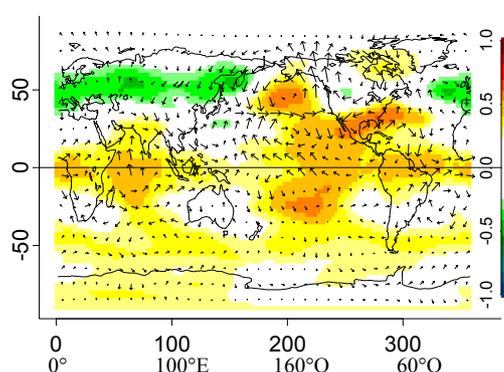


Figure 4.5. Cartes des coefficients de corrélation linéaire entre l'altitude du géopotentiel 200 hPa et l'indice D (a), l'indice A (b) et l'indice DA (c), JFM de 1950 à 2001 (couleurs=sig.>95%, t-test bilatéral).

Lorsque l'activité dépressionnaire est prépondérante dans le Pacifique Nord-Est, une anomalie des vents dans le sens cyclonique centrée dans les moyennes latitudes entre 40°N et 45°N, approximativement, est bien perceptible mais tout de même moins fortement qu'à 500 hPa. La composante nord est accentuée sur l'Ouest du Pacifique Nord et en revanche la composante sud est renforcée sur l'Est.

(a) Cor (Indice D, Ta200&V200.JFM)
1950-2001

(b) Cor (Indice A, Ta200&V200.JFM)
1950-2001



(c) Cor (Indice DA, Ta200&V200.JFM) 1950-2001

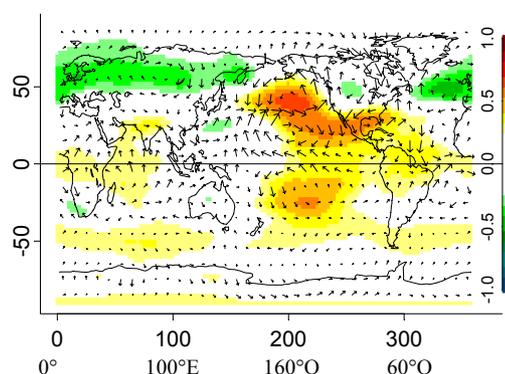


Figure 4.6. Cartes des coefficients de corrélation linéaire entre les températures de l'air (couleurs), le vent à 200 hPa (vecteurs) et l'indice D (a), l'indice A (b) et l'indice DA (c), JFM de 1950 à 2001 (couleurs=sig.>95%, t-test bilatéral).

Dans la zone tropicale du Pacifique Nord, les anomalies de vent sont organisées dans le sens anticyclonique centré sur Hawaii. A l'est de Hawaii les anomalies des vents de nord prennent progressivement un caractère zonal en direction de l'ouest (au sud de 20°N) puis remontent en direction du nord jusqu'au niveau du Jet sub-tropical Est Asiatique. Ainsi, entre ces deux pôles de circulation, le courant Jet sub-tropical est généralement intensifié depuis l'est du Japon jusqu'en Californie. De plus, apparaissent fortement une anomalie de convergence et une anomalie de divergence des vents au niveau du courant Jet sub-tropical, à l'est du Japon (Jet sub-tropical Est Asiatique) et au nord-est de Hawaii respectivement.

L'intensité du courant jet sub-tropical et la variation de son extension vers l'est déterminent le « storm track » qui affecte les basses latitudes, le rail le long duquel les dépressions se forment et se propagent vers 35°N-40°N approximativement. Lorsque ce courant est intensifié avec une forte extension vers l'est, cette configuration est favorable à la formation et à la propagation très méridionale des dépressions dans le centre et l'Est du Pacifique Nord. Ainsi, des cyclones extra-tropicaux se forment plus souvent à l'ouest de la Californie et apportent de fortes précipitations sur le Sud-Ouest des Etats-Unis jusqu'au niveau de la Basse Californie (Mexique). Inversement, lorsque l'extension vers l'Est du Jet sub-tropical est restreinte (configuration associée à un fort anticyclone sub-tropical sur l'Est du Pacifique Nord), ces dépressions se forment plus rarement dans les basse latitudes et n'atteignent pas la côte nord-américaine (persistance plus faible) .

La structure des anomalies de température à 200 hPa est très différente de celle de surface ou à 500 hPa. Elle n'obéit pas au champ des anomalies de l'altitude du géopotentiel ni à celui des anomalies des vents. La caractéristique majeure est une opposition entre les températures

(plus chaudes) du centre et de l'Est de l'ensemble du Bassin Pacifique, sur le Golfe du Mexique et généralement sur l'ensemble de la zone inter-tropicale, et les températures plus froides sur l'Atlantique Nord et l'Eurasie, au nord de 50°N approximativement.

En contre-partie, lorsque l'activité anticyclonique est plus forte dans le Pacifique Nord-Est, une anomalie de la circulation dans le sens anticyclonique est établit dans les moyennes latitudes (géopotential plus haut) et une circulation dans le sens cyclonique se manifeste dans la zone tropicale (géopotential plus bas) du Pacifique Nord. Ainsi, le courant jet sub-tropical est moins fort avec une anomalie de divergence et de convergence entre le Japon et Hawaii et Hawaii et la Californie respectivement. Les températures à 200 hPa sont plus froides sur le centre et l'Est du Bassin Pacifique et également dans la zone inter-tropicale globale, mais plus chaudes dans les hautes latitudes de l'Atlantique Nord et de l'Eurasie.

Pour synthétiser, dans la basse et la moyenne troposphère, la variation de l'intensité de la dépression des Aléoutiennes (pression), est en opposition avec celle de la zone inter-tropicale du Pacifique occidental et plus fortement avec la région de Hawaii, dans la moyenne troposphère. Le renforcement de cette configuration dans le Pacifique Nord après 1976, allant de paire avec une activité dépressionnaire prépondérante sur le Nord-Est, s'accompagne d'une intensification du jet sub-tropical depuis le Japon jusqu'en Californie. Dans la zone extra-tropicale, les anomalies de l'écoulement atmosphérique moyen (à 500 hPa) montrent un talweg froid renforcé sur l'Ouest et le centre du Pacifique Nord et une dorsale chaude renforcée sur le Nord-Est. L'accentuation de la dorsale chaude sur le Pacifique Nord-Est tend à se propager sur le continent nord-américain, influençant la circulation atmosphérique moyenne depuis le Canada jusque dans la région du Golfe du Mexique.

L'observation des anomalies dans la circulation à 500 hPa et à 200 hPa est cohérente avec celle de surface et en accord avec les analyses antérieures, qui mettent en lumière les téléconnexions associées aux conditions atmosphériques et/ou océaniques dans le Pacifique Nord (ex : Namias et al. 1988, Trenberth 1990, Trenberth et Hurrell 1994, Mantua et al. 1997, Mantua et Hare 2001) et dans le Pacifique équatorial (ex : Bjerknes 1966, 1969, White et Walker 1973, Namias 1976a, Keshavamurty 1982, Blackmon et al. 1983, Alexander 1992, Lau 1997, Trenberth et al 1998). Ainsi, PDO semble être en lien avec l'activité transitoire du Pacifique Nord-Est au cours de l'ensemble de la période 1950-2001 et ENSO semble influencer fortement l'activité dépressionnaire / anticyclonique sur notre secteur après le milieu des années 1970.

4.3. Les modes climatiques du Pacifique

En surface, le signal climatique moyen le plus fort associé à une activité dépressionnaire prépondérante dans le Pacifique Nord-Est est l'intensification de la dépression des Aléoutiennes qui va de pair avec la structure des vents à 10 mètres et des températures de l'air à 2 mètres. De plus, l'indice DA apparaît comme étant lié au dipôle des PNM (Aléoutiennes / zone inter-tropicale du Pacifique occidental) et aux anomalies de températures dans la zone inter-tropicale du Pacifique. Les variations de l'activité transitoire du Pacifique Nord-Est, sont alors en accord avec les pressions moyennes de surface de la zone

extra-tropicale du Pacifique Nord et montrent également une structure en quadri-pôle dans la moyenne troposphère sur le secteur Pacifique Nord / Amérique du Nord.

Il est communément admis que la variabilité des TSO dans le Pacifique Nord (PDO) et dans la zone équatoriale (ENSO) sont en relation avec l'activité cyclonique extra-tropicale dans le Pacifique Nord ainsi qu'avec la structure de variabilité de NPI (North Pacific Index) et de PNA (Pacific North America Pattern), au cours de la saison hivernale (ex : Barnston et Livezey 1987, Namias et al. 1988, Kushnir et Wallace 1989, Wallace et al 1990, Trenberth et Hurrell 1994, Gulev et al 2001, Schneider et Cornuelle 2005). Nous devons souligner que la signature de PNA est largement plus forte dans le Pacifique que sur le continent nord-américain (Wallace et Gutzler 1981) et surtout en hiver (Barnston et Livezey 1987, Leathers et Palecki 1992). Ainsi, au cours de la saison hivernale, les modes NPI et PNA sont relativement similaires et synthétisent la variabilité de la circulation moyenne dans le Pacifique Nord.

Par conséquent, afin d'analyser plus précisément les liens existant entre l'activité dépressionnaire / anticyclonique dans le Pacifique Nord-Est, et les variations des caractéristiques océaniques / atmosphériques, nous allons définir et décrire les indices dérivés des températures de la surface de l'océan, PDO et ENSO (section 4.3.1), puis les indices dérivés de l'atmosphère, NPI et PNA (section 4.3.2). Enfin, grâce à ces indicateurs océaniques / atmosphériques, nous tenterons de placer l'activité transitoire de surface dans un contexte plus général de relation océan-atmosphère dans le secteur Pacifique Nord / Amérique du Nord (section 4.3.3).

4.3.1. Les modes de la température de surface océanique PDO et ENSO: définition

Les indices PDO et ENSO ont été calculés à partir des données d'observation des températures de surface de l'océan (TSO). Nous avons utilisé la nouvelle version des données des anomalies moyennes mensuelles d'observation des TSO de Kaplan et al. (1998) et Reynolds et Smith (1994). Ces données sont disponibles de 1856 à aujourd'hui. Pour la période 1856 à 1981, les données sont issues des observations des navires, puis à partir de 1981, les observations des satellites ont été introduites. Les anomalies sont établies sur la base de la période 1951-1980. La résolution est de $5^{\circ} \times 5^{\circ}$ couvrant l'espace 87.5N-87.5S et 2.5E-357.5E. Pour avoir plus de précisions sur la construction de ces données nous renvoyons aux publications de Kaplan et al. (1998), Parker et al. (1994) et Reynolds et Smith (1994).

L'indice PDO est défini comme étant la première composante principale des TSO du Pacifique, au nord de 20°N (Davis 1976, Mantua et al. 1997). Pour notre étude, nous avons utilisé l'indice PDO en JFM couvrant la période 1950-2001 (Figure 4.7). Lorsque l'indice PDO est positif, les TSO sont anormalement chaudes le long de la côte occidentale de l'Amérique du Nord et anormalement froides sur la partie centrale du Pacifique Nord. Dans la zone inter-tropicale, les températures sont plus chaudes dans la zone Niño ainsi que dans l'Océan Indien (et dans une moindre mesure dans l'Atlantique).

L'indice PDO présente, comme son nom l'indique, une variabilité d'échelle décennale. Au cours de la période 1950-2001, deux grandes phases se distinguent. Entre les hivers 1976-77, l'indice change brutalement de signe, passant d'une période froide à une période chaude sur l'Est et d'une période chaude à une période froide sur le centre du

Pacifique Nord. De 1950 à 1976, l'indice PDO est en phase négative et ce surtout dans les années 50. Cependant, nous pouvons souligner que cette période (1950 à 1976) est tout de même ponctuée de valeurs positives (1958, 1959, 1960, 1961, 1970, 1973). A partir de 1977, PDO est dans une phase positive. Les plus fortes valeurs sont observables en 1977, 1978, 1980, 1981, 1983, 1986, 1987 et 1998. Au cours de cette période, quelques années apparaissent tout de même comme étant négatives (1989, 1990, 1991, 1999, 2000 2001).

(a) Indice PDO (JFM, 1950-2001)

(b) Cor (PDO.JFM, TSO.JFM) 1950-2001

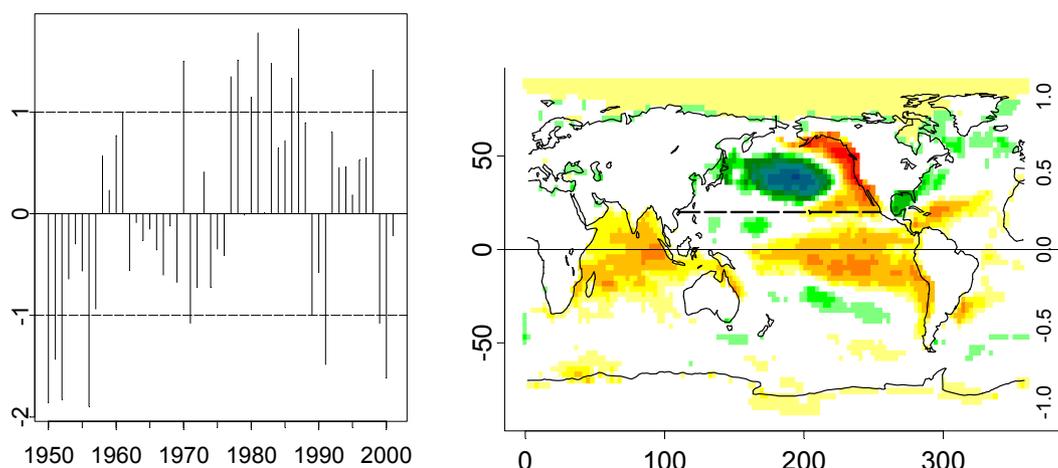


Figure 4.7. (a) Indice PDO et (b) carte des coefficients de corrélation linéaire entre l'indice PDO et les températures de surface océanique, JFM de 1950 à 2001 (couleurs=sig.>95%, t-test bilatéral). L'indice PDO est calculé à partir des TSO de la zone représentée sur la figure b.

L'indice Niño 3.4, décrivant le mode ENSO, est calculé en moyennant les TSO de la zone (5°N-5°S / 120°O-170°O) en JFM et pour la période 1950-2001 (Figure 4.8). La structure des anomalies des TSO associées au Niño 3.4 montre une forte symétrie de part en d'autre de l'Equateur. La phase chaude du Niño 3.4 correspond à des températures plus chaudes le long de l'Equateur à l'est de 170°E, approximativement, ainsi que dans l'Océan Indien. En contre-partie, les températures sont plus froides dans la région « warm pool ».

(a) Indice NINO3.4 (JFM, 1950-2001)

(b) Cor (NINO3.4.JFM, TSO.JFM) 1950-2001

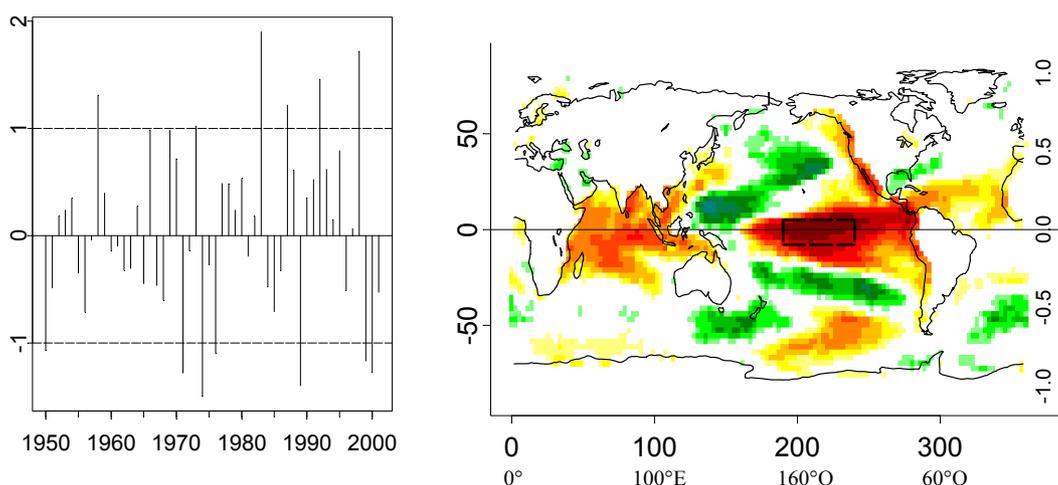


Figure 4.8. (a) Indice NINO3.4 et (b) carte des coefficients de corrélation linéaire entre l'indice NINO3.4 et les températures de surface océanique, JFM de 1950 à 2001 (couleurs=sig.>95%, t-test bilatéral). L'indice NINO3.4 est calculé à partir des TSO de la zone représentée sur la figure b.

Dans la zone extra-tropicale du Pacifique Nord, les TSO sont plus chaudes le long de la côte ouest de l'Amérique du Nord, du Mexique jusque dans le Golfe de l'Alaska. En revanche, elles sont plus froides sur le centre, au nord de Hawaii. Cette structure est relativement identique dans la zone extra-tropicale du Pacifique Sud.

Le cycle du Niño 3.4 dure de 2 à 7 ans en moyenne. Pour les phases chaudes, les années les plus remarquables sont 1958, 1983, 1987, 1992 et 1998 et pour les phases les plus froides, 1971, 1974, 1989, 1999 et 2000. De manière générale, la décennie 90 est caractérisée par des années plus chaudes que la normale.

4.3.2. Modes climatiques atmosphériques NPI et PNA : définition

L'indice NP moyenne les PNM dans la zone 30°N-65°N / 160°E-140°O du Pacifique (Trenberth 1990, Trenberth et Hurrell, 1994). Il a pour objectif de révéler la variabilité inter-annuelle et décennale de l'intensité de la dépression des Aléoutiennes (Figure 4.9). Lorsque l'indice est positif, c'est à dire que les pressions sont plus fortes dans la région des Aléoutiennes, elles sont plus faibles dans la zone tropicale du Pacifique occidental. Au cours de la période 1950-1976, les pressions sur le Pacifique Nord sont généralement plus fortes que la normale, mais à partir de 1977, les phases négatives tendent à être plus fréquentes et plus accentuées comme en 1978, 1981, 1983, 1986, 1992 et 1998 (ces années correspondant à des phases chaudes voire très chaudes de PDO et de ENSO).

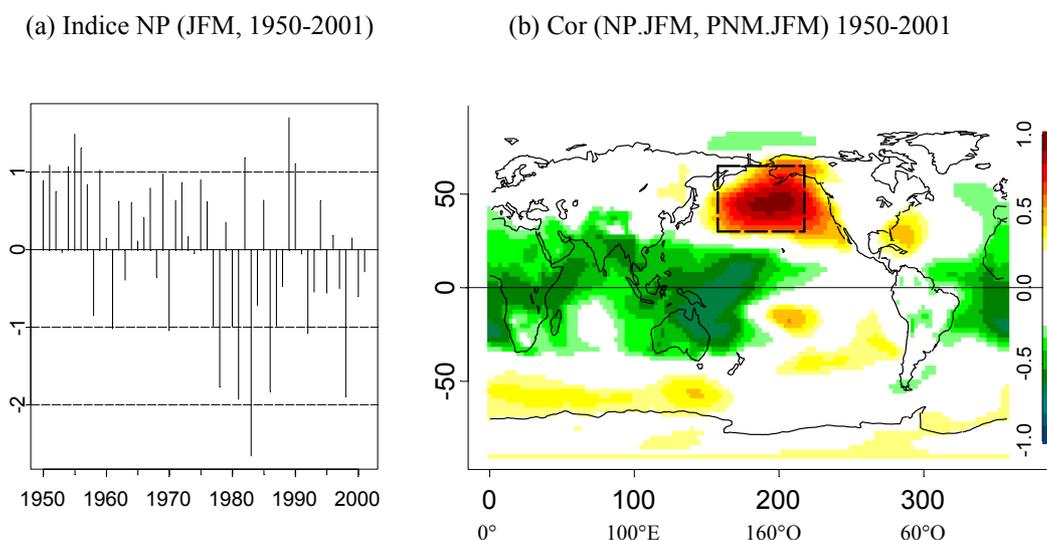


Figure 4.9. (a) Indice NP et (b) carte des coefficients de corrélation linéaire entre l'indice NP et les pressions au niveau de la mer, JFM de 1950 à 2001 (couleurs=sig.>95%, t-test bilatéral). L'indice NP est calculé à partir des PNM de la zone représentée sur la figure b.

L'indice PNA (source: <http://www.cdc.noaa.gov/ClimateIndices>) est la 2^{ème} composante principale avec rotation de l'altitude du géopotential 500 hPa de l'Hémisphère Nord (au Nord de 20°N) en hiver (figure 4.10). Comme nous l'avons signalé précédemment (section 4.2.1), il mesure la circulation de la moyenne troposphère et présente des variations maximales au niveau de la région des Aléoutiennes, de Hawaii, de l'Amérique du Nord-Ouest

et du sud-est des Etats-Unis (le premier et le dernier pôles varient ensemble et en opposition aux deux autres).

Sur la figure A4.8 (cf. Annexes), on observe qu'une forte structure ondulatoire est associée à l'occurrence d'une phase positive de PNA. Elle se manifeste par une dorsale chaude (anomalie de flux de sud) le long de la côte ouest et un talweg froid (anomalie de flux de nord) sur les régions centrales et orientales de l'Amérique du Nord. Cette configuration est accompagnée de fortes advections d'air froid en provenance de l'Arctique, dans les Grandes Plaines d'Amérique du Nord, responsables du gel des agrumes en Floride (Namias 1978, Rogers et Rohli 1991, Downton et Miller 1993).

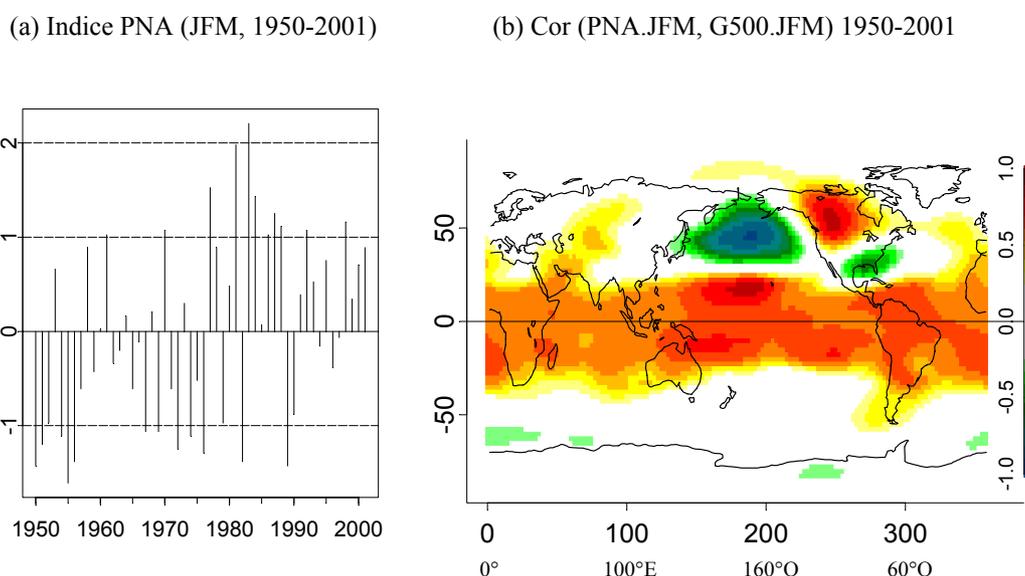


Figure 4.10. (a) Indice PNA et (b) carte des coefficients de corrélation linéaire entre l'indice PNA et l'altitude du géopotential 500 hPa, JFM de 1950 à 2001 (couleurs=sig.>95%, t-test bilatéral).

Comme pour NPI et PDO, l'indice PNA change de phase abruptement entre 1976 et 1977. De 1950 à 1976, l'indice est généralement négatif puis à partir de 1977 et jusqu'en 2001, il est plus fréquemment positif avec de fortes valeurs comme en 1977, 1981, 1983, 1984, 1986, 1987, 1988, 1992 et 1998.

4.3.3. Relations avec les indices de l'activité dépressionnaire et anticyclonique

Le tableau 4.3 présente les coefficients de corrélation entre les indices de l'activité transitoire (D, A, AD) du Pacifique Nord-Est et les indices PDO, ENSO, NP et PNA. L'indice DA est bien corrélé avec PDO. La phase positive (négative) de l'indice DA, correspondant à une activité dépressionnaire (anticyclonique) prépondérante dans le Pacifique Nord-Est, est associée à une anomalie cyclonique (anticyclonique) de la circulation des vents, en opposition (accord) avec la circulation du gyre océanique, générant des TSO plus chaudes (froides) le long de la côte occidentale de l'Amérique du Nord et des TSO plus froides (chaudes) sur le centre et l'Ouest du Pacifique Nord.

Il existe également une relation avec les TSO tropicales. Anderson et Gyakum (1989), Gyakum et al. (1989), Rogers (1990), Graham et Diaz (2001) ont observé une relation

relativement modeste entre l'activité dépressionnaire du Pacifique Nord et les anomalies de TSO dans la zone du NINO3.4. Pour l'ensemble de la période le coefficient de corrélation entre l'indice DA et l'indice NINO3.4 est également modeste ($r = 0.45$, sig. > 99%). Nous pouvons noter que de 1977 à 2001, la relation est plus forte ($r = 0.52$, sig. > 99%) que de 1950 à 1976 ($r = 0.25$, sig. = NS), les TSO équatoriales présentent alors de fortes anomalies positives en conjonction avec une phase fortement positive de PDO comme en 1983, 87, 92 et 98. Par conséquent, les caractéristiques des dépressions et des anticyclones semblent être significativement reliées aux TSO tropicales après le changement de phase de PDO dans le milieu des années 1970.

		Indice DA	Indice D	Indice A	PDO	NINO3.4	NPI	PNA
Indice DA	50-01	1.00						
	50-76	1.00						
	77-01	1.00						
Indice D	50-01	<u>0.90</u>	1.00					
	50-76	<u>0.86</u>	1.00					
	77-01	<u>0.90</u>	1.00					
Indice A	50-01	<u>-0.90</u>	<u>-0.62</u>	1.00				
	50-76	<u>-0.78</u>	-0.36	1.00				
	77-01	<u>-0.92</u>	<u>-0.66</u>	1.00				
PDO	50-01	<u>0.64</u>	<u>0.56</u>	<u>-0.59</u>	1.00			
	50-76	<u>0.53</u>	<u>0.38</u>	<u>-0.50</u>	1.00			
	77-01	<u>0.58</u>	<u>0.52</u>	<u>-0.54</u>	1.00			
NINO3.4	50-01	<u>0.45</u>	<u>0.38</u>	<u>-0.43</u>	<u>0.54</u>	1.00		
	50-76	0.25	0.18	-0.24	<u>0.46</u>	1.00		
	77-01	<u>0.52</u>	<u>0.46</u>	<u>-0.49</u>	<u>0.55</u>	1.00		
NPI	50-01	<u>-0.74</u>	<u>0.82</u>	<u>-0.86</u>	<u>-0.74</u>	<u>-0.45</u>	1.00	
	50-76	<u>-0.49</u>	<u>0.57</u>	<u>-0.64</u>	<u>-0.70</u>	-0.23	1.00	
	77-01	<u>-0.79</u>	<u>0.88</u>	<u>-0.91</u>	<u>-0.66</u>	<u>-0.53</u>	1.00	
PNA	50-01	<u>0.78</u>	<u>0.66</u>	<u>-0.73</u>	<u>0.69</u>	<u>0.53</u>	<u>-0.86</u>	1
	50-76	<u>0.45</u>	<u>0.41</u>	-0.34	<u>0.60</u>	<u>0.38</u>	<u>-0.75</u>	1
	77-01	<u>0.88</u>	<u>0.74</u>	<u>-0.86</u>	<u>0.63</u>	<u>0.59</u>	<u>-0.88</u>	1

Tableau 4.3. Coefficients de corrélation linéaire, les valeurs en gras= sig. > 95% et soulignées= sig. > 99% (t-test bilatéral).

Les modes PDO et ENSO ne sont pas indépendants, il existe en effet une relation statistique significative entre les deux (tableau 4.3). Beaucoup d'études montrent que, dans la zone extra-tropicale du Pacifique Nord, la variabilité, tant au point de vue de la circulation atmosphérique qu'océanique de surface est largement sous l'influence des variations des TSO dans le Pacifique tropical (ex : Bjerknes 1966, 1969, 1972, Hoskins et Karoly 1981, Wallace et Gutzler 1981, Trenberth 1990, Hoerling et Ting 1994, Graham et al. 1995, Lau 1997, Mantua et al. 1997, Trenberth et Hurrell 1994, Graham et Diaz 2001). En revanche, en ce qui concerne l'influence des TSO extra-tropicales sur la variabilité atmosphérique des moyennes latitudes, les avis divergent (ex : Trenberth et Hurrell 1994, Latif et Barnett 1994, Blade 1997, Zhang et al. 1997, Peng et al. 1997, Schneider et Cornuelle 2005).

La phase positive de l'indice DA, signifiant une activité dépressionnaire renforcée dans le Pacifique Nord-Est, correspond à la phase négative de NPI (pressions plus faibles sur le Pacifique Nord) et positive de PNA (crête chaude le long de la côte nord-américaine).

C'est en général à partir du milieu des années 1970 que l'activité des transitoires dans le Pacifique Nord-Est présente une meilleure relation avec les indices NP et PNA.

Dans ce chapitre, nous avons montré que la variabilité inter-annuelle de l'activité transitoire hivernale de surface du Pacifique Nord-Est est en accord avec la variabilité des paramètres climatiques moyens au niveau de l'ensemble de la troposphère (ex : Lau 1988, Rogers et Raphael 1992) ainsi que des températures de la surface océanique (ex : Cayan 1992). Le changement climatique du milieu des années 70 caractérisé par une intensification de l'activité dépressionnaire implique des changements dans la circulation atmosphérique moyenne de surface avec une anomalie des vents dans le sens cyclonique, inverse à la circulation moyenne des courants marins de surface (gyre), induisant un transport des eaux océaniques ralenti dans le Pacifique Nord, avec des TSO plus froides sur le centre et l'Ouest et plus chaudes à l'est (ex : Royer 1989, Bakun 1990, Miller et al. 1994, 1998). L'accentuation des vents de sud le long de la côte nord-américaine implique un renforcement des advections de chaleur sensible et latente sur l'Ouest du continent.

Des causes possibles à ces changements ont été discutées par Namias (1978), Nitta et Yamada (1989), Trenberth (1990), Trenberth et Hurrell (1994), Graham (1994) qui ont noté un lien étroit entre les changements décennaux du Pacifique Nord et ceux de la zone tropicale du Pacifique et de l'Océan Indien et également les changements dans la fréquence et l'intensité des événements El Niño versus La Niña. Plus récemment, Schneider et Cornuelle (2005) ont montré que les anomalies des TSO de la zone extra-tropicale étaient les résultats de différents forçages dont les trois principaux étant ENSO, la variabilité intrinsèque de la circulation atmosphérique de surface dans le Pacifique Nord (dépression des Aléoutiennes) et les anomalies de la circulation océanique dans la zone d'extension du Kuroshio-Oyashio. En ce qui concerne le changement de phase de PDO au milieu des années 70, il semble être davantage imputable au changement de phase de ENSO (chaud), renforçant les anomalies de PDO via la circulation océanique, par propagation d'ondes de Kelvin le long de la côte Pacifique de l'Amérique (Chelton et Davis 1982, Clarke et Lebedev 1999), et via l'atmosphère (atmospheric bridge, Alexander 1990, 1992ab, Alexander et al. 2002). Les changements des TSO extra-tropicales (PDO) altèrent ensuite la circulation atmosphérique par effets retro-actifs. Comme nous l'avons observé précédemment, l'activité transitoire du Pacifique Nord-Est, associée à la dépression des Aléoutiennes, apparaît comme étant sensible à la variabilité de ENSO et PDO sur les échelles inter-annuelle et décennale (ces observations seront davantage discutées dans la troisième partie).

Dans ce chapitre, nous avons montré la cohérence entre l'activité transitoire de surface et les structures moyennes des pressions au niveau de la mer, des températures de l'air et de la circulation des vents proches de la surface ainsi qu'à 500 hPa et 200 hPa. Nous allons maintenant analyser comment la succession des perturbations transitoires, en interférence avec les caractéristiques topographiques régionales, influence la variabilité des températures et des précipitations locales de l'Amérique du Nord-Ouest.

Chapitre 5 : Les températures et précipitations hivernales en Amérique du Nord-Ouest

En hiver, les anticyclones transitoires déterminent particulièrement les températures minimales journalières, dans les hautes et moyennes latitudes, en advectant, en direction du sud, de l'air froid, subsident, par conséquent réduisant la couverture nuageuse, situation favorable au refroidissement radiatif (ex : Oravec et Bosart 1990, Durre et Wallace 2001). Inversement, les dépressions advectent en direction du nord de l'air plus chaud et limitent le refroidissement radiatif grâce à la couverture nuageuse qui leur est associée. Karl et al. (1984, 1986, 1993), Easterling (2002) Groisman et al. (2004) ont observé, dans les régions de moyennes latitudes de l'Amérique du Nord, une tendance à la réduction de l'amplitude thermique diurne depuis les années 1950, résultant d'une plus forte augmentation des températures minimales (nocturnes) par rapport aux températures maximales (diurnes) surtout à partir du milieu des années 1970. Ce phénomène est observé tout au long de l'année et surtout en hiver et au printemps. Les causes sont attribuées à l'accroissement de la couverture nuageuse (ex : Dai et al. 1999, Sun et al. 2001) peut-être due aux activités anthropiques. Les modèles climatiques prévoient en effet une tendance similaire en réponse aux modifications climatiques associées aux activités anthropiques (ex : Cao et al. 1992).

L'intensification de la dépression des Aléoutiennes, après le milieu des années 70, correspond à une période plus chaude et plus humide sur l'Ouest des Etats-Unis (ex : Cayan et al. 1998), hormis pour la période après 1998 et pour le sud-ouest notamment, qui correspond au début d'une sécheresse persistante, caractérisée par des températures plus chaudes et de manière continues (ex : Piechota et al. 2004). Ceci apparaît comme étant associé à une période d'activité anticyclonique plus faible que la moyenne dans le Pacifique Nord-Est et à une activité dépressionnaire positive, selon nos indices atmosphériques A et D.

La considération des transitoires d'ordre synoptique, nous donne l'opportunité de vérifier si les changements de l'activité dépressionnaire et/ou anticyclonique coïncident avec l'évolution climatique récente sur l'Ouest de l'Amérique du Nord. Cette relation, à notre connaissance, n'a pas été démontrée. Nous allons par conséquent focaliser notre analyse sur la relation entre l'activité transitoire dans le Pacifique Nord-Est et le climat hivernal (températures et précipitations) sur l'Ouest de l'Amérique du Nord dans les observations.

Dans un premier temps, nous ferons une description du climat moyen hivernal en Amérique du Nord-Ouest (section 5.1) et présenterons la variabilité inter-annuelle des caractéristiques de température et précipitations (section 5.2). Puis, nous étudierons dans quelle mesure les systèmes transitoires du Pacifique Nord-Est sont en relation avec les variations, les tendances et/ou ruptures climatiques observées sur l'Ouest du continent nord-américain (section 5.3).

5.1. Températures et précipitations hivernales en Amérique du Nord-Ouest : caractéristiques moyennes

Au point de vue physique, l'Ouest de l'Amérique du Nord se caractérise par la présence de la Cordillère nord-américaine qui s'étire du Nord au Sud, des latitudes polaires jusque dans les tropiques, parallèlement à la côte Pacifique. Cette contrainte orographique interfère avec les caractéristiques atmosphériques de l'ensemble de la troposphère et joue par conséquent un rôle déterminant dans la répartition des climats et également des structures moyennes de la variabilité temporelle des paramètres météorologiques comme la température et les précipitations entre autres.

Dans l'objectif de décrire le climat moyen en hiver sur l'Amérique du Nord-Ouest et d'étudier son évolution au cours de la période 1950-2001, nous avons utilisé des données d'observation au pas de temps journalier (section 5.1.1). Après avoir réalisé une brève description des reliefs de l'Amérique du Nord-Ouest, nous ferons une présentation du climat hivernal de la région d'étude à partir des moyennes en janvier-février-mars des caractéristiques de température (T_{min} , T_{max} , amplitude thermique diurne...) et précipitations (cumuls des précipitations et fréquence des jours de pluie) (section 5.1.2).

5.1.1. Présentation des données in situ

Nous avons utilisé les données journalières des températures minimales (T_{min} , °C), maximales (T_{max} , °C) et des cumuls de précipitations (P , mm) de 276 stations distribuées de manière non-homogène sur le Canada, les Etats-Unis et le Mexique à l'ouest de 100°O, pour les hivers de 1950 à 2001 (janvier, février et mars = 90 observations par hiver et par stations). Ces stations ont été sélectionnées par le National Climatic Data Center (NCDC 2003) pour les Etats-Unis et par les organismes canadien et mexicain (Vincent et Gullett 1999, Miranda 2003). La qualité des données a été contrôlée. Nous devons souligner que ces stations sont suffisamment éloignées des zones urbaines, pour éviter les influences de l'îlot de chaleur urbain. Nous avons sélectionné les stations ayant une couverture temporelle raisonnable pour les hivers 1950-2001.

Le nombre d'observations journalières varie, selon les stations, entre 74 et 90 par hiver (JFM) pour les T_{min} , T_{max} et les P , en moyenne sur l'ensemble de la période, ce qui représente un pourcentage d'observation moyen se situant entre 82% et 100% par hiver (Figure 5.1.a). Nous devons cependant préciser que certaines stations n'ont pas été opérationnelles sur l'ensemble de la période, ainsi certains hivers ne présentent aucune observation (Figure 5.1.b et 5.1.c), notamment au niveau du Mexique. Le maximum d'hivers sans observation est de 8 et concerne 2 stations (l'une au nord du Canada et l'autre au Mexique).

Pour chaque station et pour chaque hiver, nous avons calculé :

- la moyenne et l'écart-type pour les T_{min} et les T_{max} (figure 5.3) ;
- la moyenne de l'amplitude thermique diurne (figure 5.3) ;

- le cumul des précipitations et la fréquence des jours de pluie (figure 5.4).

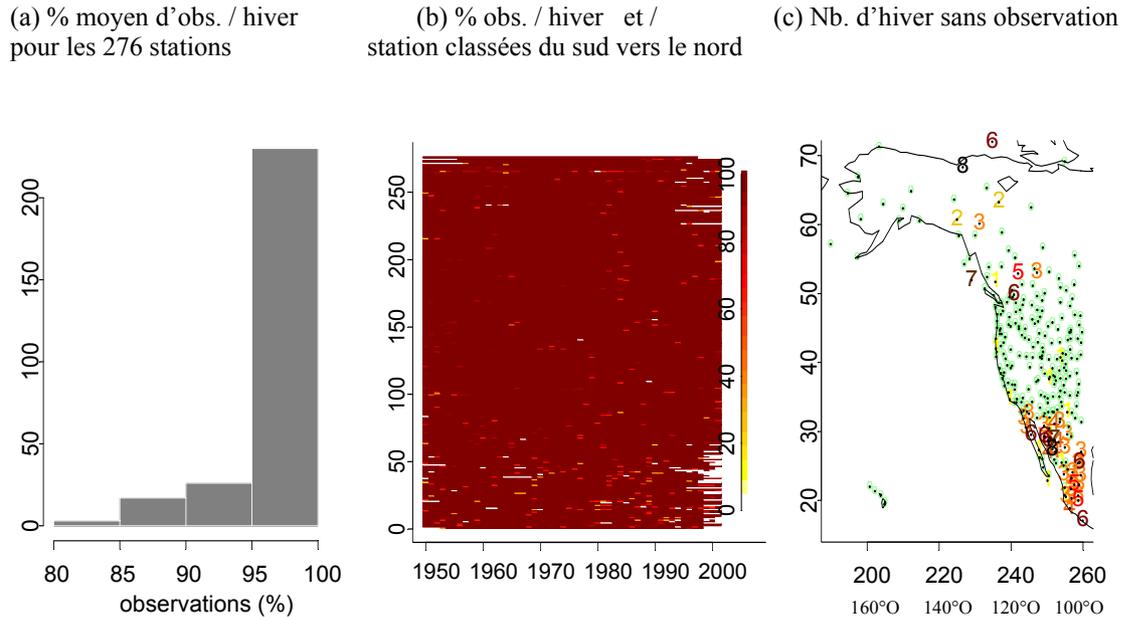


Figure 5.1. Pourcentage moyen d'observations journalières par hiver pour les 276 stations (a), pourcentage d'observations pour chaque hiver et pour toutes les stations classées du sud (n°1) vers le nord (n°276) au cours de la période 1950-2001 (b), nombre d'hiver sans observation (c). Le nombre d'observations est le même pour les Tmin, Tmax et P.

Pour les hivers avec des valeurs manquantes nous n'avons pas souhaité réaliser d'interpolation temporelle parce que d'une part, la procédure est délicate notamment pour les précipitations, et d'autre part, le nombre d'observations pour chaque hiver est généralement suffisamment important pour établir les moyennes. Nous devons tout de même souligner que les stations mexicaines présentent souvent des séries lacunaires, avec des hivers durant lesquels les jours avec observations sont parfois inférieurs à 50% (Figure 5.1.b). Par conséquent, sur le Mexique, les statistiques présentées dans ce travail doivent être considérées avec prudence, notamment pour les précipitations.

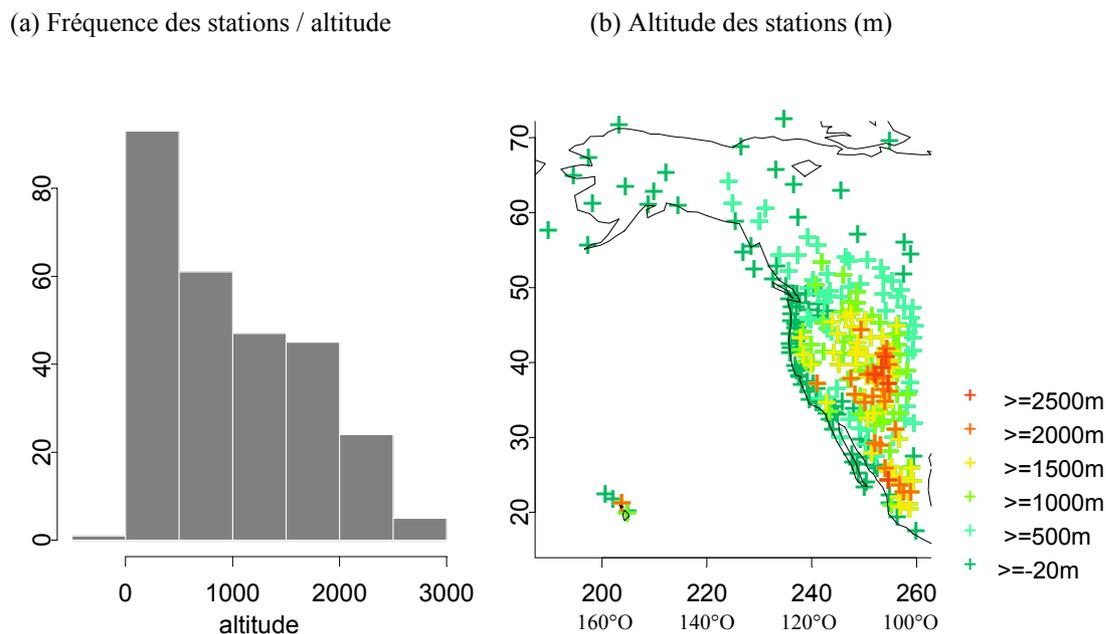


Figure 5.2. Fréquence des stations en fonction de l'altitude en mètre (a), altitude des stations en mètres (b).

Pour l'étude des conditions climatiques moyennes hivernales (section 5.1.2), les hivers sans observation ne seront pas considérés. Par exemple, pour la station mexicaine où 8 hivers sont sans observation, les statistiques seront établies sur une base de 46 hivers. Nous précisons dans les sections suivantes (5.2 et 5.3) comment ont été considérés les hivers sans observation.

L'altitude des stations s'échelonne entre -20 m et 2807 m. 50% des stations se situent à une altitude inférieure à 855 m et environ 75% d'entre elles (202 stations) se situent à des altitudes inférieures à 1500 m. Les observations en altitude, au-dessus de 1500 m, sont localisées surtout aux Etats-Unis et au Mexique, dans les Montagnes Rocheuses, la chaîne des Cascades, la Sierra Nevada et les Sierra Madre occidentale et orientale (Figure 5.2). Nous devons préciser que les données des précipitations en altitude au cours de la saison hivernale, sont dérivées des précipitations neigeuses, par conséquent, l'estimation est peu précise (notamment à cause de l'action du vent).

5.1.2. Description du relief et du climat hivernal de l'Amérique du Nord-Ouest

L'écoulement atmosphérique dans la basse troposphère est directement modulé par les reliefs continentaux. Ainsi, les caractéristiques majeures de la morphologie orographique (altitude, orientation...) déterminent fortement la régionalisation climatique. Avant de présenter les caractéristiques moyennes des températures et précipitations en hiver, il paraît nécessaire de décrire les grands ensembles orographiques de l'Amérique du Nord-Ouest (cf. Annexes, Figure A5.1).

Le continent nord-américain se caractérise dans sa partie occidentale par la présence d'une cordillère d'axe Ouest-Est au Nord, au niveau de l'Alaska, puis Nord-Sud, des Territoires du Nord-Ouest (Canada) jusqu'au Mexique, parallèle à la ligne de côte. Cet ensemble orographique est varié avec une alternance de chaînes et massifs montagneux et de plateaux disséqués par des vallées profondes. Cette cordillère nord-américaine est plus ou moins massive du Nord au Sud, présentant un net élargissement dans sa partie médiane, entre 35°N et 45°N approximativement. Au Nord, la Chaîne de l'Alaska, généralement d'axe Ouest-Est, présente des altitudes élevées (Mont Mc Kinley : 6195 m, Mont Sanford : 4949 m). Elle se continue vers l'est et le sud, par les Montagnes Rocheuses (façade orientale) et la Chaîne Côtière (façade occidentale).

Au Canada, la façade orientale de la cordillère est occupée par les Montagnes Rocheuses qui font face, à l'est, aux grandes plaines nord-américaines. Elles présentent des altitudes largement supérieures à 2000 m (ex : Mont Robson 3954 m, Mont Columbia 3747 m, en Colombie Britannique/Alberta), adoptant un tracé relativement linéaire des Territoires du Nord-Ouest jusque dans l'Etat du Montana (Etats-Unis), et sont entre-coupées de cols (Kicking horse pass 1627 m, Colombie Britannique/Alberta, Maria Pass 1587 m, Montana) et de vallées comme celles de la Peace River (Colombie Britannique), Athabasca River, Boro River (Alberta) et Missouri River (Montana).

Plus au sud, au sud du Montana, dans le Nord de l'Idaho et le Wyoming, la linéarité des Montagnes Rocheuses est remplacée par une série de dômes massifs et élevés (Pic Granite 3901 m, Montana, Pic Gannet 4202 m, Pic Borah 3868 m), dont l'axe général s'éloigne du tracé de la côte Pacifique. Cet ensemble orographique se poursuit vers le sud par des chaînes

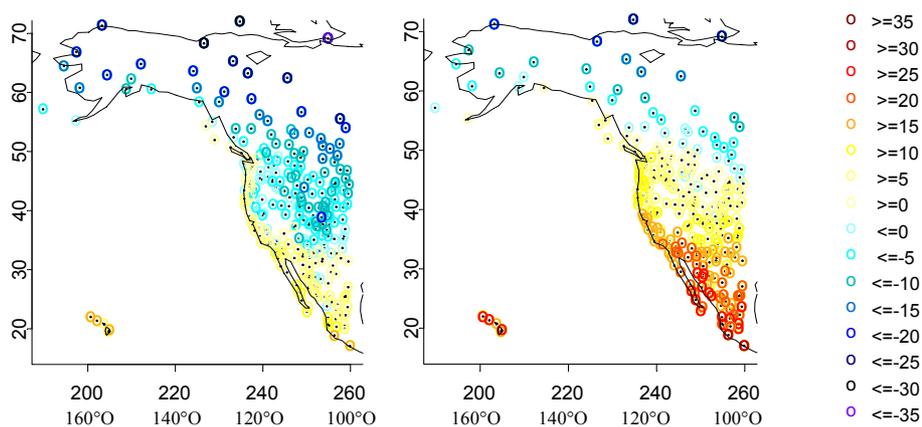
montagneuses de forte altitude comme les Monts San Juan (Mont Wilson 4343 m), Monts Sangre de Cristo (Pic Bianca 4373 m), Monts Sacramento (3658 m) dans l'état du Colorado et au nord du Nouveau Mexique.

A l'ouest de cet axe, dans la partie interne, au niveau des états du Nevada, de l'Utah, du Nord-Est de l'Arizona et de l'Ouest du Nouveau Mexique, le relief se caractérise par une succession de massifs et de plateaux disséqués par des cours d'eau (ex : Grand Bassin et la Humbolt River, Plateau du Colorado et le fleuve Colorado). Ce complexe orographique se prolonge jusqu'au Mexique avec à l'est, la Sierra Madre Orientale, à l'ouest la Sierra Madre Occidentale beaucoup plus élevée en moyenne que la précédente et, entre les deux, les hauts plateaux mexicains dont l'altitude est souvent supérieure à 1000 m.

La bordure occidentale (façade Pacifique) de la Cordillère nord-américaine est jalonnée de chaînes montagneuses plus ou moins élevées, longeant le littoral de la Colombie Britannique jusqu'en Basse Californie (Mexique). Dans la partie canadienne et sud de l'Alaska, la Chaîne Côtière, coupée par de nombreuses vallées humides (ex : Stikine, Skeena), présente des altitudes supérieures à 2000 m (Mont Waddigton 4040 m). Le long du littoral, les plissements orographiques sont matérialisés par de nombreuses îles montagneuses plus ou moins grandes tel l'Archipel Alexandre, l'Île de la Reine Charlotte et la plus grande, l'Île de Vancouver (point culminant de 2163 m). Au sud de la région de Vancouver débute la Chaîne des Cascades qui s'étire jusqu'au nord de la Californie et est alors succédée par la Sierra Nevada. Cette barrière orographique est doublée à l'ouest, le long du littoral, par les Chaînes Côtières qui se poursuivent jusqu'à la pointe méridionale de la Presqu'île de Californie. A la latitude de Portland (Oregon), les reliefs sont percés d'est en ouest par la Columbia River. Plus au sud, la plaine de Californie s'étire entre les sommets très élevés de la Sierra Nevada (Mont Whitney 4417 m) à l'est et les Chaînes Côtières à l'ouest excédant rarement les 2000 m (Mont Linn 2464 m). Cette vaste dépression orographique, inférieure à 100 m d'altitude en moyenne, est ouverte sur le littoral du Pacifique au niveau de la région de San Francisco. En Californie du Sud, la Sierra Nevada rejoint les Chaînes Côtières qui se poursuivent jusqu'au niveau de la Presqu'île de Californie où les altitudes diminuent graduellement du Nord (San Bernardino 3508 m, Californie) au Sud (Cerro Las Casitas 2164 m, Basse Californie, Mexique). Cette presqu'île est séparée du continent par le Golfe de Californie ou Mer de Cortes.

(a) Moy. Tmin JFM (°C)

(b) Moy. Tmax JFM (°C)



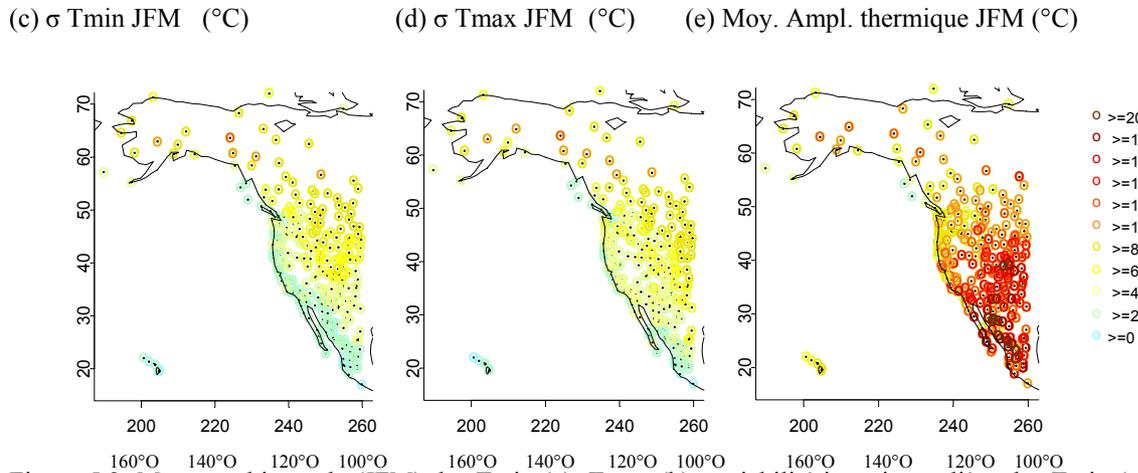


Figure 5.3. Moyenne hivernale (JFM) des Tmin (a), Tmax (b), variabilité inter-journalière des Tmin (c), Tmax (d) et amplitude thermique diurne (e) en degré Celsius, 1950-2001.

L'étirement nord-sud du secteur occidental de l'Amérique du Nord, allant des régions polaires aux régions tropicales et la présence de la Cordillère, d'axe parallèle à la ligne de côte ainsi que l'agencement général des reliefs qui la constitue, jouent évidemment un rôle fondamental dans la répartition des températures et des précipitations moyennes sur l'Ouest de l'Amérique du Nord. La Cordillère empêche d'une part l'incursion de l'air polaire continental du Canada, sur la façade occidentale et d'autre part en limite fortement les influences océaniques du Pacifique Nord vers l'intérieur du continent (Figures 5.3 et 5.4). Cette contrainte orographique est particulièrement perceptible sur les cartes des totaux de précipitations en JFM (Figure 5.4) avec une frange littorale très arrosée de l'Alaska jusqu'en Californie, le long des versants sud de la Chaîne de l'Alaska et occidentaux de la Chaîne Côtière de la Colombie Britannique, des Cascades et de la Sierra Nevada. La répartition des caractéristiques moyennes des températures (Figure 5.3) montre un gradient Est-Ouest et Nord-Sud, avec un réchauffement, une diminution de la variabilité inter-journalière des températures et une diminution de l'amplitude thermique diurne, de l'intérieur du continent vers la bordure Pacifique et également des régions septentrionales vers les régions méridionales.

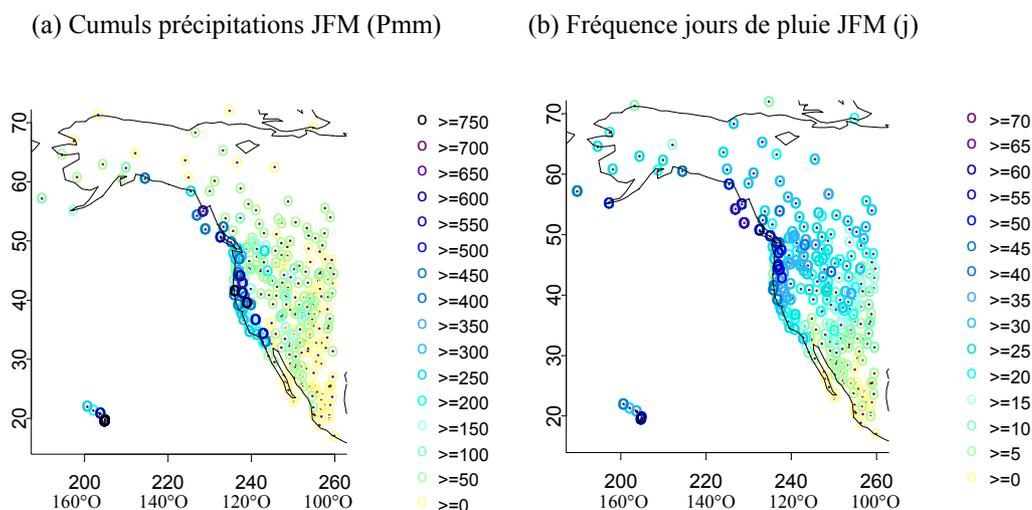


Figure 5.4. Moyenne hivernale (JFM) des cumuls des précipitations en millimètres (a) et des fréquences de jour de pluie (b), 1950-2001.

Très schématiquement, 6 aires climatiques peuvent être distinguées (figure 5.5) :

- la première se caractérise par des Tmin et Tmax négatives voire fortement négatives et des précipitations modestes (inférieures à 200 mm), comprenant la Péninsule de l'Alaska (exceptée sa marge méridionale), l'intérieur du Canada et le Dakota du Nord (violet) ;
- la deuxième regroupe les régions des Montagnes Rocheuses des Etats-Unis, avec des Tmin négatives, des Tmax faiblement positives et des précipitations relativement contrastées d'une station à l'autre ou d'une région à l'autre (contraste montagnes, vallées, orientations), mais généralement inférieures à 200 mm (bleu) ;
- la troisième inclue les stations se situant sur la bordure littorale de l'intérieur du Golfe de l'Alaska, ainsi que le long de la Chaîne des Cascades et de la Sierra Nevada, avec des Tmin négatives, des Tmax positives et des précipitations excédant 200 mm, pouvant atteindre ponctuellement 700 mm en moyenne (vert) ;
- la quatrième concerne les îles au large de la Colombie Britannique et la bordure littorale des Etats-Unis (Etats de Washington, Oregon et Californie) avec des Tmin et Tmax positives et des précipitations abondantes supérieures à 200 mm voire à 750 mm en Californie du Nord (jaune) ;

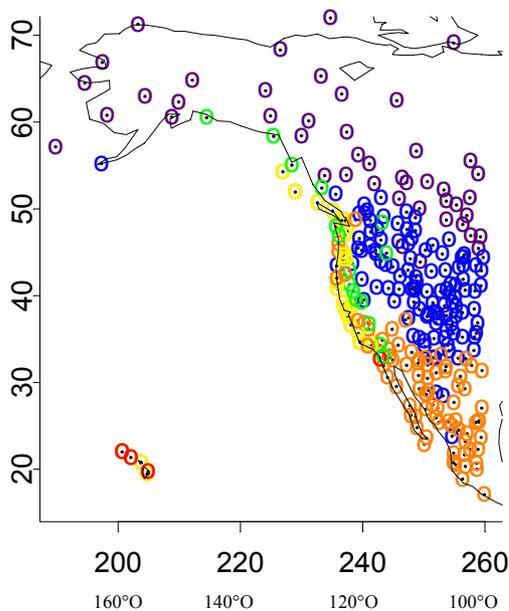


Figure 5.5 : Aires climatiques de l'Amérique du Nord-Ouest

- Violet : Tmin et Tmax < 0°C & P < 200 mm
- Bleu : Tmin < 0°C et Tmax > 0°C & P < 200 mm
- Vert : Tmin < 0°C et Tmax > 0°C & P > 200 mm
- Jaune : Tmin > 0°C et Tmax > 0°C & P > 200 mm
- Orange : Tmin > 0°C et Tmax > 0°C & P < 200 mm
- Rouge : Tmin > 10°C et Tmax > 10°C & P > 200 mm

- la cinquième regroupant les stations du Mexique et quelques stations de la côte des Etats-Unis, avec des températures (Tmin et Tmax) positives et des précipitations faibles, généralement inférieures à 200 mm (orange) ;
- la sixième concerne les îles Hawaii avec des Tmin et Tmax supérieures à 10°C et des précipitations supérieures à 200 mm (rouge).

A l'intérieur de chacune de ces aires existe évidemment des dégradés climatiques nord-sud et est-ouest et également des variations en fonction de l'altitude et de l'orientation de la topographie.

5.2. Températures et précipitations hivernales en Amérique du Nord-Ouest : analyse spatio-temporelle

Afin de diagnostiquer l'évolution temporelle ainsi que les structures spatiales de la variabilité inter-annuelle des températures (section 5.2.1) et des précipitations (section 5.2.2) en Amérique du Nord-Ouest, nous avons tout d'abord calculé les moyennes pour chaque hiver et pour chacune des variables (Tmin, Tmax, P...). Puis, nous avons recherché des tendances linéaires au cours de la période 1950-2001, pour chaque station. Enfin, nous avons réalisé une Analyse en Composantes Principales (ACP) afin d'identifier les structures spatiales de la variabilité inter-annuelle, qui nous permettra d'une part de délimiter des régions homogènes en termes de variation temporelle et d'autre part de vérifier la répartition spatiale des éventuelles tendances et/ou ruptures climatiques qui ont affecté l'Amérique du Nord-Ouest. Nous tenons à souligner que l'analyse suivante est non-exhaustive car elle vise simplement à une prise de connaissance générale du comportement des températures et précipitations hivernales sur le secteur d'étude, qui nous permettra par la suite d'interpréter plus aisément les résultats de la section 5.3.

5.2.1. Variation spatio-temporelle des températures

La figure 5.6, montre les tendances des températures minimales et maximales. On constate que la grande majorité des stations, à l'exception du Mexique, présente un réchauffement significatif tant pour les Tmin que pour les Tmax. Nous pouvons préciser également que l'augmentation est plus forte pour les Tmin que pour les Tmax. Ainsi, l'amplitude thermique diurne tend à devenir moins forte pour la plupart des stations.

(a) Tendence Tmin JFM (°C) (b) Tendence Tmax JFM(°C) (c) Tendence Ampl.therm. JFM (°C)

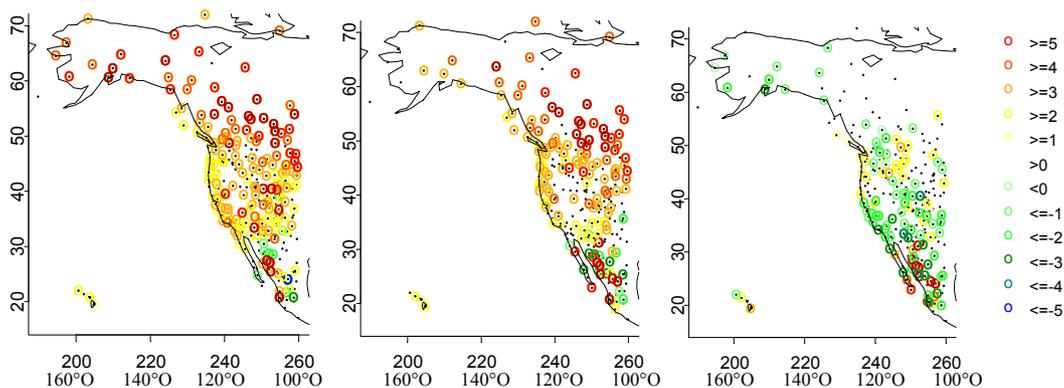


Figure 5.6. Tendances linéaires¹³ des Tmin (a), Tmax (b), Amplitudes thermiques diurnes (c) en JFM, au cours de la période 1950-2001 (couleurs = sig. > 95%, t-test bilatéral). Cf. Annexes, figure A5.2 pour visualiser l'évolution des Tmin pour 4 stations.

Du nord vers le sud, trois zones peuvent être distinguées en fonction des tendances :

- au nord de 50°N les tendances au réchauffement sont plus fortes (Alaska et la Colombie Britannique), excédant 4°C voire 5°C sur l'ensemble de la période, ce qui est considérable ;
- entre 30°N et 50°N, le réchauffement se situe majoritairement entre 1°C et 3°C ;
- au sud de 30°N (au Mexique), on note un refroidissement, surtout marqué dans les Tmax, de l'ordre de 2°C à 3°C (notons que cette région n'est pas homogène, certaines stations présentant un réchauffement significatif).

¹³ Les tendances linéaires ont été calculées en excluant les hivers sans observation.

Quelques nuances régionales peuvent être apportées avec un réchauffement plus faible le long des côtes de la Colombie Britannique, de l'Etat de Washington et de l'Oregon surtout pour les Tmin (inférieur à 2°C sur l'ensemble de la période) et en revanche un réchauffement plus prononcé, à l'intérieur du continent, dans les régions montagneuses du Canada et des Etats-Unis (dans les Rocheuses), supérieur à 4°C voire 5°C (pour les Tmin). L'influence océanique, le long de la côte Pacifique, semble donc pondérer l'augmentation des températures.

L'évolution générale des Tmin et Tmax sur notre secteur peut-être visualisée sur la figure suivante (5.7). Jusque vers la fin des années 1970, les hivers anormalement froids sont les plus fréquents (ex : 1950, 1951, 1952, 1955, 1956, 1957, 1964). Ils affectent davantage certaines régions que d'autres selon les années. Par exemple, l'hiver 1950 a été froid sur l'ensemble du secteur au nord de 30°N et particulièrement aux latitudes comprises entre 45°N et 55°N approximativement. Avant la fin des années 1970, peu d'hivers apparaissent comme étant nettement plus chauds que la normale (ex : 1953, 1958, 1961).

(a) Anomalies standardisées Tmin JFM

(b) Anomalies standardisées Tmax JFM

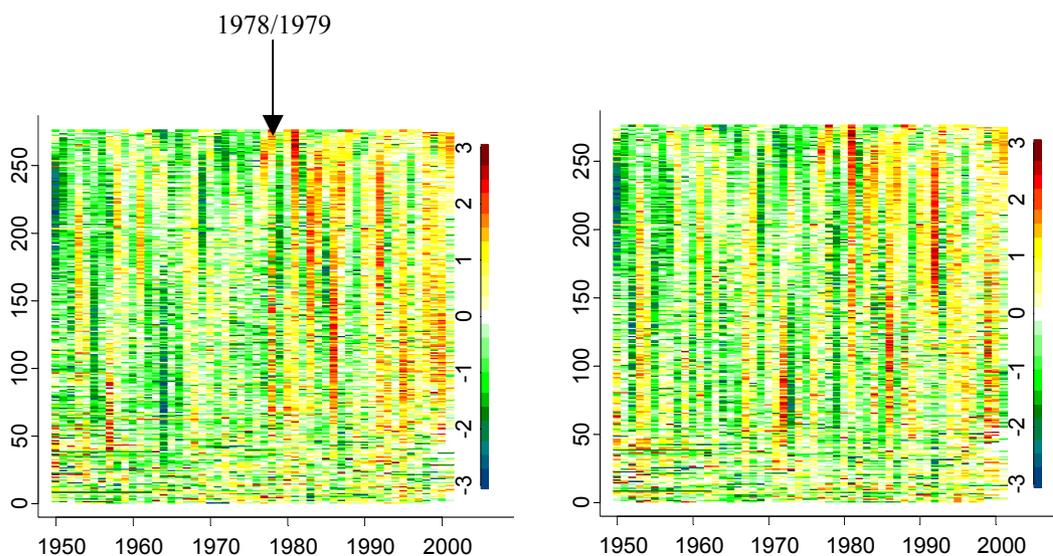


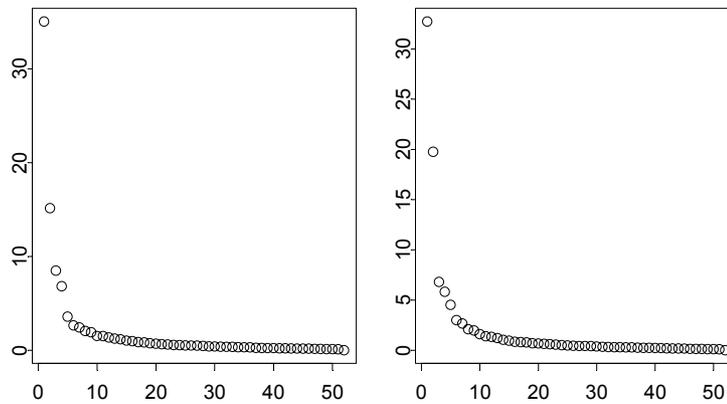
Figure 5.7. Anomalies standardisées¹⁴ des Tmin (a) et Tmax (b) en JFM au cours de la période 1950-2001. Les stations sont classées du sud (1) vers le nord (276). La station n°1 se situe à 17.05°N, la n°50 à 30.45°N, la n°100 à 36.58°N, la n°150 à 41.25°N, la n°200 à 46.57°N, la n°250 à 55.20°N et la n°276 à 76.23°N.

Pour les stations les plus septentrionales, l'hiver 1977 (Namias 1978) marque le début d'une période généralement plus chaude qui persiste au moins jusqu'en 2001. Durant l'hiver 1978, la plupart des stations de notre secteur d'étude montrent des températures plus élevées que la normale. Il est suivi en 1979 d'un hiver significativement plus froid (Namias 1980, Harnack 1980). Les années 1980 apparaissent comme étant ponctuées d'hivers nettement plus chauds que la normale (1981, 1983, 1984 pour les stations les plus au nord, 1986 et 1987 pour les stations les plus au nord). Enfin, les années 1990 confirment le réchauffement avec une diminution de l'occurrence d'hivers froids et une augmentation de la fréquence des hivers chauds comme en 1992, 1995 pour les stations les plus au sud, 1998, 1999, 2000 et 2001 pour les stations les plus au nord.

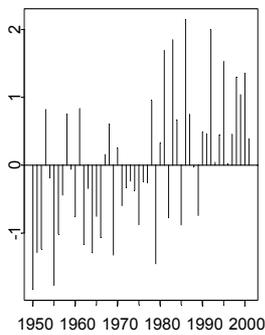
¹⁴ Les hivers sans observation ont été remplacés par 0 (en blancs sur la figure 5.7).

Afin de compléter les observations précédentes nous allons réaliser une Analyse en Composantes Principales (ACP)¹⁵, qui permettra de déterminer les structures spatiales de la variabilité inter-annuelle des Tmin et Tmax sur l'Ouest de l'Amérique du Nord, pour la période 1950-2001 (Figure 5.8). Nous parviendrons ainsi à mettre en lumière d'éventuelles tendances et/ou ruptures climatiques régionales ayant affecté l'espace d'étude. Les 4 premières composantes ont été retenues, expliquant 65% de la variance totale (nous n'avons pas effectué de rotation sur les 4 premiers facteurs car les structures spatiales, associées à chacun de ces facteurs, sont raisonnablement interprétables).

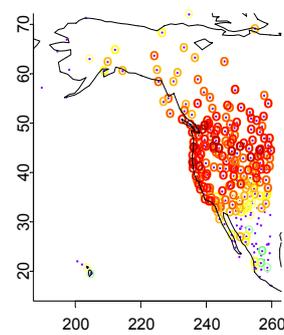
(a) ACP Tmin JFM (% variance) (b) ACP Tmax JFM (% variance)



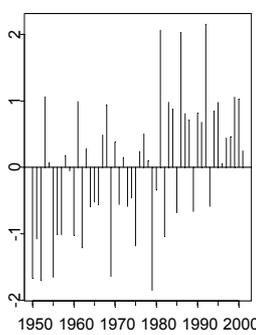
(c) CP1Tmin (35%)



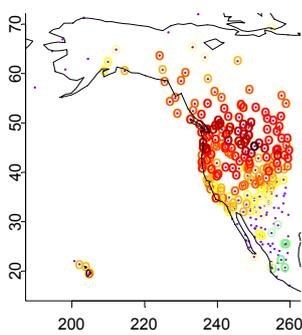
(d) Corrélations



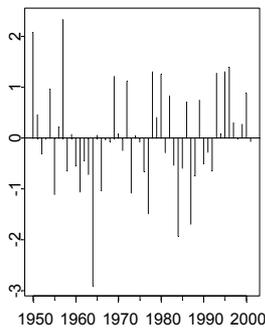
(e) CP1Tmax (32%)



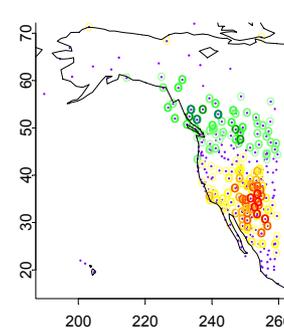
(f) Corrélations



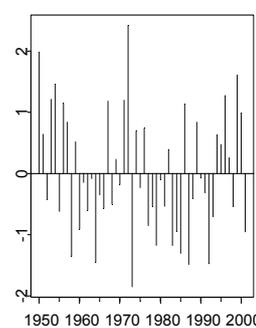
(g) CP2Tmin (15%)



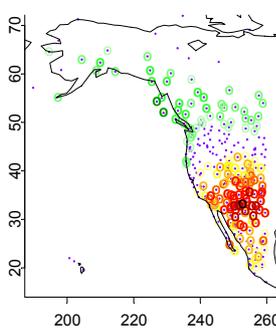
(h) Corrélations



(i) CP2Tmax (20%)



(j) Corrélations



¹⁵ ACP réalisée sur les anomalies standardisées, cf. figure 5.7.

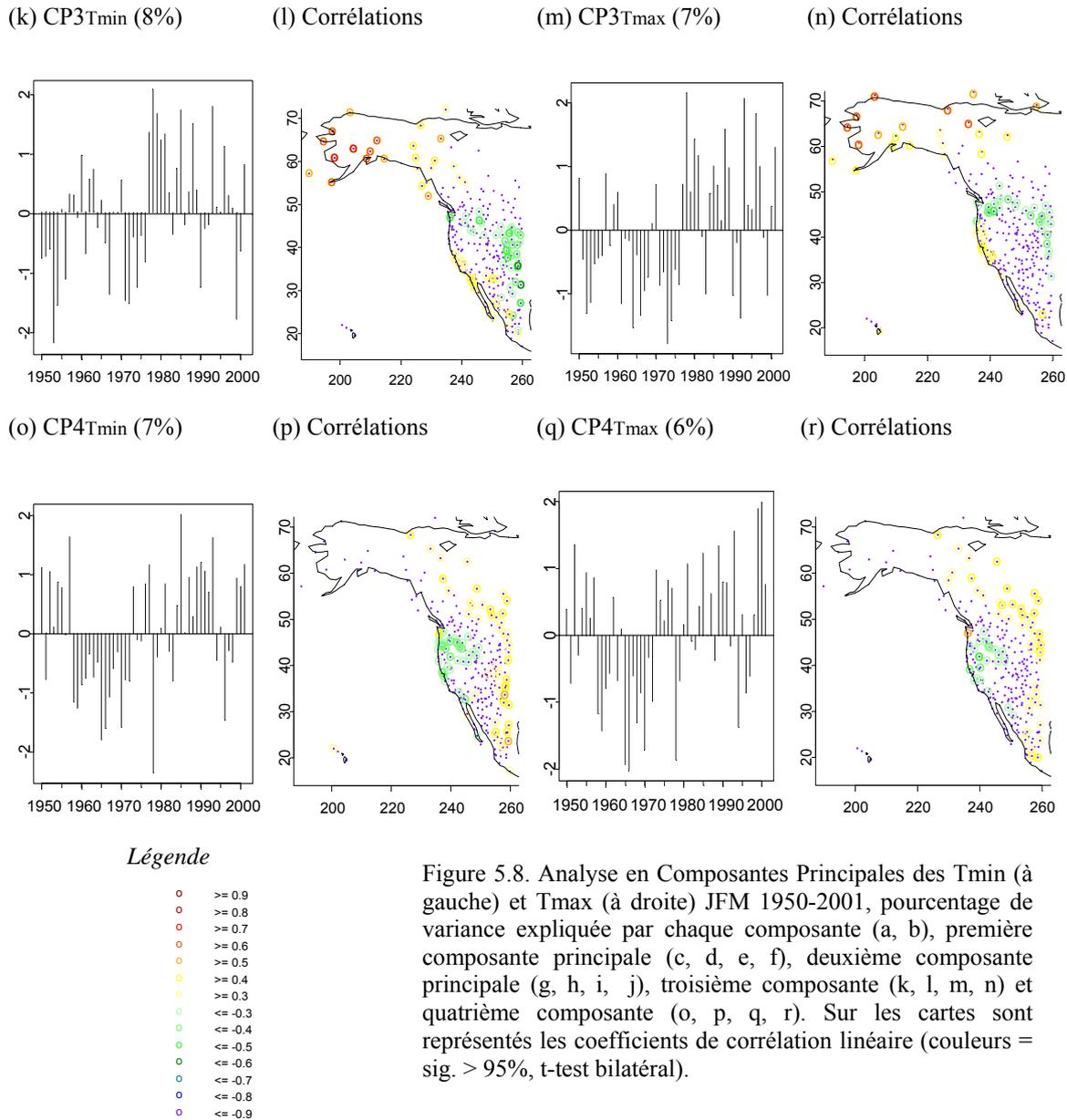


Figure 5.8. Analyse en Composantes Principales des Tmin (à gauche) et Tmax (à droite) JFM 1950-2001, pourcentage de variance expliquée par chaque composante (a, b), première composante principale (c, d, e, f), deuxième composante principale (g, h, i, j), troisième composante (k, l, m, n) et quatrième composante (o, p, q, r). Sur les cartes sont représentés les coefficients de corrélation linéaire (couleurs = sig. > 95%, t-test bilatéral).

La première composante des Tmin et Tmax (CP1Tmin, CP1Tmax), expliquant 35% et 32% de la variance totale respectivement, montre un réchauffement sur l'ensemble du secteur au cours de la période 1950-2001 (à l'exception de quelques stations mexicaines qui enregistrent un refroidissement). C'est particulièrement durant les décennies 80 et 90 que les températures apparaissent comme étant plus élevées que la normale.

Le deuxième mode (CP2Tmin 15%, CP2Tmax, 20% de la variance totale) met en opposition la variation des températures sur l'Ouest du Canada et le secteur sud-Ouest des Etats-Unis / Nord du Mexique. Cette composante montre une certaine variabilité inter-annuelle mais nous pouvons tout de même noter qu'à partir du milieu des années 90 le réchauffement tend à être accru sur le Sud-Ouest des Etats-Unis et pondéré sur l'Ouest du Canada.

La troisième composante (CP3Tmin 8%, CP3Tmax 7%) présente une variabilité décennale avec une rupture au milieu des années 70 (1976-77) tant pour les Tmin que les Tmax. Ce changement apparaît avoir affecté l'Alaska avec des températures supérieures à la

normale à partir de 1977, et dans une moindre mesure les régions côtières de la Californie ainsi que la bordure occidentale du Mexique mais seulement pour les T_{min}.

Enfin, la quatrième composante (CP4T_{min}, 6.8%, CP4T_{max}, 5.8%) présente une structure spatiale peu marquée mettant en opposition le secteur des états de Washington / Oregon, et l'intérieur du continent depuis le Nord du Canada jusqu'au Mexique. Ce mode montre que depuis le milieu des années 60, le réchauffement tend à être amplifié à l'intérieur du continent et en revanche légèrement pondéré sur les Etats de Washington et de l'Oregon .

Il apparaît que l'Ouest de l'Amérique du Nord se réchauffe significativement en hiver au cours de la période 1950-2001 avec des tendances plus fortes sur les régions au Nord de 50°N. Les T_{min} augmentent plus fortement que les T_{max} sur la quasi-totalité du secteur, ainsi, l'amplitude thermique diurne diminue.

Sur la quasi-totalité du secteur, les températures augmentent et c'est surtout à partir des années 80 qu'elles sont plus chaudes que la normale (CP1). A ce réchauffement général se surimpose une variabilité inter-annuelle et décennale. Par exemple, il apparaît qu'à partir de la fin des années 1970, le réchauffement s'est nettement renforcé sur la Péninsule de l'Alaska (CP3). L'Ouest du Canada a eu un réchauffement accentué au cours des années 80 mais en revanche pondéré à partir du milieu des années 90, et inversement pour le Sud-Ouest des Etats-Unis et le Nord du Mexique (CP2).

5.2.2. Variation spatio-temporelle des précipitations

En ce qui concerne les précipitations, au cours de la période 1950-2001, elles tendent à devenir plus abondante le long de la côte ouest depuis la Péninsule de l'Alaska jusqu'en Californie à l'exception de la région de Vancouver / Seattle (Figure 5.9). L'augmentation des cumuls des précipitations est supérieure à 50 mm voire à 100 mm le long du littoral. Les précipitations sont aussi plus abondantes mais dans une moindre mesure à l'intérieur du continent, dans les états de l'Arizona, du Nouveau Mexique, de l'Utah et du Colorado (environ +50 mm). Inversement, les précipitations tendent à diminuer légèrement à l'intérieur du continent au niveau de la Colombie Britannique et pour quelques stations des états de

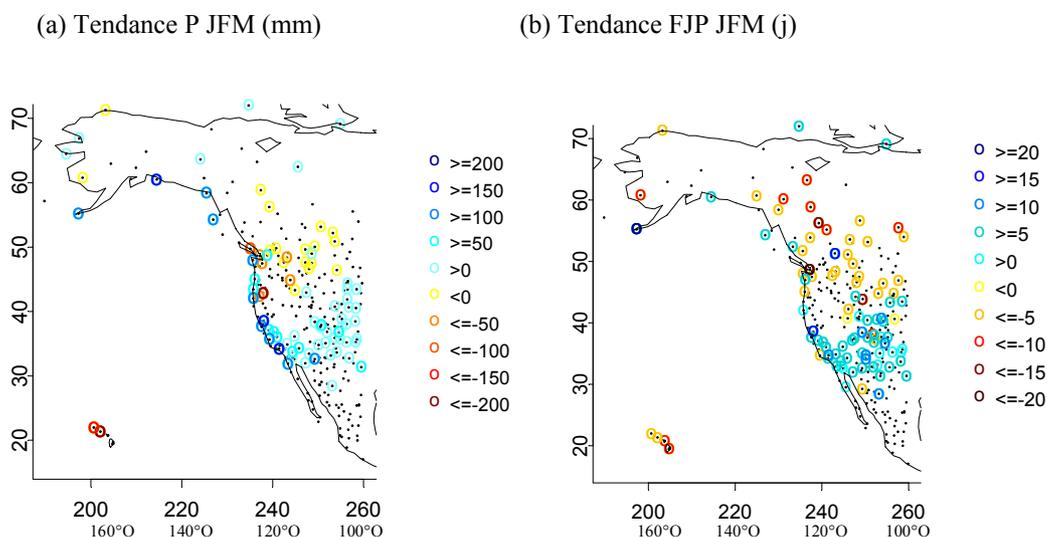


Figure 5.9. Tendances linéaires des cumuls de précipitations (a) et fréquences des jours de pluie (b) en JFM au cours de la période 1950-2001 (couleurs = sig. > 95%, t-test bilatéral). Cf. Annexes, figure A5.3 pour visualiser l'évolution des cumuls de précipitations pour 4 stations.

Washington, Idaho et Montana. Pour la fréquence des jours de pluie, la régionalisation est la même, mais le contraste Nord-Sud et côte Pacifique-intérieur du continent est renforcé.

Nous pouvons observer sur la figure 5.10 que contrairement aux températures, la structure méridienne (Nord-Sud) de la répartition des anomalies de précipitations est peu claire due sans doute à la sensibilité des précipitations à différents paramètres locaux et régionaux comme celui du relief (altitude et orientation). De plus, au Nord de 45°N approximativement (cf. figure 5.9), le contraste entre le littoral (où les précipitations augmentent) et l'intérieur du continent (où les précipitations diminuent) « brouille » le signal.

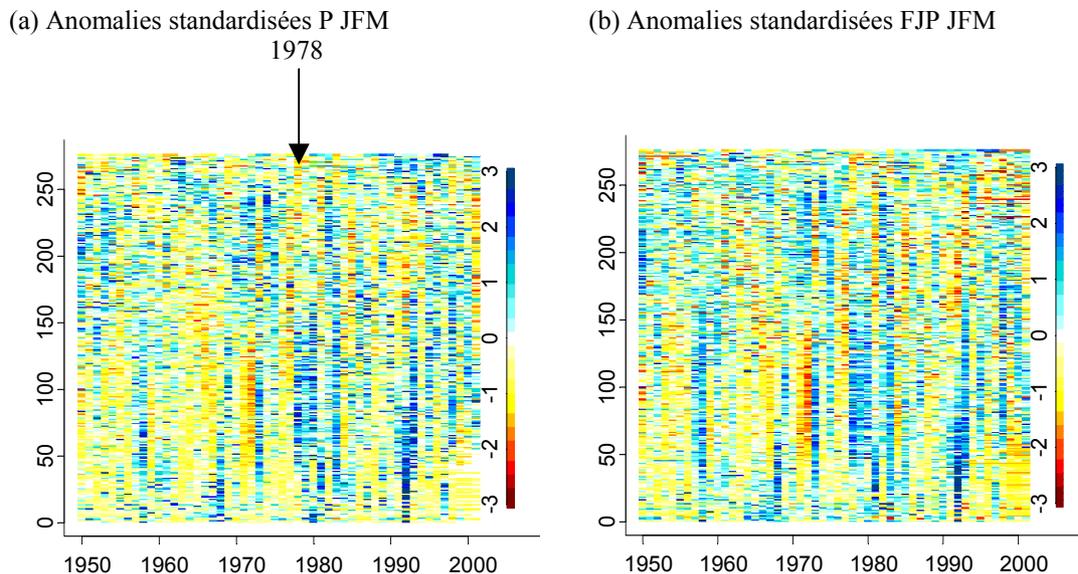


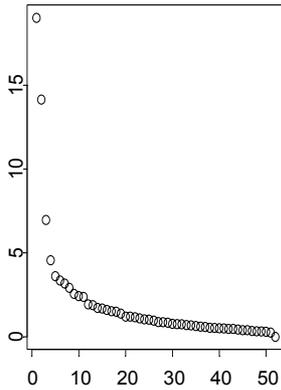
Figure 5.10. Anomalies standardisées des cumuls des précipitations (a) et des fréquences des jours de pluie (b) en JFM, au cours de la période 1950-2001. Les stations sont classées du sud (1) vers le nord (276). La station n°1 se situe à 17.05°N, la n°50 à 30.45°N, la n°100 à 36.58°N, la n°150 à 41.25°N, la n°200 à 46.57°N, la n°250 à 55.20°N et la n°276 à 76.23°N.

Même si l'on observe une augmentation des précipitations le long de littoral de l'Alaska et sur le sud-ouest des Etats-Unis, la variation inter-annuelle des cumuls des précipitations apparaît relativement hétérogène d'une région à l'autre (voire d'une station à l'autre dans une même région climatique). Nous pouvons tout de même émettre quelques observations. Au sud de 40°N approximativement, les précipitations tendent à augmenter à partir de 1978 avec une période nettement plus humide qui dure jusqu'en 1983. De 1984 à 1991, les précipitations apparaissent plus modérées selon les stations, avec des hivers légèrement excédentaires ou légèrement déficitaires. Les hivers 1992 et 1993 sont en revanche nettement plus humides pour les stations au sud de 35°N approximativement et au sud de 45°N respectivement. A partir de 1994 on observe une alternance entre les hivers humides et secs selon les stations (notons que 1998 a été très humide entre 30°N et 45°N approximativement).

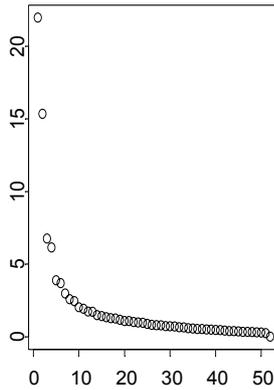
Pour faciliter le diagnostic du comportement pluviométrique hivernal en Amérique du Nord-Ouest, nous avons réalisé une Analyse en Composantes Principales avec rotation

Varimax¹⁶ des cumuls de précipitations et des fréquences des jours de pluie en JFM (Figure 5.11). L'ACP distingue 4 modes principaux de la variabilité inter-annuelle des cumuls de précipitations et de la fréquence des jours de pluie sur l'Ouest de l'Amérique du Nord, expliquant 46% et 50% de la variance totale respectivement.

(a) ACP P (% var.)



(b) ACP FJP (%var.)

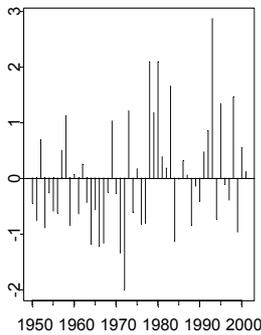


(c) % de var. ACP, Rotation Varimax

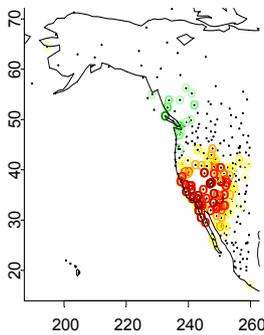
ACP (variance)					
	CP1	CP2	CP3	CP4	Var. Cumul.
P	20%	14%	7%	5%	46%
FJP	23%	15%	7%	5%	50%

Rotation Varimax (variance)					
	CPR1	CPR2	CPR3	CPR4	Var. Cumul.
P	16%	11%	11%	8%	46%
FJP	20%	12%	11%	7%	50%

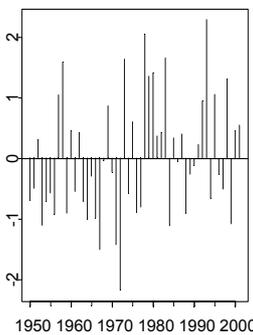
(d) CPR1P (16%)



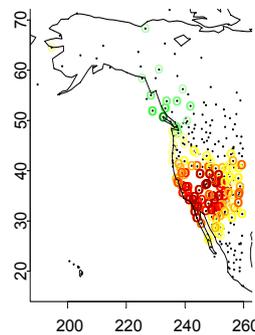
(e) Corrélations



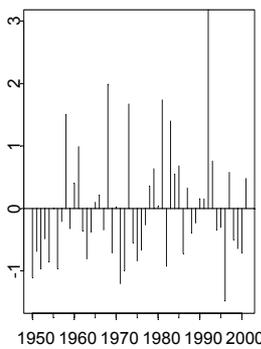
(f) CPR1FJP (20%)



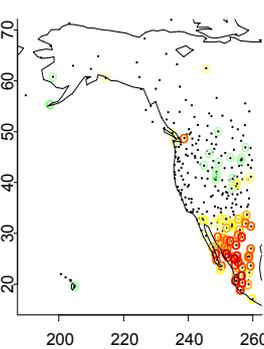
(g) Corrélations



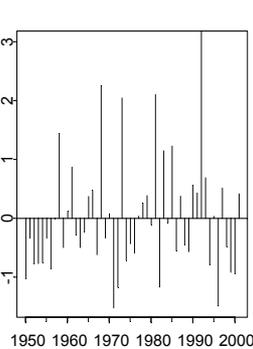
(h) CPR2P (11%)



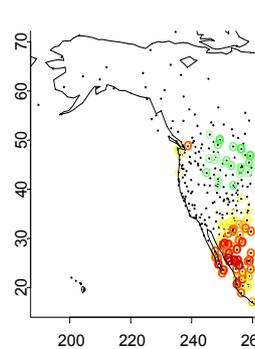
(i) Corrélations



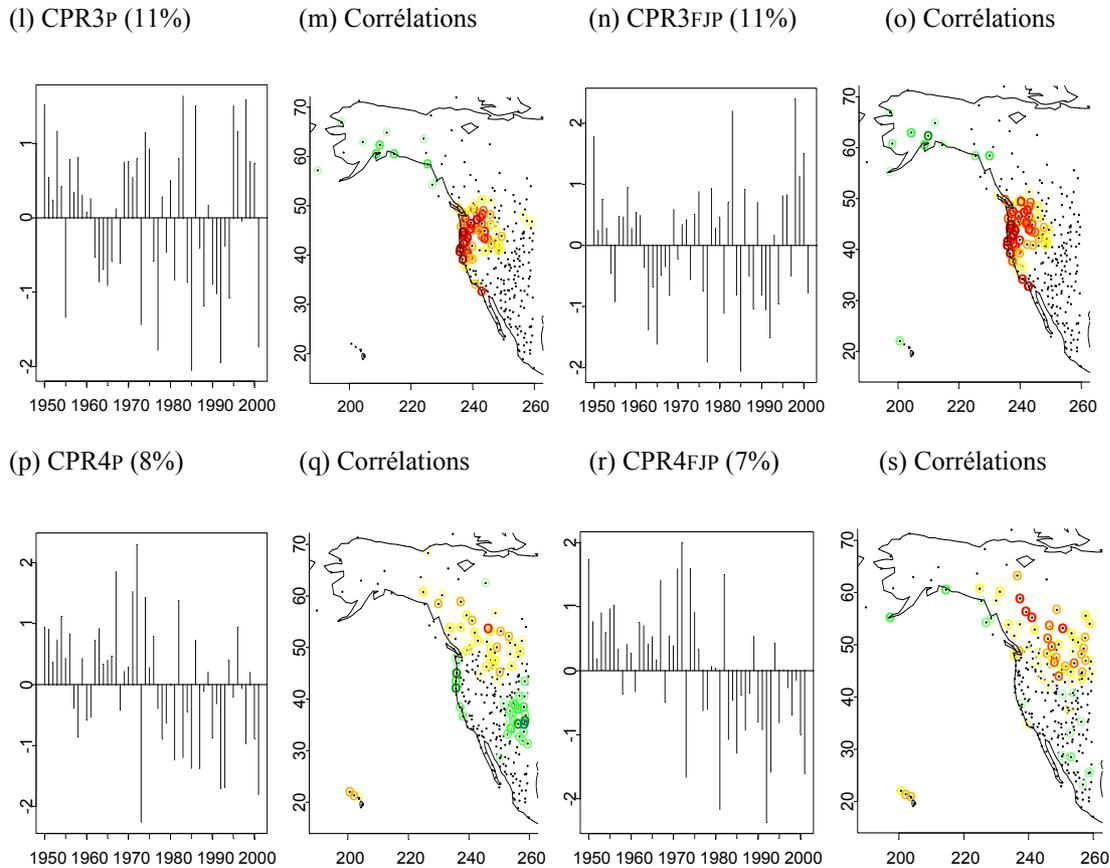
(j) CPR2FJP (12%)



(k) Corrélations



¹⁶ Les structures spatiales de la variabilité inter-annuelle des précipitations sont moins fortes que celles des températures, ainsi, une rotation varimax, facilitera le diagnostic.



Légende

- >= 0.9
- >= 0.8
- >= 0.7
- >= 0.6
- >= 0.5
- >= 0.4
- >= 0.3
- <= -0.3
- <= -0.4
- <= -0.5
- <= -0.6
- <= -0.7
- <= -0.8
- <= -0.9

Figure 5.11. Analyse en Composantes Principales avec rotation Varimax des cumuls de précipitations (à gauche) et des fréquences des jours de pluie (à droite) en JFM 1950-2001, pourcentage de variance expliquée par chaque composante (a, b, c), première (d, e, f, g), deuxième (h, i, j, k), troisième (l, m, n, o) et quatrième (p, q, r, s) composante principale avec rotation varimax.

Sur les cartes sont représentés les coefficients de corrélation linéaire (couleurs = sig. > 95%, t-test bilatéral).

La première composante (CPR1P 16% et CPR1FJP 20%) met en opposition les précipitations sur la Colombie Britannique et le Sud-Ouest des États-Unis. Un renversement de signe apparaît clairement entre 1977 et 1978. De 1950 à 1977, les pluies ont diminué en Colombie Britannique tandis qu'elles augmentaient sur le Sud-Ouest des États-Unis.

Le deuxième mode (CPR2P et CPR2FJP, 11% et 12 % de la variance totale respectivement) décrit les précipitations sur le Nord du Mexique. À l'échelle inter-annuelle, elles évoluent inversement de celles des Montagnes Rocheuses du Nord des États-Unis.

La troisième composante (CPR3P, 11% et CPR3FJP, 11 %), décrit surtout les variations des précipitations sur le Nord-Ouest des États-Unis et le long de la côte de la Californie. Elles varient en opposition avec celles de l'Alaska. La caractéristique majeure de cette composante, est qu'au cours de la chronique 1950-2001, la variabilité inter-annuelle et la magnitude de l'indice tendent à augmenter fortement tant pour les phases positives que négatives.

Enfin, la quatrième composante (CPR4P, 8% et CPR4FJP, 7%) mesure la variation des précipitations sur l'Ouest du Canada à l'intérieur du continent. À partir du milieu des années

1970 (1977), des conditions plus sèches concernent l'Ouest du Canada. En revanche, la fréquence des jours de pluie est plus forte le long de la côte du Golfe de l'Alaska et les cumuls de précipitations augmentent le long de la côte des Etats-Unis, ainsi que sur le Nouveau Mexique et le Colorado.

Le diagnostic de l'évolution des températures et précipitations hivernales sur l'Ouest de l'Amérique du Nord montre que :

- les températures augmentent sur l'ensemble du secteur (à l'exception du Mexique), et plus fortement les Tmin que les Tmax, induisant une diminution de l'amplitude thermique diurne au cours de la période 1950-2001 ;
- les années 1980 et 90 apparaissent comme étant beaucoup plus chaudes que les années 50 et 60 sur la quasi-totalité du secteur ;
- à partir de 1977 le réchauffement est accentué sur l'Alaska (et dans une moindre mesure le long de la côte californienne) persistant jusqu'en 2001 ;
- les précipitations augmentent le long de la côte Pacifique depuis l'Alaska, jusqu'en Californie ainsi que sur les états de l'Arizona, du Nouveau Mexique, de l'Utah et du Colorado sur la période 1950-2001 mais particulièrement à partir du milieu des années 1970,
- les précipitations diminuent plus ou moins faiblement à l'intérieur du continent au niveau du Canada, et surtout à partir du milieu des années 1970,
- la variabilité inter-annuelle des précipitations ainsi que la magnitude des phases sèches et humides augmentent à partir des années 70 sur le Nord-Ouest des Etats-Unis, le long de la côte de la Californie, et dans une moindre mesure sur l'Alaska.

Il apparaît que l'augmentation générale des températures n'est pas étroitement associée à l'augmentation des précipitations. En effet, il n'existe pas de relation linéaire entre la variabilité des températures et des précipitations : si les jours de précipitations, en hiver, sont généralement des jours plus chauds que la moyenne, inversement les jours plus chauds ne sont pas forcément des jours pluvieux. Par conséquent, la variation inter-annuelle des températures n'obéit pas aux mêmes mécanismes que celle des précipitations. Dans le but de diagnostiquer dans quelle mesure les variations de la circulation atmosphérique influence le climat sur notre secteur, nous allons maintenant étudier les liens entre l'activité transitoire du Pacifique Nord-Est et les températures / précipitations en Amérique du Nord-Ouest.

5.3. Relations entre l'activité transitoire du Pacifique Nord-Est et les températures / précipitations sur l'Ouest de l'Amérique du Nord

Afin d'étudier l'influence de la variabilité de l'activité dépressionnaire / anticyclonique hivernale du Pacifique Nord-Est sur les températures et les précipitations sur le Nord-Ouest de l'Amérique, nous avons calculé les coefficients de corrélations temporelles linéaires entre les indices atmosphériques D, A et DA et les séries de températures minimales et maximales et de l'amplitude thermique diurne (section 5.3.1). La même procédure a été menée avec la fréquence des extrêmes froids et chauds, diurnes et nocturnes (section 5.3.2) et enfin avec les cumuls des précipitations ainsi que la fréquence des jours de pluie (section 5.3.3), pour chaque station au cours de la période 1950-2001.

5.3.1. Températures minimales /maximales et amplitudes thermiques diurnes

Lorsque l'activité dépressionnaire est renforcée dans le Pacifique Nord-Est, les températures sont plus chaudes sur l'Ouest de l'Amérique du Nord (Figure 5.12), tant pour les Tmin que pour les Tmax (à l'exception du Mexique) et la variabilité inter-journalière des températures diurnes et nocturnes tend à être réduite (Figure 5.13).

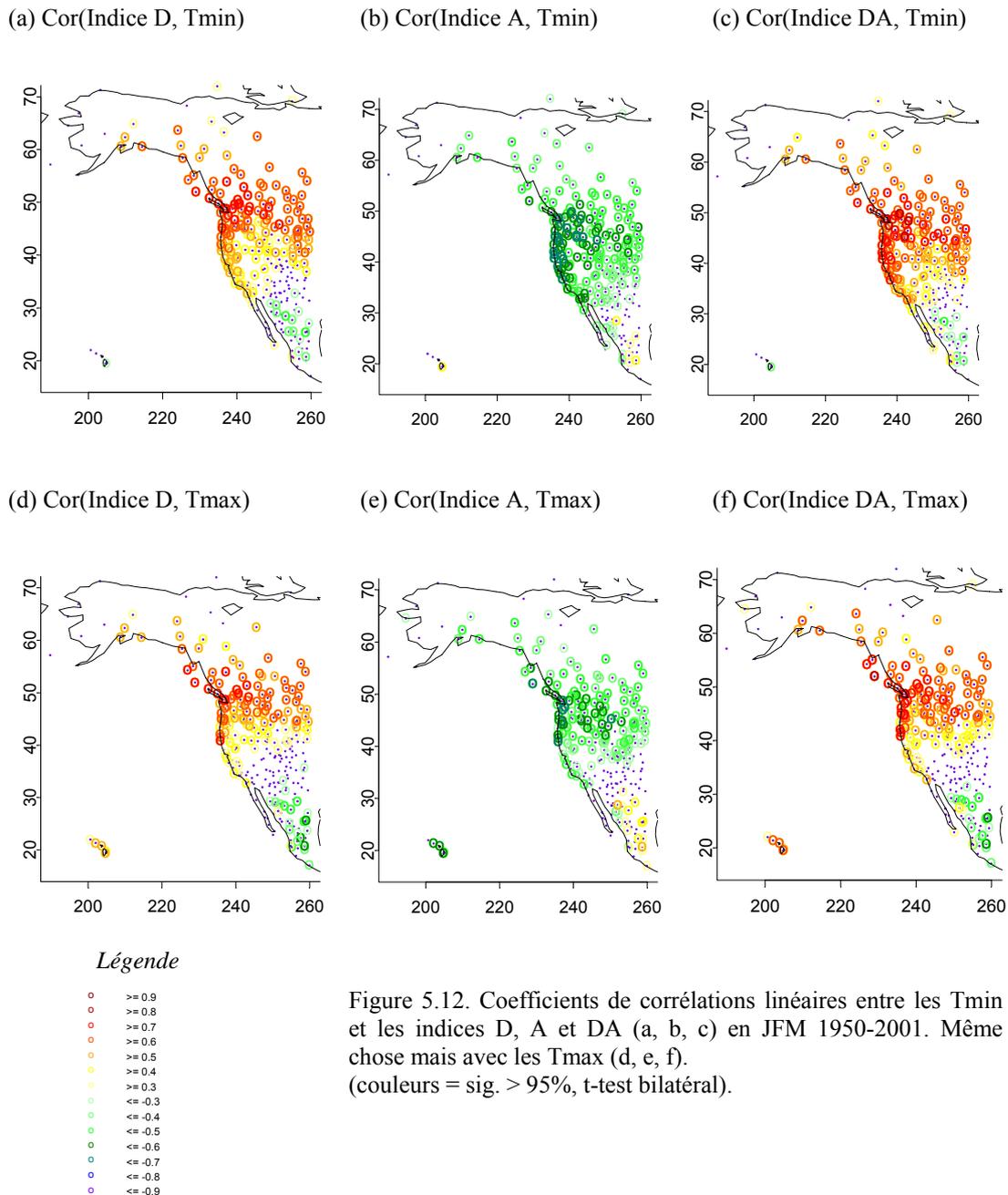


Figure 5.12. Coefficients de corrélations linéaires entre les Tmin et les indices D, A et DA (a, b, c) en JFM 1950-2001. Même chose mais avec les Tmax (d, e, f). (couleurs = sig. > 95%, t-test bilatéral).

De manière générale, les relations sont plus significatives entre l'activité transitoire et les Tmin qu'avec les Tmax (Figure 5.12 a et d)¹⁷. Nous pouvons observer que lorsque

¹⁷ Dans les régions où les coefficients de corrélation sont les plus forts, l'indice DA explique entre 30 et 65% de la variance des Tmin et entre 30 et 50% de la variance des Tmax.

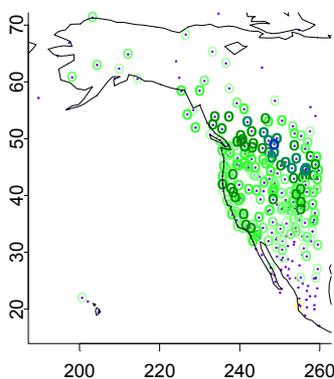
l'activité dépressionnaire est plus forte et que l'activité anticyclonique est plus faible, les températures nocturnes sont plus chaudes de l'Alaska / Territoires du Nord-Ouest jusqu'en Californie / Arizona et sont plus froides sur le Mexique (relations faibles).

Nous pouvons également préciser que les cartes montrant les relations avec les Tmin (spécifiquement), associées d'une part à l'activité dépressionnaire (Figure 5.12b) et d'autre part à l'activité anticyclonique (Figure 5.12c), sont « imparfaitement symétriques ». La structure spatiale des corrélations associée aux anticyclones est légèrement décalée vers le sud comparativement à celle associée à l'activité dépressionnaire. L'influence de l'activité anticyclonique semble donc plus méridionale que l'activité dépressionnaire. Les coefficients de corrélation les plus forts concernent surtout les régions littorales des Etats-Unis ainsi que l'intérieur de l'Etat de Washington. L'influence des anticyclones semble concerner (directement ou indirectement) le Nouveau Mexique contrairement aux dépressions. La structure associée aux dépressions est donc légèrement décalée vers le nord. Ainsi, l'activité dépressionnaire apparaît être en plus forte relation avec les températures de la Colombie Britannique. De plus, l'influence des cyclones extra-tropicaux tend à pénétrer plus largement vers l'est, entre les latitudes 45°N et 55°N, comparativement aux anticyclones. Nous pouvons également noter que l'opposition avec les températures au Mexique est alors plus marquée.

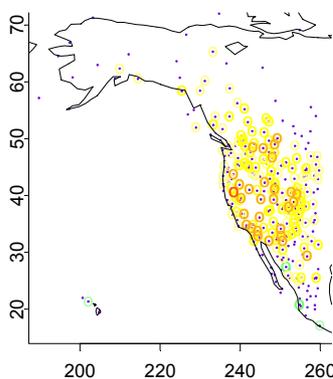
Les structures associées aux Tmax montrent un plus fort contraste entre le Nord et le Sud tant pour l'influence des dépressions que des anticyclones, avec une opposition plus nette entre les températures de la zone 40°N-60°N et le Mexique. Cependant, les températures diurnes (Tmax) semblent, de manière générale, moins sensibles à l'activité transitoire que les températures nocturnes (Tmin). Par exemple, la circulation transitoire du Pacifique Nord-Est semble ne pas influencer la variabilité des Tmax à l'intérieur du continent entre 30°N et 40°N (Nevada, Arizona, Nouveau Mexique, Utah, Colorado). Ces plus faibles relations, voire l'absence de relation, résultent de la complexité du forçage radiatif, au cours de la journée, avec notamment l'absence ou la présence de nuages.

La variabilité inter-journalière des Tmin et surtout des Tmax (Figure 5.13) est davantage corrélée avec l'activité dépressionnaire qu'avec l'activité anticyclonique en termes de magnitude des coefficients et d'espace concerné. En effet, lorsque l'activité dépressionnaire est plus forte, la variabilité inter-journalière des températures est réduite sur l'ensemble du secteur, depuis l'Alaska jusque sur le Nord du Mexique.

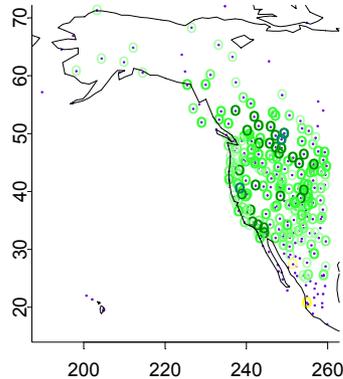
(a) Cor(Indice D, σ Tmin)



(b) Cor(Indice A, σ Tmin)



(c) Cor(Indice DA, σ Tmin)



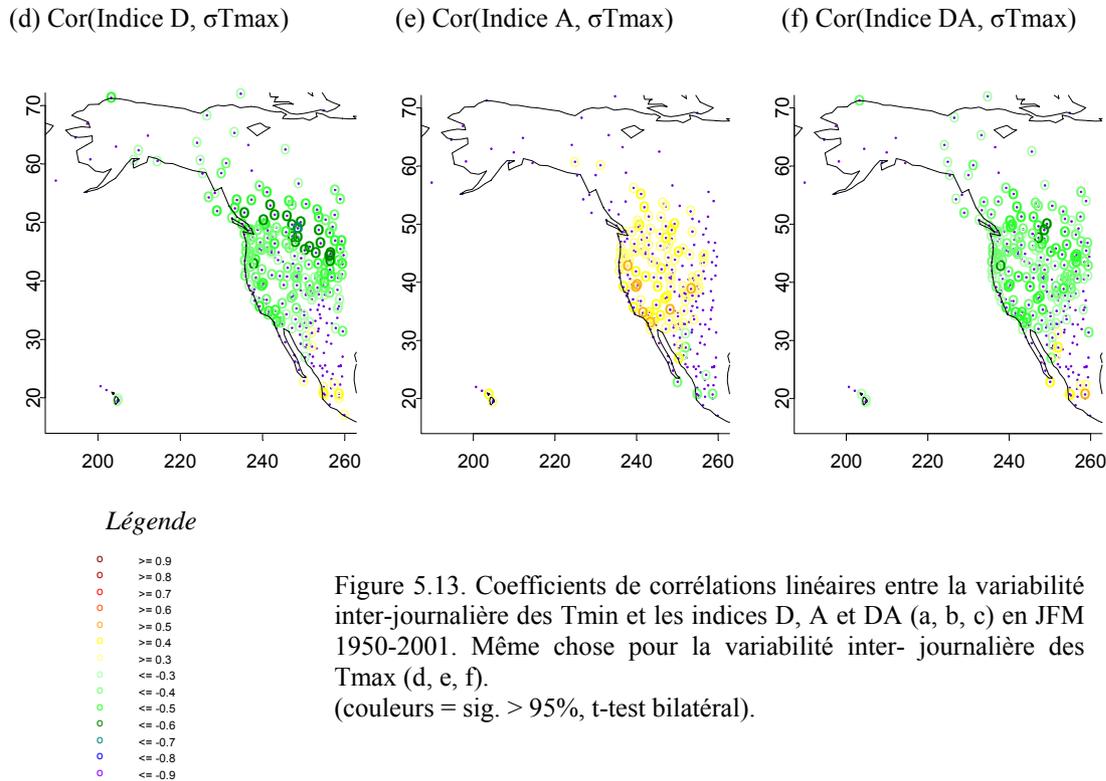


Figure 5.13. Coefficients de corrélations linéaires entre la variabilité inter-journalière des T_{min} et les indices D, A et DA (a, b, c) en JFM 1950-2001. Même chose pour la variabilité inter-journalière des T_{max} (d, e, f). (couleurs = sig. > 95%, t-test bilatéral).

Inversement, lorsque l'activité anticyclonique est plus forte, les températures sont plus contrastées d'un jour à l'autre en Colombie Britannique et surtout sur l'Ouest des Etats-Unis (pas en Alaska, ni à l'intérieur du continent à l'est de la Cordillère). Nous pouvons expliquer cette observation peut-être par le fait que lorsque l'activité dépressionnaire est plus forte, les anticyclones, à l'arrière des cyclones extra-tropicaux, sont moins fréquents et/ou moins forts donc le refroidissement qui suit les dépressions est moins intense.

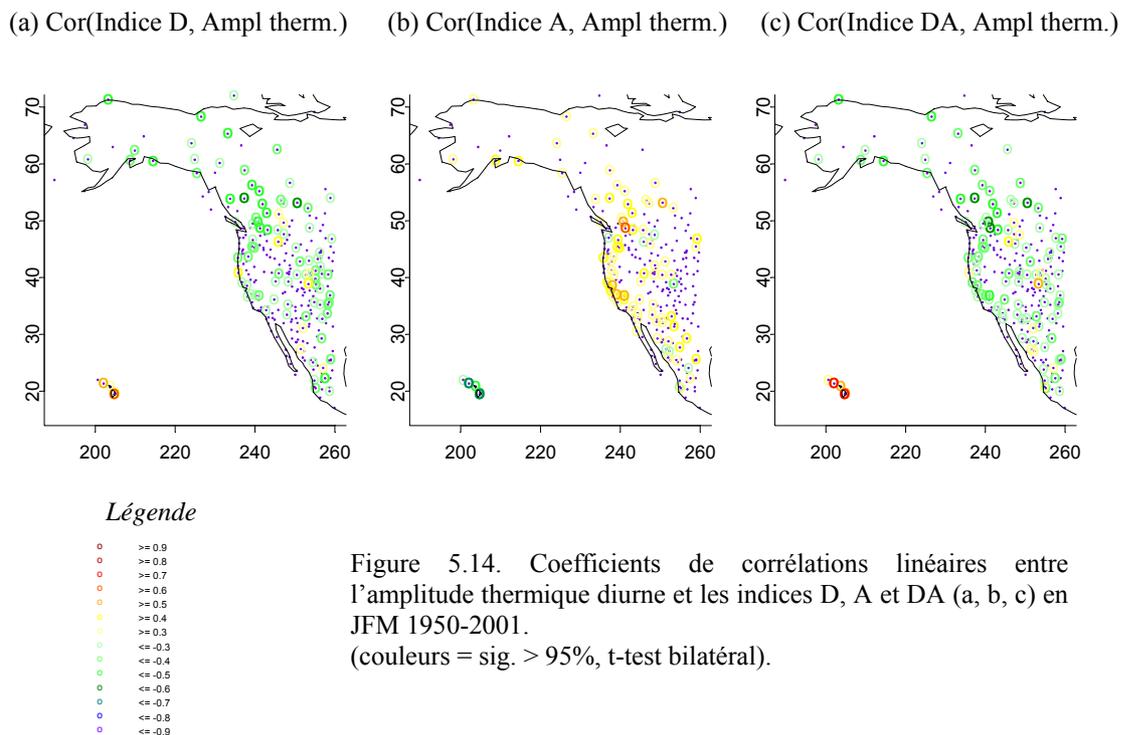


Figure 5.14. Coefficients de corrélations linéaires entre l'amplitude thermique diurne et les indices D, A et DA (a, b, c) en JFM 1950-2001. (couleurs = sig. > 95%, t-test bilatéral).

Les structures associées à l'amplitude thermique diurne (figure 5.14) ne sont pas très fortes mais nous pouvons tout de même noter que les dépressions, à cause de la couverture nuageuse qui leur est associée, sont favorables à la réduction de l'écart entre Tmin et Tmax en particulier sur les régions au nord de 50°N.

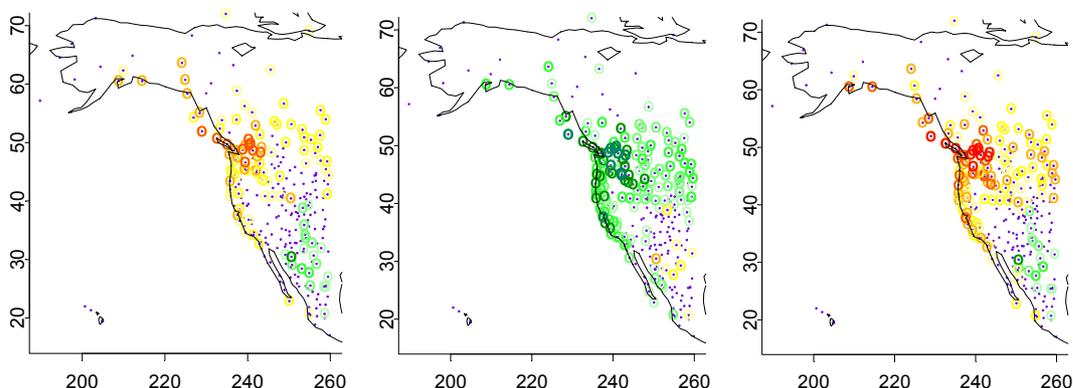
5.3.2. Événements extrêmes chauds et extrêmes froids diurnes et nocturnes

Nous avons défini deux variables cumulant les notions de fréquence et d'intensité des températures : fréquence des extrêmes chauds et froids nocturnes et diurnes. Selon Gershunov (1998), les températures extrêmes froides sont définies comme étant des températures inférieures au 1^{er} décile fixé à partir de l'ensemble des températures pour les 52 hivers et pour chaque station. La fréquence des extrêmes chauds correspond à la fréquence des températures supérieures au 9^{ème} décile fixé sur 52 hivers pour chaque station. Par conséquent, pour chaque station, nous avons calculé le pourcentage des jours durant lesquels les températures minimales ou maximales sont plus froides que le 10^{ème} percentile (événements extrêmes froids : Tmin10 ou Tmax10) ou plus chaudes que le 90^{ème} percentile (événements extrêmes chauds: Tmin90 ou Tmax90).

Comme nous l'avons souligné précédemment, l'activité transitoire détermine mieux les températures nocturnes que diurnes (figures 5.12 et 5.15). Lorsque l'activité dépressionnaire est plus forte dans le Pacifique Nord-Est, la fréquence des extrêmes chauds nocturnes (Tmin90) et diurnes (Tmax90) est plus élevée le long de la côte ouest, de l'Alaska à la Californie et à l'intérieur du continent entre 45°N et 55°N (figure 5.15). Les relations sont plus fortes avec l'activité anticyclonique qui semble déterminer plus significativement la variabilité de l'occurrence des extrêmes chauds que l'activité dépressionnaire. En d'autres termes, les hivers où l'activité anticyclonique est plus forte, la probabilité d'occurrence d'extrêmes chauds, (et plus spécifiquement nocturnes) est limitée sur l'Ouest de l'Amérique du Nord (excepté le Mexique).

L'activité transitoire semble influencer plus fortement les événements extrêmes froids (Figure 5.16) nocturnes et diurnes (les extrêmes chauds diurnes ou nocturnes semblent dépendre davantage des facteurs plus locaux). A l'inverse des extrêmes chauds, les

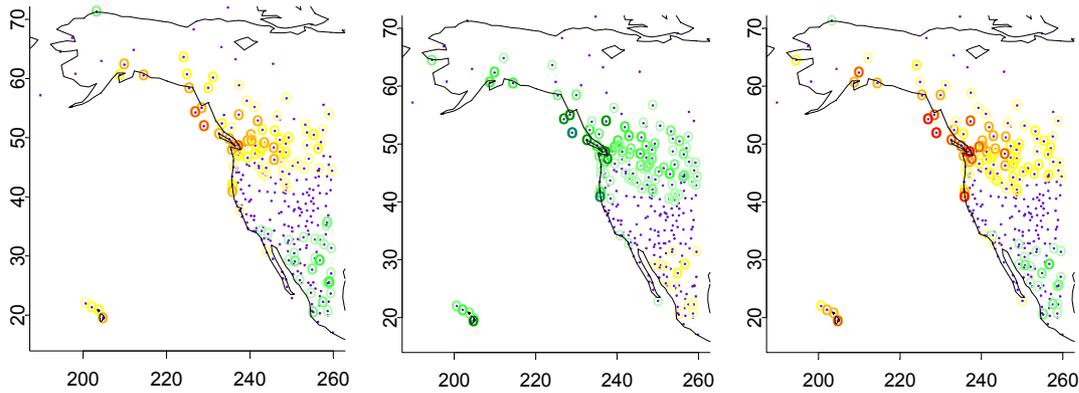
(a) Cor(Indice D, Tmin90) (b) Cor(Indice A, Tmin90) (c) Cor(Indice DA, Tmin90)



(d) Cor(Indice D, Tmax90)

(e) Cor(Indice A, Tmax90)

(f) Cor(Indice D, Tmax90)



Légende

- ≥ 0.9
- ≥ 0.8
- ≥ 0.7
- ≥ 0.6
- ≥ 0.5
- ≥ 0.4
- ≥ 0.3
- ≤ -0.3
- ≤ -0.4
- ≤ -0.5
- ≤ -0.6
- ≤ -0.7
- ≤ -0.8
- ≤ -0.9

Figure 5.15. Coefficients de corrélations linéaires entre la fréquence des nuits extrêmement chaudes (Tmin90) et les indices D, A et DA (a, b, c) en JFM 1950-2001. Même chose pour la fréquence des journées extrêmement chaudes (Tmax90) (d, e, f). (couleurs = sig. > 95%, t-test bilatéral).

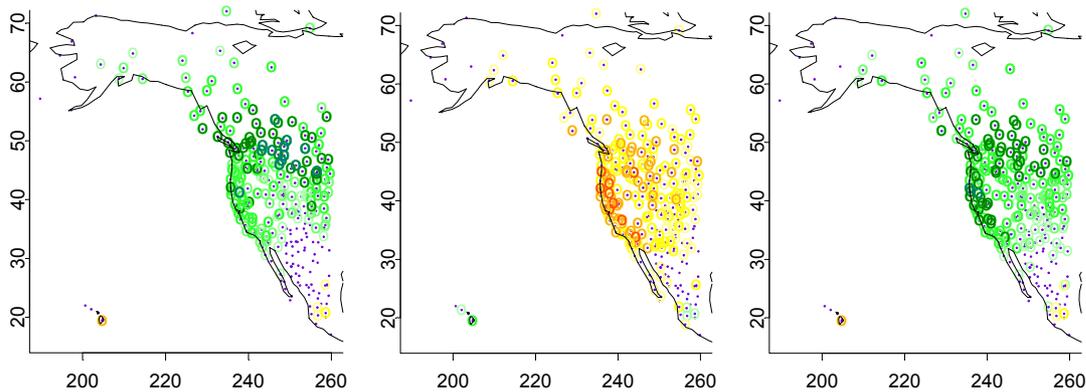
dépansions semblent contrôler plus fortement la variabilité de l'occurrence des extrêmes froids diurnes ou nocturnes. Les hivers durant lesquels l'activité dépressionnaire est plus forte, la probabilité d'occurrence d'événements extrêmes froids est limitée.

D'une manière générale, les structures spatiales des corrélations avec les événements extrêmes chauds et froids montrent un effet orographique sur l'Ouest de l'Amérique du Nord. La zone située entre 40°N et 60°N, est majoritairement soumise aux passages des systèmes dépressionnaires qui sont moins entravés que les anticyclones par la topographie, et peuvent donc traverser la Cordillère, affectant les températures à l'intérieur des terres. Pour l'activité anticyclonique, les plus forts coefficients de corrélations, à l'intérieur du continent, correspondent aux régions de faible altitude, notamment au niveau de la vallée de la Columbia River.

(a) Cor(Indice D, Tmin10)

(b) Cor(Indice A, Tmin10)

(c) Cor(Indice DA, Tmin10)



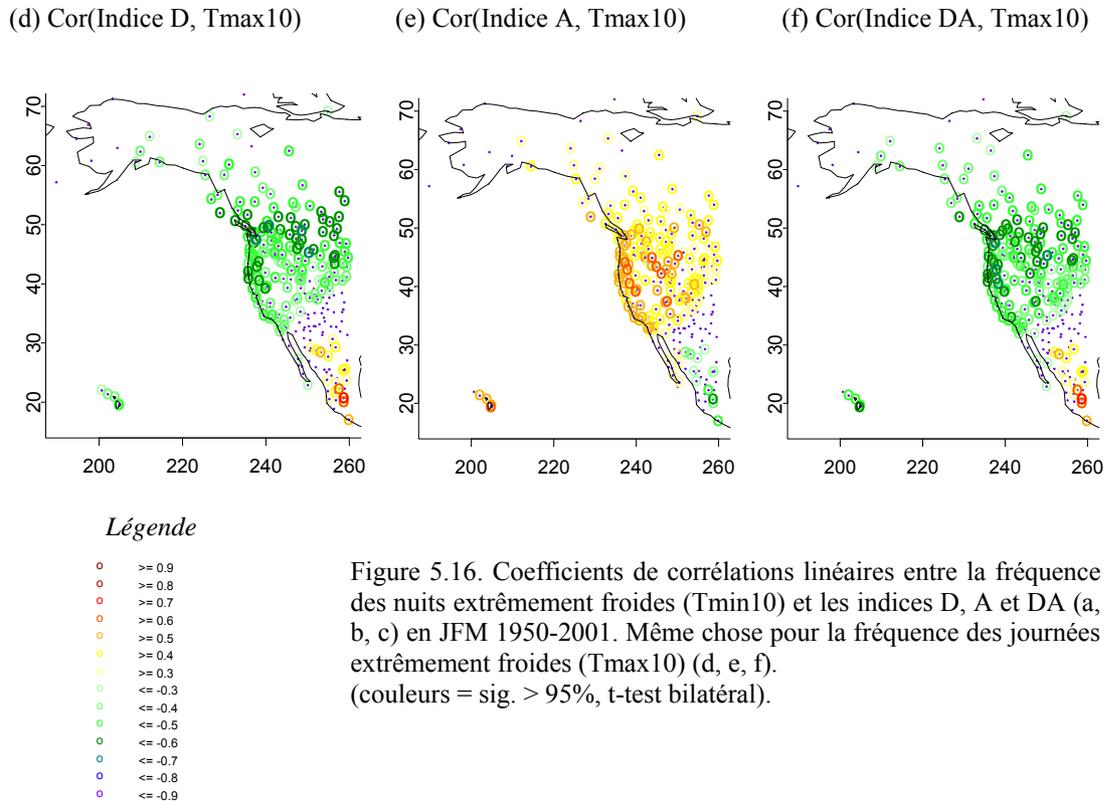


Figure 5.16. Coefficients de corrélations linéaires entre la fréquence des nuits extrêmement froides (Tmin10) et les indices D, A et DA (a, b, c) en JFM 1950-2001. Même chose pour la fréquence des journées extrêmement froides (Tmax10) (d, e, f). (couleurs = sig. > 95%, t-test bilatéral).

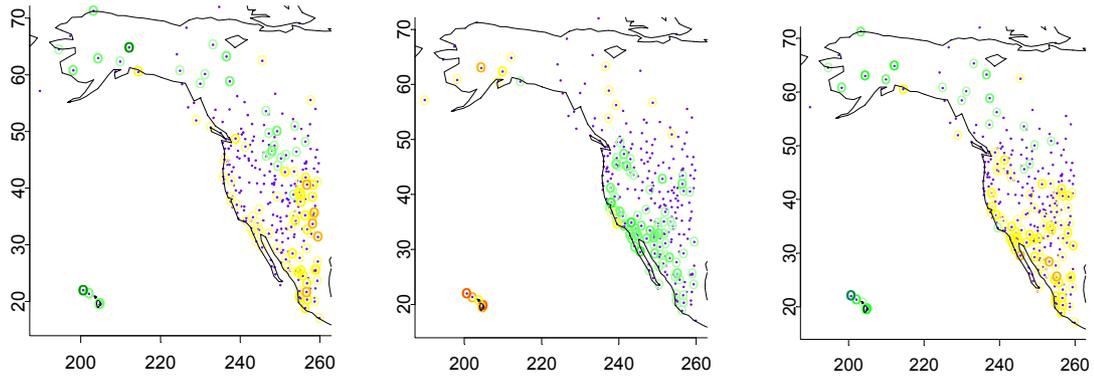
5.3.3. Cumuls des précipitations et fréquence des jours de pluie

Les relations entre l'activité transitoire du Pacifique Nord-Est et les précipitations (cumuls et fréquences des jours de pluie, figures 5.17 et 5.18) ne sont pas très significatives au cours de la période 1950-2001¹⁸. Ceci est dû en grande partie aux facteurs géographiques locaux et régionaux comme l'altitude, les effets d'abri, d'exposition (ex : Dettinger et al., 2004). Nous pouvons tout de même préciser qu'après le changement climatique de 1976-77, les relations sont davantage significatives (cf. Annexes, Figures A.5.4 et A.5.5).

Ainsi, lorsque l'activité dépressionnaire est plus intense, au détriment de l'activité anticyclonique, dans le Pacifique Nord-Est, les précipitations sont plus abondantes le long de la côte Ouest, du sud de la Colombie Britannique, jusqu'au Mexique et inversement moins abondantes sur l'Alaska et à l'intérieur du continent de l'Alberta au Montana (et également sur Hawaii). Des anticyclones moins fréquents et moins puissants le long de la côte Ouest signifient une diminution de la possibilité de formation de blocages anticycloniques (situations défavorables aux précipitations) ce qui permet donc aux dépressions de circuler « sans entrave » sur l'ensemble du Pacifique Nord-Est. De plus, à partir du milieu des années 70, les dépressions sont plus profondes (induisant peut-être des couloirs dépressionnaires plus étirés en latitude) sur notre secteur et ont tendance à circuler à des latitudes plus basses (cf. Chapitre 3), ainsi sont elles davantage susceptibles de générer des précipitations à des latitudes plus basses, jusqu'en Californie du Sud par exemple. Cependant, des dépressions

¹⁸ L'indice DA explique au mieux entre 10 et 25% de la variance des cumuls des précipitations et de la fréquence des jours de pluie sur le continent et 43% sur Hawaii.

(a) Cor(Indice D, P) 1950-01 (b) Cor(Indice A, P) 1950-01 (c) Cor(Indice DA, P) 1950-01



Légende

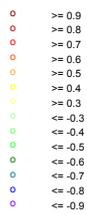
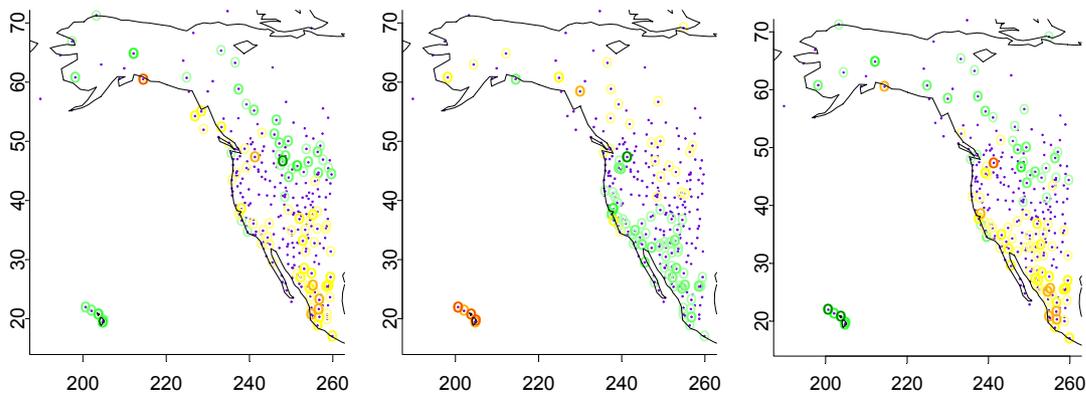


Figure 5.17. Coefficients de corrélations linéaires entre les cumuls hivernaux (JFM) des précipitations et les indices D, A et DA (a, b, c) 1950-2001. (couleurs = sig. > 95%, t-test bilatéral).

circulant à des latitudes plus basses (inférieures à 50°N) sont davantage susceptibles d’être (a) affectées par la Cordillère nord-américaine qui est plus large entre 35°N et 45°N approximativement. Ainsi, les précipitations sont non seulement moins importantes sur les régions septentrionales mais également à l’intérieur du continent dans les états de l’Alberta et du Montana.

(a) Cor(Indice D, FJP) 1950-01 (b) Cor(Indice A, FJP) 1950-01 (c) Cor(Indice DA, FJP) 1950-01



Légende

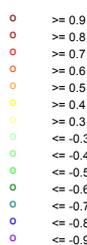


Figure 5.18. Coefficients de corrélations linéaires entre les fréquences des jours de pluie (JFM) des précipitations et les indices D, A et DA (a, b, c) 1950-2001. (couleurs = sig. > 95%, t-test bilatéral).

Nous pouvons également souligner que les précipitations au niveau des Iles Hawaii sont bien corrélées avec les indices D et A. Il apparaît que lorsque l'activité anticyclonique est plus forte sur l'Est du Pacifique Nord et que la probabilité d'occurrence de blocages anticyclonique est par conséquent plus forte le long de la côte ouest nord-américaine, le gradient de pression est renforcé vers 160°O chaque fois qu'une dépression aborde le secteur de Hawaii (effet de canalisation, comme le long d'un relief). Cette configuration est favorable aux précipitations sur ce secteur (Cram et Tatum 1979).

Nous avons montré qu'une activité dépressionnaire intensifiée et associée à une plus faible activité anticyclonique dans le Pacifique Nord-Est, contribue à modifier le régime thermique hivernal, avec une réduction de la fréquence des jours froids et extrêmement froids et une augmentation des jours chauds et extrêmement chauds, sur la majeure partie de l'Amérique du Nord-Ouest (à l'exception du Mexique qui présente soit des coefficients de corrélation non significatifs ou soit en anti-phase avec le reste du secteur étudié). Ces observations sont particulièrement valables pour les températures nocturnes (Tmin) avec lesquelles les coefficients de corrélations sont plus forts et l'extension spatiale du signal plus grande que pour les températures diurnes (Tmax). L'affaiblissement de l'activité anticyclonique dans le Pacifique Nord-Est témoignent de la diminution des advections de nord en provenance des hautes latitudes le long de la partie occidentale de l'Amérique du Nord. Simultanément, des cyclones extra-tropicaux plus fréquents et plus intenses contribuent au réchauffement des températures nocturnes, en advectant de l'air chaud des basses latitudes, et en réduisant le nombre de nuits de ciel découvert, favorables au refroidissement radiatif. Les températures diurnes (Tmax) sont moins sensibles au forçage des transitoires à cause de la complexité de l'effet radiatif au cours de la journée (absence ou présence de nuages). Les phases de prépondérance de l'activité dépressionnaire correspondent à une réduction de l'amplitude diurne des températures (Tmax-Tmin), et à une réduction de la variabilité inter-journalière des Tmin. Ces relations et changements observés sont dus à des modifications de l'activité dépressionnaire / anticyclonique tant aux échelles temporelles inter-annuelles que multi-décennales.

Il apparaît que l'activité anticyclonique (Indice A) présente une meilleure relation (corrélations négatives) avec les températures nocturnes extrêmes chaudes (Tmin90) que l'indice D. Inversement, l'activité cyclonique extra-tropicale tend à montrer une meilleure relation (corrélations négatives) avec la variabilité de la fréquence des nuits extrêmement froides (Tmin10) que l'indice A. Cette plus forte influence des systèmes dépressionnaires sur les températures minimales extrêmes se révèle sur l'amplitude diurne et la variabilité inter-journalière des températures. Par conséquent, la réduction de l'activité anticyclonique tend à accroître la fréquence des nuits extrêmement chaudes, et, l'intensification de l'activité dépressionnaire contribue à réduire la fréquence des nuits extrêmement froides, ainsi que le contraste de l'amplitude diurne et la variabilité inter-journalière des Tmin.

L'activité transitoire est beaucoup plus faiblement corrélée avec les précipitations sur le secteur d'étude. Cependant, après le milieu des années 70, lorsque l'activité dépressionnaire est plus forte et l'activité anticyclonique moins forte, les précipitations sont accrues le long de la côte Pacifique de la Colombie Britannique jusqu'au Mexique, mais en revanche défavorisées sur le Nord de l'Alaska et les régions à l'intérieur du continent (Alberta et Montana) et également Hawaii.

Dans cette 2^{ème} partie, nous avons analysé la variabilité de l'activité dépressionnaire et anticyclonique du Pacifique Nord-Est qui a permis de mieux diagnostiquer la variabilité des structures moyennes climatiques qui caractérisent le Pacifique Nord-Est. Les pressions centrales des anticyclones tendent à diminuer graduellement au cours de la période 1950-2001, tandis que les pressions des dépressions présentent une forte rupture de stationnarité entre 1976 et 1977. Les fréquences des dépressions et des anticyclones présentent une plus forte variabilité inter-annuelle à partir du milieu des années 1970. C'est également à partir de 1977 que les dépressions adoptent des trajectoires plus méridionales. Ces modifications dans l'activité transitoire des moyennes latitudes sont associées de manière cohérente aux modifications des TSO extra-tropicales et de la circulation moyenne de la basse et de la haute troposphère ainsi que du climat de l'Amérique du Nord-Ouest. Depuis le milieu des années 70, l'intensification de l'activité dépressionnaire, au détriment de l'activité anticyclonique dans le Pacifique Nord-Est, est associée à des PNM plus faibles et à une anomalie de la circulation des vents dans le sens cyclonique sur le centre et l'Est du Pacifique Nord (NPI négatif). Sur le centre du Pacifique Nord, les anomalies de vent de nord sont accompagnées de températures plus faibles que la normale et en revanche, le long de la côte ouest nord-américaine ainsi que sur l'Alaska et l'Ouest du Canada, les anomalies de vents de sud induisent des températures plus chaudes (PDO positif). Par conséquent, la tendance au réchauffement des températures sur l'Ouest de l'Amérique du Nord, qui s'observe au cours de la période 1950-2001, est renforcée à partir du milieu des années 70, en particulier sur l'Alaska et le long de la côte ouest des Etats-Unis, en réponse aux modifications de la circulation atmosphérique et océanique du Pacifique Nord. Les changements observés dans la circulation transitoire favorisent les précipitations le long de la côte ouest nord-américaine mais surtout sur le Sud-Ouest des Etats-Unis. Cette augmentation est probablement induite par la diminution de l'activité anticyclonique sur le Pacifique Nord-Est, associée à des trajectoires plus méridionales des dépressions. En revanche, à l'intérieur du continent et au nord de 40°N les cumuls de précipitations et la fréquence des jours de pluie tendent à diminuer, peut-être en raison d'une diminution de l'incursion des dépressions à l'intérieur du continent (notamment au niveau du Canada).

Dans la prochaine partie nous compléterons les analyses précédemment exposées car nous replacerons l'évolution de l'activité transitoire du Pacifique Nord-Est, dans le contexte de l'évolution de la circulation atmosphérique et océanique du Pacifique Nord. Etant donné que la majeure partie des transitoires qui circulent sur le Pacifique Nord-Est proviennent du secteur occidental, c'est en effet à l'échelle du Pacifique Nord que doit être étudiée la variabilité inter-annuelle de l'activité dépressionnaire / anticyclonique hivernale dans les observations et dans les simulations du modèle CNRM-CM3. Ces analyses doivent également permettre de répondre à certaines questions qui restent en suspens notamment sur le changement climatique du milieu des années 70 et du possible impact de l'activité anthropique sur l'activité transitoire du Pacifique Nord et par voie de conséquence sur les températures et précipitations en Amérique du Nord-Ouest.

**Partie III : Evolution des caractéristiques
des dépressions et des anticyclones dans le
Pacifique Nord en réponse au
réchauffement climatique global**

Au cours du 20^{ème} siècle, la température moyenne annuelle globale a augmenté d'environ 0.6°C (ex : Jones et al. 1999 ; IPCC 2001). Deux périodes de réchauffement se sont succédé : la première, de 1910 à 1945 et la seconde à partir de 1976, durant lesquelles la température moyenne globale a augmenté de 0.15°C par décennie (IPCC, 2001). Le réchauffement climatique n'est pas uniforme à l'échelle globale. A partir du milieu des années 70, les températures moyennes annuelles ont subi une hausse plus forte dans l'Hémisphère Nord au niveau du Bassin Arctique et sur les continents nord-américain et eurasiatique. Sur les océans de l'Hémisphère boréal, les températures augmentent généralement (depuis 1976) mais moins fortement que sur les continents. Certaines régions océaniques enregistrent même un léger refroidissement comme le Nord-Ouest de l'Atlantique (Mer de Baffin et Détroit de Davis) et le Nord du Pacifique Nord (Mer de Béring, Golfe de l'Alaska). Les différentes tendances régionales, au sein des océans et des continents de l'Hémisphère Nord notamment, pourraient en partie résulter des variations de la circulation atmosphérique et océanique sur les échelles décennales (ex : AO-NAO : *Arctic Oscillation - North Atlantic Oscillation* et PDO : *Pacific Decadal Oscillation*).

Comme nous l'avons évoqué dans le chapitre 5, ce sont particulièrement les températures nocturnes (Tmin) qui augmentent le plus fortement (2 fois plus que les Tmax avec 0.2°C et 0.1°C par décennie pour les Tmin et les Tmax respectivement, depuis 1950 ; IPCC, 2001), ainsi, l'amplitude thermique diurne diminue significativement. Cette plus forte augmentation de Tmin est généralement attribuée à l'augmentation de la couverture nuageuse spécifiquement dans les moyennes et hautes latitudes de l'Hémisphère Nord qui est également associée à une légère augmentation des précipitations (de l'ordre de 0.5% à 1% par décennie). La vapeur d'eau dans l'atmosphère tend également à augmenter (de quelques pour cent par décennie) dans beaucoup de régions de l'Hémisphère Nord.

Le réchauffement des continents de l'Hémisphère Nord est associé à une diminution significative de la couverture neigeuse et des glaces continentales. En ce qui concerne la banquise de l'Arctique, son extension décroît partout fortement au printemps et en été (de 10% à 15 % depuis 1950) et plutôt régionalement en hiver.

Selon la plupart des études menées à l'échelle globale et au cours de la saison hivernale, la fréquence des cyclones extra-tropicaux tend à diminuer au cours de ces 50 dernières années. Cependant, il a été observé qu'ils deviennent plus intenses, ainsi, la fréquence des cyclones profonds s'accroît significativement dans l'Hémisphère Sud (Simmonds et Keay, 2000ab ; Pezza et Ambrizzi, 2003), comme dans l'Hémisphère Nord (Serreze et al., 1997 ; McCabe et al., 2001 ; Gulev et al., 2001 ; Paciorek et al., 2002 ; Wang et al., 2006) depuis le milieu du siècle dernier. En ce qui concerne la fréquence des dépressions, certaines nuances temporelles et régionales doivent être soulignées. Dans l'Hémisphère Nord, selon les travaux mentionnés précédemment, le nombre des dépressions des moyennes latitudes (entre 30°N et 60°N) diminue depuis le milieu du siècle dernier, mais elles sont de plus en plus nombreuses dans les hautes latitudes (au nord de 60°N) depuis la fin des années 70. Leur intensité augmente généralement dans toutes les bandes zonales au nord de 30°N. Cette tendance semble se confirmer dans le Pacifique Nord avec une augmentation de la fréquence des dépressions très creuses depuis les années 1950 (Graham et Diaz, 2001).

D'après les projections des modèles de circulation générale atmosphère-océan (MCGAO) forcés par des scénarios simulant une augmentation des gaz à effet de serre, les tendances observées (réchauffement des températures, augmentation de l'humidité dans l'atmosphère...), pourraient se confirmer voire s'accroître au cours du siècle prochain en raison de l'augmentation des gaz à effet de serre due aux activités anthropiques. Cependant, de nombreuses incertitudes demeurent à propos de l'évolution régionale des climats et de

l'évolution de la circulation atmosphérique-océanique notamment. En ce qui concerne la fréquence et l'intensité des cyclones extra-tropicaux dans un contexte de réchauffement climatique global, les analyses ne sont pas encore suffisamment nombreuses, selon l'IPCC, pour envisager raisonnablement leur évolution respective. Cependant, de plus en plus d'études s'accorderaient sur le fait que l'augmentation des gaz à effet de serre pourrait générer des dépressions moins fréquentes dans les moyennes latitudes (ex : Zhang et Wang, 1997 ; Sinclair et Watterson, 1999 ; Lambert et Fyfe, 2006 ; Watterson, 2006) mais plus intenses au cours de la saison hivernale (ex : Hall et al., 1994 ; Lambert, 1995 ; Carnell et Senior, 1998 ; Lambert et Fyfe, 2006).

Ces modifications dans la circulation atmosphérique des moyennes latitudes auront probablement des impacts sur les températures et les précipitations régionales et spécifiquement au cours de la saison hivernale. Dans cette troisième partie, nous analyserons comment les modes basse fréquence de l'activité dépressionnaire et anticyclonique de surface dans les moyennes latitudes du Pacifique Nord pourraient évoluer dans un contexte de réchauffement climatique global, et quelles conséquences pourraient être envisagées sur le climat hivernal de l'Amérique du Nord-Ouest. Comme nous l'avons souligné précédemment, selon l'IPCC (2001), les travaux menés sur l'activité dépressionnaire, spécifiquement, à partir des projections des modèles, ne sont pas encore suffisamment nombreux pour déterminer raisonnablement son évolution dans un contexte d'augmentation des gaz à effet de serre. Dans cette troisième partie, nous contribuerons aux efforts de recherche sur ce sujet et également sur l'activité anticyclonique.

Pour évaluer les modifications possibles de l'activité transitoire en hiver dans un contexte de réchauffement climatique global, nous avons à disposition deux simulations de la troisième version du modèle couplé du Centre National de Recherches Météorologiques (CNRM-CM3). Une simulation historique permettra dans un premier temps de diagnostiquer la capacité du modèle à reproduire la climatologie hivernale observée de la fréquence et de l'intensité des dépressions et des anticyclones (Chapitre 6) ainsi que leur variabilité inter-annuelle (Chapitre 7) sur la période 1950-99. Enfin, nous analyserons comment les caractéristiques de l'activité transitoire pourraient évoluer dans un scénario de type A2 (IPCC, 2001) au cours du 21^{ème} siècle et quelles pourraient être les conséquences envisageables sur les températures et les précipitations en Amérique du Nord-Ouest, selon le modèle CNRM-CM3 (Chapitre 8).

Dans la partie précédente, à partir des trajectoires, nous avons étudié la variation des caractéristiques des systèmes dépressionnaires et anticycloniques qui ont circulé dans le Pacifique Nord-Est (car c'est dans cet espace géographique que la variation de la circulation atmosphérique influence directement le climat de l'Amérique du Nord-Ouest). Dans cette troisième partie, l'étude statistique sera basée sur les champs moyens hivernaux de la fréquence et de l'intensité des dépressions et des anticyclones, à l'échelle du Pacifique Nord. Cette approche nous permettra d'une part de mieux comprendre comment varie dans l'espace et dans le temps, l'activité transitoire, dans les observations et dans le modèle CNRM-CM3, à l'échelle du Pacifique Nord, et d'autre part d'évaluer précisément comment les caractéristiques de fréquence et d'intensité des dépressions et des anticyclones des moyennes latitudes du Pacifique Nord pourraient évoluer dans un contexte de forte augmentation des gaz à effet de serre.

Chapitre 6 : Climatologie de l'activité transitoire hivernale du Pacifique Nord : Comparaison entre les Réanalyses NCEP-NCAR et la simulation historique du modèle CNRM-CM3

Dans le cadre du projet AMIP (Atmospheric Model Intercomparison Project), qui a pour objectif d'améliorer les simulations des modèles (Gates, 1992 ; Gates et al., 1999), Lambert et al. (2002) ont diagnostiqué la capacité de 13 modèles à reproduire la climatologie hivernale des fréquences des dépressions pour l'Hémisphère Nord (DJF) et l'Hémisphère Sud (JJA). En utilisant un schéma automatique (présenté dans Lambert, 1988), basé sur la reconnaissance des minima locaux de pression au niveau de la mer, ils ont comparé la climatologie moyenne de la fréquence des dépressions simulée par les modèles à celle produite par les Réanalyses ECMWF-ERA et NCEP-NCAR, sur la période de référence 1979-1988. Ce qui ressort de cette étude, pour le Pacifique Nord, c'est que de manière générale les modèles reproduisent correctement la distribution géographique moyenne de l'occurrence et de l'intensité des dépressions. Cependant, il s'avère que dans le secteur du Japon les occurrences sont plus faibles dans les modèles que dans les réanalyses. De plus, dans le Golfe de l'Alaska, le déclin (comblement) observé des dépressions est mal simulé, ainsi trop de systèmes pénètrent sur le Nord du Canada. Enfin, sur le centre du Pacifique Nord, la circulation moyenne des dépressions est clairement décalée vers le nord en comparaison aux observations. Les auteurs soulignent que ces deux dernières déficiences sont reflétées dans les pressions moyennes au niveau de la mer qui sont généralement sous-estimées (trop faibles) sur le Nord-Ouest du Canada et inversement sur-estimées (trop fortes) au nord de Hawaii. Selon les mêmes auteurs, le champ moyen des pressions au niveau de la mer résulte de la contribution respective des dépressions et des anticyclones. Ainsi, les erreurs de simulation des pressions sont généralement accompagnées d'un excès ou d'un déficit d'occurrence de dépressions ou d'anticyclones.

L'objectif de ce chapitre est de vérifier si la simulation historique du modèle CNRM-CM3 reproduit de manière cohérente la climatologie hivernale de surface observée dans le Pacifique Nord tant au niveau des centres d'action statistiques (section 6.1) que de la répartition géographique moyenne de la fréquence et de l'intensité des dépressions et des anticyclones de surface dans le Pacifique Nord (section 6.2).

6.1. Conditions atmosphériques moyennes

A partir des données Reanalysées NCEP-NCAR et de la simulation historique (1950-1999) du CNRM-CM3 (présenté dans la section 6.1.1) nous avons diagnostiqué si cette dernière reproduit correctement les conditions climatiques moyennes observées en surface et

proches de la surface : champs moyens de la pression au niveau de la mer, de la température de l'air à 2 mètres et du vent à 10 mètres (section 6.1.2)

6.1.1. Présentation des données utilisées provenant du modèle CNRM-CM3

Les données utilisées dans ce travail proviennent de la troisième version du Modèle Couplé du Centre National de Recherches Météorologiques (CNRM-CM3, Salas-Mélia et al. 2006). Le modèle CNRM-CM3 est fondé sur le couplage de plusieurs modèles :

- le modèle atmosphérique global ARPEGE-Climat version 3 (Déqué et al. 1999, Gibelin et Déqué 2003) ;
- le modèle d'océan OPA8.1 (Madec et al. 1998) ;
- le modèle de banquise GELATO2 (Salas-Mélia 2002) ;
- le schéma de surface terrestre ISBA (Noilhan et Planton 1989, Mahfouf et al. 1995, Douville et al. 1995a, 1995b) ;
- un schéma de routage fluvial (Oki et Sud 1998, Chaplon et al. 2002).

Le modèle CNRM-CM3 est spectral avec une résolution spatiale T63 (environ $2.8^{\circ} \times 2.8^{\circ}$) et 45 niveaux verticaux. Deux simulations ont été utilisées dans ce travail :

- une simulation historique (XX1) couvrant la période 1860-2100, avec un forçage radiatif déterminé à partir des observations (moyennes annuelles) jusqu'en 2000 puis la simulation se poursuit jusqu'en 2100 avec les concentrations de GES et aérosols de l'année 2000. Cette simulation historique sera utilisée afin de diagnostiquer la capacité du modèle CNRM-CM3 à reproduire la climatologie et la variabilité inter-annuelle observée de l'activité transitoire.

- une simulation conforme au scénario de type A2 (SRES-A2) recommandé par l'International Panel on Climate Change (IPCC, 2001). La simulation démarre à partir de l'année 2000 de XX1 et se poursuit jusqu'en 2100. Ce scénario répond à un développement économique hétérogène à l'échelle globale et prévoit une forte augmentation (quasiment exponentielle) des concentrations en GES depuis l'année 2000 ($\text{CO}_2 \sim 400$ ppm) jusqu'en 2100 ($\text{CO}_2 \sim 840$ ppm). C'est l'un des scénarios les plus pessimistes, induisant une forte augmentation du forçage radiatif (cf. Annexes, Figure A6.1). Si l'on compare la température moyenne projetée à l'échelle globale par les modèles selon les scénarios SRES-A2 et B2 (cf. Annexes, Figure A6.2), on constate que la répartition géographique des anomalies de température ne diffère pas d'un scénario à l'autre. En revanche l'augmentation des températures est clairement plus forte pour le scénario SRES-A2, en particulier sur les continents et dans les hautes latitudes nord. Ainsi, selon le scénario SRES-A2, la réduction du gradient thermique nord-sud et continent-océan apparaît plus marquée que pour le scénario SRES-B2 (ex : Détroit de Béring $+6^{\circ}/8^{\circ}\text{C}$ et Hawaï $+2^{\circ}/3^{\circ}\text{C}$ selon le scénario SRES-A2 contre $+4^{\circ}/5^{\circ}\text{C}$ et $+1^{\circ}/2^{\circ}\text{C}$ respectivement selon le scénario SRES-B2). Par conséquent, en réduisant substantiellement les contrastes thermiques, le scénario SRES-A2 semble approprié à l'étude d'impact de l'augmentation des GES sur l'activité transitoire des moyennes latitudes, car comme nous l'avons stipulé précédemment, la fréquence des dépressions des moyennes latitudes, notamment, dépend fortement des ces contrastes thermiques. De plus,

selon Lambert et Fyfe (2006), qui ont estimé l'évolution des fréquences des dépressions à l'échelle globale, à partir de 13 modèles et selon 3 scénarios (SRES-B1, SRES-A1 et SRES-A2), le scénario SRES-A2 induit de plus fortes modifications en termes de fréquence et d'intensité des dépressions, ce qui permet d'appréhender de manière plus consistante l'impact des GES sur l'activité dépressionnaire.

	Unité	Résolution	Couverture spatiale	Période	Scénario
PNM Jour.	hPa	~ 2.8°*2.8°	87.9°N-1.39°N / 78.75°E-250.31°E	JFM 1950-1999	XX1
PNM Jour.	hPa	~ 2.8°*2.8°	87.9°N-1.39°N / 78.75°E-250.31°E	JFM 2050-2099	SRES-A2
PNM Sais.	hPa	~ 2.8°*2.8°	90°N-90°S / 0°E-357.5°E	JFM 1950-1999	XX1
PNM Sais.	hPa	~ 2.8°*2.8°	90°N-90°S / 0°E-357.5°E	JFM 2050-2099	SRES-A2
Ta2m Sais.	°C	~ 2.8°*2.8°	88.542°N-88.542°S / 0°E-358.125°E	JFM 1950-1999	XX1
Ta2m Sais.	°C	~ 2.8°*2.8°	88.542°N-88.542°S / 0°E-358.125°E	JFM 2050-2099	SRES-A2
u10m Sais.	m/s	~ 2.8°*2.8°	88.542°N-88.542°S / 0°E-358.125°E	JFM 1950-1999	XX1
u10m Sais.	m/s	~ 2.8°*2.8°	88.542°N-88.542°S / 0°E-358.125°E	JFM 2050-2099	SRES-A2
v10m Sais.	m/s	~ 2.8°*2.8°	88.542°N-88.542°S / 0°E-358.125°E	JFM 1950-1999	XX1
v10m Sais.	m/s	~ 2.8°*2.8°	88.542°N-88.542°S / 0°E-358.125°E	JFM 2050-2099	SRES-A2

Tableau 6.1. Données CNRM-CM3 utilisées¹⁹ pour l'analyse en surface (ou proche de la surface) : pression moyenne journalière au niveau de la mer (PNM Jour.), et, pression au niveau de la mer (PNM), température de l'air à 2 mètres (Ta2m), composante zonale et méridienne du vent à 10 mètres (u10m et v10m), moyennes saisonnières en JFM de 1950 à 1999 pour XX1 et de 2050 à 2099.

Pour chaque simulation nous avons à disposition les données moyennes journalières de la pression au niveau de la mer pour l'espace 0°-90°N / 80°E-110°O et les données moyennes mensuelles à l'échelle globale de la pression au niveau de la mer (PNM), de la température de l'air à 2 mètres (Ta2m), de la composante zonale et méridienne du vent à 10 mètres (Tableau 6.1.). Les périodes disponibles en données journalières pour la simulation XX1 et la simulation SRES-A2 sont 1950-1999 et 2050-2099 respectivement, par conséquent notre étude sera restreinte à ces deux périodes.

6.1.2. Comparaison des champs moyens (JFM) issus de la simulation historique du modèle et des Réanalyses

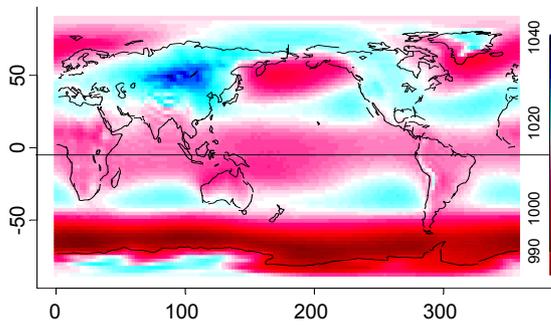
L'analyse préliminaire des PNM à l'échelle globale indique que dans le modèle CNRM-CM3 (XX1) les pressions sont plus fortes que dans les Réanalyses NCEP-NCAR avec une moyenne de 1014.46 hPa et de 1012.4 hPa respectivement (Figure 6.1). La structure moyenne des PNM est généralement bien respectée dans le modèle. Cependant, quelques différences peuvent être notées avec:

- des pressions plus fortes sur l'Antarctique et dans les moyennes latitudes de l'Hémisphère Sud ;

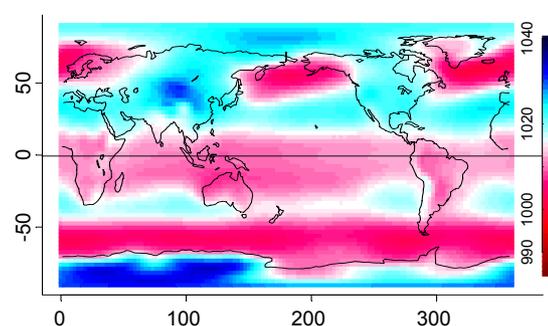
¹⁹ En ce qui concerne les dérives du modèle pour les PNM journalières (paramètre à partir duquel l'analyse des transitoires est effectuée) le modèle est lancé chaque mois et des corrections uniformes (identiques pour chaque point de grille) sont réalisées sur l'ensemble de chacun de ces mois. Ceci évite les discontinuités dans les séries utilisées pour ce travail.

- des pressions plus fortes dans le Bassin Arctique et les moyennes latitudes de l'Hémisphère Nord ainsi que dans les sub-tropiques ;
- des pressions plus fortes dans la zone inter-tropicale ;
- des pressions moins fortes sur la Sibérie et le Groenland ainsi que dans les sub-tropiques de l'Hémisphère Sud.

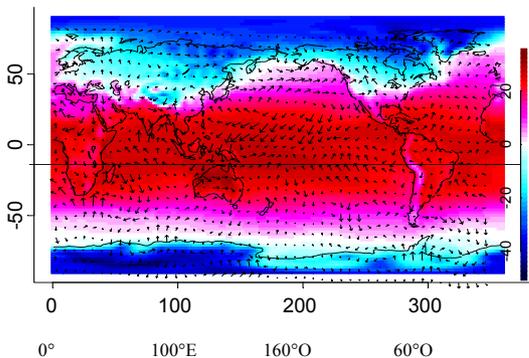
(a) PNM (JFM)
(Moy. = 1012.4 hPa) NCEP-NCAR



(b) PNM (JFM)
(Moy. = 1014.5 hPa) CNRM-CM3 XX1



(c) Ta2m & v10m (JFM)
(Moy. = 16.92°C) NCEP-NCAR



(d) Ta2m & v10m (JFM)
(Moy. = 16.42°C) CNRM-CM3 XX1

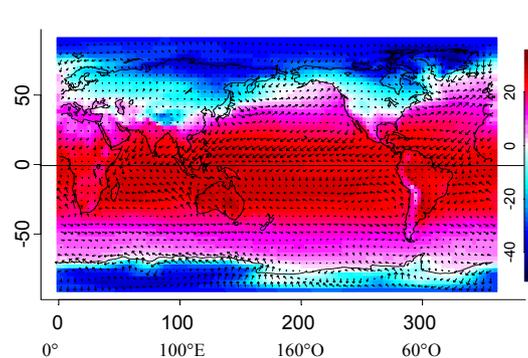


Figure 6.1. Moyenne hivernale (a et b) de la pression au niveau de la mer (PNM en hPa), (c et d) de la température de l'air à 2 mètres (Ta2m, en °C) et du vent à 10 mètres (v10m, en m/s), de 1950 à 1999 d'après les Réanalyses NCEP-NCAR (à gauche) et d'après la simulation XX1 du modèle CNRM-CM3 (à droite).

Toujours à l'échelle globale, la répartition géographique des températures de l'air à 2 mètres, simulée par le modèle, est en général conforme à celle des observations (Figure 6.2) mais la moyenne globale est légèrement inférieure dans le modèle (16.42°C) à celle des Réanalyses (16.92°C). Régionalement et selon Salas Méliá et al. (2006), durant l'hiver boréal (DJFM) un biais froid dans le modèle excède 3°C sur la quasi-totalité de la zone inter-tropicale ainsi que dans certaines régions des hautes latitudes de l'Hémisphère Nord (ex : une partie du Groenland, la Scandinavie, le Nord de l'Eurasie à l'ouest de 120°E). En revanche, sur une large partie de l'Alaska, du Canada, ainsi que sur l'Asie centrale et la Sibérie orientale, les températures de l'air à 2 mètres sont sur-estimées avec un biais chaud pouvant excéder 3°C, qui pourrait être dû, selon les auteurs, à une sous-estimation de la couverture neigeuse sur ces mêmes secteurs.

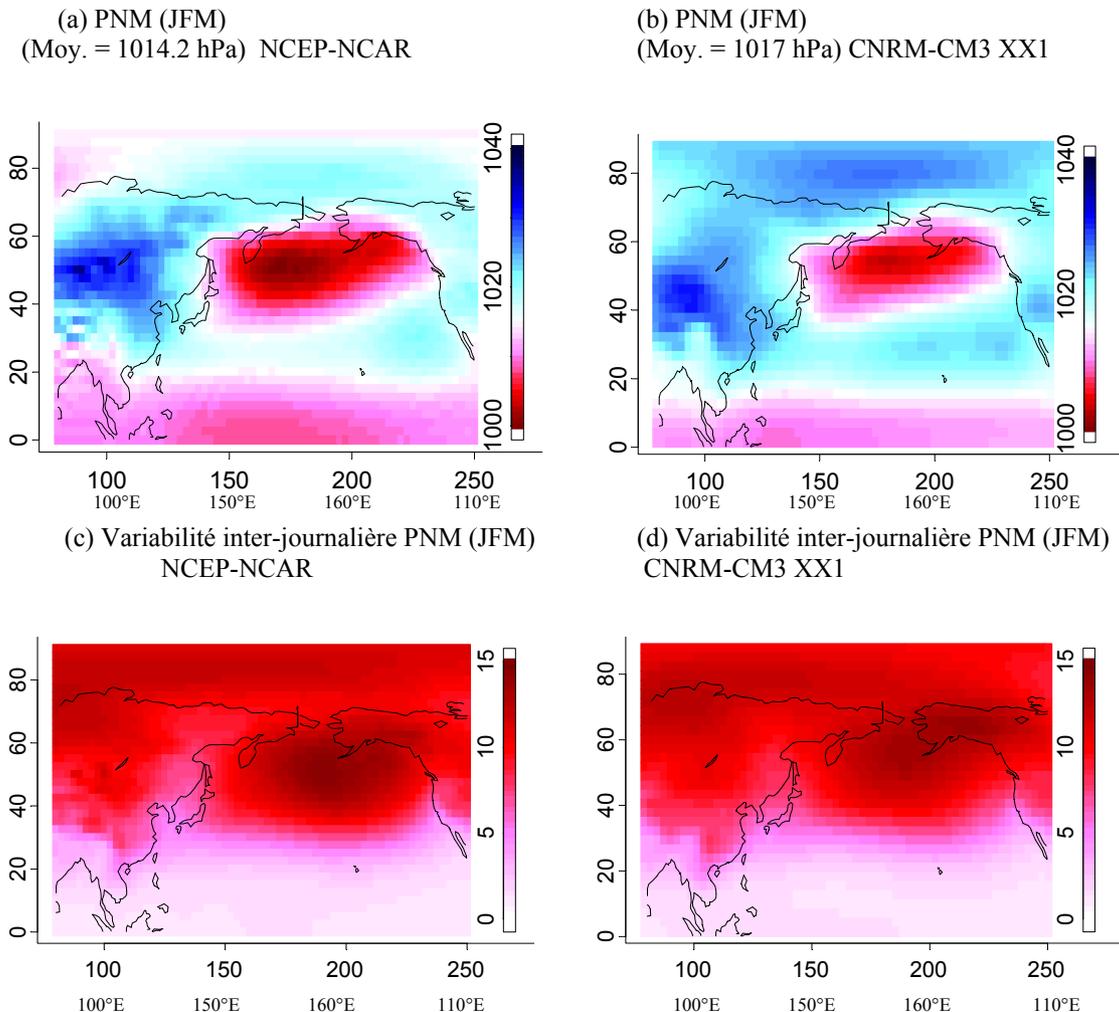


Figure 6.2. Moyenne hivernale (a et b) de la pression au niveau de la mer (PNM en hPa), (c et d) de la variabilité inter-journalière des PNM (en hPa) de 1950 à 1999 pour l'espace 0°N-90°N / 80°E-110°O d'après les Réanalyses NCEP-NCAR (à gauche) et d'après la simulation XX1 du modèle CNRM-CM3 (à droite).

Dans notre domaine d'étude (0°-90°N / 80°E-110°O), le secteur de l'Asie Orientale / Pacifique Nord, l'écart de pression apparaît légèrement plus fort qu'à l'échelle globale avec 1017 hPa dans le modèle contre 1014.2 hPa dans les Réanalyses (Figure 6.2). Ainsi, dans le Pacifique Nord, la dépression des Aléoutiennes semble rétractée au profit, au nord, de pressions plus fortes sur l'Arctique, et au sud, des hautes pressions sub-tropicales également plus fortes depuis les mers du Japon et de Chine jusqu'au large des Etats-Unis et de la Basse Californie (Mexique).

Sur le continent asiatique, l'anticyclone semi-permanent de Sibérie apparaît, d'une part, légèrement sous-estimé dans le modèle, en termes d'intensité, avec une pression centrale moyenne de 1031.2 hPa contre 1036.3 hPa dans les Réanalyses. D'autre part, il est centré légèrement plus au sud concernant ainsi moins fortement la région du Lac Baïkal et inversement, plus fortement le Sud de la Chine. Dans les Réanalyses, nous pouvons observer que schématiquement, les centres d'action, que sont l'anticyclone de Sibérie et la dépression des Aléoutiennes, sont centrés approximativement vers 50°N alors que dans le modèle, l'anticyclone de Sibérie est centré vers 45°N et la dépression des Aléoutiennes vers 55°N.

La structure moyenne de la variabilité inter-journalière de la pression est bien respectée dans le modèle CNRM-CM3. Par conséquent, la remarque précédente sur l'extension spatiale de la dépression des Aléoutiennes dans le modèle reflète peut-être un biais

systematique (pressions sur-estimées) sans implication sur la dynamique, car, la configuration moyenne des centres d'action atmosphériques du Pacifique Nord (dépression des Aléoutiennes et anticyclone sub-tropical) est relativement identique dans les Réanalyses NCEP-NCAR et dans la simulation XX1 du modèle CNRM-CM3 si nous considérons à la fois les structures de la moyenne et de la variabilité inter-journalière des PNM.

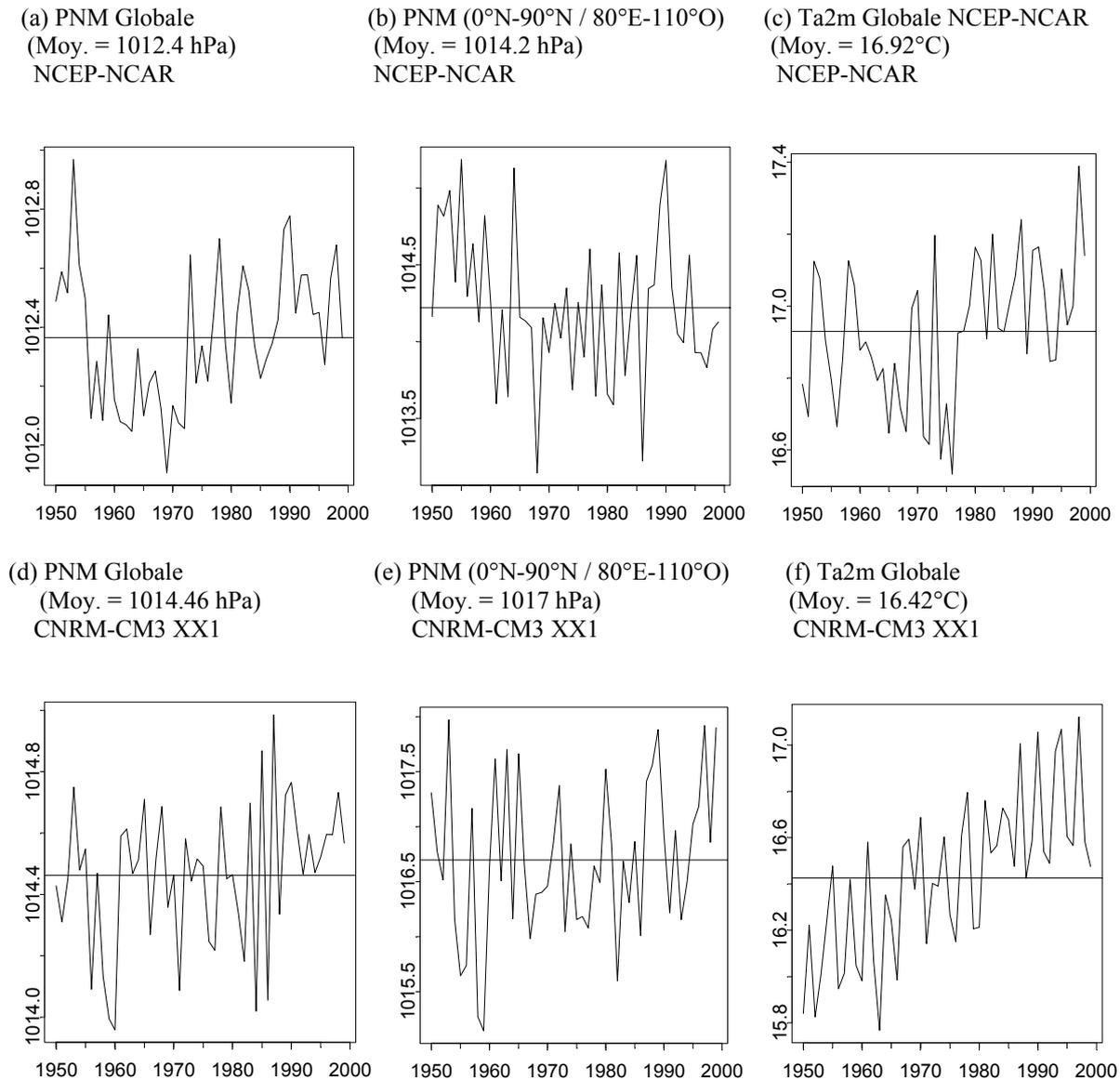


Figure 6.3. Evolution de la pression au niveau de la mer Globale (a) et dans l'espace 0°-9°0N / 80°E-110°O (b), évolution de la température de l'aire à 2 mètres globale (c) d'après les Réanalyses NCEP-NCAR en JFM de 1950 à 1999. Idem d'après le modèle CNRM-CM3 (d, e, f).

L'observation des séries temporelles de la figure 6.3. montre qu'au cours de la période 1950-99, à l'échelle globale et dans le domaine géographique (0°N-90°N / 80°E-110°O), la pression moyenne varie d'un hiver à l'autre dans les Réanalyses et dans le modèle. Nous pouvons tout de même noter, dans les Réanalyses, une certaine variabilité décennale avec la succession de trois périodes :

- durant le début des années 50, les pressions sont généralement plus fortes que la moyenne

- de 1956 jusqu'au milieu des années 70, les pressions sont généralement plus faibles
- de 1973 à 1999, les pressions sont généralement plus fortes

En ce qui concerne la température globale de l'air à 2 mètres, dans les Réanalyses, une nette rupture apparaît entre 1976 et 1977 séparant une première période plus froide, d'une seconde période plus chaude en moyenne. Dans la simulation historique du modèle CNRM-CM3, les températures globales de l'air à 2 mètres augmentent graduellement au cours de la période en accord avec l'augmentation des gaz à effet de serre (forçage radiatif conforme aux observations) mais ne présentent pas de rupture (à la différence des Réanalyses). Aucune tendance claire n'est observable dans les PNM globales.

Pour synthétiser, dans la simulation historique du modèle CNRM-CM3, les PNM apparaissent légèrement plus fortes que dans les Réanalyses au niveau du secteur Pacifique Nord. Ceci semble induire une rétraction apparente de la dépression des Aléoutiennes, spécifiquement dans sa partie Sud, au bénéfice des hautes pressions sub-tropicales. Ainsi, les hautes pressions sub-tropicales sont plus fortes dans le modèle, depuis les côtes asiatiques jusqu'aux côtes nord-américaines et semblent alors influencer plus fortement la zone 20°N-40°N. La dépression des Aléoutiennes est légèrement sous-estimée (1003 hPa contre 1000 hPa) et légèrement décalée vers le nord (55°N contre 50°N environ). De plus, l'anticyclone de Sibérie apparaît moins fort dans le modèle (1031.2 hPa contre 1036.3 hPa) et également être légèrement décalé mais vers le sud (45°N contre 50°N environ). Malgré la légère sur-estimation des PNM dans le modèle et le léger décalage des centres d'action, la structure moyenne et la variation inter-journalière sont généralement correctement reproduites par la simulation XX1 du modèle CNRM-CM3.

6.2. Climatologie hivernale de l'activité dépressionnaire et anticyclonique

Pour quantifier l'activité dépressionnaire et anticyclonique de surface tout d'abord, à partir de données moyennes journalières des pressions au niveau de la mer, issues des Réanalyses et issues des simulations du modèle (section 6.1.1), nous avons construit les trajectoires des dépressions et des anticyclones (comme présenté dans le chapitre 1), en enregistrant leur position spatiale (longitude et latitude) et leur pression centrale journalières, que nous avons ensuite cartographiées afin d'obtenir des champs de la fréquence (occurrence par point de grille) et de la pression centrale des dépressions et des anticyclones en JFM et pour 50 années dans le Pacifique Nord (section 6.2.1). Nous avons ensuite vérifié la capacité de la simulation historique du modèle CNRM-CM3 à reproduire la climatologie de l'activité dépressionnaire (section 6.2.2) et anticyclonique (section 6.2.3) issue des Réanalyses NCEP-NCAR²⁰.

²⁰ Nous avons choisi de faire une analyse comparative entre les Réanalyses et le modèle à partir de champs de la fréquence et de l'intensité des transitoires et non pas directement à partir des trajectoires des transitoires qui ne serait pas suffisamment précise.

6.2.1. Construction des champs moyens de l'occurrence et de l'intensité des dépressions et des anticyclones

Les trajectoires des transitoires sont établies en utilisant l'algorithme présenté dans le Chapitre 1, à partir des données NCEP-NCAR et de la simulation XX1 CNRM-CM3 (ainsi qu'à partir de la simulation SRES-A2 CNRM-CM3, les résultats seront présentés dans le Chapitre 8). Comme dans le Chapitre 1, nous établissons les trajectoires des transitoires en fonction des mêmes critères de pression et de déplacement dans l'espace²¹. Pour cette étude, nous retiendrons tous les systèmes ayant circulé dans les moyennes latitudes (entre 30°N et 60°N) et ayant atteint le Pacifique Nord. Afin d'avoir un nombre d'observations suffisamment important par point de grille (cf. paragraphe suivant), nous choisissons de conserver les trajectoires ayant des durées de vie supérieures ou égales à 2 jours.

A partir des fichiers répertoriant les trajectoires des transitoires dérivées des Réanalyses NCEP-NCAR et de la simulation XX1 (et SRES-A2, cf. chapitre 8) du modèle CNRM-CM3, nous cartographions l'occurrence ainsi que la pression centrale des dépressions et des anticyclones. La cartographie de l'occurrence et des passages des transitoires est une procédure délicate comme l'ont exposé Taylor (1986), Zolina et Gulev (2002, cf. Annexes, Figure A1.1). Le choix de la résolution temporelle lors de la construction des trajectoires ainsi que la résolution spatiale de la grille sur laquelle vont être cartographiées les informations, contribuent à introduire des biais. L'origine du problème provient de l'enregistrement du déplacement des systèmes dépressionnaires ou anticycloniques sur une grille. Un déplacement rapide d'un minimum ou un maximum local de pression, ne sera pas enregistré de la même façon qu'un déplacement lent, avec une sous et une sur-représentation des passages par mailles respectivement.

Il convient de palier ce problème en utilisant différentes méthodes selon l'objectif de l'étude. Par exemple, pour les analyses statistiques consacrées à la densité de passages des systèmes transitoires, il est nécessaire d'obtenir une bonne continuité dans l'espace de leur déplacement en évitant les « sauts de maille » et également en évitant de compter plusieurs fois le passage d'un même système dans une maille si celui-ci ne s'est pas déplacé d'un temps à l'autre.

Pour palier ces sous ou sur-représentations par maille, lors de la cartographie, il est nécessaire d'utiliser une grille de résolution spatiale adaptée à la résolution temporelle lors de l'établissement des trajectoires comme l'ont démontré précisément Zolina et Gulev (2002). En ce qui concerne ce travail, notre analyse a pour objectif l'étude statistique de l'**activité** dépressionnaire et anticyclonique extra-tropicale, par conséquent, la notion de **durée** est aussi importante que l'**occurrence** d'un événement (ainsi que l'**intensité** qui est représentée par la pression centrale des systèmes transitoires) par conséquent, comme dans Lambert et al. (2002) nous assumons la sur-représentation dans l'espace des systèmes transitoires se déplaçant lentement ou étant bloqués et la sous-représentation des systèmes ayant un déplacement rapide. De plus, afin d'obtenir des champs de fréquence des dépressions et des anticyclones homogènes dans l'espace, avec un nombre d'individus suffisamment important par maille

²¹ Malgré la sur-estimation des PNM dans la simulation XX1 du modèle CNRM-CM3, nous avons choisi d'utiliser les mêmes critères de pression pour faciliter la comparaison entre les Réanalyses et les deux simulations du modèle CNRM-CM3. Lambert et al. (2002) et Lambert et Fyfe (2006) ont également utilisé les mêmes seuils de pression pour leur analyse statistique d'inter-comparaison entre 13 modèles pour la première étude, et 13 modèles et 3 scénarios pour la seconde étude.

pour pouvoir réaliser une étude statistique, il est important d'adapter la résolution spatiale de la grille à la résolution temporelle des données utilisées pour l'établissement des trajectoires.

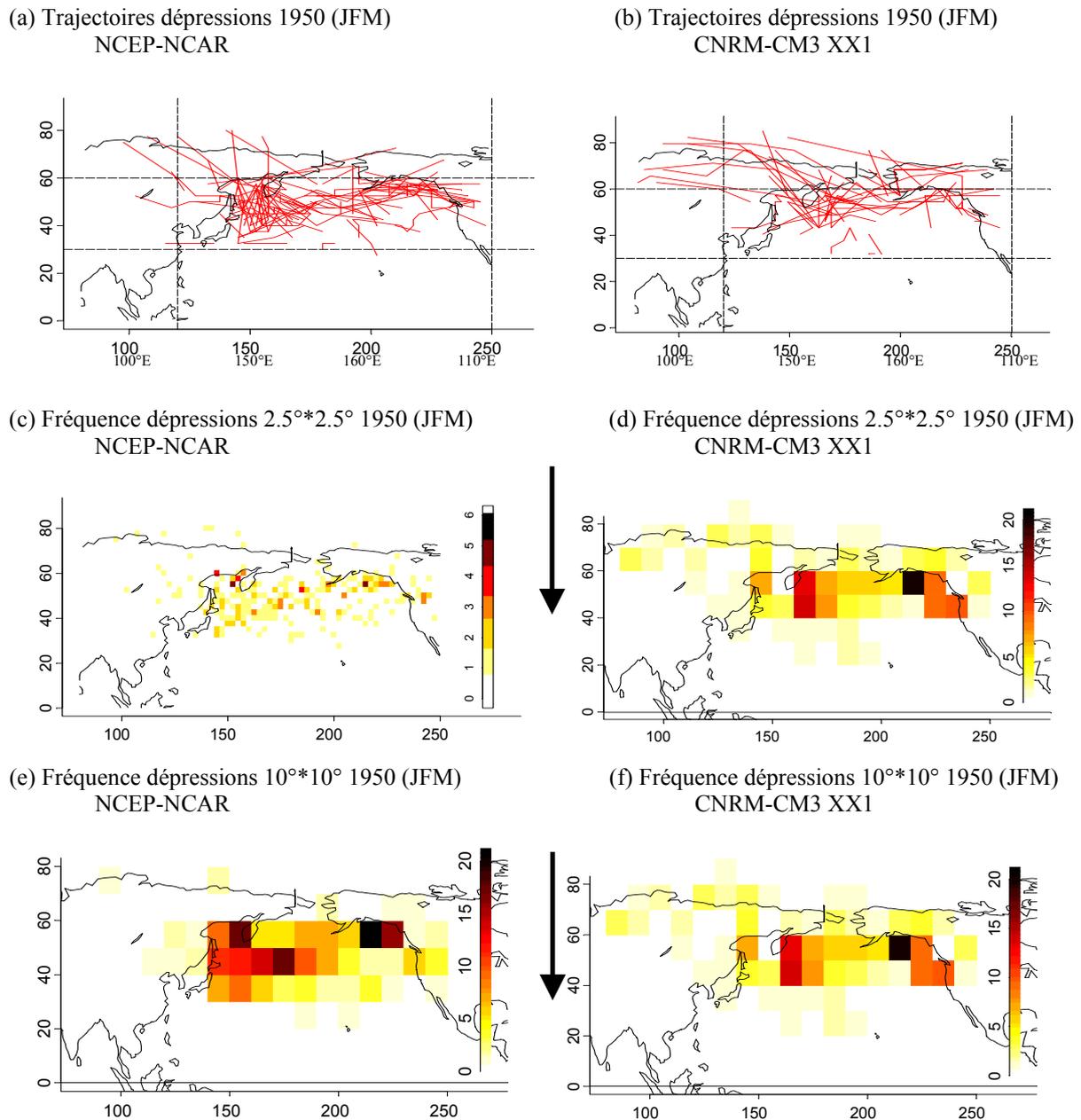


Figure 6.4. Trajectoires des dépressions inférieures à 1005 hPa et d'une durée de vie supérieure ou égale à 2 j (a et b), cartographie de la fréquence des dépressions sur une grille de $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ (c et d) et sur une grille de $10^{\circ} \times 10^{\circ}$ (e et f) en JFM 1950 d'après les Réanalyses NCEP-NCAR (à gauche) et d'après la simulation XX1 du modèle CNRM-CM3 (à droite). Nous devons préciser que la simulation XX1 du modèle n'est pas supposée reproduire les conditions climatiques réelles année par année, donc les trajectoires pour l'hiver 1950, comme pour les autres hivers, ne doivent pas être comparées strictement. Dans cet exemple, nous pouvons dire que les trajectoires et la répartition géographique de l'occurrence des dépressions sont cohérentes dans le modèle CNRM-CM3.

Le choix des données moyennes journalières des pressions au niveau de la mer induit la nécessité d'une résolution spatiale de la grille adaptée c'est à dire relativement large dans ce cas précis. Ainsi, sur une grille de $10^{\circ} \times 10^{\circ}$, nous avons cumulé les fréquences (points d'impact journaliers) des dépressions et des anticyclones d'une part et d'autre part nous avons moyenné leur pression centrale pour chaque hiver (JFM) de 1950 à 1999 pour les

Réanalyses NCEP-NCAR et pour la simulation XX1 du modèle CNRM-CM3 (et de 2050 à 2099 pour la simulation SRES-A2, cf. Chapitre 8)²². La résolution de la grille étant relativement large (Figures 6.4 et 6.5), il n'est donc pas nécessaire d'avoir recours à une interpolation spatiale des observations afin d'obtenir des structures homogènes.

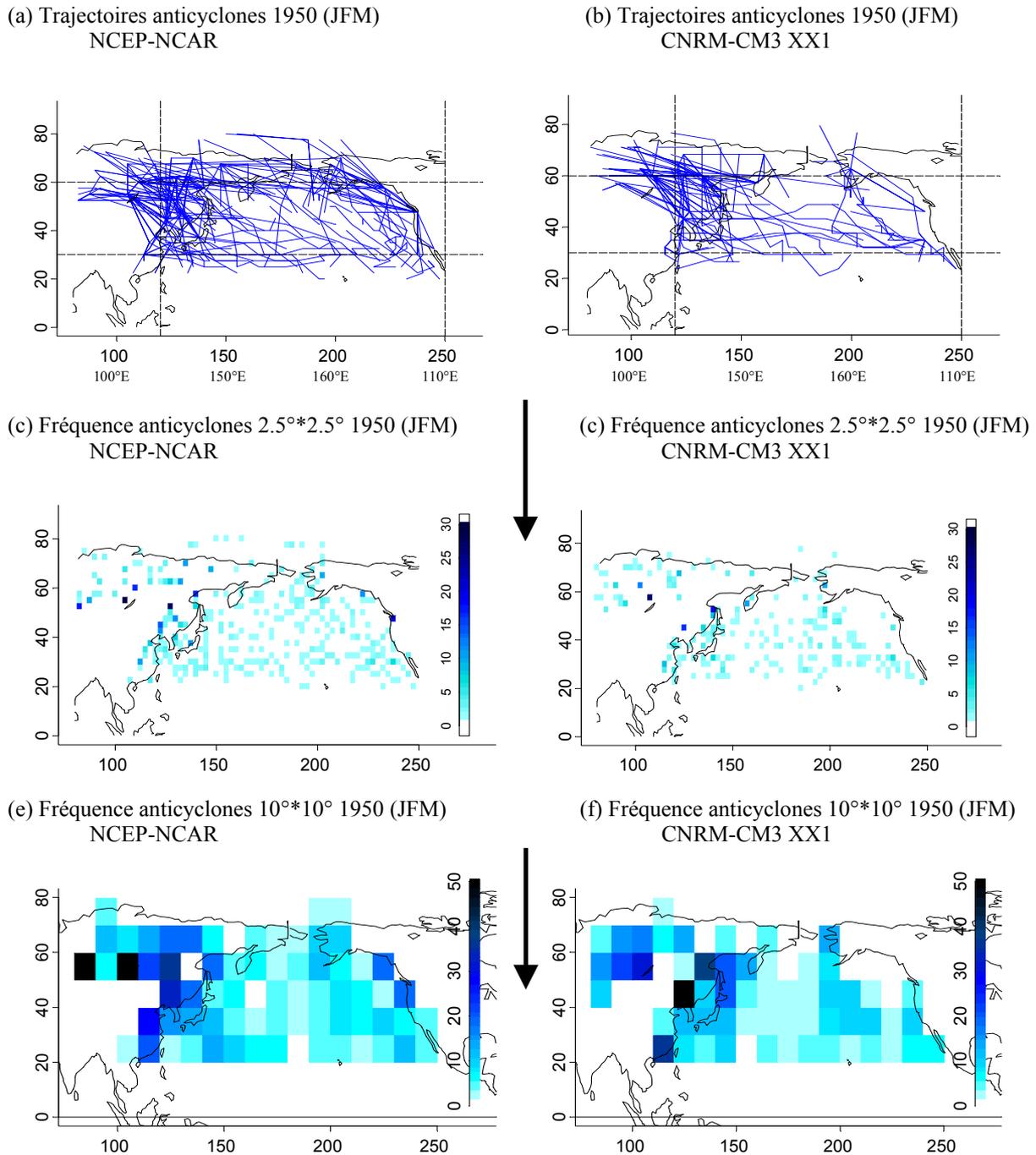


Figure 6.5. Comme figure 6.4 mais pour les anticyclones supérieurs à 1015 hPa

²² Cette grille relativement large permet également de palier la différence de résolution entre les données NCEP-NCAR et CNRM-CM3.

A partir de l'ensemble des trajectoires des transitoires des moyennes latitudes du Pacifique Nord d'une durée de vie supérieure ou égale à 2 jours, nous avons cartographié leurs caractéristiques et dérivé les champs moyens hivernaux (JFM):

- des fréquences des dépressions (< 1005 hPa) et des anticyclones (> 1015 hPa),
- de la formation des dépressions (< 1005 hPa) et des anticyclones (> 1015 hPa),
- du déclin des dépressions (< 1005 hPa) et des anticyclones (> 1015 hPa),
- des pressions centrales (< 1005 hPa) des dépressions et des anticyclones (> 1015 hPa),

pour l'ensemble de la période 1950-1999, d'après les Réanalyses NCEP-NCAR et d'après la simulation historique du modèle CNRM-CM3 (ainsi que d'après la simulation SRES-A2, cf. Chapitre 8).

Ayant construit les champs moyens hivernaux des caractéristiques des dépressions et des anticyclones, nous pouvons maintenant étudier la climatologie des transitoires des moyennes latitudes du Pacifique Nord dans la simulation historique du modèle CNRM-CM3 et dans les Réanalyses NCEP-NCAR.

6.2.2. Caractéristiques moyennes de l'activité dépressionnaire

Les Figures 6.4.a et b représentent un échantillon des trajectoires des dépressions en hiver (JFM 1950) dérivé des Réanalyses et de la simulation XX1 du modèle CNRM-CM3 respectivement. Nous pouvons voir que les trajectoires occupent une large bande qui s'étire depuis l'Est du Japon et de la Mer d'Okhotsk jusque dans le Golfe de l'Alaska, passant par le Kamchatka et les Aléoutiennes. Le domaine latitudinal de circulation est distinctement plus large sur l'Ouest du Pacifique Nord, avec des dépressions qui circulent à des latitudes plus méridionales que sur le Pacifique Nord-Est, où les trajectoires tendent à être davantage confinées dans le Golfe de l'Alaska (ex: Pettersen, 1956 ; Klein, 1957 ; Hanson et Long, 1985 ; Gyakum et al., 1989 ; Zhang et Wang, 1997 ; Gulev et al., 2001). Entre 40 et 50% des dépressions du Pacifique Nord se forment sur le secteur occidental depuis le Japon jusque sur l'Ouest de la Mer de Béring en passant par la Mer d'Okhotsk et le Kamchatka et l'Ouest des Aléoutiennes (Figure 6.6). Les études antérieures mettent en évidence l'influence du Kuroshio sur l'activité cyclonique à l'est du Japon, comme étant une région favorable à la formation des dépressions et/ou à leur développement explosif (ex: Sanders et Gyakum, 1980 ; Roebber, 1984 ; Rogers et Bosard, 1986 ; Sanders, 1986 ; Gyakum et al., 1989 ; Roebber, 1989 ; Gulev et al., 2001). Ces dépressions très creuses ont une durée d'existence en moyenne plus longue que les autres, et se déplacent vers le nord-est en direction des Aléoutiennes et du Golfe de l'Alaska et fusionnent dans la dépression des Aléoutiennes (Wallace et al., 1988). Le Golfe de l'Alaska est également une zone favorable à la formation de cyclones extra-tropicaux (avec environ 10% de formation) pouvant parfois être très creux (ex: Reed et Albright, 1986). Cependant, la particularité de cette région est qu'elle est également favorable à leur comblement (Gulev et al., 2001) avec 20 à 25% des dépressions du Pacifique Nord qui se comblent dans le Golfe de l'Alaska. Au large des Etats-Unis, l'occurrence de centres dépressionnaires est relativement faible à cause de l'influence de l'anticyclone sub-tropical qui limite la génération et la propagation des centres dépressionnaires aux latitudes inférieures à 40°N.

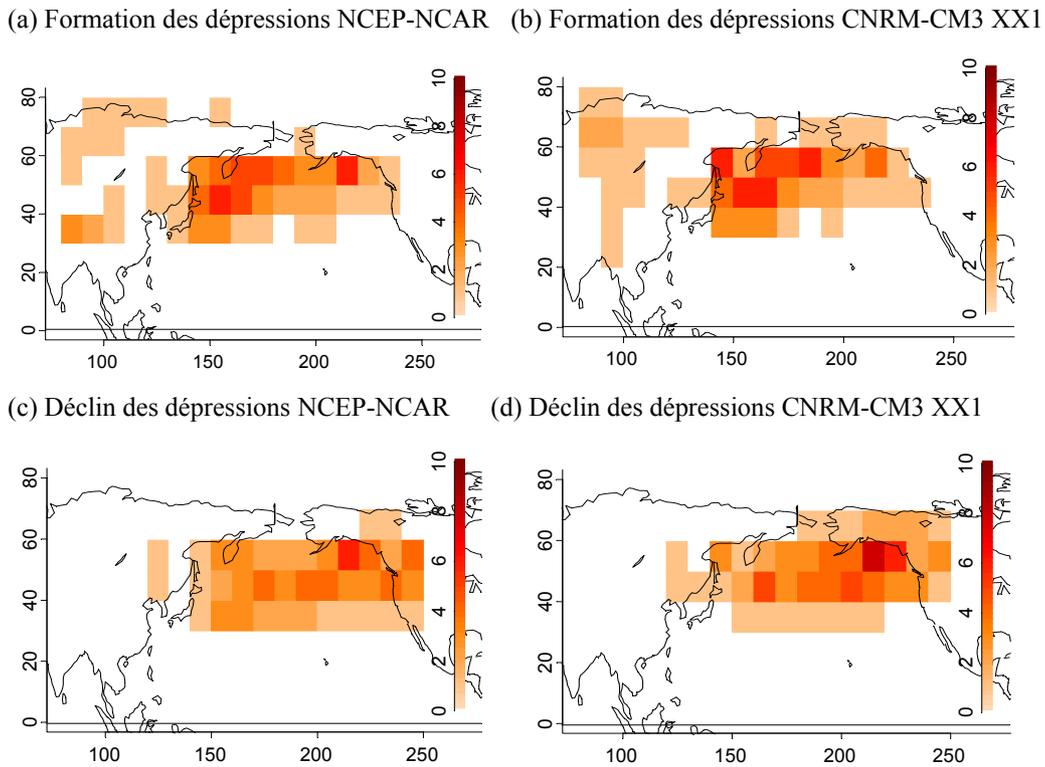
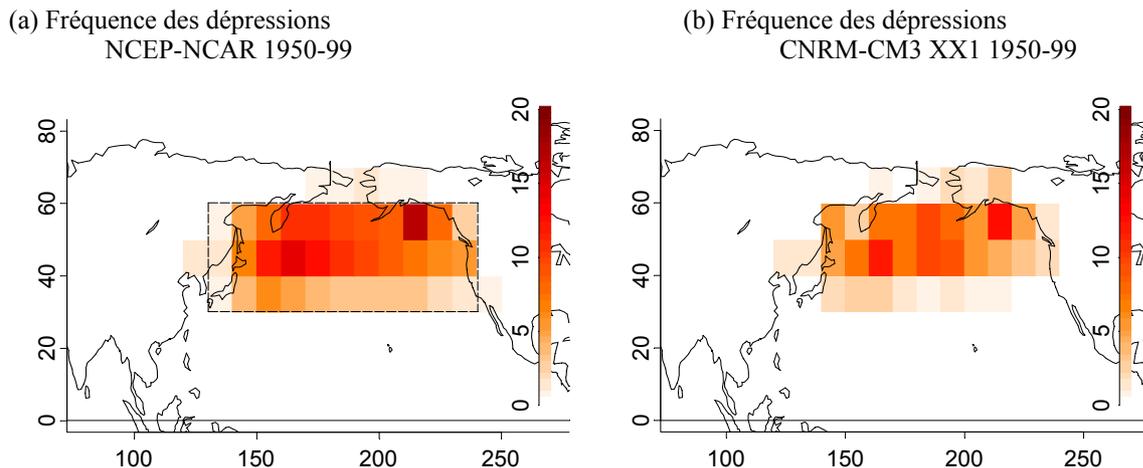
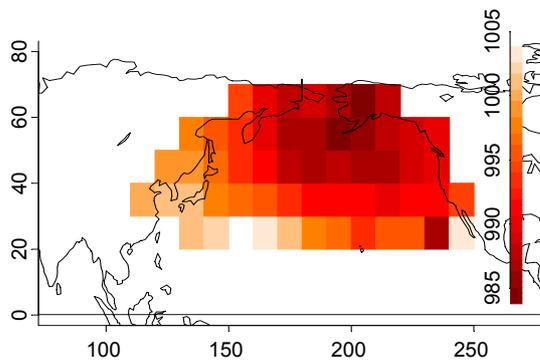


Figure 6.6. Moyenne des fréquences de formation (a et b) et de déclin (c et d) des dépressions ayant circulé dans le Pacifique Nord en JFM (1950-99), d'après les Réanalyses NCEP-NCAR (à gauche) et d'après la simulation XX1 du modèle CNRM-CM3 (à droite).

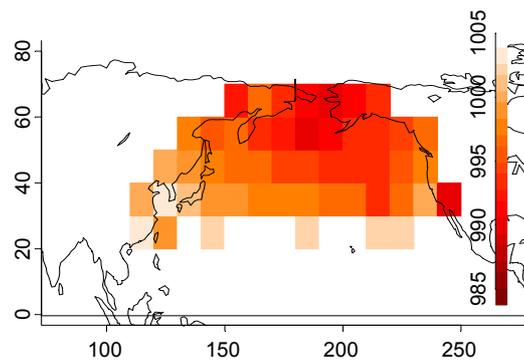
Par conséquent, la zone de fréquentation moyenne des cyclones extra-tropicaux en hiver (Figure 6.7), s'étire principalement dans la zone 30°N-60°N du Pacifique avec des dépressions très fréquentes surtout entre 40°N et 60°N, où elles sont présentes tous les hivers au cours de la période 1950-1999 (cf. Annexes A6.3). Deux secteurs de très forte activité apparaissent : le Sud-Est du Kamchatka et le Golfe de l'Alaska dans les NCEP-NCAR et la simulation XX1. La structure moyenne de la fréquence des dépressions, tant dans les Réanalyses NCEP-NCAR que dans la simulation XX1 du modèle CNRM-CM3, est en accord avec les études antérieures (ex: Pettersen, 1956 ; Anderson et Gyakum, 1989 ; Geng et Sugi, 2003).



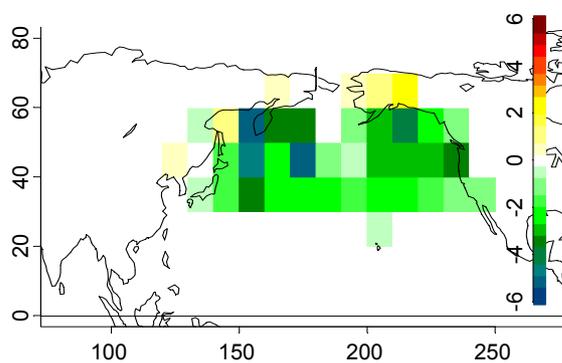
(c) Pression centrale des dépressions
NCEP-NCAR 1950-99



(d) Pression centrale des dépressions
CNRM-CM3 XX1 1950-99



(e) Fréquence des dépressions
[CNRM-CM3 XX1] - [NCEP-NCAR]



(f) Pression centrale des dépressions
[CNRM-CM3 XX1] - [NCEP-NCAR]

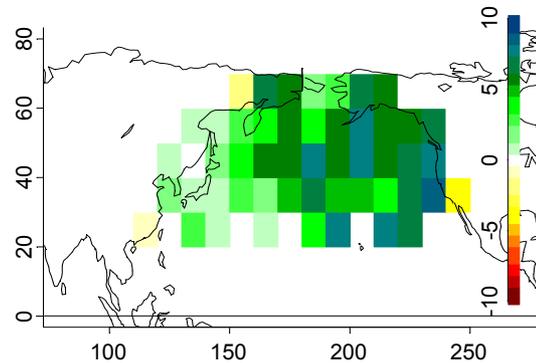


Figure 6.7. Fréquence (a, b) et pression centrale (c, d) des dépressions d'après les Réanalyses NCEP-NCAR (à gauche) et la simulation XX1 du modèle CNRM-CM3 (à droite). Différence entre b et a (e, fréquence) et différence entre d et c (f, pression centrale). Les informations sur les continents ne sont pas représentées (masque). Sur les cartes a et b les valeurs comprises entre 0 et 1 ne sont pas perceptibles car sont représentées en blanc. En réalité, au sud de 30°N, leur moyenne hivernale est simplement inférieure à 1 par maille et supérieure à 0 pour toutes les mailles de couleurs représentées sur les figures c et d.

Dans les latitudes moyennes du Pacifique Nord, la pression centrale des cyclones extra-tropicaux est en moyenne de 993 hPa (min = 985 hPa) et 997 (min = 990 hPa) dans les Réanalyses et dans la simulation XX1 respectivement. C'est dans le secteur Aléoutiennes / Mer de Béring / Alaska que les pressions sont les plus creuses et c'est plus spécifiquement sur la Péninsule de l'Alaska que les dépressions présentent des pressions centrales plus faibles avec 985 hPa dans les Réanalyses NCEP-NCAR et 990 hPa dans le modèle CNRM-CM3 (XX1). Nous pouvons noter qu'entre 20°N et 30°N, la densité des dépressions est très faible (inférieure à une par maille et par hiver), représentant 1.64 occurrences par hiver pour l'ensemble de la zone 20°N-30°N / 110°E-110°O. Néanmoins, dans les Réanalyses, ces cyclones extra-tropicaux peuvent présenter des pressions centrales relativement faibles spécifiquement entre Hawaii et la Basse Californie (entre 998 hPa et 986 hPa en moyenne), alors que dans le modèle CNRM-CM3, elles sont moins fréquentes et moins creuses (supérieures à 1000 hPa en moyenne). Ces observations rejoignent celles de Lambert et al. (2002) qui ont observé la difficulté des modèles à reproduire correctement l'activité dépressionnaire dans la région de Hawaii avec une nette sous-estimation de la fréquence des dépressions sur ce secteur.

Dans la simulation XX1 du modèle CNRM-CM3, les trajectoires et les structures spatiales des moyennes des fréquences et des pressions centrales des dépressions sont bien reproduites mais l'activité dépressionnaire est généralement sous-évaluée. Sur la quasi-totalité du Pacifique Nord, les fréquences sont moins fortes dans le modèle CNRM-CM3 que dans les Réanalyses NCEP-NCAR (Figure 6.7) et surtout sur l'Ouest, entre le Japon et le Kamchatka, ainsi que dans le Golfe de l'Alaska et dans une moindre mesure dans les latitudes comprises entre 30°N et 40°N depuis le Japon jusqu'en Californie.

Pour comparaison, le nombre moyen par hiver des dépressions ayant circulé sur le Pacifique Nord (trajectoires) est de 66 dans les NCEP-NCAR et seulement de 40 dans le modèle (Tableau 6.2). Cependant, nous devons souligner que dans le modèle, les dépressions sont plus persistantes avec une durée de vie de 4.4 jours en moyenne contre 3.8 jours dans les Réanalyses. Malgré une durée de vie plus longue la densité moyenne de l'occurrence (impacts journaliers) des dépressions est sous-évaluée dans le modèle. Par exemple, dans les moyennes latitudes du Pacifique Nord (30°N-60°N / 130°E-120°O, zone A, Figure 6.7.a) la fréquence des dépressions (impacts journaliers) est en moyenne de 222 ($\sigma = 21$) dans les Réanalyses contre 148 ($\sigma = 18$) dans le modèle.

	NCEP-NCAR	CNRM-CM3 XX1
Freq. traj, ayant atteint la zone A	66 ($\sigma=7.5$)	40 ($\sigma=5.2$)
Durée des traj, ayant atteint la zone A (j)	3.8 ($\sigma=0.2$)	4.4 ($\sigma=0.4$)
Nb formations dans la zone A	56 ($\sigma=7$)	33 ($\sigma=5$)
Nb déclins dans la zone A	58 ($\sigma=7$)	34 ($\sigma=6$)
Fréquence dans la zone A	222 ($\sigma=21$)	148 ($\sigma=18$)
Pression moyenne dans la zone A (hPa)	991 ($\sigma=2$)	995.5 ($\sigma=1.7$)

Tableau 6.2. Caractéristiques moyennes de l'activité dépressionnaire dans les moyennes latitudes du Pacifique Nord (30°N-60°N / 130°E-120°O). Limite de la zone A sur la Figure 6.7.a.

Dans le modèle CNRM-CM3, les pressions centrales des dépressions sont plus fortes spécifiquement sur le centre et l'Est ainsi que dans les basses latitudes de notre secteur. Dans la zone 30°N-60°N / 130°E-120°W (zone A), l'intensité des dépressions est sur-estimée dans le modèle avec 995.5 hPa ($\sigma = 1.7$) en moyenne contre 991 hPa ($\sigma = 2$) dans les Réanalyses.

Les plus fortes PNM moyennes journalières dans la simulation historique du modèle CNRM-CM3 en comparaison aux Réanalyses NCEP-NCAR, pourraient expliquer que les dépressions apparaissent moins fréquentes et moins creuses dans le modèle. De plus, le choix du seuil fixe de 1005 hPa pour l'identification des dépressions est peut-être la cause de la différence du nombre de trajectoires ainsi que de l'occurrence par maille (nous en discuterons dans la conclusion de ce chapitre).

6.2.3. Caractéristiques moyennes de l'activité anticyclonique

Les trajectoires des anticyclones (Figure 6.5.a.b.) sont hautement concentrées sur l'Ouest de notre secteur. Durant la saison hivernale, la présence de l'anticyclone de Sibérie est favorable aux fréquentes décharges d'air froid sur les régions des Mers d'Okhotsk, du Japon et de Chine (ex: Jhun et Lee 2004, Panagiotopoulos et al. 2005). Ces advections d'air froid

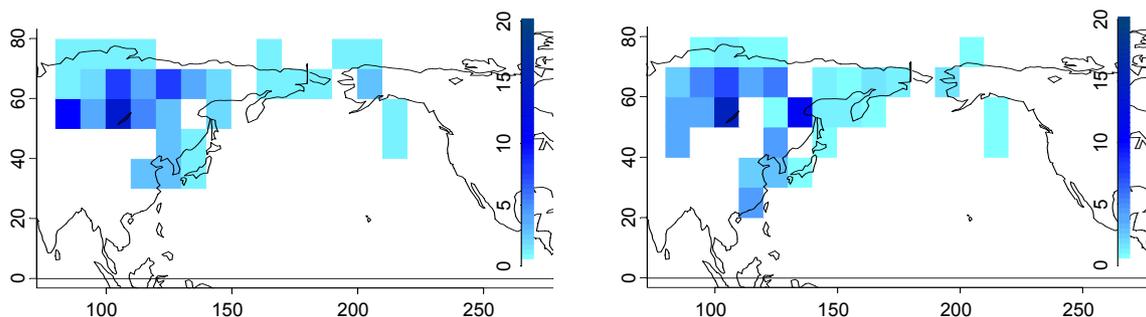
forment des crêtes de pression, qui peuvent se développer (ou non) en anticyclones fermés sur l'océan et se propager en direction du sud, vers les latitudes sub-tropicales. Ces événements synoptiques sont associés à la mousson hivernale (vents froids et secs en provenance du Nord), sur l'Asie du Sud-Est et le Pacifique Nord-Ouest comme nous l'avons déjà évoqué dans les chapitres précédents. Environ 75% des anticyclones ayant atteint le Pacifique Nord se forment sur le continent asiatique (Figure 6.8) et la plupart d'entre eux disparaissent le long de la façade occidentale du Pacifique Nord car environ 65% des anticyclones ayant atteint le Pacifique Nord disparaissent aux abords ou au contact de l'Océan. Sous l'influence du déplacement des dépressions, environ 10% des anticyclones asiatiques peuvent se propager zonalement dans les latitudes inférieures à 40°N et atteindre le Pacifique Nord-Est. Une autre catégorie d'anticyclones transitoires circulant sur l'extrême Est de la Sibérie, la Mer de Béring et l'Alaska (environ 10%), atteignent directement le Pacifique Nord-Est. D'autres anticyclones peuvent se former sur le reste du Pacifique Nord mais, le pourcentage moyen est inférieur à 1 par maille et par hiver, par conséquent, ils ne sont pas représentés sur les cartes (Figure 6.8).

Selon cette description générale, la fréquence des anticyclones du Pacifique Nord (Figure 6.9) est plus forte le long du continent asiatique et dans une moindre mesure le long de la côte ouest de l'Amérique du Nord ainsi que dans la zone sub-tropicale, entre 20°N et 40°N. Les centres d'anticyclones sont présents chaque hiver sur l'Ouest et le Sud-Ouest du Pacifique Nord (cf. Annexes, Figures A6.3). La latitude 20°N représente la limite (absolue) de leur propagation en direction du sud. En effet, la latitude minimale absolue enregistrée au cours de la période 1950-99 est 20°N. Nous pouvons ajouter que les anticyclones transitoires sont distinctement moins nombreux dans l'aire d'influence de la dépression des Aléoutiennes.

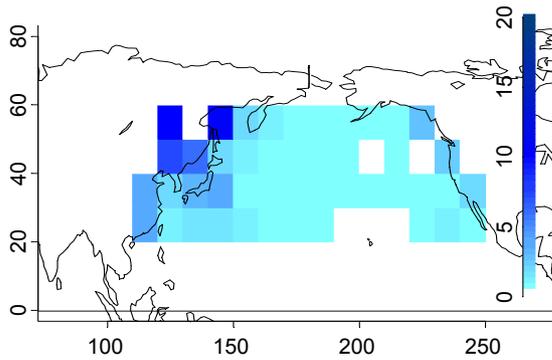
Les observations précédentes sur l'occurrence moyenne des anticyclones transitoires sont en accord avec les études antérieures, telles que celles de Pettersen (1956) et partiellement celles de Zhang et Wang (1997), car ces derniers ont exclu délibérément de leurs analyses les anticyclones asiatiques.

Sur le Pacifique Nord, la pression moyenne par maille des anticyclones est comprise entre 1024 hPa et 1035 hPa (moyenne : 1029.5 hPa) et entre 1023 hPa et 1039.5 hPa (moyenne : 1030.5 hPa) dans les Réanalyses et dans le modèle respectivement. Les anticyclones sont généralement plus forts sur le Pacifique Nord-Ouest, depuis la Mer d'Okhotsk jusque sur la Mer de Chine (supérieurs à 1030 hPa en moyenne), dans le Pacifique Nord-Est (supérieurs à 1028 hPa) et au centre dans les latitudes sub-tropicales (supérieurs à 1029 hPa mais seulement dans les Réanalyses). Nous pouvons noter que peu d'anticyclones circulent dans les latitudes tropicales avec moins de 1 anticyclone par maille et par hiver à 20°N. Cependant, ces anticyclones peuvent présenter de forte pression spécifiquement dans les Réanalyses.

(a) Formation des anticyclones NCEP-NCAR (b) Formation des anticyclones CNRM-CM3 XX1



(c) Déclin des anticyclones NCEP-NCAR



(d) Déclin des anticyclones CNRM-CM3 XX1

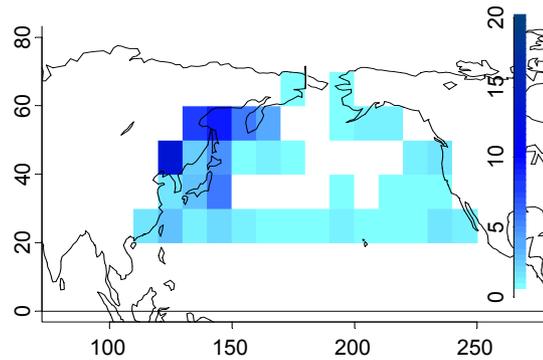
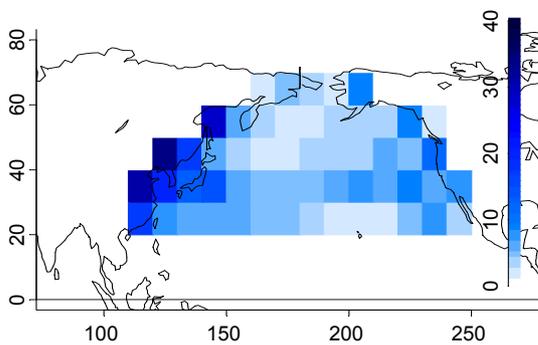


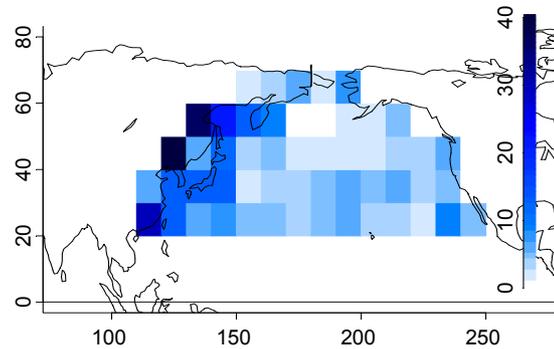
Figure 6.8. Moyenne des fréquences de formation (a et b) et de déclin (c et d) des dépressions ayant circulé dans le Pacifique Nord en JFM (1950-99), d'après les Réanalyses NCEP-NCAR (à gauche) et d'après la simulation XX1 du modèle CNRM-CM3 (à droite).

De manière générale, le modèle CNRM-CM3 reproduit correctement les structures moyennes de la fréquence et des pressions centrales des anticyclones transitoires du Pacifique Nord. Le nombre de trajectoires d'anticyclones ayant atteint les moyennes latitudes du Pacifique Nord (zone A : 117 / 115), leur durée de vie (3.61 / 3.63) et la répartition géographique moyenne des fréquences est relativement similaire dans les Réanalyses NCEP-NCAR et dans la simulation XX1 du modèle CNRM-CM3.

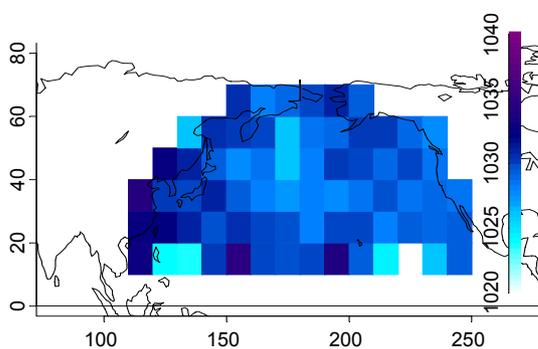
(a) Fréquence des anticyclones NCEP-NCAR 1950-99



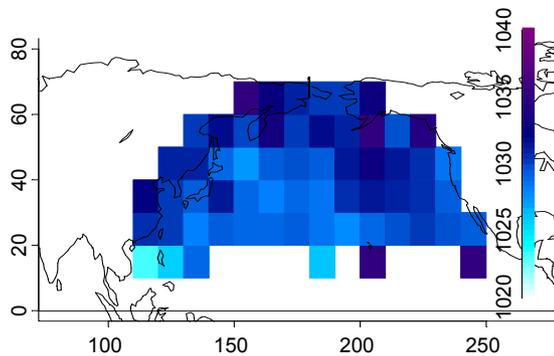
(b) Fréquence des anticyclones CNRM-CM3 XX1 1950-99



(c) Pression centrale des anticyclones NCEP-NCAR 1950-99



(d) Pression centrale des anticyclones CNRM-CM3 XX1 1950-99



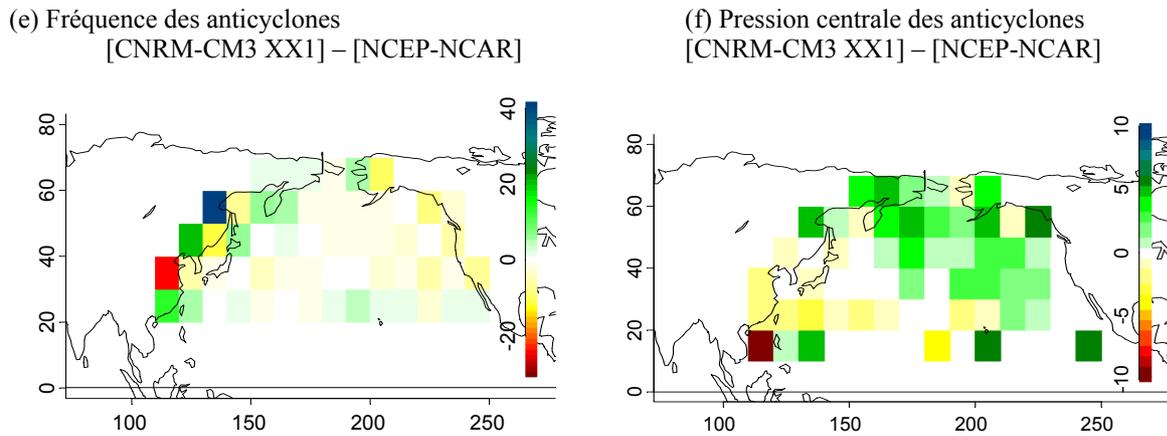


Figure 6.9. Fréquence (a, b) et pression centrale (c, d) des anticyclones d'après les Réanalyses NCEP-NCAR (à gauche) et la simulation XX1 du modèle CNRM-CM3 (à droite). Différence entre b et a (e, fréquence) et différence entre d et c (f, pression centrale). Les informations sur les continents ne sont pas représentées (masque).

Cependant, nous pouvons noter que les anticyclones sont moins nombreux sur le Pacifique Nord-Est respectivement dans le modèle en comparaison avec les Réanalyses. De plus, leur pression centrale est généralement sur-estimée dans la région des Aléoutiennes et sur le Pacifique Nord-Est et légèrement sous-estimée sur le Sud-Ouest du Pacifique Nord. Cependant, dans les moyennes latitudes, la fréquence (impacts journaliers) des anticyclones (dans la zone A) est respectée avec 211 ($\sigma = 33$) occurrences dans les Réanalyses et 210 ($\sigma = 35$) dans le modèle, ainsi que leur pression centrale avec 1029 hPa ($\sigma = 1.9$) dans les Réanalyses et 1030 hPa ($\sigma = 1.9$) dans le modèle.

	NCEP-NCAR	CNRM-CM3 XX1
Freq. traj, ayant atteint la zone A	117 ($\sigma = 12.9$)	115 ($\sigma = 15$)
Durée des traj, ayant atteint la zone A (j)	3.6 ($\sigma = 0.2$)	3.6 ($\sigma = 0.2$)
Nb formations dans la zone A	23 ($\sigma = 7$)	33 ($\sigma = 6$)
Nb déclins dans la zone A	102 ($\sigma = 12$)	101 ($\sigma = 13$)
Fréquence dans la zone A	210 ($\sigma = 32$)	210 ($\sigma = 35$)
Pression moyenne dans la zone A (hPa)	1029 ($\sigma = 1.9$)	1030 ($\sigma = 1.9$)

Tableau 6.3. Caractéristiques moyennes de l'activité anticyclonique dans les moyennes latitudes du Pacifique Nord (30°N-60°N / 130°E-120°O). Limite de la zone A sur la Figure 6.7.a.

Dans ce chapitre, nous avons établi un diagnostic général de la capacité du modèle CNRM-CM3 à reproduire la climatologie de l'activité transitoire de surface dans les moyennes latitudes du Pacifique Nord. Les PNM légèrement plus fortes dans le modèle que dans les Réanalyses induisent certaines différences au point de vue des statistiques générales des caractéristiques des dépressions en particulier. Ainsi, le nombre de trajectoires, la densité de fréquentation et l'intensité sont généralement sous-évalués sur l'ensemble des moyennes latitudes du Pacifique Nord. Nous avons évoqué la possibilité que le seuil fixe de 1005 hPa utilisé lors de la détection des centres dépressionnaires soit la cause de cette sous-évaluation étant donné que les PNM sont généralement plus fortes dans le modèle que dans les Réanalyses. Nous avons vérifié cette hypothèse en déterminant la fréquence des minima

locaux de pression sans restriction de pression (en supprimant le seuil 1005 hPa). Il s'avère que les minima locaux de pression détectés dans le modèle sont d'environ 30% inférieurs à ceux dans les Réanalyses et les maxima locaux de pression sont d'environ 20% inférieurs dans le modèle (en supprimant le seuil de 1015 hPa) sur l'ensemble de notre secteur d'étude (cf. Annexes, Figure A6.4). Nous devons rappeler que la résolution spatiale des données de la pression moyenne journalière est différente avec $\sim 2.8^\circ \times 2.8^\circ$ pour le modèle et $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ pour les Réanalyses. Ainsi, pour notre secteur d'étude, les matrices ne sont de la même taille: 62 lon. * 32 lat. (1984 points) pour le modèle et 69 lon. * 37 lat. (2553 points) pour les Réanalyses. Nous avons pris en compte cette différence pour calculer les pourcentages précédemment énumérés. Par conséquent, il apparaît que la variation spatiale des pressions moyennes journalières est moins forte dans le modèle CNRM-CM3 que dans les Réanalyses NCEP-NCAR. Cette observation explique en partie pourquoi le nombre des trajectoires des dépressions ainsi que la densité de fréquentation par maille sont sous-évaluées dans le modèle (la résolution légèrement plus large de modèle induit sans doute un lissage).

Malgré ces différences, le modèle CNRM-CM3 reproduit de manière très cohérente les structures spatiales et notamment, les trajectoires, les fréquences et la répartition géographique moyenne des pressions centrales moyennes des dépressions et des anticyclones transitoires des moyennes latitudes du Pacifique Nord. Dans le chapitre suivant, nous vérifierons si le modèle CNRM-CM3 reproduit correctement la variabilité spatio-temporelle de la fréquence et de l'intensité des dépressions et des anticyclones.

Chapitre 7 : Variabilité inter-annuelle de l'activité transitoire hivernale du Pacifique Nord : Comparaison entre les Réanalyses NCEP-NCAR et la simulation historique du modèle CNRM-CM3

Selon Lambert et al. (2002), dans les observations et à l'échelle de l'Hémisphère Nord, la variabilité inter-annuelle de la fréquence des cyclones extra-tropicaux peu profonds (dont la pression centrale est supérieure à 980 hPa) est relativement faible alors qu'elle est beaucoup plus forte pour les systèmes creux (inférieurs à 980 hPa). Ceci signifie que le nombre de cyclones extra-tropicaux d'intensité modérée est relativement constant d'un hiver à l'autre, mais en revanche, la variabilité inter-annuelle des systèmes modérés se creusant pour devenir intenses, est forte. Toujours à l'échelle de l'Hémisphère Nord, Lambert (1996) et Lambert et al. (2002) ont montré l'existence du signal de ENSO dans le nombre de cyclones extra-tropicaux intenses au cours de la saison hivernale. L'hypothèse explicative émise est l'accentuation du gradient thermique nord-sud dû à l'augmentation des températures dans les Tropiques, associée au renforcement du transport de vapeur d'eau des basses vers les hautes latitudes, contribuant ainsi au sur-creusement des cyclones extra-tropicaux, lors des épisodes ENSO chauds et inversement lors des événements froids.

Dans le Pacifique Nord, Xiojie et al. (2006) ont évalué comment les cyclones extra-tropicaux sont responsables de la variabilité inter-annuelle de la dépression des Aléoutiennes. Ils ont distingué deux types de trajectoires préférentielles suivies par les dépressions expliquant les phases de forte et de faible intensité de la dépression des Aléoutiennes. Ainsi, les hivers durant lesquels la dépression des Aléoutiennes est plus intense correspondent à un déplacement généralement zonal des dépressions, très rapprochées les unes des autres avec une forte concentration des systèmes sur le centre et l'Est des Aléoutiennes (phase positive). Inversement, au cours des hivers durant lesquels la dépression des Aléoutiennes est affaiblie, les trajectoires des dépressions ont une composante davantage méridienne, en direction du Pôle, et ont tendance à occuper l'ensemble du Pacifique Nord (phase négative). Durant les phases positives, la dépression des Aléoutiennes est centrée en moyenne à l'Est de 180° alors qu'au cours des phases négatives, sa position centrale est décalée à l'ouest de 180°. De plus, les mêmes auteurs ont observé que les cyclones extra-tropicaux sont en moyenne plus / moins creux, de plus / moins grandes dimension lors des phases positives / négatives en association avec les événements El Niño / La Niña.

Dans le chapitre 3, nous avons montré que dans le Pacifique Nord-Est et à l'échelle inter-annuelle, l'activité dépressionnaire et l'activité anticyclonique sont généralement en anti-phase. Par conséquent, lorsque l'activité dépressionnaire est renforcée, l'activité anticyclonique est plus faible. De plus, la variabilité inter-annuelle de l'activité transitoire, tant pour les dépressions que les anticyclones, présente des liens significatifs avec la dépression des Aléoutiennes, les TSO extra-tropicales et tropicales du Bassin Pacifique. Ainsi, les phases positives de PDO et de l'ENSO (chaud) tendent à favoriser l'activité

dépressionnaire au détriment de l'activité anticyclonique et inversement lors des phases négatives, et ce, dans le Pacifique Nord-Est.

L'objectif de ce chapitre est d'étudier la variabilité inter-annuelle de l'activité dépressionnaire / anticyclonique à l'échelle du Pacifique Nord, d'après les Réanalyses NCEP-NCAR et d'après la simulation historique du modèle CNRM-CM3 et d'établir les connexions entre l'activité transitoire du Pacifique Nord et la variation climatique moyenne à l'échelle globale. Cette démarche s'inscrivant dans un double objectif : en premier lieu, dans un effort de validation du modèle CNRM-CM3 avant d'étudier la simulation SRES-A2 et deuxièmement, dans le but de compléter notre analyse relative au chapitre 3.

Pour cela, à partir des champs moyens hivernaux de la fréquence et de l'intensité des dépressions et des anticyclones, dérivés des Réanalyses NCEP-NCAR et du modèle CNRM-CM3, nous allons tout d'abord analyser la variation moyenne de chacun de ces paramètres, puis étudier leurs relations statistiques à l'échelle inter-annuelle (section 7.1). Ensuite, nous déterminerons les principaux modes de la variabilité spatio-temporelle de l'activité dépressionnaire (section 7.2) et de l'activité anticyclonique (section 7.3).

7.1. Caractéristiques moyennes de la variation inter-annuelle de l'activité dépressionnaire et anticyclonique du Pacifique Nord

Dans le chapitre précédant, nous avons montré que les répartitions spatiales de la fréquence des dépressions et des anticyclones ainsi que leur pression moyenne sont dans l'ensemble correctement reproduites par la simulation XX1 du modèle CNRM-CM3. Maintenant, nous allons comparer la variation moyenne inter-annuelle des caractéristiques des dépressions et des anticyclones dans le modèle et dans les Réanalyses (section 7.1.1). Comme nous l'avons vu dans le chapitre 3, la variabilité inter-annuelle de l'activité dépressionnaire et anticyclonique est généralement en anti-phase dans le Pacifique Nord-Est. Par conséquent nous allons vérifier si cette anti-phase se manifeste dans les moyennes latitudes du Pacifique Nord, dans les Réanalyses NCEP-NCAR ainsi que dans le modèle CNRM-CM3 (section 7.1.2). Nous allons pratiquer une analyse temporelle seulement pour déterminer les liens généraux entre l'activité dépressionnaire et anticyclonique des moyennes latitudes du Pacifique Nord (une analyse plus précise de la variabilité spatio-temporelle des caractéristiques des dépressions et des anticyclones sera l'objet de la section 7.2).

7.1.1. Variation inter-annuelle moyenne de l'activité transitoire

La figure 7.1 montre que la variation inter-annuelle (écart-type) des PNM en JFM est clairement plus forte dans les hautes latitudes que dans les basses latitudes. De plus, dans le Pacifique Nord, une large aire de forte variabilité est centrée au sud-ouest de la Péninsule de l'Alaska et couvre la quasi-totalité de la zone entre 30°N-35°N et 65°N depuis le Kamchatka jusqu'aux côtes nord-américaines. Cette zone ne correspond pas exactement à la dépression des Aléoutiennes qui en moyenne est centrée à l'ouest de 180° en JFM (cf. Chapitre 6, fig. 6.3) et concerne plus fortement le secteur occidental que le secteur oriental du Pacifique Nord.

Cette aire de plus forte variabilité inter-annuelle des PNM concerne donc surtout le centre et l'Est de la dépression des Aléoutiennes et également la moitié Nord de l'anticyclone subtropical de Hawaii / Californie.

Cette configuration moyenne est semblable dans les Réanalyses et dans la simulation XX1 du modèle CNRM-CM3. Cependant, quelques différences peuvent être soulignées. Dans le modèle CNRM-CM3, la variabilité inter-annuelle des pressions est plus forte dans le Bassin Arctique, sur le Canada ainsi que sur le centre-est du Pacifique Nord et en revanche, moins forte sur le continent asiatique au sud de 60°N en comparaison avec les Réanalyses. Dans les hautes latitudes de notre secteur, sur le Bassin Arctique (Canada), les variations des PNM d'un hiver à l'autre se situent en moyenne entre 4 et 5 hPa (2 et 4 hPa) dans les Réanalyses NCEP-NCAR et entre 5 hPa et plus de 6.5 hPa (4 et 5 hPa) dans le modèle. Sur le centre du Pacifique Nord, approximativement au sud de la Péninsule de l'Alaska, la variabilité inter-annuelle des PNM est également légèrement sur-estimée par le modèle avec des valeurs excédant 7 hPa alors qu'elles ne dépassent pas 6 hPa dans les Réanalyses NCEP-NCAR.

(a) PNM (σ) NCEP-NCAR (hPa)

(b) PNM (σ) CNRM-CM3 XX1 (hPa)

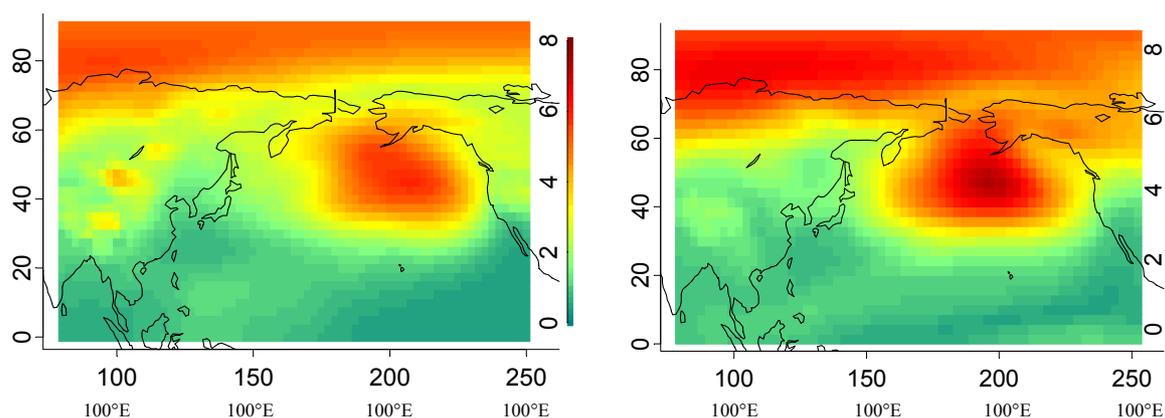
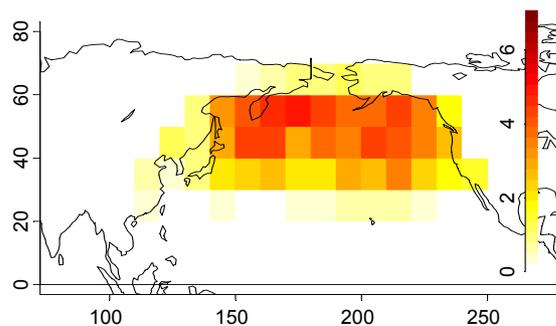


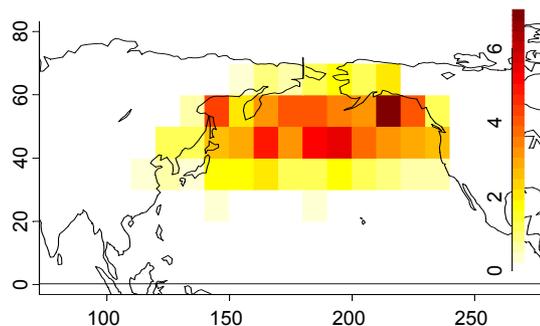
Figure 7.1. (a) Variation inter-annuelle des PNM en JFM de 1950 à 1999 d'après les Réanalyses NCEP-NCAR et (b) d'après la simulation XX1 du modèle CNRM-CM3 (Ecart-types en hPa).

La structure de la variation inter-annuelle moyenne des fréquences des dépressions (Figure 7.2) est logiquement similaire à celle de la fréquence moyenne (cf. Chapitre 6, fig.6.7) avec de plus fortes valeurs entre 40°N-60°N, zone principale de circulation des cyclones extra-tropicaux du Pacifique Nord. Comme nous l'avons souligné dans le chapitre précédent, les fréquences des dépressions au sud de 40°N et plus précisément au nord de Hawaii, sont généralement sous-estimées dans le modèle CNRM-CM3 et cette déficience est également révélée dans la variation inter-annuelle qui est également sous-estimée sur ces mêmes secteurs. Par exemple, dans la zone 30°N-40°N, entre le Japon et la côte nord-américaine, la variation inter-annuelle de la fréquence des dépressions se situe en moyenne entre 1 et 4 (par cellule) dans les Réanalyses et entre 0.5 et 2.5 (par cellule) dans le modèle. Dans le secteur du Japon et du Kamchatka, la variation inter-annuelle de la fréquence des dépressions est également sous-estimée par le modèle avec une variation se situant entre 2 et 3 (par cellule) dans le modèle contre 4 et 5 (par cellule) dans les Réanalyses.

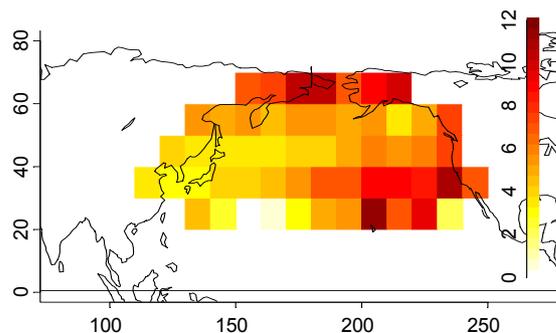
(a) Fréquence Dépressions (σ) NCEP-NCAR



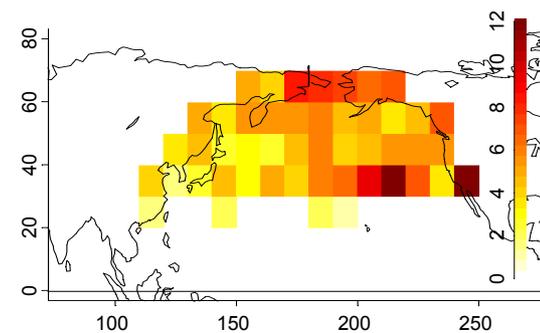
(b) Fréquence Dépressions (σ) CNRM-CM3 XX1



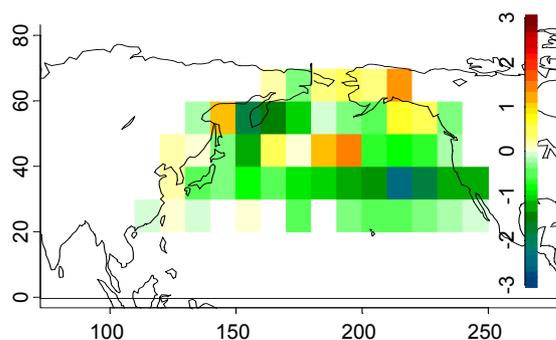
(c) Pression Dépressions (σ) NCEP-NCAR (hPa)



(d) Pression Dépressions (σ) CNRM-CM3 XX1 (hPa)



(e) Fréquence Dépressions (σ)
[CNRM-CM3 XX1 - NCEP-NCAR]



(f) Pression Dépressions (σ)
[CNRM-CM3 XX1 - NCEP-NCAR] (hPa)

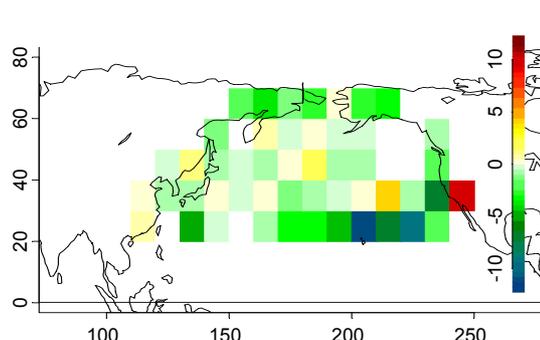


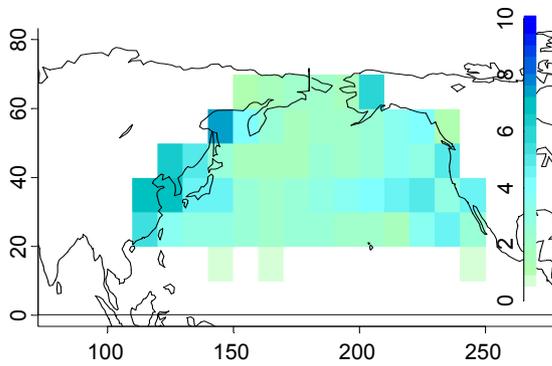
Figure 7.2. Variation inter-annuelle de la fréquence (a, b), de la pression centrale (c, d) des dépressions, d'après les Réanalyses NCEP-NCAR (à gauche) et d'après la simulation XX1 du modèle CNRM-CM3 (à droite). Différence entre b et a (e) et entre d et c (f)²³.

En ce qui concerne la variation inter-annuelle de la pression centrale des dépressions, elle est clairement plus forte sur l'Est du Pacifique Nord (entre Hawaii et le Golfe de l'Alaska) que sur l'Ouest (secteur du Japon). Cette caractéristique est relativement similaire dans les Réanalyses NCEP-NCAR et dans la simulation XX1 du modèle CNRM-CM3. Dans les latitudes inférieures à 30°N, la variation inter-annuelle de la pression des dépressions apparaît comme étant clairement sous-estimée par le modèle. Nous devons cependant rappeler

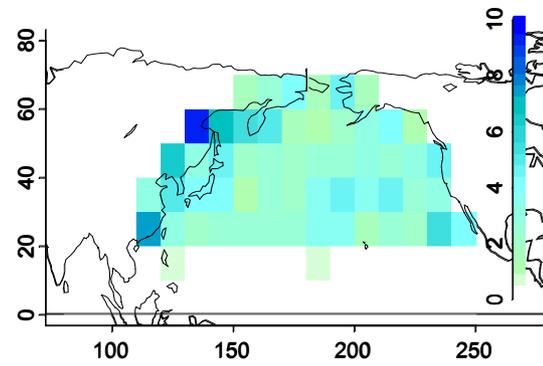
²³ Comme nous l'avons mentionné dans le chapitre précédent, sur les cartes a et b les valeurs comprises entre 0 et 1 ne sont pas perceptibles car sont représentées en blanc. En réalité, au sud de 30°N, l'écart-type des fréquences est simplement inférieure à 1 par maille et mais supérieur à 0 pour toutes les mailles de couleurs représentées sur les figures c et d (au sud de 30°N notamment).

que les fréquences sont généralement nulles au sud de 30°N dans le modèle, d'où cette forte différence avec les Réanalyses.

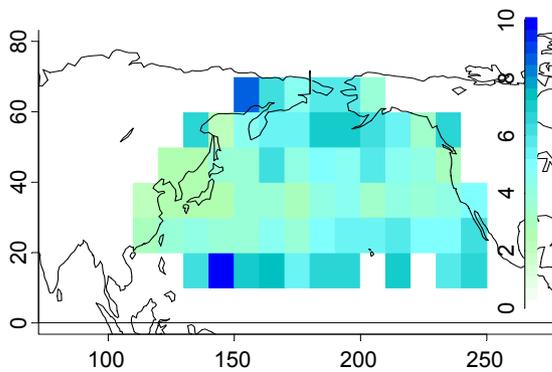
(a) Fréquence Anticyclones (σ) NCEP-NCAR



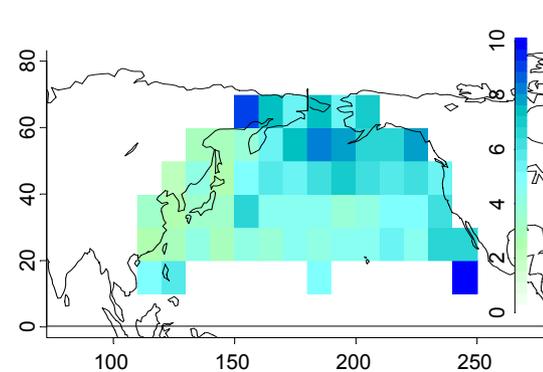
(b) Fréquence Anticyclones (σ) CNRM-CM3 XX1



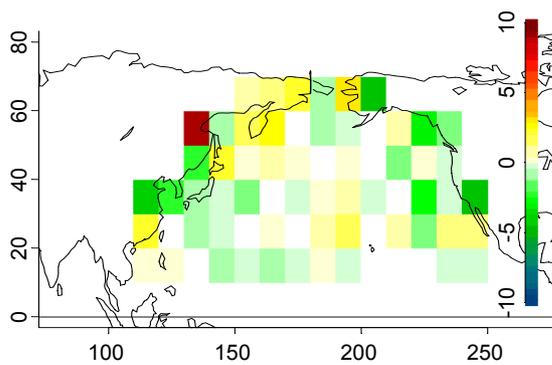
(c) Pression Anticyclones (σ) NCEP-NCAR



(d) Pression Anticyclones (σ) CNRM-CM3 XX1



(e) Fréquence Anticyclones (σ)
[CNRM-CM3 XX1 - NCEP-NCAR]



(f) Pression Anticyclones (σ)
[CNRM-CM3 XX1 - NCEP-NCAR]

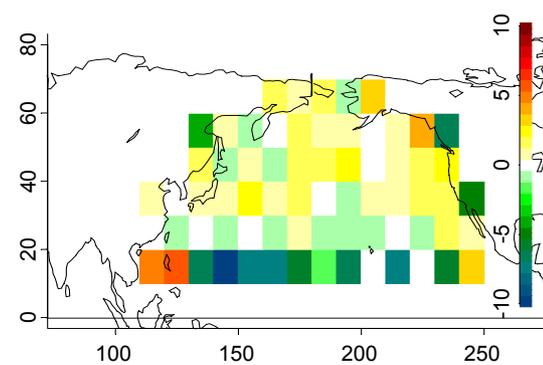


Figure 7.3. Variation inter-annuelle de la fréquence (a, b), de la pression centrale (c, d) des anticyclones, d'après les Réanalyses NCEP-NCAR (à gauche) et d'après la simulation XX1 du modèle CNRM-CM3 (à droite). Différence entre b et a (e) et entre d et c (f).

Le long des côtes asiatiques et nord-américaines (lieux de plus forte fréquentation des anticyclones, cf. Chapitre 6, fig.6.9), la fréquence des anticyclones varie plus fortement d'un hiver à l'autre (entre 3 et 9 par cellule) que sur la partie médiane du Pacifique Nord (entre 1 et 3 par cellule), là où ils sont généralement moins nombreux à circuler. Cette configuration moyenne est identique dans les Réanalyses et dans le modèle.

La pression centrale des anticyclones varie en moyenne entre 2 et 5 hPa d'un hiver à l'autre sur la façade occidentale et le centre du Pacifique Nord. En revanche, la variation est en moyenne plus forte au niveau de la dépression des Aléoutiennes avec des valeurs comprises entre 5 et 8 hPa. Cette caractéristique est légèrement plus marquée dans le modèle CNRM-CM3 que dans les Réanalyses NCEP-NCAR.

Malgré une légère sur-estimation de la variation inter-annuelle moyenne des PNM dans les moyennes latitudes du Pacifique Nord, la structure est correctement reproduite par le modèle CNRM-CM3. Cependant, la variation inter-annuelle de la fréquence des dépressions est clairement sous-estimée au niveau du Kamchatka ainsi qu'au sud de 40°N, en raison de la difficulté du modèle à simuler le passage des dépressions dans les latitudes inférieures à 40°N. Ce problème de simulation des dépressions dans les latitudes relativement basses se répercute également sur la pression centrale des dépressions qui ne peut être estimée dans la région de Hawaii car, selon nos critères de détection des dépressions, seulement 7 systèmes ont pu être enregistrés entre Hawaii et la Basse Californie (entre 20°N et 30°N), contre 54 dans les Réanalyses, au cours de la période 1950-99. Pour les anticyclones, la variation inter-annuelle moyenne de la fréquence et de l'intensité dans les moyennes latitudes du Pacifique Nord est correctement reproduite par le modèle.

7.1.2. Relations entre les caractéristiques des dépressions et des anticyclones

A l'échelle inter-annuelle et dans les moyennes latitudes du Pacifique Nord (dans la zone 30°N-60°N / 130°E-120°O : zone A), lorsque le nombre des trajectoires des dépressions est plus important, leur durée de vie est en moyenne plus courte (Tableau 7.1, $r = -0.63$, sig. > 99% d'après les Réanalyses et $r = -0.59$, sig. > 99% d'après le modèle). Cette même observation est valable pour les anticyclones ($r = -0.41$ et $r = -0.44$, sig. > 99%). Dans la zone A, lorsque l'occurrence des dépressions est plus forte, leur pression centrale tend à être plus faible, c'est-à-dire, que des dépressions plus nombreuses correspondent généralement à des dépressions plus creuses ($r = -0.27$, sig. > 95%, NCEP-NCAR). Dans le modèle CNRM-CM3, cette relation n'apparaît pas significative ($r = -0.14$ sig. = NS). Cependant, la corrélation négative entre la fréquence des dépressions et leur pression centrale est plus significative sur le Pacifique Nord-Est et plus précisément dans la zone 40°N-60°N / 180°-130°O d'après les Réanalyses et le modèle ($r = -0.50$, sig. > 99% et $r = -0.34$, sig. > 99%, respectivement). En ce qui concerne les anticyclones, lorsqu'ils sont plus fréquents dans la zone A, leur pression centrale tend à être plus forte ($r = 0.51$, sig. > 99%, NCEP-NCAR). Dans le modèle CNRM-CM3, cette relation est correctement reproduite ($r = 0.35$, sig. > 99%).

La relation la plus marquée est la corrélation significativement négative entre l'activité dépressionnaire et anticyclonique dans les moyennes latitudes du Pacifique Nord. Ainsi, le nombre des trajectoires ($r = -0.57$, sig. > 99% dans les NCEP-NCAR et $r = -0.25$, sig. > 99% dans le modèle) ainsi que la fréquence ($r = -0.71$, sig. > 99% et $r = -0.60$, sig. > 99%, respectivement) des dépressions et des anticyclones dans les moyennes latitudes du Pacifique Nord varient inversement d'un hiver à l'autre (Figure 7.4). Nous pouvons préciser que c'est sur la partie orientale et plus précisément dans la zone 40°N-60°N / 180°-130°O que l'anti-corrélation des fréquences est la plus forte ($r = -0.84$, sig. > 99% dans les NCEP-NCAR et $r = -0.70$, sig. 99% dans le modèle).

NCEP / NCAR JFM 1950-1999

CNRM-CM3 XX1 JFM 1950-1999

	n.Traj. D	Dur.D	n.Traj.A	Dur.A
n.Traj.D	1	-0.63	-0.57	0.20
Dur.D		1	0.22	-0.22
n.Traj.A			1	-0.41
Dur.A				1

	n.Traj.D	Dur.D	n.Traj.A	Dur.A
n.Traj.D	1	-0.59	-0.25	0
Dur.D		1	0	0
n.Traj.A			1	-0.44
Dur.A				1

NCEP / NCAR JFM 1950-1999

CNRM-CM3 XX1 JFM 1950-1999

	Freq.D	Press.D	Freq.A	Press.A
Freq.D	1	-0.27	-0.71	-0.48
Press.D		1	0.6	0.23
Freq.A			1	0.51
Press.A				1

	Freq.D	Press.D	Freq.A	Press.A
Freq.D	1	-0.14	-0.60	-0.35
Press.D		1	0.30	0.15
Freq.A			1	0.35
Press.A				1

Tableau 7.1. Coefficients de corrélation linéaire entre les caractéristiques (n.Traj. : nombre de trajectoires, Dur. : durée moyenne des trajectoires, Freq. : fréquence (points d'impact journalier), Press. : pression centrale) des dépressions (D) et des anticyclones (A) d'après les Réanalyses NCEP-NCAR (à gauche) et d'après la simulation XX1 du modèle CNRM-CM3 (à droite) dans la zone A (limites sur la figure 7.4). sig. > 95% en gras.

De plus, lorsque les dépressions sont plus nombreuses, la pression centrale des anticyclones est plus faible ($r = -0.48$, sig. > 99% et $r = -0.35$, sig. > 99%, respectivement) et des dépressions plus creuses sont associées à moins d'anticyclones. Par conséquent, un transit intensifié de dépressions creuses, dans les moyennes latitudes du Pacifique Nord, est défavorable à l'activité anticyclonique, avec des anticyclones moins fréquents et d'intensité plus faible. Cette anti-phase est peut-être due au fait que lorsque les dépressions sont plus nombreuses elles circulent à proximité les unes des autres et sont généralement plus creuses (Xiaojie et al., 2006). Cet enchaînement successif pourrait limiter la formation, le développement et la propagation des anticyclones que suivent les dépressions. Inversement, des dépressions moins nombreuses, relativement éloignées les unes des autres, pourraient favoriser l'activité anticyclonique dans les moyennes latitudes.

(a) Cor (Freq. Dépressions, Freq. Anticyclones)
NCEP-NCAR

(b) Cor (Freq. Dépressions, Freq. Anticyclones)
CNRM-CM3 XX1

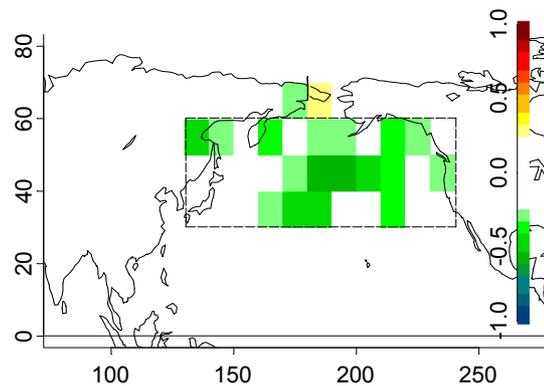
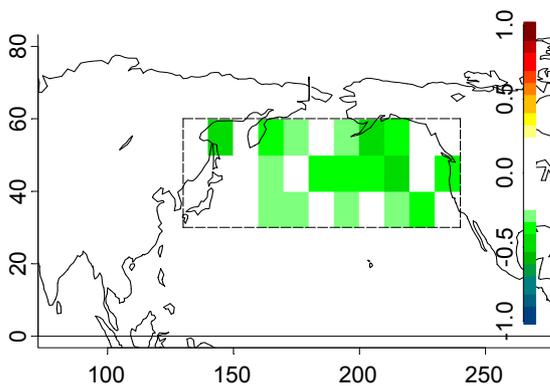


Figure 7.4. Cartes des coefficients de corrélation linéaire entre la fréquence des dépressions et des anticyclones d'après les Réanalyses NCEP-NCAR (a) d'après et la simulation XX1 du modèle CNRM-CM3 (JFM, 1950-99).

Il ressort de cette analyse que dans le Pacifique Nord, la variation inter-annuelle des PNM est plus forte sur le centre et l'Est que sur le secteur occidental. Cette observation est correctement reproduite par le modèle mais est généralement sur-estimée. La variation inter-annuelle de la fréquence et de la pression centrale des dépressions est sous-estimée dans les latitudes inférieures à 40°N et notamment entre Hawaii et la côte californienne par le modèle CNRM-CM3. En revanche, la variation inter-annuelle de la fréquence et l'intensité des anticyclones, est correctement reproduite par le modèle.

Dans les moyennes latitudes du Pacifique Nord, les fréquences des dépressions et des anticyclones sont faiblement corrélées avec leur intensité respective, comme nous l'avons constaté dans le Pacifique Nord-Est (chapitre 3). Cependant, l'activité dépressionnaire et anticyclonique évoluent généralement inversement d'un hiver à l'autre. Les fréquences des dépressions et des anticyclones apparaissent fortement anti-corrélées dans les moyennes latitudes du Pacifique Nord et notamment sur l'Est de notre secteur (dans la zone 40°N-60°N / 180°-130°O). De plus, la variation de l'intensité des dépressions est en lien avec la fréquence des anticyclones avec des dépressions plus creuses qui semblent limiter les fréquences des anticyclones. Le modèle reproduit correctement les liens statistiques entre les caractéristiques des dépressions et des anticyclones.

7.2. Les modes de variabilité de l'activité dépressionnaire dans le Pacifique Nord

Anderson et Gyakum (1989) ont diagnostiqué les types de régime de la circulation atmosphérique du Pacifique Nord au cours de la saison froide (ONDJFM) à partir des champs de fréquence des cyclones extra-tropicaux de surface construits sur la période 1975/76-1982/83. Après avoir réalisé une ACP (simple et aussi avec rotation), trois modes principaux ont été distingués. Le premier mode mesure principalement la variabilité de la fréquence des cyclones extra-tropicaux sur l'Est des Aléoutiennes, qui varie inversement aux régions alentours (mer d'Okhotsk, Nord de Hawaii, Golfe de l'Alaska). Le deuxième mode, met en opposition la fréquence des cyclones extra-tropicaux dans la zone 30°N-50°N du Pacifique et leur fréquence dans la Mer de Béring. Enfin, le troisième mode montre que les fréquences des cyclones extra-tropicaux dans le Golfe de l'Alaska évoluent inversement à celles sur l'Ouest de la Mer de Béring et également au large des Etats-Unis.

A partir des champs des anomalies standardisées de l'occurrence et des pressions centrales de dépressions, nous déterminerons les principaux modes de variabilité spatio-temporelle (ACP, sans rotation car les modes principaux présentent des structures suffisamment fortes) de la fréquence (section 7.2.1) et de l'intensité (section 7.2.2) des dépressions des moyennes latitudes du Pacifique Nord, dans les Réanalyses NCEP-NCAR et dans la simulation historique du modèle CNRM-CM3. Nous présenterons ici les modes dont les structures spatiales sont raisonnablement interprétables. Afin d'établir les relations entre chacun des modes de l'activité dépressionnaire et la variation climatique moyenne de surface, nous calculerons les coefficients de corrélation linéaire avec les champs moyens de la pression au niveau de la mer, les températures de l'air à 2 mètres et les composantes zonales et méridiennes du vent à 10 mètres (ainsi qu'avec les données in-situ des températures et précipitations sur l'Ouest de l'Amérique du Nord pour les modes dérivés des Réanalyses NCEP-NCAR).

7.2.1. Les modes de variabilité de la fréquence des dépressions

Dans les Réanalyses NCEP-NCAR, deux modes principaux expliquent la variabilité inter-annuelle de la fréquence des dépressions. Le premier mode (CP1-FD.NCEP-NCAR, 11% de la variance totale) montre la variabilité latitudinale de la fréquence des dépressions mettant en opposition la zone 30°N-50°N du Pacifique et la région de la Mer de Béring (Figure 7.5 et cf. Annexes, figure A7.1). Le second mode (CP2-FD.NCEP-NCAR, 8%) mesure la variation de la fréquence des dépressions sur l'Est des Aléoutiennes. Ces deux premiers modes s'apparentent aux deux premiers régimes identifiés par Anderson et Gyakum (1989), l'ordre des composantes étant cependant inversé (Figure 7.6).

Dans le modèle CNRM-CM3, la première composante principale de la fréquence des dépressions (CP1-FD.CNRM-CM3) explique 15% de la variance totale (Figure 7.5 et cf. Annexes, figure A7.2) et est relativement similaire à celle des Réanalyses. La deuxième composante (8% de la variance totale) mesure les fréquences des dépressions depuis le Sud du Japon jusqu'aux abords de la côte des Etats-Unis (Figure 7.6).

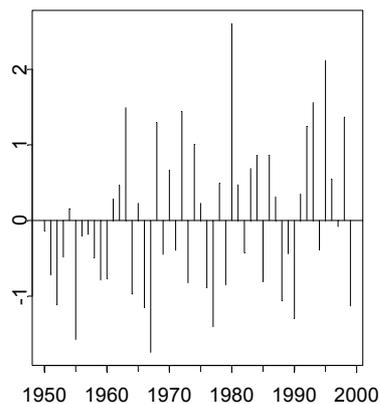
- Le premier mode de la fréquence des dépressions

Dans les Réanalyses NCEP-NCAR, la première composante principale (CP1-FD.NCEP-NCAR), mesure la fréquence des dépressions dans la zone 30°N-50°N du Pacifique qui varie en opposition à celle dans la zone 50°N-60°N, plus fortement dans la région de la Mer de Béring. Au cours de la période 1950-99, les cyclones extra-tropicaux tendent à être de plus en plus nombreux dans la zone 30°N-50°N (Indice CP1-FD.NCEP-NCAR positif), signifiant qu'ils adoptent des trajectoires davantage méridionales (cf. Annexes, Figure A7.3). Ces résultats rejoignent ceux de Wang et al. 2006 qui ont observé une augmentation de la fréquence des dépressions dans les moyennes latitudes du Pacifique Nord au cours de la seconde moitié du 20^{ème} siècle. Cependant, la variabilité inter-annuelle de ce mode est relativement importante. Plus précisément, durant les années 1950, les dépressions concernent des latitudes relativement septentrionales (Indice CP1-FD.NCEP-NCAR négatif), circulant plus fréquemment sur la Mer de Béring et inversement moins fréquemment dans la zone 30°N-50°N du Pacifique. A partir des années 1960, la variabilité inter-annuelle de l'Indice CP1-FD.NCEP-NCAR augmente avec une accentuation des phases positives, signifiant que les dépressions adoptent plus fréquemment des trajectoires méridionales comme au cours des hivers 1963, 1968, 1972, 1980, 1992, 1993, 1995 et 1998. Les phases négatives, révélant des trajectoires plus septentrionales, se manifestent toute fois régulièrement comme en 1966, 1967, 1976, 1977, 1988, 1989, 1990, mais sont en général de moins en moins fréquentes spécifiquement au cours de la décennie 1990.

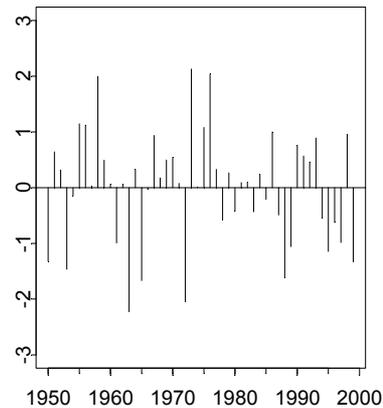
Le premier mode de la fréquence des dépressions, dans les Réanalyses, qui traduit la variation nord-sud de la fréquentation des dépressions synoptiques, est principalement associé à la variation inter-annuelle des PNM dans les moyennes latitudes du Pacifique Nord. Ainsi, lorsque les dépressions sont plus fréquentes dans la zone 30°N-50°N, les anomalies des PNM sont négatives entre 20°N et 45°N, depuis le Japon jusqu'en Amérique du Nord. Cette large zone est en faible opposition, mais significativement, avec les anomalies des PNM dans la zone inter-tropicale du Pacifique occidental. Cette structure des PNM organise les anomalies de vent à 10 mètres et les températures de l'air à 2 mètres dans les moyennes latitudes ainsi

que dans la zone sub-tropicale du Pacifique Nord. Une anomalie dans le sens cyclonique de la circulation des vents, centrée vers 35°N-150°O, génère des anomalies de vent de sud et des températures plus chaudes le long de la côte de la Basse Californie (Mexique) et des anomalies de vent d'est dans le Golfe de l'Alaska. La région des Aléoutiennes est soumise à des anomalies de vent de nord qui s'incurve progressivement en direction du sud sur le centre du Pacifique Nord et ensuite en direction de l'est dans la région du Kuroshio où les températures de l'air sont plus froides. Ce mode apparaît être en étroite relation avec les anomalies des PNM, de vent et de température dans les sub-tropiques par conséquent avec l'anticyclone sub-tropical, mais bien plus faiblement avec les conditions atmosphériques équatoriales. Il est communément admi que les épisodes chauds de ENSO sont associés à des trajectoires plus méridionales des cyclones extra-tropicaux dans le Pacifique Nord (ex : Eichler et Higgins 2006) et surtout le Pacifique Nord-Est, générant des précipitations plus abondantes sur le Sud-Ouest de l'Amérique du Nord. L'observation précédente nous conduit à analyser plus en détail la relation entre la variation du caractère nord-sud des trajectoires des cyclones extra-tropicaux et les conditions climatiques de la zone tropicale (cf. Annexes, figure A7.4 et tableau 7.1). L'explication de l'absence de corrélation significative entre ENSO et la fréquence des dépressions dans la zone 30°N-50°N du Pacifique au cours de la période 1950-99 peut-être expliquée, en partie, par une relation inverse avec les conditions inter-tropicales avant le changement climatique du milieu des années 1970 et après.

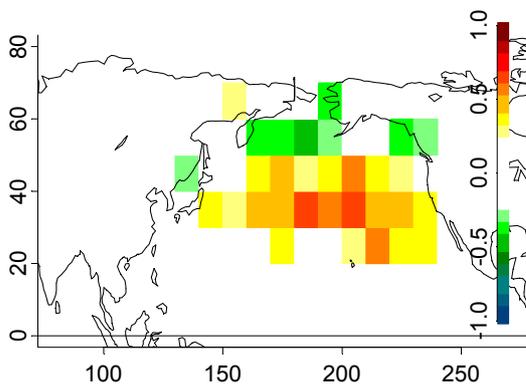
(a) Indice CP1-FD.NCEP-NCAR (11%)



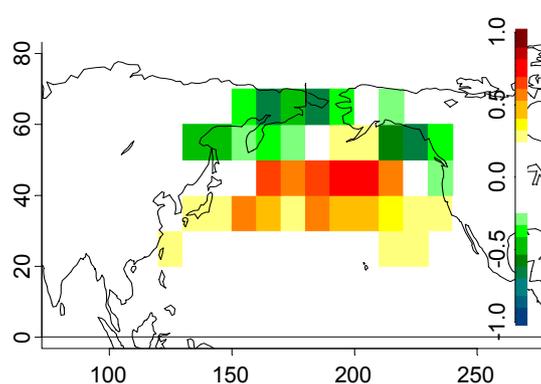
(b) Indice CP1-FD.CNRM-CM3 (15%)



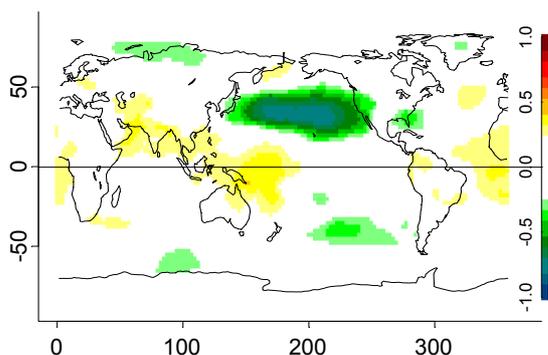
(c) Cor (Indice CP1-FD.NCEP-NCAR, Freq.D)



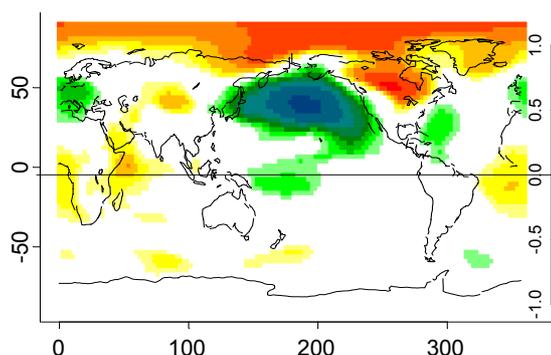
(d) Cor (Indice CP1-FD.CNRM-CM3, Freq.D)



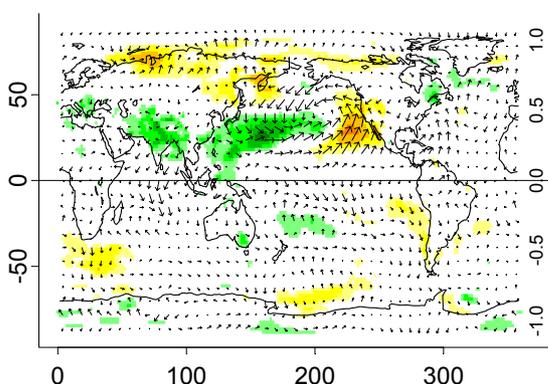
(e) Cor (Indice CP1-FD.NCEP-NCAR, PNM)



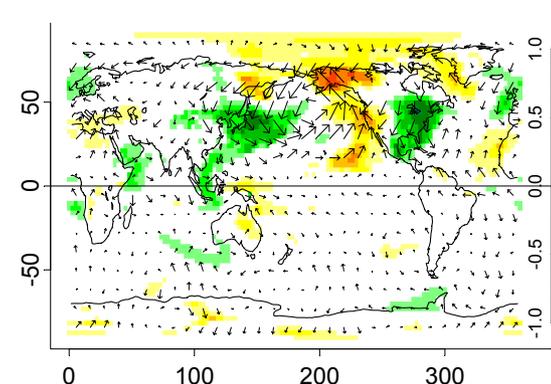
(f) Cor (Indice CP1-FD.CNRM-CM3, PNM)



(g) Cor (Indice CP1-FD.NCEP-NCAR, Ta2m&v10m)



(h) Cor (Indice CP1-FD.CNRM-CM3, Ta2m&v10m)



(i) Cor (Indice CP1-FD.NCEP-NCAR, T&P)

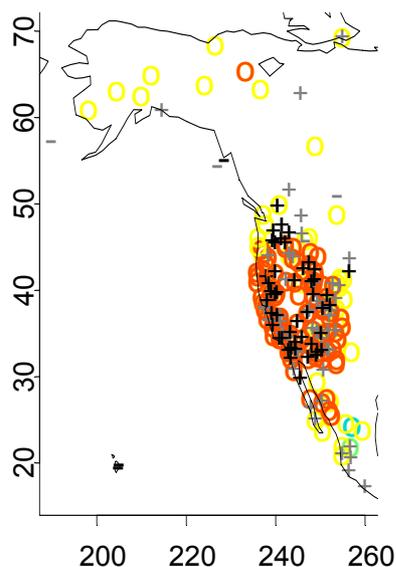


Figure 7.5. Première composante principale de la fréquence des dépressions, indices CP1-FD (a, b), carte des coefficients de corrélation linéaire entre les indices précédents et la fréquence des dépressions (c, d), les pressions au niveau de la mer (e, f), les températures de l'air à 2 m et le vent à 10m (g, h). Les couleurs = corrélations sig. > 95%.

A gauche d'après les Réanalyses et à droite d'après la simulation XXI du modèle CNRM-CM3.

(i) carte des coefficients de corrélation linéaire entre l'indice CP1-FD.NCEP-NCAR et les températures minimales (cercles jaunes / verts, rouges / bleus correspondent à des coef. positifs / négatifs, sig. > 95% , sig. > 99% respectivement) et les cumuls des précipitations (signes + / - correspondent à des coef. positifs / négatifs, gris = sig. > 95% et noirs = sig. > 99%).

JFM 1950-99

Ce changement dans la relation est associé à un léger décalage vers l'est de la structure des corrélations de fréquences des dépressions avec l'indice CP1-FD.NCEP-NCAR (et aussi

des PNM, du vent à 10m et des températures à 2m)²⁴. Par conséquent, la variation ouest-est de la fréquence des dépressions dans la zone 30°N-50°N est peut-être modulée sur les échelles décennales en accord avec ENSO. Mais nous devons tout de même souligner que les relations, avant et après le milieu des années 1970, entre la fréquence des dépressions dans la zone 30°N-50°N du Pacifique et les conditions atmosphériques dans les tropiques, sont faibles.

Des dépressions plus nombreuses dans la zone 30°N-50°N du Pacifique, traduisant des trajectoires plus méridionales, sont davantage susceptibles d'advecier directement l'air sub-tropical et tropical en direction du continent nord-américain et sont favorables à des conditions plus chaudes et plus humides sur l'Ouest des Etats-Unis et le long de la côte ouest du Mexique (Figure 7.5.i).

Dans le modèle CNRM-CM3, les fréquences des dépressions dans la zone 30°N-50°N (CP1-FD.CNRM-CM3) sont en opposition avec celles le long de la côte asiatique depuis la Mer d'Okhotsk jusque dans le Détroit de Béring ainsi qu'avec celles dans le Golfe de l'Alaska (Figure 7.5). Par conséquent, dans le modèle, lorsque les dépressions sont plus fréquentes dans les latitudes inférieures à 50°N, elles le sont moins au nord de cette limite approximative. Ce mode mesure donc la variabilité nord-sud (septentrionale-méridionale) de la fréquentation des dépressions dans le Pacifique Nord (cf. Annexes, Figure A7.5).

Ce premier mode, relatif à la fréquence des dépressions, explique largement la variabilité inter-annuelle des PNM dans le Pacifique Nord (Figure 7.8). Ainsi, lorsque les dépressions sont plus fréquentes dans la zone 30°N-50°N, les PNM sont généralement plus faibles depuis la côte asiatique jusqu'à la côte nord-américaine, et de Hawaii jusqu'aux Aléoutiennes (et les PNM sont plus fortes dans le Bassin Arctique ainsi que sur le Canada). A cette vaste aire de plus faibles PNM, est associée une anomalie dans le sens cyclonique de la circulation des vents, centrée vers 45°N-160°O. Dans le Pacifique Nord-Est, des anomalies de vent de sud et des Ta2m plus chaudes se manifestent depuis Hawaii jusqu'en Alaska. Sur la façade occidentale, les anomalies de vent de nord sont accompagnées par des Ta2m plus froides dans la zone du Kuroshio. Ce mode n'apparaît pas en lien avec les conditions climatiques dans les tropiques.

Cette première composante de la fréquence des dépressions a un mode de variabilité inter-annuelle mais nous pouvons tout de même noter qu'à partir des années 1980, l'indice est plus souvent négatif et les phases positives sont plus modestes. Nous devons rappeler que la simulation XX1 du modèle CNRM-CM3 présente un forçage radiatif conforme aux observations. Par conséquent, cette légère diminution de la fréquence des dépressions dans la zone 30°N-50°N à partir des années 80 résulte peut-être de l'augmentation des GES. Nous étudierons plus en détail ce sujet dans le chapitre suivant.

Les structures spatiales du premier mode de la fréquence des dépressions sont relativement similaires dans les Réanalyses et dans le modèle CNRM-CM3.

²⁴ Avant (après) le milieu des années 1970, la phase positive de l'indice CP1-FD.NCEP-NCAR est associée à:

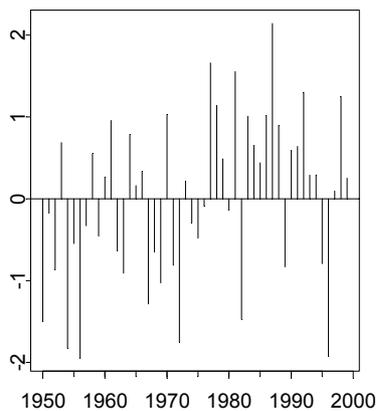
- plus de dépressions entre 30°N-50°N sur l'Ouest et le centre (le centre et l'Est),
- une anomalie négative des PNM centrée au nord-ouest (nord-est) de Hawaii,
- à des anomalies des PNM neutres (plus fortes) dans la zone inter-tropicale du Pacifique occidental,
- des PNM plus fortes (neutre) dans la zone NIÑO,
- des températures plus froides-neutres (plus chaudes) dans la zone NINO,
- l'absence (présence) de la symétrie inter-hémisphérique à l'échelle globale.

- deuxième mode de la fréquence des dépressions

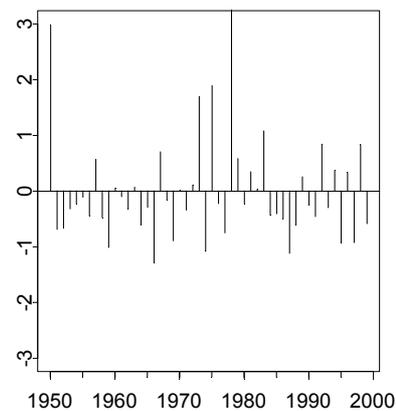
Dans les Réanalyses NCEP-NCAR, la deuxième composante (CP2-FD.NCEP-NCAR) mesure la variabilité inter-annuelle de la fréquence des dépressions sur la partie Est des Aléoutiennes (Figure 7.6). Il apparaît que lorsque l'occurrence des dépressions est plus importante sur ce secteur (indice positif), elle est inversement moins forte dans les régions alentour (ex : le Nord-Est de la Sibérie, la Mer d'Okhotsk, le Nord de Hawaii et l'Ouest de la Colombie Britannique). On note donc une opposition entre les phases de concentration et d'absence de concentration sur l'Est des Aléoutiennes des passages des dépressions (cf. Annexes, Figure A7.6).

Le changement climatique du milieu des années 1970, qui a affecté le Pacifique Nord est clairement marqué dans cette composante. Durant la première période, de 1950 à 1976, les dépressions étaient généralement moins nombreuses sur l'Est des Aléoutiennes (indice négatif) mais ponctuée de certains hivers positifs comme en 1953, 1961, 1964 et 1970. Entre 1976 et 1977 une rupture est suivie par des dépressions plus nombreuses sur l'Est des Aléoutiennes avec des valeurs relativement fortes comme en 1977, 1978, 1981, 1983, 1986, 1987, 1992 et 1998. Cette seconde période est également caractérisée par deux valeurs fortement négatives : 1982 et 1996. L'intensification et le déplacement vers l'Est de la dépression des Aléoutiennes ont été bien observés dans les études antérieures (Trenberth

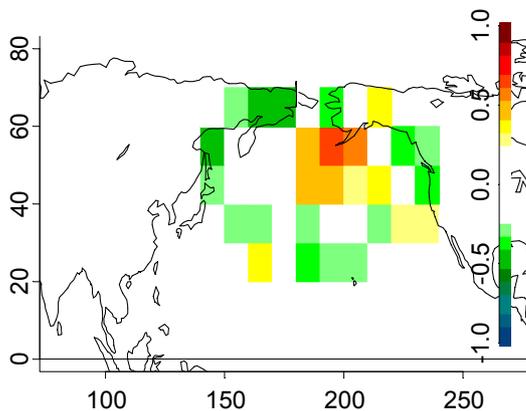
(a) Indice CP2-FD.NCEP-NCAR (8%)



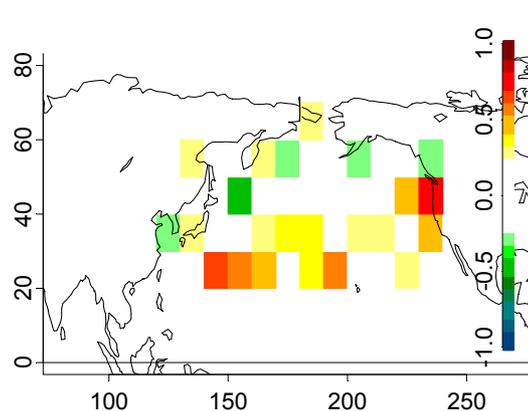
(b) Indice CP2-FD.CNRM-CM3 (8%)

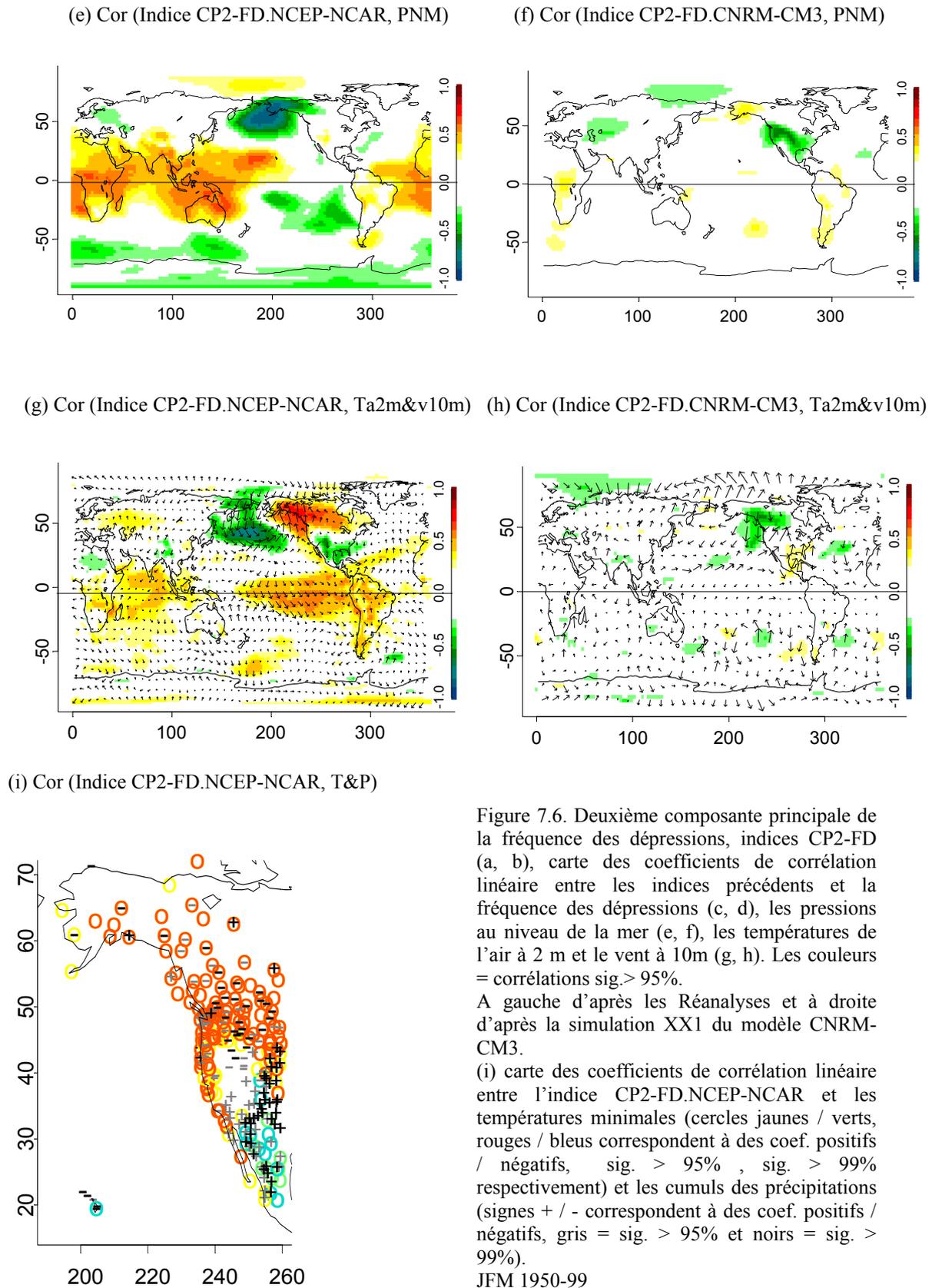


(c) Cor (Indice CP2-FD.NCEP-NCAR, Freq.D)



(d) Cor (Indice CP2-FD.CNRM-CM3, Freq.D)





1990, Trenberth et Hurrell 1994, Overland et al. 1999) et apparaît comme étant en étroite relation avec l'occurrence des dépressions synoptiques sur ce secteur (Xiaojie et al. 2006). En

effet, l'indice CP2-FD.NCEP-NCAR apparaît significativement corrélé avec les PNM sur les Aléoutiennes.

La phase positive de l'indice CP2-FD.NCEP-NCAR, signifiant une plus forte fréquence des dépressions sur l'Est des Aléoutiennes, est associée à des anomalies négatives des PNM sur l'ensemble des Aléoutiennes et sur l'Alaska et à des anomalies positives des PNM dans la zone inter-tropicale (à l'exception du Pacifique Est). Dans les latitudes extra-tropicales du Pacifique Nord, les anomalies négatives des PNM induisent une anomalie de la circulation des vents dans le sens cyclonique, avec des anomalies de vent de sud et des températures plus chaudes le long de la côte ouest de la Amérique du Nord et plus fortement dans le Golfe de l'Alaska ainsi qu'à l'intérieur du continent sur l'Alaska et le Nord-Ouest du Canada. En contrepartie, les anomalies de vent de nord sont associées à des températures plus froides dans la région de l'Oyashio et sur le centre du Pacifique Nord.

Ce mode est également en relation avec les conditions atmosphériques inter-tropicales. Lorsque les dépressions sont plus nombreuses sur l'Est des Aléoutiennes, les températures équatoriales sont plus chaudes dans le Pacifique central et oriental. Cette structure est relativement similaire à celle de PDO ($r = 0.66$, sig. > 99%), révélant un lien étroit entre la force de la dépression des Aléoutiennes, associée à la fréquence des dépressions synoptiques, les TSO extra-tropicales et tropicales (NIÑO3.4: $r = 0.46$, sig. > 99%). Un épisode El Niño (la Niña), tend à être associé à une concentration (absence de concentration) des passages de dépressions sur l'Est des Aléoutiennes.

La structure des corrélations associée à l'indice CP2-FD.NCEP-NCAR est relativement stable au cours de la période 1950-99 mais les coefficients sont largement plus forts après la rupture de 1976-77 (cf. Annexes, Figure A7.7).

Une plus grande concentration de la fréquentation des dépressions sur l'Est des Aléoutiennes est associée à des températures plus chaudes le long de la côte ouest de l'Amérique du Nord ainsi qu'à l'intérieur du continent au nord de 45°N approximativement et inversement à des températures plus froides sur le Mexique. La structure des corrélations avec les précipitations montre des conditions neutres ou plus humides le long de la côte ouest au niveau des Etats de Washington et de l'Oregon et des conditions significativement plus humides sur le Mexique ainsi que sur la façade orientale de la Cordillère au sud de 45°N. Inversement, des conditions moins pluvieuses apparaissent à l'intérieur de la Cordillère depuis la Colombie Britannique jusque dans l'Etat du Nevada.

Dans le modèle CNRM-CM3, la seconde composante (8% de la variance totale), présente une structure spatiale différente de celle dérivée des Réanalyses, puisqu'elle mesure les fréquences des dépressions depuis le Sud du Japon jusqu'aux abords de la côte des Etats-Unis, et ne présente pas de lien significatif avec les PNM, Ta2m et vent10m du Pacifique Nord.

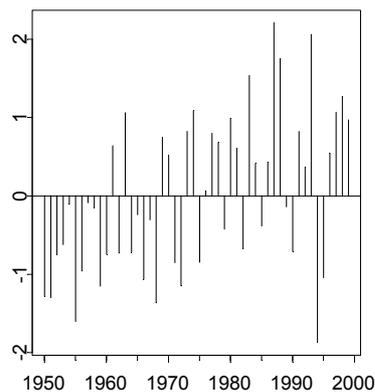
7.2.2. Les modes de variabilité de l'intensité des dépressions

Dans les Réanalyses comme dans le modèle CNRM-CM3, la variabilité inter-annuelle des pressions centrales des dépressions des moyennes latitudes du Pacifique Nord est synthétisée par la première composante (CP1-ID.NCEP-NCAR, 10% et CP1-ID.CNRM-CM3, 12%).

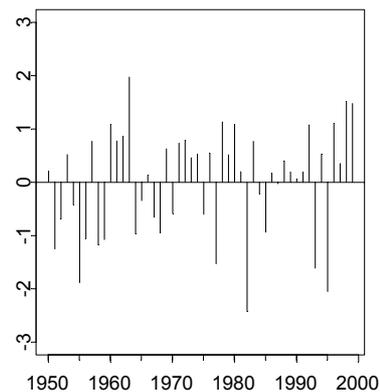
Dans les Réanalyses, la première composante de la pression centrale des dépressions (CP2-ID.NCEP-NCAR) mesure la variabilité inter-annuelle de l'intensité des dépressions dans les moyennes latitudes du Pacifique Nord, spécifiquement sur le Pacifique central, l'Est des Aléoutiennes, Golfe de l'Alaska et le long de la côte ouest de l'Amérique du Nord (Figure 7.7). Il apparaît que l'intensité des dépressions (inverse de la pression centrale) augmente graduellement au cours de la période 1950-99. Cette observation rejoint les résultats de Graham et Diaz 2001 qui ont également montré que la force des cyclones extra-tropicaux augmente à travers l'ensemble du Pacifique Nord depuis les années 1950. C'est au cours des hivers 1983, 1987, 1988, 1993, 1998 que les dépressions sont les plus creuses. La force des cyclones extra-tropicaux du Pacifique Nord varie significativement avec la dépression des Aléoutiennes : des cyclones extra-tropicaux plus creux correspondant à une dépression des Aléoutiennes plus creuse.

L'intensité des dépressions transitoires est également en relation avec les conditions atmosphériques dans les Tropiques, comme l'ont suggéré Lambert (1996) et Lambert et al. (2002), avec un signal de ENSO dans la fréquence des dépressions creuses. La cause est attribuée au renforcement du gradient thermique Pôle-Equateur à cause du réchauffement dans les tropiques durant les phases chaudes de ENSO, induisant une structure barocline plus forte. De plus, les flux de chaleur latente, des tropiques vers les extra-tropiques, sont intensifiés et contribuent fortement au creusement des dépressions.

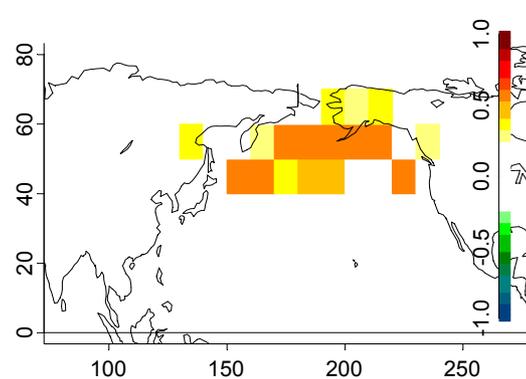
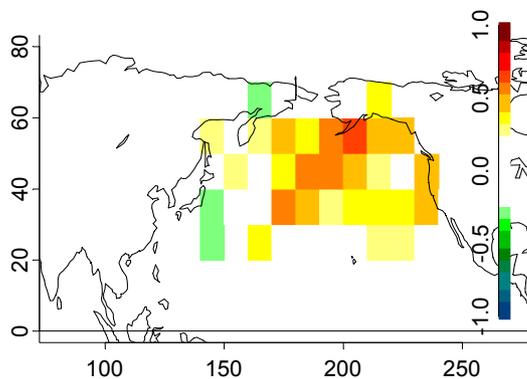
(a) Indice CP1-ID.NCEP-NCAR (10%)



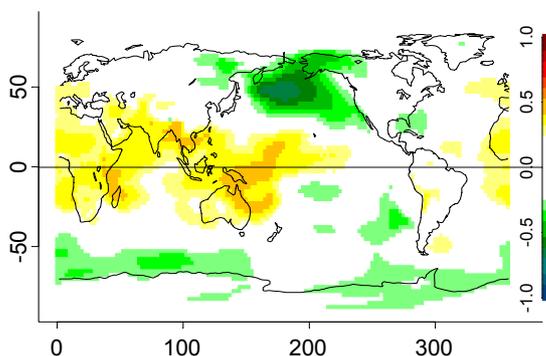
(b) Indice CP1-ID.CNRM-CM3 (12%)



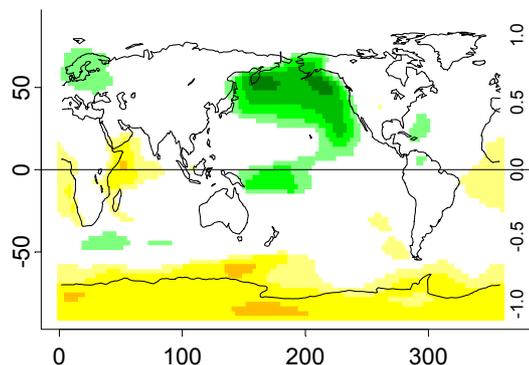
(c) Cor (Indice CP1-ID.NCEP-NCAR, Intensité.D) (d) Cor (Indice CP1-ID.CNRM-CM3, Intensité.D)



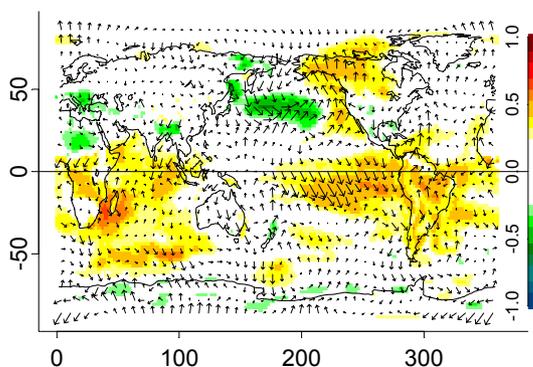
(e) Cor (Indice CP1-ID.NCEP-NCAR, PNM)



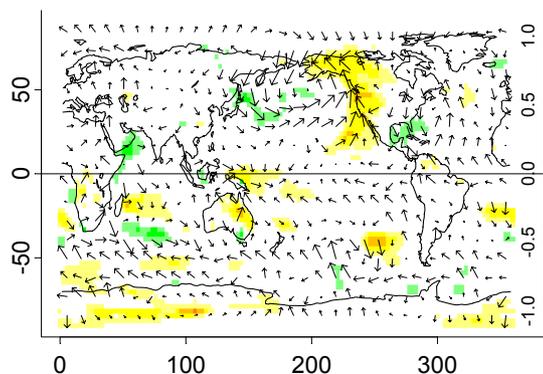
(f) Cor (Indice CP1-ID.CNRM-CM3, PNM)



(g) Cor (Indice CP1-ID.NCEP-NCAR, Ta2m&v10m)



(h) Cor (Indice CP1-ID.CNRM-CM3, Ta2m&v10m)



(i) Cor (Indice CP1-ID.NCEP-NCAR, T&P)

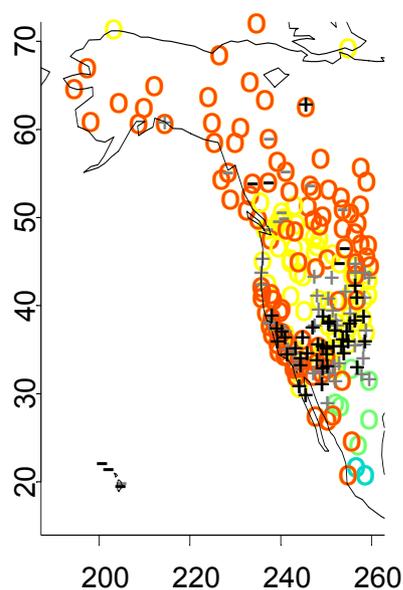


Figure 7.7. Première composante principale de l'intensité des dépressions (**intensité = inverse de la pression centrale pour les dépressions**), indice CP1-ID (a, b), carte des coefficients de corrélation linéaire entre les indices précédents et l'intensité des dépressions (c, d), les pressions au niveau de la mer (e, f), les températures de l'air à 2 m et le vent à 10m (g, h). Les couleurs = corrélations sig. > 95%.

A gauche d'après les Réanalyses et à droite d'après la simulation XX1 du modèle CNRM-CM3.

(i) carte des coefficients de corrélation linéaire entre l'indice CP1-ID.NCEP-NCAR et les températures minimales (cercles jaunes / verts, rouges / bleus correspondent à des coef. positifs / négatifs, sig. > 95%, sig. > 99% respectivement) et les cumuls des précipitations (signes + / - correspondent à des coef. positifs / négatifs, gris = sig. > 95% et noirs = sig. > 99%).

JFM 1950-99

Des dépressions plus creuses dans les moyennes latitudes du Pacifique Nord sont associées à des températures plus chaudes sur la quasi-totalité de l'Amérique du Nord-Ouest (à l'exception de certaines stations mexicaines). Des conditions plus humides se manifestent sur les Etats-Unis et plus spécifiquement le long de la côte de la Californie, ainsi qu'à l'intérieur du continent entre 30°N et 40°N.

Dans le modèle CNRM-CM3, le régime principal explique la variabilité spatio-temporelle de l'intensité des dépressions dans les moyennes latitudes du Pacifique Nord. La première composante de la pression centrale des dépressions (CP1-ID.CNRM-CM3, 12% de la variance totale) distingue la zone entre 40°N et 60°N du Pacifique (Figure 7.9). Lorsque les dépressions sont plus creuses entre 40°N et 60°N, les PNM sont plus faibles sur le Pacifique Nord. Une anomalie cyclonique de la circulation des vents se manifeste sur le Pacifique Nord. Des anomalies de vents de sud sont associées à des Ta2m plus chaudes le long de la côte nord-américaine. Dans le modèle, l'intensité des dépressions de la zone 40°N-60°N du Pacifique ne présente pas de relation avec la variabilité climatique dans les tropiques contrairement aux Réanalyses.

Au cours de la période 1950-99, l'intensité simulée des dépressions dans la zone 40°N-60°N semble augmenter légèrement cependant, certains hivers présentent des valeurs fortement négatives.

Dans la simulation historique du modèle CNRM-CM3, la variabilité spatio-temporelle des caractéristiques des dépressions présente à la fois des points communs et des divergences avec celle dérivée des Réanalyses NCEP-NCAR. Dans les Réanalyses, le premier mode décrit la variation nord-sud de la fréquence des dépressions et le second mode mesure la variabilité des fréquences des dépressions sur l'Est des Aléoutiennes. Dans le modèle, ces deux modes ne sont pas distingués. Seul le premier mode explique la variabilité de la fréquence des dépressions en opposant, plus fortement que dans les Réanalyses, les zones se situant au nord et au sud de 50°N. Ainsi, ce premier mode est largement en relation avec la variabilité des PNM du Pacifique Nord dans le modèle, alors que dans les Réanalyses le premier et le second mode expliquent la variabilité des PNM entre 20°N et 45°N et la variabilité des PNM au niveau de la dépression des Aléoutiennes respectivement.

En ce qui concerne l'intensité des dépressions, le modèle reproduit correctement la structure spatiale de la variabilité temporelle (même si elle apparaît davantage confinée dans les latitudes situées entre 40°N et 60°N en comparaison avec les Réanalyses qui incluent l'ensemble de la zone se situant entre 30°N et 60°N) ainsi que les relations statistiques avec les PNM, Ta2m et v10m dans le Pacifique Nord. En revanche, le modèle semble avoir des difficultés à reproduire les relations entre les conditions atmosphériques inter-tropicales du Pacifique et l'activité dépressionnaire dans les moyennes latitudes du Pacifique Nord.

7.3. Les modes de variabilité de l'activité anticyclonique dans le Pacifique Nord

A notre connaissance, dans le Pacifique Nord, les modes de la variabilité inter-annuelle de l'activité anticyclonique n'ont jamais été étudiés. Comme précédemment, nous

avons réalisé une ACP sur les champs des anomalies standardisées de la fréquence (section 7.3.1) et de l'intensité (section 7.3.2) des anticyclones et restreint notre étude aux modes présentant des structures spatiales raisonnablement interprétables.

7.3.1. Les modes de variabilité de la fréquence des anticyclones

Comme pour les dépressions, la variabilité de la fréquence des anticyclones, dans les Réanalyses NCEP-NCAR, est caractérisée par deux modes principaux. Le premier régime (CP1-FA.NCEP-NCAR, 12%) met en opposition les fréquences des anticyclones dans les moyennes latitudes (30°N-60°N) et dans les latitudes plus basses (inférieures à 30°N). Le second régime oppose les fréquences des anticyclones dans le Golfe de l'Alaska et dans le secteur de la Mer d'Okhotsk (CP2-FA.NCEP-NCAR, 7%).

Dans le modèle CNRM-CM3, l'ACP distingue également deux modes principaux de la variabilité spatio-temporelle de la fréquence des anticyclones (17% et 8% de la variance totale, respectivement). Les structures spatiales de ces deux composantes sont relativement similaires à celles des Réanalyses.

- le premier mode de la fréquence des anticyclones

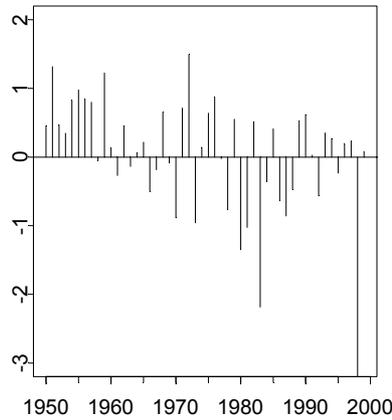
Dans les Réanalyses NCEP-NCAR, l'analyse spatio-temporelle de la fréquence des anticyclones (Figure 7.8) montre que dans les moyennes latitudes du Pacifique Nord, entre 30°N et 50°N, les fréquences des anticyclones varient en opposition à celles au sud de 30°N. Lorsque les anticyclones circulent davantage dans les moyennes latitudes du Pacifique Nord, ils ont tendance à moins pénétrer dans les basses latitudes et inversement, lorsque les anticyclones transitent moins dans les moyennes latitudes, ils ont tendance à pénétrer davantage dans les basses latitudes notamment sur l'Ouest du Pacifique Nord (cf. Annexes, figure A7.8).

Au cours de la période 1950-99, l'indice CP1-FA.NCEP-NCAR montre une diminution de l'occurrence des anticyclones dans la zone 30°N-50°N. Plus précisément, durant les années 1950, les anticyclones sont plus nombreux sur le centre et l'Est du Pacifique Nord. Les années 1960 sont caractérisées par des conditions neutres avec une alternance des phases modestement positives et négatives. Puis, la variation inter-annuelle est renforcée au cours des années 1970. Enfin, à partir de 1978, les phases négatives deviennent plus fréquentes et montrent un accroissement de leur magnitude (1980, 1981, 1983, 1998) et inversement les phases positives deviennent plus modestes.

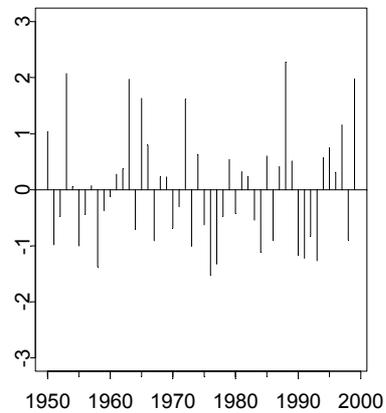
Ce premier mode de la fréquence des anticyclones explique la variabilité des PNM sur la quasi-totalité du Pacifique Nord. La phase positive de cet indice est associée à des PNM anormalement fortes dans les moyennes latitudes du Pacifique Nord et le long de la côte ouest de l'Amérique, de la Basse Californie (Mexique) jusque dans la zone équatoriale. De plus fortes PNM sont également observables dans le Golfe du Mexique. Inversement des pressions anormalement faibles concernent la zone inter-tropicale du Pacifique occidental, de l'Océan Indien, de l'Afrique et de l'Atlantique. Lorsque les anticyclones sont plus fréquents dans les moyennes latitudes du Pacifique Nord, une anomalie de la circulation des vents dans le sens anticyclonique se manifeste sur le Pacifique Nord induisant des températures de l'air à 2 mètres plus froides le long de la côte ouest de l'Amérique du Nord et inversement des températures plus chaudes depuis le Japon jusqu'au centre du Pacifique Nord. Les conditions

atmosphériques dans les tropiques sont bien connectées avec les anticyclones des moyennes latitudes du Pacifique Nord avec des températures plus froides dans les Tropiques (La Niña) lorsque les anticyclones sont plus nombreux et inversement des anticyclones moins nombreux sont associés à des températures plus chaudes dans les Tropiques (El Niño).

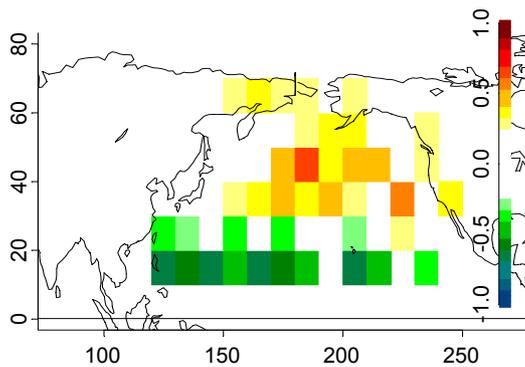
(a) Indice CP1-FA.NCEP-NCAR (12%)



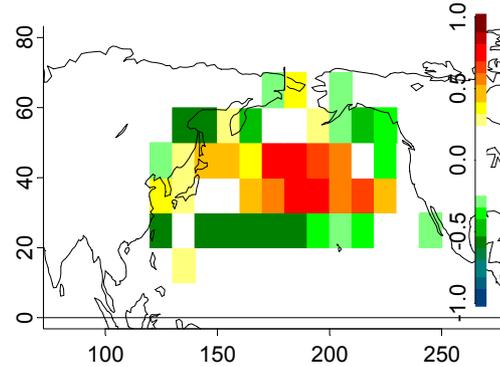
(b) Indice CP1-FA.CNRM-CM3 (17%)



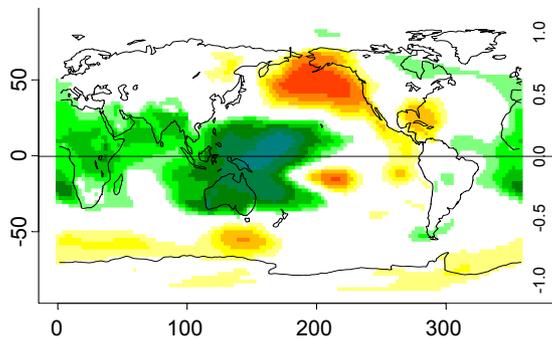
(c) Cor (Indice CP1-FA.NCEP-NCAR, Freq.A)



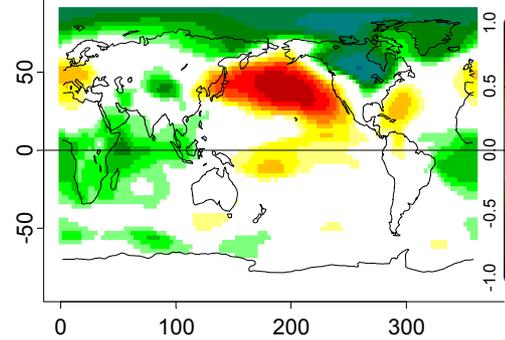
(d) Cor (Indice CP1-FA.CNRM-CM3, Freq.A)



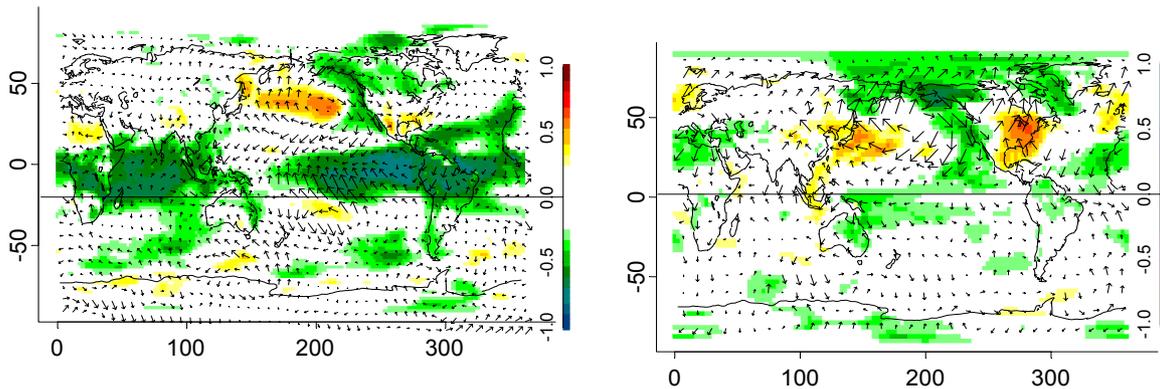
(e) Cor (Indice CP1-FA.NCEP-NCAR, PNM)



(f) Cor (Indice CP1-FA.CNRM-CM3, PNM)



(g) Cor (Indice CP1-FA.NCEP-NCAR, Ta2m&v10m) (h) Cor (Indice CP1-FA.CNRM-CM3, Ta2m&v10m)



(i) Cor (Indice CP1-FA.NCEP-NCAR, T&P)

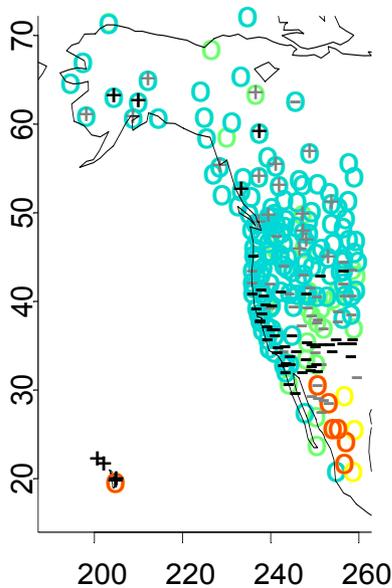


Figure 7.8. Première composante principale de la fréquence des anticyclones, indices CP1-FA (a, b), carte des coefficients de corrélation linéaire entre les indices précédents et la fréquence des anticyclones (c, d), les pressions au niveau de la mer (e, f), les températures de l'air à 2 m et le vent à 10m (g, h). Les couleurs = corrélations sig. > 95%.

A gauche d'après les Réanalyses et à droite d'après la simulation XX1 du modèle CNRM-CM3.
(i) carte des coefficients de corrélation linéaire entre l'indice CP1-FA.NCEP-NCAR et les températures minimales (cercles jaunes / verts, rouges / bleus correspondent à des coef. positifs / négatifs, sig. > 95% , sig. > 99% respectivement) et les cumuls des précipitations (signes + / - correspondent à des coef. positifs / négatifs, gris = sig. > 95% et noirs = sig. > 99%).
JFM 1950-99

Les relations entre les fréquences des anticyclones des moyennes latitudes du Pacifique Nord et le climat de l'Amérique du Nord-Ouest montrent tout d'abord que des anticyclones plus fréquents entre 30°N et 50°N (phase positive de CP1-FA.NCEP-NCAR) sont associés à des températures plus froides sur l'Ouest de l'Amérique du Nord (excepté pour quelques stations mexicaines). La structure des corrélations avec les précipitations montre des conditions moins pluvieuses au sud de 45°N, approximativement, mais plus humides sur les régions se situant au nord de 45°N. Dans ce cas, l'opposition nord-sud dans la structure des corrélations est peut-être due au fait que lorsque les anticyclones sont plus nombreux entre 30°N et 50°N, les dépressions sont généralement moins creuses dans le Pacifique Nord-Est et moins nombreuses entre 30°N et 50°N mais plus nombreuses dans le Golfe de l'Alaska, au large de la Colombie Britannique. Par conséquent, ces dépressions sont davantage susceptibles de générer des précipitations au nord de 45°N.

Dans le modèle CNRM-CM3, la première composante de la fréquence des anticyclones (17% de la variance totale) est relativement similaire à celle des Réanalyses et montre que lorsque les anticyclones sont plus nombreux dans la zone 30°N-50°N du Pacifique

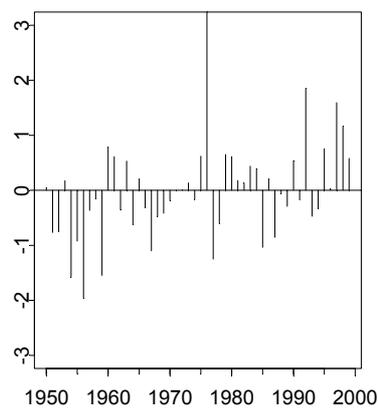
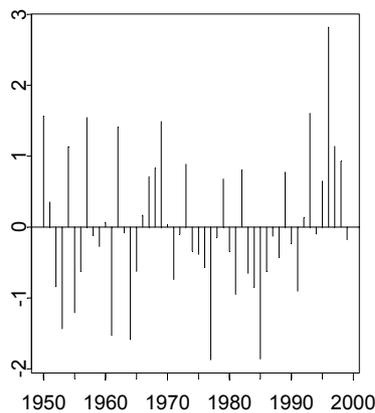
et surtout sur le secteur central, ils tendent à être moins nombreux au niveau de la Mer d'Okhotsk, du Golfe de l'Alaska ainsi que dans la zone 20°N-30°N (Figure 7.8 et cf. Annexes, figure A7.9). Ce mode varie principalement sur les échelles inter-annuelles.

Les structures spatiales des corrélations entre l'indice CP1-FA.CNRM-CM3 et les PNM, Ta2m et v10m sont approximativement identiques (avec des signes opposés) à celles associées au premier mode de variabilité de la fréquence des dépressions (CP1-FD.CNRM-CM3). Des anticyclones plus fréquents entre 30°N et 50°N révèlent des PNM plus fortes sur le Pacifique Nord induisant une anomalie dans le sens anticyclonique de la circulation des vents, avec des anomalies de vent de nord et des Ta2m plus froides le long de la côte ouest nord-américaine et des anomalies de vent de sud sur l'Ouest du Pacifique Nord avec des Ta2m plus chaudes dans la région de Kuroshio. Dans la zone équatoriale du Pacifique occidental, les Ta2m sont plus froides. Les téléconnexions avec le domaine tropical sont moins fortes que dans les Réanalyses.

- le deuxième mode de la fréquence des anticyclones

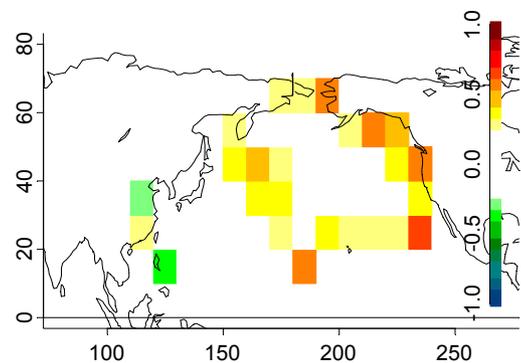
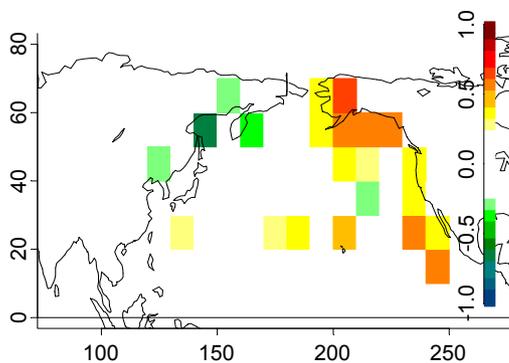
Dans les Réanalyses NCEP-NCAR, le second régime (CP2-FA. NCEP-NCAR, 7% de la variance totale) montre que lorsque les anticyclones sont plus fréquents le long des côtes nord-américaines et plus spécifiquement sur l'Alaska et dans le Golfe de l'Alaska, ils sont moins nombreux dans le secteur de la Mer d'Okhotsk / Kamchatka (Figure 7.9 et cf. Annexes, Figure A7.10).

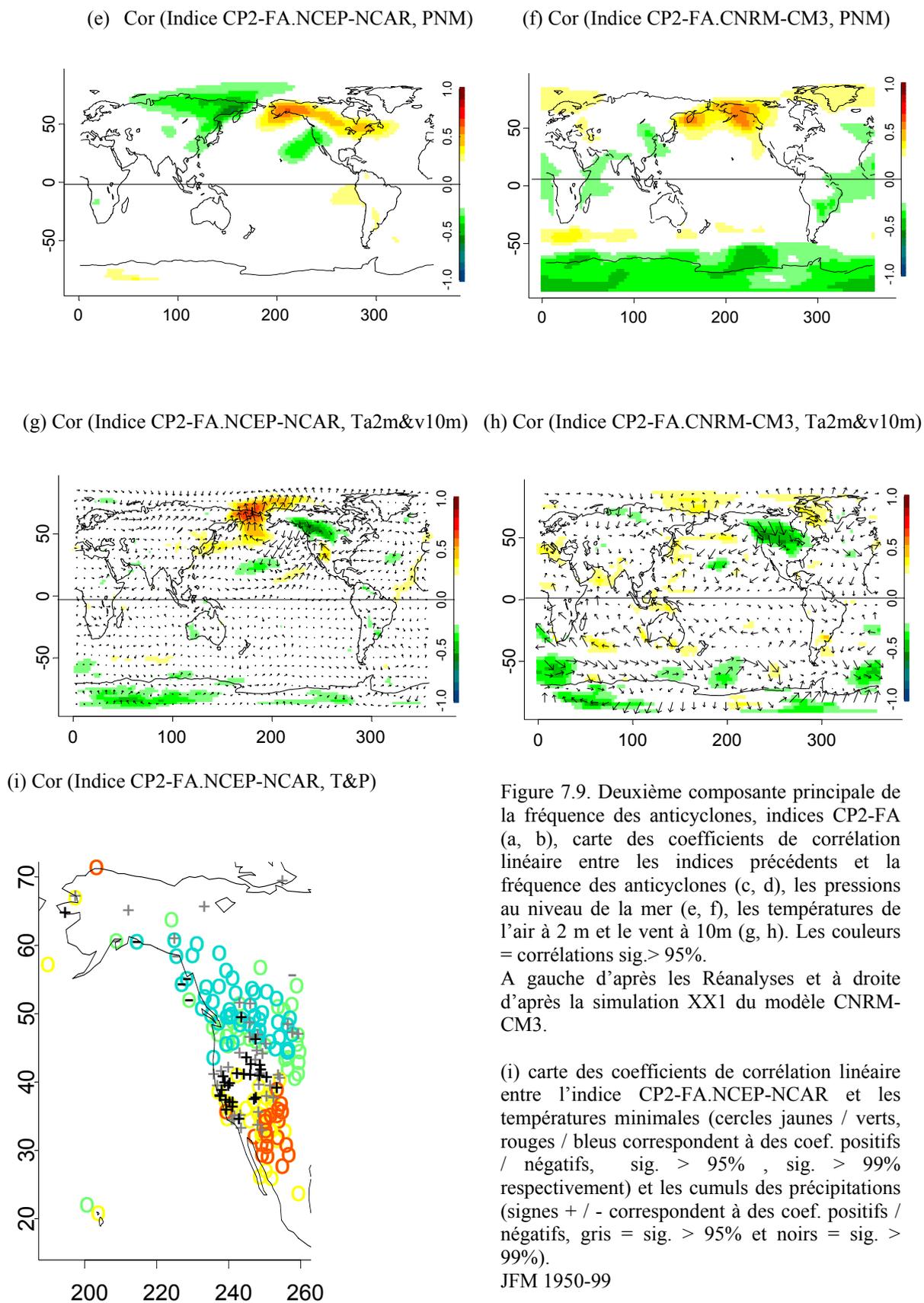
(a) Indice CP2-FA.NCEP-NCAR (7%) (b) Indice CP2-FA.CNRM-CM3 (8%)



(c) Cor (Indice CP2-FA.NCEP-NCAR, Freq.A)

(d) Cor (Indice CP2-FA.CNRM-CM3, Freq.A)





L'indice CP2-FA.NCEP-NCAR montre que le long de la côte ouest de l'Amérique du Nord, et particulièrement dans le Golfe de l'Alaska, la fréquence des anticyclones est très variable d'un hiver à l'autre durant les années 50 et 60, puis, à partir de 1970 jusqu'à la fin des années 90, ils sont moins nombreux et finalement à partir de 1993, ils deviennent plus fréquents (variabilité décennale).

Ce mode est associé à des PNM plus fortes sur l'Alaska et le Canada, et à des PNM plus faibles sur le Nord-Est de la Sibérie ainsi que sur le secteur situé entre Hawaii et la côte Ouest des Etats-Unis. Une anomalie de la circulation des vents dans le sens anticyclonique est centrée sur l'Alaska induisant des anomalies de vent de nord dans le Golfe de l'Alaska et des températures plus froides sur les Etats de la Colombie Britannique, l'Alberta et le Saskatchewan, et, des anomalies de vent de sud sont accompagnées par des températures plus chaudes sur le secteur allant de la Mer de Béring jusque dans la Mer des Tchouktches. Nous pouvons également noter la présence d'anomalies de vents de sud entre Hawaii et le Sud-Ouest des Etats-Unis. Ce mode correspond à des dépressions moins nombreuses sur l'Est des Aléoutiennes mais plus nombreuses entre Hawaii et le Sud-Ouest des Etats-Unis, expliquant aussi ces structures.

La phase positive de l'indice CP2-FA.NCEP-NCAR, correspondant plus spécifiquement à des anticyclones plus nombreux dans le Golfe de l'Alaska, semble défavoriser les précipitations sur le pourtour du Golfe de l'Alaska et être associée à des températures plus froides dans les régions continentales se situant entre 40°N et 65°N. Inversement, les températures apparaissent plus chaudes au sud de 40°N et les précipitations semblent être favorisées en Californie et à l'intérieur de la Cordillère, depuis l'Arizona jusqu'en Colombie Britannique. Comme nous l'avons souligné précédemment, la phase positive de ce mode est associée à des dépressions moins nombreuses dans le Golfe de l'Alaska mais plus fréquentes entre Hawaii et les Etats-Unis, ce qui pourrait expliquer la structure des corrélations avec les précipitations notamment. Ces résultats sont similaires à ceux de Carrera et al. (2004), à propos de l'influence des bocages anticycloniques au niveau du secteur de l'Alaska sur les températures et les précipitations en Amérique du Nord.

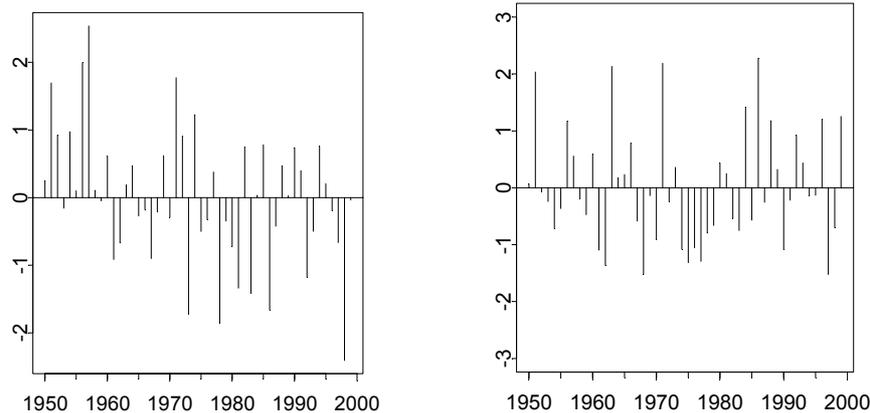
Dans le modèle CNRM-CM3, la deuxième composante (8% de la variance totale) mesure la fréquentation des anticyclones le long de la côte nord-américaine, depuis le Détroit de Béring jusqu'au large de la Basse Californie (Mexique) et aussi depuis la Mer d'Okhotsk jusque dans le secteur d'Hawaii (cf. Annexes, figure A7.11). Cette structure est en certains points assez proche de celle des Réanalyses et montre aussi une certaine variabilité décennale. Ce mode est associé à des PNM plus fortes sur l'Alaska et le Kamchatka, induisant une anomalie dans le sens anticyclonique de la circulation des vents. Les anomalies de vent de nord sur le Canada, sont associées à de Ta2m plus froides. De manière générale, le modèle CNRM-CM3 reproduit correctement les deux premiers modes de la variabilité spatio-temporelle de la fréquence des anticyclones.

7.3.2. Les modes de variabilité de l'intensité des anticyclones

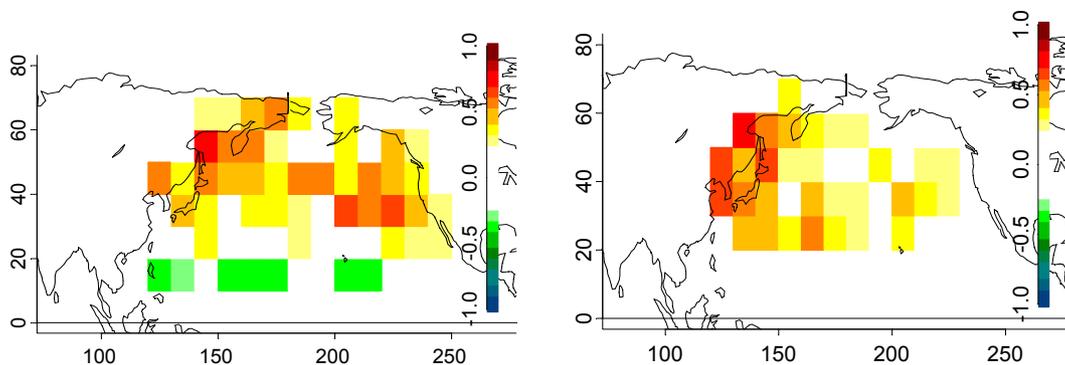
La pression centrale des anticyclones est synthétisée par la première composante principale (CP1-IA.NCEP-NCAR, 14%) mesurant la variation des pressions sur l'ensemble des moyennes latitudes du Pacifique Nord, pour les Réanalyses NCEP-NCAR (Figure 7.10). Dans le modèle CNRM-CM3, les deux premiers modes expliquent la variation de la pression

des anticyclones dans les moyennes latitudes du Pacifique Nord : le premier sur l'Ouest (CP1-IA.CNRM-CM3, 13%) et le second (CP2-IA.CNRM-CM3, 10%) sur l'Est du Pacifique Nord. La première composante de l'intensité des anticyclones (NCEP-NCAR) synthétise la variabilité de la pression des anticyclones sur l'ensemble des moyennes latitudes du Pacifique Nord (Figure 7.12). Comme pour les dépressions, la pression centrale des anticyclones tend à diminuer graduellement au cours de la période 1950-99. Selon le mode CP1-IA.NCEP-NCAR, au cours de la décennie 1950, les anticyclones étaient généralement plus forts. A partir de la fin des années 1950, et jusqu'au début des années 1970, leur pression centrale devient plus variable et finalement, le reste de la période est caractérisé par des anticyclones plus faibles (ex : 1973, 1978, 1981, 1983, 1986, 1992, 1998). La force des anticyclones est bien corrélée avec les PNM sur le Pacifique Nord et également sur la Sibérie, la Mer de Béring et l'Alaska avec des anomalies positives de PNM lorsque la pression centrale des anticyclones est plus forte. Ceci correspond à des températures anormalement froides sur la Sibérie, le long de la côte ouest nord-américaine et dans les Tropiques (La Niña). Les structures des corrélations (PNM, Ta2m et v10m) sont approximativement les mêmes que celles associées à la première composante de la fréquence des anticyclones, à l'exception des conditions atmosphériques sur la Sibérie qui apparaissent significativement corrélées à la pression centrale des anticyclones sur l'ensemble des moyennes latitudes du Pacifique Nord. Nous pouvons ajouter également que des anticyclones plus forts sur le Pacifique Nord correspondent à des dépressions moins nombreuses sur le Pacifique Nord-Est à l'exception du Golfe de l'Alaska ou elles paraissent plus nombreuses (non montré).

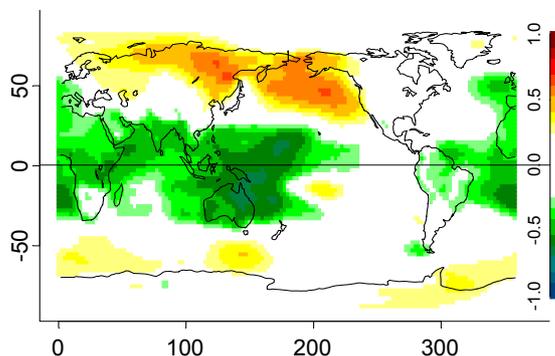
(a) Indice CP1-IA.NCEP-NCAR (14%) (b) Indice CP1-IA.CNRM-CM3 (13%)



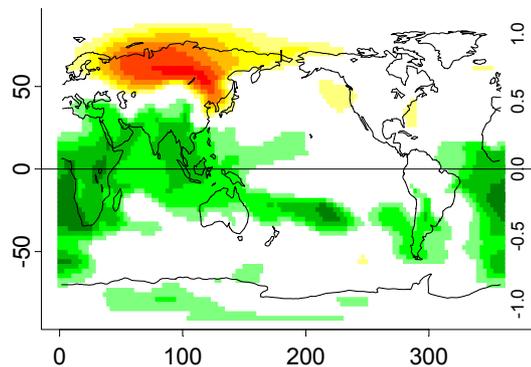
(c) Cor (Indice CP1-IA.NCEP-NCAR, Intensité.A) (d) Cor (Indice CP1-IA.CNRM-CM3, Intensité.A)



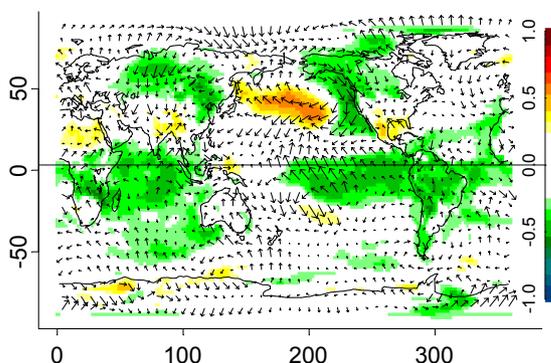
(e) Cor (Indice CP1-IA.NCEP-NCAR, PNM)



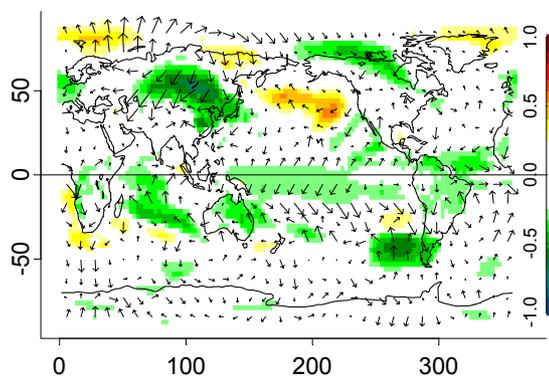
(f) Cor (Indice CP1-IA.CNRM-CM3, PNM)



(g) Cor (Indice CP1-IA.NCEP-NCAR, Ta2m&v10m)



(h) Cor (Indice CP1-IA.CNRM-CM3, Ta2m&v10m)



(i) Cor (Indice CP1-IA.NCEP-NCAR, T&P)

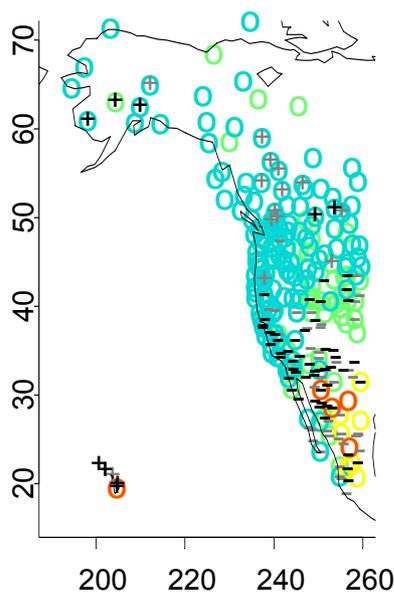


Figure 7.10. Première composante principale de l'intensité des anticyclones (CP1-IA.NCEP-NCAR : intensité = pression centrale pour les anticyclones), indices CP1-IA (a, b), carte des coefficients de corrélation linéaire entre les indices précédents et l'intensité des anticyclones (c, d), les pressions au niveau de la mer (e, f), les températures de l'air à 2 m et le vent à 10m (g, h). Les couleurs = corrélations sig.> 95%. A gauche d'après les Réanalyses et à droite d'après la simulation XX1 du modèle CNRM-CM3.

(i) carte des coefficients de corrélation linéaire entre l'indice CP1-IA.NCEP-NCAR et les températures minimales (cercles jaunes / verts, rouges / bleus correspondent à des coef. positifs / négatifs, sig. > 95%, sig. > 99% respectivement) et les cumuls des précipitations (signes + / - correspondent à des coef. positifs / négatifs, gris = sig. > 95% et noirs = sig. > 99%).

JFM 1950-99

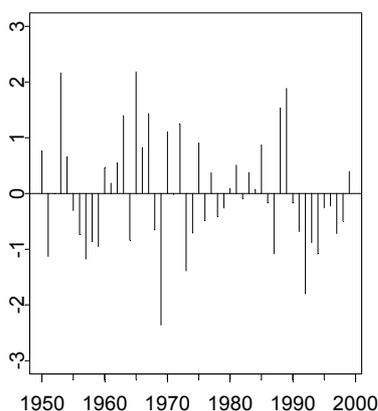
Des anticyclones plus forts dans les moyennes latitudes du Pacifique Nord sont associés à des températures généralement plus froides sur l'Amérique du Nord-Ouest avec des précipitations plus faibles au sud de 45°N approximativement. En revanche au nord de 45°N, les conditions apparaissent plus humides. L'opposition nord-sud dans la structure des corrélations avec les précipitations peut être expliquée (comme nous l'avons souligné précédemment) par le fait que lorsque les anticyclones sont plus forts, les dépressions sont généralement moins nombreuses dans l'Est du Pacifique Nord sauf sur l'Alaska et dans le Golfe de l'Alaska où elles sont généralement plus fréquentes.

Comme nous l'avons souligné précédemment, dans le modèle CNRM-CM3, la variabilité spatio-temporelle de la pression centrale des anticyclones présente deux modes principaux. La première composante de la pression centrale des anticyclones (CP1-IA.CNRM-CM3, figure 7.10) mesure l'intensité des anticyclones sur la quasi-totalité du Pacifique Nord mais plus spécifiquement le long de la côte asiatique, sur le secteur du Japon et la deuxième composante (CP2-IA.CNRM-CM3, figure 7.11) met en opposition l'intensité des anticyclones dans le Pacifique Nord-Est à celle le long de la côte asiatique.

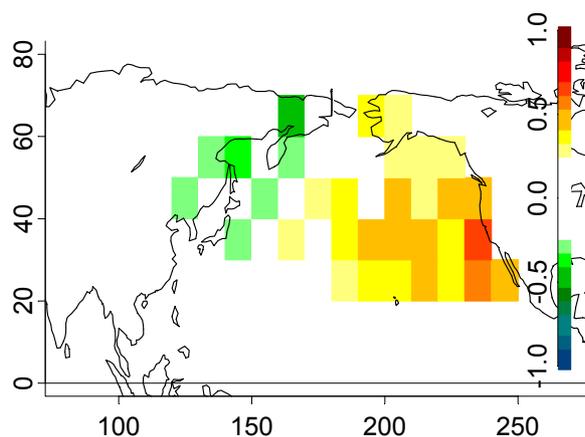
L'indice CP1-IA.CNRM-CM3 varie sur les échelles inter-annuelles en accord avec les PNM et les Ta2m en Sibérie. Ainsi, lorsque les PNM sont plus fortes et les Ta2m plus froides en Sibérie, les anticyclones présentent des pressions centrales plus fortes sur l'Ouest et le centre du Pacifique Nord. Ce premier mode montre également des liens significatifs avec les conditions climatiques dans la zone inter-tropicale à l'échelle globale avec des PNM plus faibles depuis l'Ouest du Pacifique inter-tropical jusque dans l'Atlantique. Les Ta2m sont plus froides dans le Pacifique équatorial ainsi que dans l'Océan Indien et l'Atlantique.

Le deuxième mode de l'intensité des anticyclones (Figure 7.11) montre que lorsque les anticyclones sont plus forts sur le centre et l'Est du Pacifique Nord, ils sont plus faibles le long de la côte asiatique. Ceci correspond à des PNM plus fortes dans le Pacifique Nord et à une anomalie de la circulation des vents dans le sens anticyclonique. Des anomalies de vent de nord et des Ta2m plus froides se manifestent sur l'Alaska et le long de la côte nord-américaine jusque dans la zone inter-tropicale du Pacifique occidental et des anomalies de vent de sud et des Ta2m plus chaudes sont observables au large du Japon. Dans le modèle, la variabilité inter-annuelle de la pression des anticyclones sur le centre et l'Est du Pacifique Nord présente des relations significatives avec les PNM dans le Bassin Arctique.

(a) Indice CP2-IA.CNRM-CM3 (10%)



(b) Cor (Indice CP2-IA.CNRM-CM3, Intensité.A)



(c) Cor (Indice CP2-IA.CNRM-CM3, PNM)

(d) Cor (Indice CP2-IA.CNRM-CM3, Ta2m&v10m)

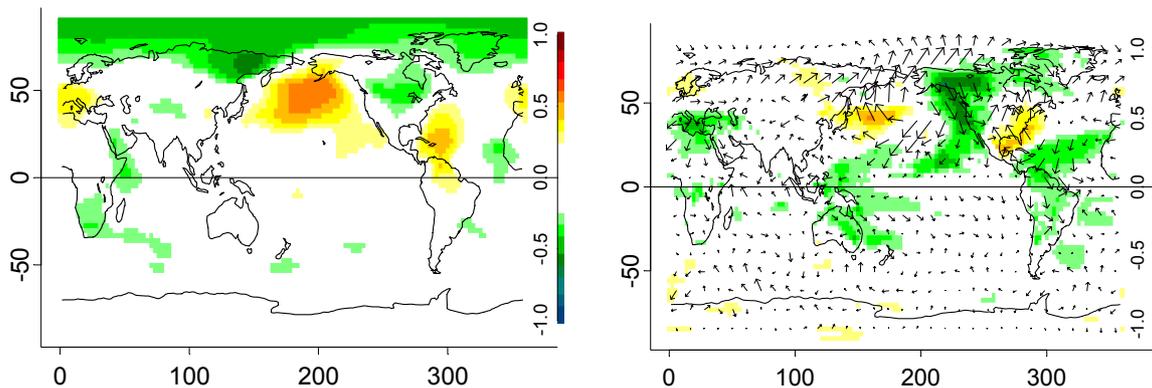


Figure 7.11. Deuxième composante principale de l'intensité des anticyclones (CP2-IA.CNRM-CM3 : **intensité = pression centrale pour les anticyclones**), indice CP2-IA.CNRM-CM3 (a), carte des coefficients de corrélation linéaire entre l'indice CP2-IA.CNRM-CM3 et l'intensité des anticyclones (b), les pressions au niveau de la mer (c), les températures de l'air à 2 m et le vent à 10m (d). Les couleurs = corrélations sig.> 95%. JFM 1950-99, simulation XX1.

Comme pour les dépressions, la variabilité spatio-temporelle des caractéristiques des anticyclones dérivée la simulation XX1 du modèle CNRM-CM3 présente des convergences et des divergences avec celle dérivée des Réanalyses NCEP-NCAR. En ce qui concerne la variabilité spatio-temporelle de la fréquence des anticyclones, le modèle présente deux modes en concordance avec les Réanalyses. Cependant, à propos de l'intensité des anticyclones, dans le modèle, elle varie selon deux modes principaux, distinguant d'une part la variabilité des pressions des anticyclones sur l'Ouest et le centre du Pacifique Nord (présentant des liens significatifs avec l'anticyclone de Sibérie) et d'autre part sur le centre et l'Est du Pacifique Nord (ne présentant pas des liens significatifs avec l'anticyclone de Sibérie). Dans les Réanalyses le premier mode de l'intensité synthétise la variabilité de la pression des anticyclones sur l'ensemble des moyennes latitudes du Pacifique Nord et présente, notamment, des liens avec l'Anticyclone de Sibérie. Enfin, le modèle semble avoir des difficultés à reproduire les relations entre les conditions atmosphériques inter-tropicales du Pacifique et l'activité anticyclonique dans les moyennes latitudes du Pacifique Nord.

L'étude de la variabilité inter-annuelle de l'activité transitoire des moyennes latitudes du Pacifique Nord nous a permis tout d'abord de montrer que la simulation historique du modèle CNRM-CM3 reproduit correctement les structures moyennes de la variation inter-annuelle des caractéristiques des dépressions et des anticyclones. Les relations entre les caractéristiques des transitoires, et notamment l'anti-corrélation entre l'activité dépressionnaire et anticyclonique, sont correctement simulées par le modèle.

Il apparaît que le modèle CNRM-CM3 reproduit de manière cohérente les modes principaux de la variabilité spatio-temporelle des caractéristiques des dépressions et des anticyclones. Cependant, quelques difficultés doivent être soulignées :

- le mode (2) mesurant la variation de la fréquence des dépressions sur l'Est des Aléoutiennes n'est pas reproduit pas le modèle, alors que celui-ci semble être d'une grande importance dans les observations, car il est fortement connecté avec la variabilité de la

dépression des Aléoutiennes et des TSO extra-tropicales et tropicales. Dans les observations, ce mode apparaît donc fondamental car il varie sur les échelles décennales et révèle fortement la rupture climatique des années 70.

- les relations entre la variation des conditions atmosphériques dans la zone inter-tropicale du Pacifique et l'activité transitoire des moyennes latitudes du Pacifique Nord, ne sont pas correctement reproduites par le modèle alors qu'elles sont clairement observables dans les Réanalyses. Il semble donc que le signal ENSO est peu, voire pas, détectable dans les principaux modes de l'activité dépressionnaire et anticyclonique du modèle. Cette remarque rejoint les analyses de Lambert (2002) qui a montré que la plupart des modèles climatiques globaux ne parviennent pas à simuler les relations entre la variabilité de ENSO et l'intensité des cyclones extra-tropicaux à l'échelle de l'Hémisphère Nord. La raison est peut-être due au problème précédemment évoqué.

- le modèle CNRM-CM3 montre une forte relation entre les fréquences des dépressions et des anticyclones des moyennes latitudes du Pacifique Nord et la pression atmosphérique dans les hautes latitudes de l'Hémisphère Nord. Or, cette relation n'apparaît pas dans les Réanalyses NCEP-NCAR.

Après cet effort de validation, le prochain chapitre sera consacré à l'étude de l'évolution de l'activité transitoire des moyennes latitudes du Pacifique Nord dans la simulation SRES-A2 du modèle CNRM-CM3.

Chapitre 8 : L'activité transitoire dans la simulation de type A2 du modèle CNRM-CM3: Conséquences possibles du réchauffement climatique global sur le climat du Pacifique Nord et de l'Amérique du Nord-Ouest

La plupart des projections des MCGAO, forcés par des scénarios simulant une augmentation des gaz à effet de serre, prévoient une diminution de la fréquence des dépressions des moyennes latitudes au cours de la saison hivernale et à l'échelle globale (ex : Zhang et Wang, 1997 ; Sinclair et Watterson, 1999 ; Lambert et Fyfe, 2006 ; Watterson, 2006). Les principales raisons évoquées sont les changements dans la baroclinicité et particulièrement dans la basse troposphère (ex : Lunkeit et al., 1998). Ces modifications sont induites par la réduction des gradients horizontaux de température en raison du plus fort réchauffement prévu dans les hautes latitudes ainsi que sur les continents. Par conséquent, les différences de températures entre les hautes et les basses latitudes et entre les surfaces continentales et océaniques devraient être plus faibles. La réduction des contrastes thermiques serait défavorable à la cyclogenèse. Cependant, dans les conditions d'une atmosphère plus chaude, les modèles prévoient un accroissement de l'humidité. Cet accroissement de la chaleur latente pourrait renforcer certaines dépressions et par conséquent pourrait générer une augmentation de la fréquence des dépressions très creuses (ex : Hall et al., 1994 ; Lambert, 1995 ; Carnell et Senior, 1998 ; Lambert et Fyfe, 2006).

Pour les anticyclones transitoires des moyennes latitudes, très peu d'études (une seule à notre connaissance sur l'Hémisphère Nord) sont consacrées à l'évolution de leurs caractéristiques dans un contexte d'augmentation des gaz à effet de serre (GES). Selon Zhang et Wang (1997), la diminution de la fréquence des dépressions prévue sera accompagnée également par une diminution de la fréquence des anticyclones à l'échelle de l'Hémisphère Nord et au cours de la saison hivernale (étude basée sur la première version du NCAR Community Climate Model).

Dans ce chapitre nous allons étudier l'évolution de l'activité dépressionnaire / anticyclonique des moyennes latitudes du Pacifique Nord en hiver dans un contexte de forte augmentation des gaz à effet de serre, d'après la simulation SRES-A2 de modèle CNRM-CM3 (période 2050-2099). Nous comparons tout d'abord les conditions climatiques moyennes en surface et proche de la surface ainsi que la climatologie des dépressions et des anticyclones dérivées de la simulation historique (XX1) et de la simulation SRES-A2 du modèle CNRM-CM3 (section 8.1). Enfin, nous analyserons comment la variabilité inter-annuelle des modes de l'activité dépressionnaire / anticyclonique pourrait évoluer dans un contexte de forte augmentation des gaz à effet de serre et quelles pourraient être les conséquences envisageables sur le climat de l'Amérique du Nord-Ouest (section 8.2).

8.1. Conditions moyennes projetées par le modèle CNRM-CM3 selon le scénario SRES-A2

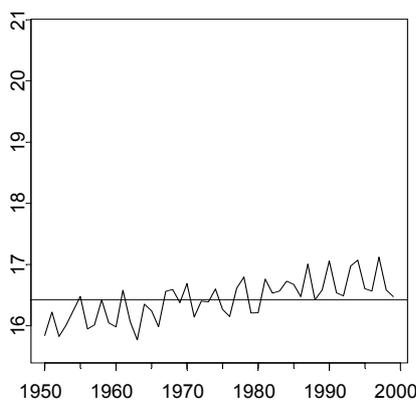
Dans l'objectif d'envisager les modifications des conditions moyennes du climat hivernal de surface et proche de la surface dans le Pacifique Nord dans un contexte de fort réchauffement climatique global, nous comparerons les champs moyens des PNM, Ta2m et v10m (section 8.1.1) ainsi que la fréquence et l'intensité des dépressions et des anticyclones (section 8.1.2) dérivés de la simulation historique (XX1) et de la simulation SRES-A2 du modèle CNRM-CM3.

8.1.1. Champs climatiques moyens en surface et proche de la surface : comparaison entre les simulations XX1 et SRES-A2

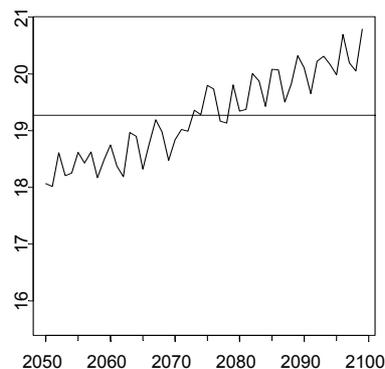
Dans un contexte de fortes émissions de gaz à effet de serre (SRES-A2) le modèle CNRM-CM3 prévoit une tendance au réchauffement plus marquée dans la simulation SRES-A2 avec une augmentation de 2.42°C (tendance linéaire) sur la période 2050-99 contre 0.8°C sur la période 1950-99 (XX1)²⁵. Ainsi, la température hivernale globale est plus chaude dans la simulation SRES-A2, s'élevant à 19.27°C au cours de la période 2050-2099 contre 16.42°C, au cours de la période 1950-1999 (Figure 8.1).

Le réchauffement est observable sur la quasi-totalité du globe, à l'exception de la région se situant au sud et sud-ouest du Groenland ainsi que du Détroit de Davis où l'on observe un refroidissement, peut-être dû à un feed-back négatif de la circulation océanique (Figure 8.2). Les températures sont donc généralement plus chaudes mais le réchauffement est plus fort dans l'Hémisphère Nord que dans l'Hémisphère Sud. De plus, l'augmentation des températures apparaît clairement plus marquée sur les continents que sur les océans.

(a) Ta2m Globale
CNRM-CM3 XX 1 (Moy. = 16.42°C)



(b) Ta2m Globale
CNRM-CM3 SRES-A2 (Moy. = 19.27°C)



²⁵ A titre de comparaison, cf. Annexes, figure A8.1.

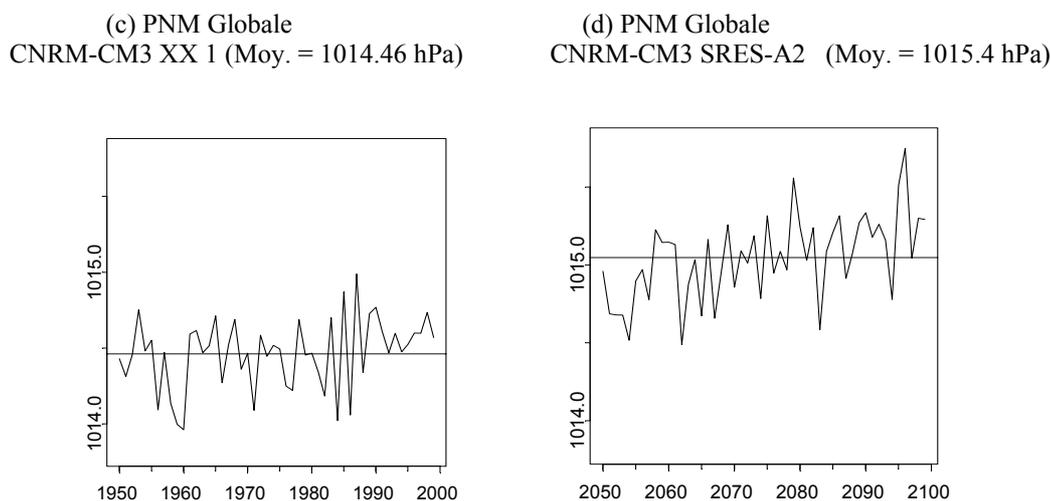


Figure 8.1 : Evolution de la température de l'air à 2 m globale (a, b) et de PNM (c, d) d'après la simulation XX1 (à gauche, de 1950 à 1999) et la simulation SRES-A2 (à droite, de 2050 à 2099) du modèle CNRM-CM3 en JFM.

Toujours à l'échelle globale, le modèle prévoit des PNM moyennes légèrement plus fortes dans la simulation SRES-A2 (1015.04 hPa) que dans la simulation XX1 (1014.46 hPa). Cette légère augmentation des PNM à l'échelle globale pourrait résulter de l'augmentation de la vapeur d'eau dans l'atmosphère, due au fort réchauffement.

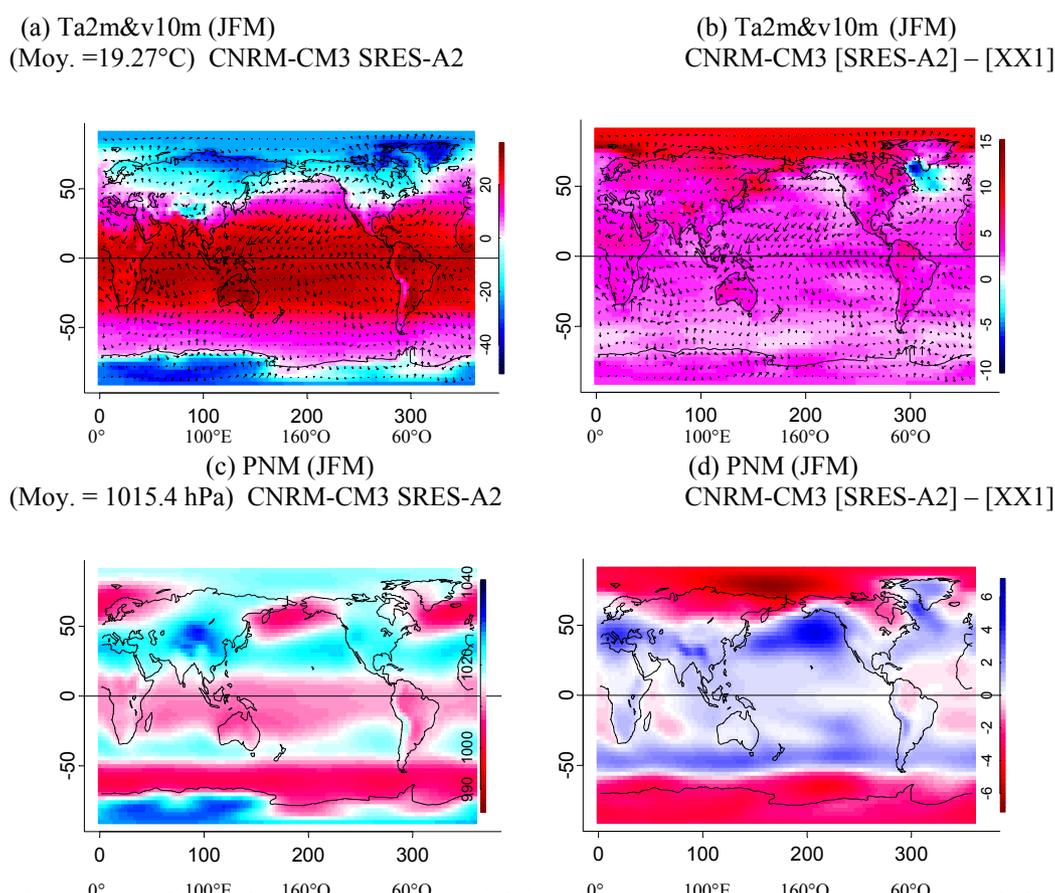


Figure 8.2 : Moyenne hivernale de la température de l'air à 2 mètres et du vent à 10 mètres (a) et de la pression au niveau de la mer (b), de 2050 à 2099 d'après la simulation SRES-A2 du modèle CNRM-CM3. Différence entre la simulation SRES-A2 et XX1 du modèle CNRM-CM3 (b et d).

Régionalement, les PNM apparaissent plus faibles dans les hautes latitudes Nord et Sud selon la simulation SRES-A2. C'est au niveau du Bassin Arctique que la diminution des pressions risque d'être la plus forte notamment sur les mers de Laptev, de Sibérie orientale et des Tchouktches. Entre 30°N-50°N et 30°S-50°S, le modèle prévoit des PNM généralement plus fortes. Enfin, dans la zone inter-tropicale, les PNM sont légèrement plus fortes sur l'Est de l'Océan indien, le Pacifique (à l'exception de la zone NINO où les PNM moyennes ne changent pas) ainsi que sur l'Afrique australe et orientale. Inversement elles sont légèrement plus faibles sur l'Atlantique.

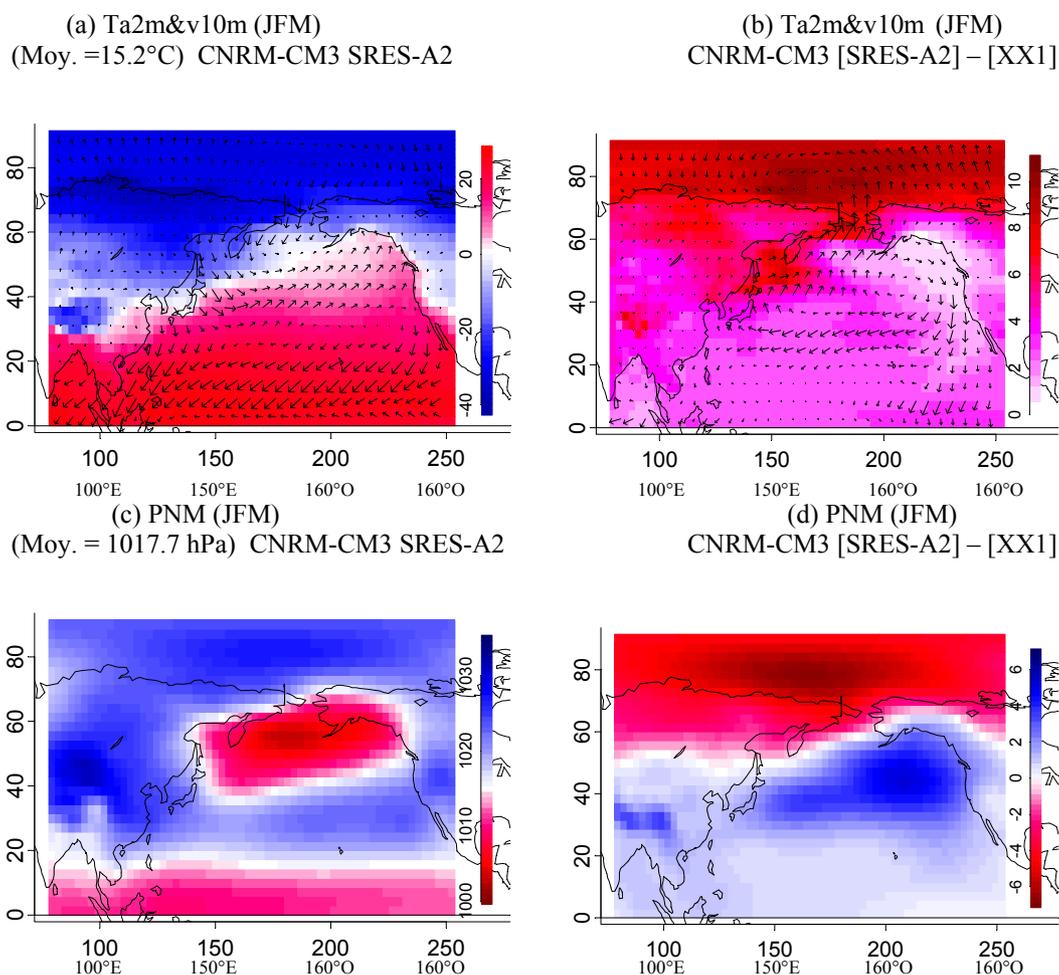


Figure 8.3: Moyenne hivernale de la température de l'air à 2 mètres et du vent à 10 mètres (a) et de la pression au niveau de la mer (b), de 2050 à 2099 d'après la simulation SRES-A2 du modèle CNRM-CM3 pour l'espace 0°N-90°N / 80°E-110°O. Différence entre la simulation SRES-A2 et XX1 du modèle CNRM-CM3 (b et d).

Dans le secteur Asie orientale / Pacifique Nord, quelques précisions régionales peuvent être apportées à propos des conditions moyennes de surface projetées par le modèle CNRM-CM3 selon le scénario SRES-A2 (Figure 8.3). En moyenne, le réchauffement apparaît être plus fort dans les hautes latitudes, sur le Bassin Arctique et sur le Nord de la Sibérie avec des températures plus chaudes en moyenne de +6°C à +10°C. Sur le Pacifique Nord, les températures se réchauffent fortement le long de la côte asiatique depuis le Japon jusque dans le Détroit de Béring en passant par la Mer d'Okhotsk (de +5°C à +9°C). En revanche, les températures se réchauffent plus faiblement, de l'ordre de +0.5°C à +1.5°C, le long de la côte ouest de l'Amérique du Nord, depuis le Golfe de l'Alaska jusqu'au large de la Basse Californie (Mexique).

En ce qui concerne les pressions au niveau de la mer, le modèle prévoit des PNM plus fortes sur l'ensemble du Pacifique Nord et spécifiquement sur la partie Orientale (de +2 hPa à +5 hPa). Cette augmentation des PNM sur l'Est du Pacifique Nord est accompagnée d'une réduction de la variation inter-journalière de la pression en particulier dans le Golfe de l'Alaska et sur le Nord-Ouest de l'Amérique du Nord (cf. Annexes, figure A8.2).

Inversement, les PNM sont plus faibles dans les hautes latitudes, au niveau de la Sibérie et dans le Bassin Arctique, particulièrement sur les mers de Laptev, de Sibérie orientale et des Tchouktches (de -2 hPa à -7 hPa). Sur le Pacifique Nord, les pressions plus fortes sont associées à une anomalie de circulation des vents dans le sens anticyclonique centrée sur l'Est du Pacifique Nord (approximativement 40°N-150°O). Le long de la côte ouest de l'Amérique du Nord, les anomalies de composante nord des vents pourraient expliquer la pondération du réchauffement des températures depuis la côte du Golfe de l'Alaska jusqu'en Californie. Inversement, le long de la côte asiatique, les anomalies de composante sud des vents pourraient contribuer à renforcer le réchauffement des températures depuis le Japon jusque dans le Déroit de Béring.

Ainsi, à l'échelle moyenne hivernale et dans un contexte de fort réchauffement climatique et selon le modèle CNRM-CM3, l'Anticyclone semi-permanent de Sibérie pourrait être affaibli dans sa partie septentrionale mais au contraire renforcé dans sa partie méridionale (effet dynamique). La dépression des Aléoutiennes pourrait être plus faible dans sa partie méridionale et orientale mais plus intense le long de la côte asiatique depuis la Mer d'Okhotsk jusqu'au niveau du Déroit de Béring. Enfin, l'anticyclone sub-tropical pourrait être plus fort notamment entre Hawaii et la Californie.

8.1.2. Évolution de la climatologie hivernale de l'activité transitoire selon le scénario SRES-A2

- Fréquence et intensité des dépressions

Dans le scénario SRES-A2 du modèle CNRM-CM3, la répartition géographique moyenne de la fréquence des dépressions par cellule apparaît relativement similaire par rapport à la simulation historique (cf. chapitre 6 et Figure 8.4). Cependant, dans la simulation SRES-A2, la zone de fréquentation des dépressions semble rétractée notamment dans sa partie méridionale.

La fréquence des dépressions est significativement réduite dans les latitudes 30°N-50°N ainsi que dans le Golfe de l'Alaska et inversement, significativement renforcée depuis le Kamchatka jusque dans le Déroit de Béring. Les trajectoires de dépressions, qui atteignent les moyennes latitudes du Pacifique Nord (zone A) sont moins nombreuses dans la simulation SRES-A2 avec une réduction de 7.5% par rapport à la simulation XX1 (Tableau 8.1). Ces dépressions ont une durée de vie totale (pour l'ensemble des trajectoires) qui reste inchangée mais qui est significativement réduite (t-test) dans les moyennes latitudes du Pacifique Nord (zone A), d'environ 13%. Ainsi, la fréquence moyenne des dépressions (points d'impact journaliers) est plus faible dans la zone A de l'ordre de 14%. Cette réduction est significative, comme nous l'avons précisé précédemment, depuis l'Est du Japon jusqu'au large des côtes des Etats-Unis (entre 30°N et 50°N) ainsi que dans le Golfe de l'Alaska. Nous pouvons également souligner que dans les latitudes les plus basses (inférieures à 30°N), la diminution

est très marquée car selon le scénario SRES-A2 du modèle CNRM-CM3, au cours de la période 2050-99, les dépressions ne circulent plus entre 20°N et 30°N à l'ouest de 160°O (-100%, cf. Annexes, figure A8.3).

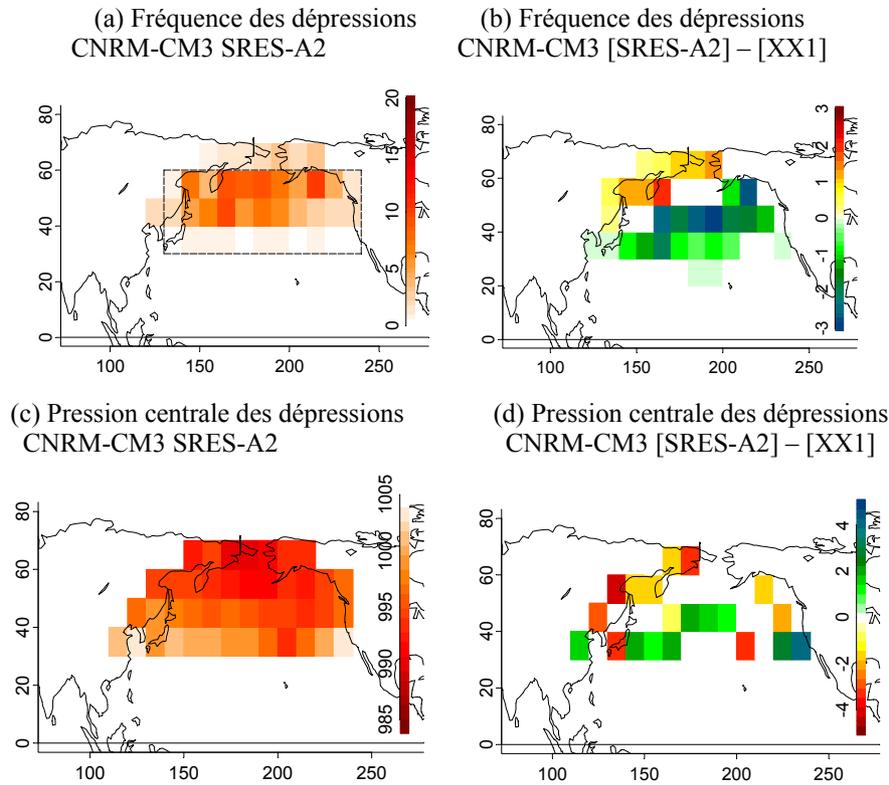


Figure 8.4 : Fréquence moyenne hivernale des dépressions dans la simulation SRES-A2 (a). Différence de la fréquence moyenne des dépressions entre la simulation SRES-A2 et la simulation XX1 (b, couleur = sig. > 95%). Pression centrale moyenne des dépressions dans la simulation SRES-A2 (c). Différence de la pression centrale moyenne des dépressions entre la simulation SRES-A2 et la simulation XX1 (d, couleur = sig. > 95%).

Ainsi, les trajectoires des dépressions qui atteignent les moyennes latitudes du Pacifique Nord sont moins nombreuses. Elles tendent à circuler davantage sur le Nord-Ouest du Pacifique Nord et moins au sud de 50°N ainsi que dans le Golfe de l'Alaska. Ceci signifie que la zone barocline (« rail » ou « storm track ») est d'une part moins active dans les moyennes latitudes du Pacifique Nord mais d'autre part plus active sur le Nord-Ouest, entre le Kamchatka et le Détroit de Béring. Cette observation est confirmée par le fait que les dépressions ayant atteint les moyennes latitudes du Pacifique Nord se forment moins souvent sur l'Océan Pacifique mais plus souvent sur le continent asiatique (cf. Annexes, figure A8.4). Après avoir atteint (ou s'être formées dans) les moyennes latitudes du Pacifique Nord, ces dépressions tendent à se combler plus souvent sur le Nord- Nord-Ouest du secteur (Mer d'Okhotsk, Kamchatka et Mer de Béring) et par conséquent moins souvent entre 30°N et 50°N ainsi que dans le golfe de l'Alaska (Tableau 8.1).

Selon le scénario SRES-A2, dans les moyennes latitudes du Pacifique Nord, les dépressions sont en moyenne plus creuses le long de la côte asiatique (de -2 hPa à -4 hPa) ainsi que dans le Golfe de l'Alaska (-2 hPa) et moins creuses depuis l'Est du Japon jusque sur

le centre du Pacifique Nord (de +1 hPa à +2 hPa) ainsi qu'au large des côtes de la Californie (de +3 hPa à +4 hPa).

	CNRM-CM3 XX1	CNRM-CM3 SRES-A2
Nb. traj, ayant atteint la zone A	40 ($\sigma = 5.2$)	37* ($\sigma = 4.2$)
Durée des traj, ayant atteint la zone A (j)	4.4 ($\sigma = 0.4$)	4.5 ($\sigma = 0.4$)
Nb formations dans la zone A	33 ($\sigma = 5$)	26* ($\sigma = 5$)
Nb déclins dans la zone A	34 ($\sigma = 6$)	28* ($\sigma = 5$)
Fréquence dans la zone A	148 ($\sigma = 18$)	127* ($\sigma = 20$)
Pression moyenne dans la zone A (hPa)	995.5 ($\sigma = 1.7$)	995 ($\sigma = 2$)

Tableau 8.1. Caractéristiques moyennes de l'activité dépressionnaire dans les moyennes latitudes du Pacifique Nord (30°N-60°N / 130°E-120°O). Limite de la zone A sur la Figure 8.4.

* différence entre SRES-A2 et XX1 sig. > 95%.

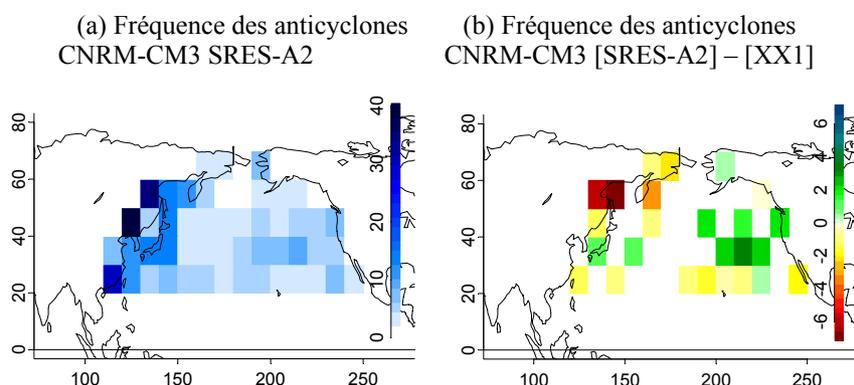
Pour synthétiser, dans un contexte de fort réchauffement global, le modèle CNRM-CM3 prévoit régionalement des dépressions :

- plus nombreuses et plus creuses le long de la côte asiatique ;
- moins nombreuses mais plus creuses dans le Golfe de l'Alaska et au large de la Colombie Britannique et des Etats de Washington et de l'Oregon ;
- moins nombreuses et moins creuses à l'Est du Japon, sur le centre du Pacifique et au large de la Californie.

- Fréquence et intensité des anticyclones

Selon la simulation SRES-A2, le modèle CNRM-CM3 prévoit que le nombre de trajectoires des anticyclones ayant atteint les moyennes latitudes du Pacifique Nord est plus faible de l'ordre de 8% (Tableau 8.2). Leur durée de vie totale reste inchangée mais tend à être plus longue dans les moyennes latitudes du Pacifique Nord (dans la zone A, +7%).

Régionalement, la fréquence des anticyclones (points d'impact journaliers, Figure 8.5) est significativement réduite le long de la côte asiatique, sur la Mer d'Okhotsk, le Kamchatka et l'Est de la Mer de Béring. Les anticyclones sont également moins nombreux dans les basses latitudes spécifiquement dans le secteur de Hawaii (-20%, cf, Annexes, figure A8.3). Inversement, la fréquence des anticyclones sur le Pacifique Nord-Est, entre 30°N et 50°N, est plus forte avec une augmentation de 10 à 60% selon les cellules.



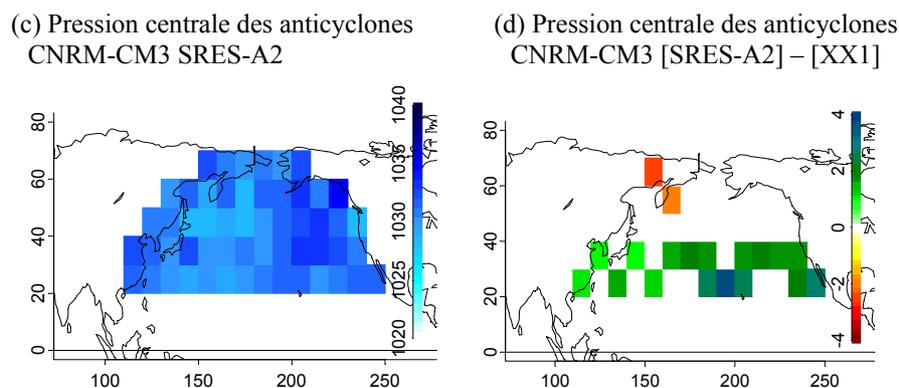


Figure 8.5 : Fréquence moyenne hivernale des anticyclones dans la simulation SRES-A2 (a). Différence de la fréquence moyenne des anticyclones entre la simulation SRES-A2 et la simulation XX1 (b, couleur = sig. > 95%). Pression centrale moyenne des anticyclones dans la simulation SRES-A2 (c). Différence de la pression centrale moyenne des anticyclones entre la simulation SRES-A2 et la simulation XX1 (d, couleur = sig. > 95%).

Dans les moyennes latitudes du Pacifique Nord, la pression centrale des anticyclones apparaît être légèrement plus forte en moyenne (+1 hPa, Tableau 8.2). Régionalement, la pression centrale moyenne des anticyclones (Figure 8.5) est plus faible dans le secteur du Kamchatka / extrême Est de la Sibérie orientale. Inversement, elle est renforcée dans les latitudes inférieures à 40°N notamment dans le secteur de Hawaii.

Pour synthétiser, selon la simulation SRES-A2 du modèle CNRM-CM3, régionalement, les anticyclones sont :

- moins nombreux le long de la côte asiatique au nord de 40°N et moins intenses dans le secteur du Kamchatka / extrême Est de la Sibérie orientale ;
- moins nombreux mais plus forts dans les basses latitudes entre 20°N et 40°N ;
- plus nombreux et plus forts sur le Pacifique Nord-Est entre 30°N et 40°N ;
- plus nombreux avec une intensité inchangée sur le Pacifique Nord-Est entre 40°N et 50°N ;
- moins nombreux avec une intensité inchangée dans le Golfe de l'Alaska.

	CNRM-CM3 XX1	CNRM-CM3 SRES-A2
Nb. traj, ayant atteint la zone A	115 ($\sigma = 15$)	106 ($\sigma = 11.5$)*
Durée des traj, ayant atteint la zone A (j)	3.6 ($\sigma = 0.2$)	3.8 ($\sigma = 0.2$)*
Nb formations dans la zone A	33 ($\sigma = 6$)	29 ($\sigma = 6$)*
Nb déclins dans la zone A	101 ($\sigma = 13$)	94 ($\sigma = 11$)
Fréquence dans la zone A	210 ($\sigma = 35$)	208 ($\sigma = 28$)
Pression moyenne dans la zone A (hPa)	1030 ($\sigma = 1.9$)	1031 ($\sigma = 1.8$)*

Tableau 8.2 : Caractéristiques moyennes de l'activité anticyclonique dans les moyennes latitudes du Pacifique Nord (30°N-60°N / 130°E-120°O). Limite de la zone A sur la Figure 8.4.

* différence entre SRES-A2 et XX1 sig. > 95%.

Nous avons montré que dans un contexte de fort réchauffement climatique global, la répartition géographique moyenne des caractéristiques des dépressions et des anticyclones est relativement conservée. Cependant, les trajectoires des dépressions et des anticyclones, ayant

atteint les moyennes latitudes du Pacifique Nord, tendent à être moins nombreuses. La durée de vie des dépressions dans les moyennes latitudes du Pacifique Nord apparaît légèrement réduite alors que celle des anticyclones augmente légèrement. Les anticyclones tendent à être plus forts dans les latitudes inférieures à 40°N et plus nombreux au large de la côte nord-américaine entre 30°N et 50°N. L'intensité des dépressions est accentuée le long de la côte asiatique et dans le Golfe de l'Alaska mais réduite, à l'Est du Japon, sur le centre du Pacifique Nord au large de la Californie.

L'activité dépressionnaire, tant au point de vue de la fréquence que de l'intensité pourrait être favorisée le long de la côte asiatique et inversement pour l'activité anticyclonique. Dans le Pacifique Nord l'activité dépressionnaire pourrait être généralement diminuée particulièrement en termes de fréquence au profit de l'activité anticyclonique, en termes d'intensité au sud de 40°N et en termes de fréquence dans le Pacifique Nord-Est entre 30°N et 50°N.

Ces modifications de l'activité transitoire et en particulier la diminution de la fréquence de dépressions dans les moyennes latitudes semblent induire une intensification de la composante sud et de la composante nord des vents le long de la côte asiatique et de la côte ouest de l'Amérique du Nord respectivement et des PNM plus fortes sur le Pacifique Nord (cf. section 8.1.1). Par conséquent, le réchauffement des températures pourrait en moyenne être accentué sur la bordure occidentale mais en revanche limité sur la bordure orientale du Pacifique Nord.

8.2. Évolution des modes de la variabilité spatio-temporelle des caractéristiques des transitoires des moyennes latitudes du Pacifique Nord dans la simulation SRES-A2 du modèle CNRM-CM3 : Impacts possibles sur le climat de l'Amérique du Nord-Ouest

Dans un contexte d'augmentation des gaz à effet de serre, l'évolution probable des modes climatiques qui régissent notamment le Pacifique Nord, tels que PDO et ENSO, reste encore incertaine, tout comme l'évolution régionale des climats, car les résultats sont souvent contradictoires en fonction des modèles utilisés. Sur l'Ouest de l'Amérique du Nord, certaines études (ex : Leung et Ghan, 1999 ; Kim et al., 2002 ; Snyder et al., 2002 ; 2004) s'accorderaient tout de même sur le fait que durant la saison hivernale, le fort réchauffement pourrait générer une forte diminution de l'enneigement en raison principalement:

- de l'élévation de la limite pluie / neige ;
- de précipitations sous forme de neige plus tardives en automne ;
- d'une fonte des neiges plus précoce au printemps.

En ce qui concerne l'évolution probable des précipitations hivernales sur l'Ouest de l'Amérique du Nord, les avis divergent partiellement. Certaines études prévoient une augmentation des précipitations hivernales sur la totalité de l'Amérique du Nord-Ouest (ex : Giorgi et al., 1994 ; Kim et al., 2002 ; Diffenbaugh et al., 2005) alors que d'autres résultats montrent plutôt un contraste nord / sud : les précipitations augmenteraient sur les régions

septentrionales et au contraire diminueraient sur les régions méridionales spécifiquement en Californie (Leung et al., 2004 ; Snyder et al., 2004 ; Sewall, 2005).

Dans le but d'estimer les impacts possibles du réchauffement climatique global sur l'activité transitoire et d'évaluer les conséquences possibles sur le climat de l'Amérique du Nord-Ouest, nous allons analyser l'évolution des modes de variabilité de la fréquence et de l'intensité des transitoires observés, dans la simulation SRES-A2 du modèle CNRM-CM3. Nous avons montré dans le chapitre précédant que le modèle CNRM-CM3 présente quelques difficultés à simuler la variabilité spatio-temporelle observée des caractéristiques des transitoires dans les moyennes latitudes du Pacifique Nord. Ainsi, dans le but d'avoir une idée cohérente avec les observations, de l'évolution de la variabilité spatio-temporelle de l'activité transitoire, nous avons projeté les modes de variabilité spatio-temporelle, dérivés des Réanalyses NCEP-NCAR, dans les simulations historique (XX1) et SRES-A2 du modèle CNRM-CM3. Les structures spatiales de la variabilité inter-annuelle de la fréquence et de l'intensité des dépressions et des anticyclones déterminées à partir des champs dérivés des Réanalyses NCEP-NCAR, sont donc projetées dans les champs respectifs des simulations du modèle CNRM-CM3 à la manière d'une « empreinte ». Ainsi, nous étudierons comment pourrait évoluer dans le temps (simulations XX1 et SRES-A2) l'intensité des modes actuels de la variabilité inter-annuelle des caractéristiques des transitoires des moyennes latitudes du Pacifique Nord et évaluer qualitativement quelles pourraient être les conséquences des modifications de l'activité transitoire sur les températures et les précipitations en Amérique du Nord-Ouest. Nous assumons que les structures spatiales restent inchangées dans le temps.

8.2.1. Évolution des modes de la fréquence et de l'intensité des dépressions

Nous avons projeté les structures spatiales des modes de la fréquence et de l'intensité des dépressions PC1-FD NCEP-NCAR, PC2-FD NCEP-NCAR, PC1-ID NCEP-NCAR (cf. Chapitre 7) dans les simulations XX1 SRES-A2 du modèle CNRM-CM3 (dénommés respectivement Mode 1 FD, Mode 2 FD, Mode 1 ID, figure 8.6). Nous pouvons préciser que dans la simulation XX1, chacun de ces modes présente des relations cohérentes avec les PNM, Ta2m et v10m dans le Bassin Pacifique et sont relativement conformes à celles dans les Réanalyses (notamment les relations avec les Tropiques, cf. Annexes figure A8.6, 7, 8).

Dans le chapitre précédant, nous avons montré que dans les observations et selon le premier mode de la fréquence des dépressions (PC1-FD NCEP-NCAR), les relations entre l'activité dépressionnaire des moyennes latitudes du Pacifique Nord et le climat de l'Amérique du Nord-Ouest révèlent tout d'abord que lorsque les dépressions sont plus fréquentes dans la zone 30°N-50°N (phase positive de l'indice PC1-FD NCEP-NCAR), traduisant un transit plus méridional, elles sont davantage susceptibles d'advecter directement l'air tropical et sub-tropical du Pacifique Nord en direction du continent nord-américain. Ainsi, des conditions plus chaudes et plus humides sont observables sur l'Ouest des Etats-Unis et le long de la côte ouest du Mexique. Selon la projection SRES-A2 du modèle CNRM-CM3, la fréquence des dépressions entre 30°N et 50°N (Mode 1 FD) risque d'être significativement réduite au cours de la période 2050-99 (Figure 8.6). Cette observation rejoint les résultats présentés dans la section 8.1.2, qui montrent une claire diminution de la fréquence des dépressions dans les moyennes latitudes du Pacifique Nord dans un contexte de fort réchauffement climatique global. Selon une approche qualitative, cette diminution de la

fréquence des dépressions dans les latitudes 30°N-50°N pourrait partiellement pondérer l'augmentation des températures et être défavorable aux précipitations sur l'Ouest des Etats-Unis (cf. Chapitre 7, figure 7.5e).

Selon le second mode de la fréquence des dépressions, dans les observations, une plus grande concentration des centres dépressionnaires sur l'Est des Aléoutiennes (phase positive de l'indice PC2-FD.NCEP-NCAR) est associée, sur l'Ouest de l'Amérique du Nord, à des températures plus chaudes le long de la côte ouest ainsi qu'à l'intérieur du continent au nord de 45°N approximativement et à des températures plus froides sur le Mexique (cf. chapitre 7, figure 7.6.e). La structure des corrélations des précipitations, relative à cet indice, montre des conditions neutres à plus humides le long de la côte ouest au niveau des Etats de Washington et de l'Oregon et des conditions significativement plus humides sur le Mexique et le long du versant oriental de la Cordillère au sud de 45°N. Inversement, les conditions sont plus sèches à l'intérieur de la Cordillère depuis la Colombie Britannique jusque dans le Nord du Nevada.

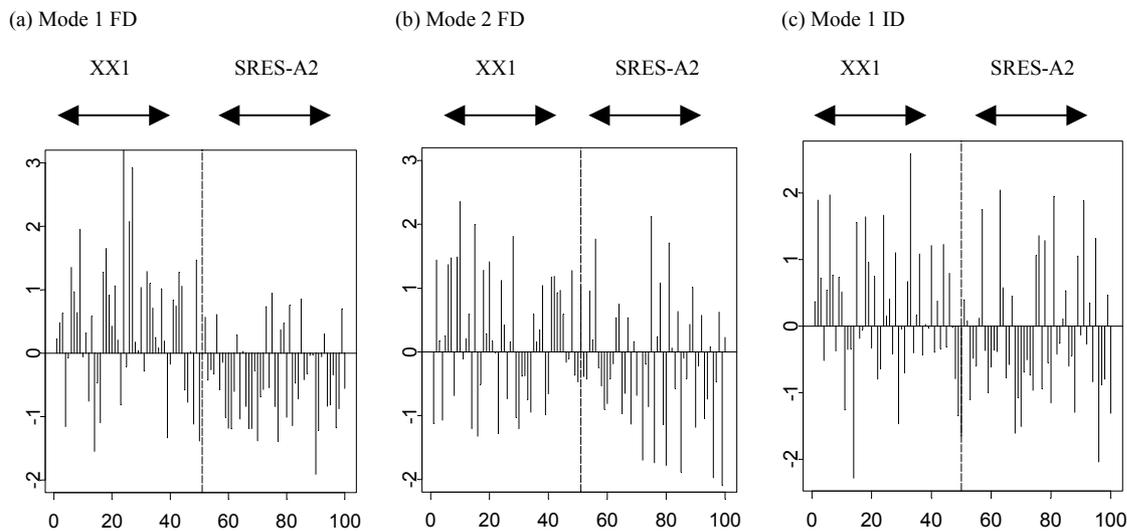


Figure 8.6 : Indice mode 1 (a) mode 2 (b) de la fréquence des dépressions. Indice mode 1 de l'intensité des dépressions (c). Intensité = inverse de la pression centrale pour les dépressions.

La projection de ce second mode dans les simulations XX1 et SRES-A2 (Mode 2 FD), montre que le réchauffement climatique global pourrait induire une diminution de la fréquence des dépressions sur l'Est des Aléoutiennes. Moins de dépressions sur l'Est des Aléoutiennes pourraient contribuer à réduire le réchauffement des températures le long de la côte ouest nord-américaine ainsi que sur les régions se situant au nord de 45°N. Les précipitations pourraient être favorisées dans la zone montagneuse depuis la Colombie Britannique jusque dans le Nord du Nevada, mais en revanche être défavorisées le long de la côte des Etats de Washington et de l'Oregon ainsi que sur le Mexique et le versant oriental de la Cordillère.

Enfin, dans les observations, selon le premier mode de l'intensité des dépressions (PC2-ID.NCEP-NCAR), des systèmes plus creux dans le Pacifique Nord (phase positive de l'indice) sont associés à des températures plus chaudes sur la quasi-totalité de l'Amérique du Nord-Ouest (exceptées certaines stations du Mexique) et à des conditions plus humides sur l'Ouest des Etats-Unis, spécifiquement le long de la côte de Californie ainsi qu'à l'intérieur du continent entre 30°N et 40°N. D'après la projection de ce mode dans les simulations XX1

et SRES-A2 (Mode 1 ID), l'intensité des dépressions pourrait, en moyenne, être légèrement plus faible en raison du réchauffement climatique, ce qui pourrait, en partie, pondérer le réchauffement des températures sur l'Ouest de l'Amérique du Nord et générer des conditions plus sèches entre 30°N et 40°N.

8.2.2. Évolution des modes de la fréquence et de l'intensité des anticyclones

Comme pour les dépressions, nous avons projeté les structures spatiales des modes de la fréquence et de l'intensité des anticyclones PC1-FA NCEP-NCAR, PC2-FA NCEP-NCAR, PC1-IA NCEP-NCAR (cf. Chapitre 7) dans les simulations XX1 SRES-A2 du modèle CNRM-CM3 (dénommés respectivement Mode 1 FA, Mode 2 FA, Mode 1 IA, figure 8.7). De même que pour les dépressions, chacun de ces modes présente des relations cohérentes avec les PNM, Ta2m et v10m dans le Bassin Pacifique et qui sont relativement similaires à celles dans les Réanalyses (cf. Annexes figure A8.9, 10, 11).

Dans les observations, les relations entre les fréquences des anticyclones dans les moyennes latitudes du Pacifique Nord et le climat de l'Amérique du Nord-Ouest suggèrent tout d'abord que plus d'anticyclones dans la zone 30°N-50°N (phase positive de l'indice PC1-FA NCEP-NCAR) est associé à des températures plus froides sur le Nord-Ouest de l'Amérique (à l'exception de certaines stations du Mexique) et à des conditions plus sèches au sud de 45°N approximativement mais à des conditions plus humides sur les régions se situant au nord de 45°N. Selon le modèle CNRM-CM3 et dans le scénario SRES-A2, les anticyclones pourraient être généralement plus fréquents dans le Pacifique Nord entre 30°N et 50°N (Mode 1 FA). Ceci pourrait limiter le réchauffement des températures sur l'Ouest de l'Amérique du Nord et être défavorable aux précipitations au sud de 45°N mais favorable à des conditions plus humides au nord de cette limite approximative.

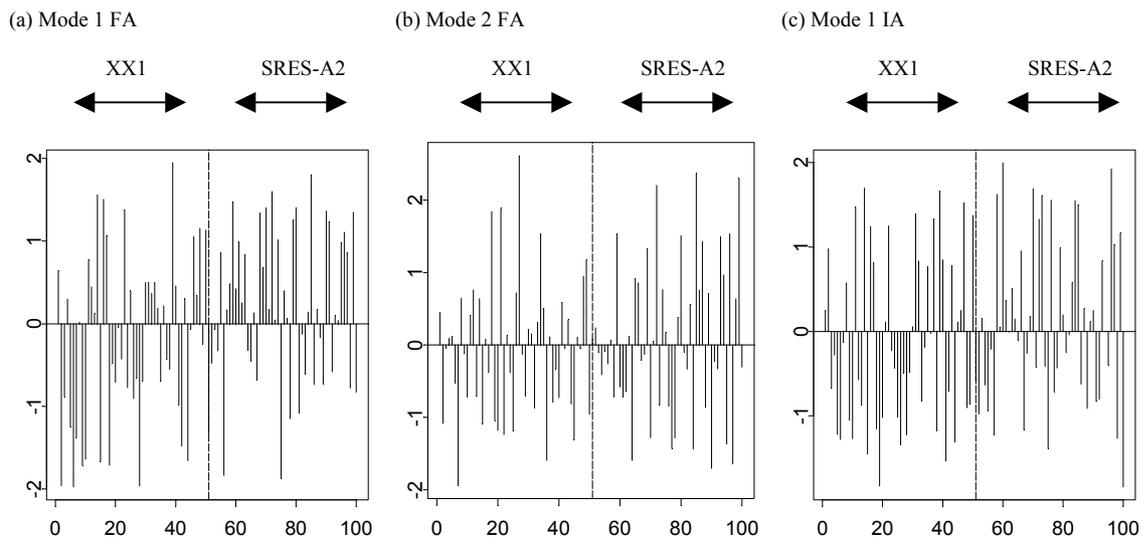


Figure 8.7 : Indice mode 1 (a) mode 2 (b) de la fréquence des anticyclones. Indice mode 1 de l'intensité des anticyclones (c). Intensité = pression centrale pour les anticyclones.

En ce qui concerne le second mode de la fréquence des anticyclones (Mode 2 FA), selon le modèle CNRM-CM3, la variabilité inter-annuelle de l'indice est conservée et aucun changement significatif ne semble se manifester dans le scénario SRES-A2.

Finalement, dans les observations, la phase positive du premier mode de l'intensité des anticyclones (PC1-IA.NCEP-NCAR), signifiant des anticyclones plus forts dans le Pacifique Nord, induit des températures plus froides sur l'Ouest de l'Amérique du Nord. Selon le scénario SRES-A2, le modèle CNRM-CM3 prévoit des anticyclones plus légèrement forts dans les moyennes latitudes du Pacifique Nord (Mode 1 IA). Ainsi, le réchauffement des températures pourrait être limité sur l'Ouest de l'Amérique du Nord. Les précipitations pourraient être favorisées au nord de 50°N approximativement, mais défavorisées au sud de 40°N.

Dans un contexte de fort réchauffement climatique global (selon la simulation SRES-A2 du modèle CNRM-CM3, période de 2050 à 2099), la fréquence des dépressions tend à être plus faible dans les moyennes latitudes du Pacifique Nord et cette observation est clairement confirmée par la projection du premier mode de variabilité de la fréquence des dépressions. De plus, un déclin général de la fréquence des dépressions sur l'Est de l'Aléoutiennes est aussi prévu. Inversement les anticyclones pourraient être plus nombreux sur le centre et l'Est du Pacifique Nord. La force des cyclones et des anticyclones des moyennes latitudes, décroît et augmente légèrement respectivement. Cependant nous devons rappeler que dans le modèle CNRM-CM3, l'intensité des dépressions répond plutôt localement au forçage radiatif dans le modèle avec des cyclones plus creux le long de la côte asiatique ainsi que dans le Golfe de l'Alaska dans un contexte de réchauffement climatique global.

Pour synthétiser, dans un scénario de forte augmentation des gaz à effet de serre, les dépressions ont des trajectoires généralement plus septentrionales et l'activité dépressionnaire, en moyenne, pourrait être décalée vers l'ouest, concernant davantage la côte asiatique. La translation en direction du nord-ouest de la fréquentation moyenne des dépressions pourrait être associée à la formation et/ou à la propagation des anticyclones sur le centre et l'Est du Pacifique Nord. Ces caractéristiques moyennes pourraient contribuer à restreindre le réchauffement des températures le long de la côte ouest de l'Amérique du Nord et être défavorables aux précipitations au sud de 45°N/50°N approximativement, mais être favorables aux précipitations au nord de cette limite.

Malgré une sur-estimation de PNM, induisant une sous-estimation générale de l'activité dépressionnaire dans les moyennes latitudes du Pacifique Nord, la simulation historique du modèle CNRM-CM3 reproduit correctement la répartition spatiale des caractéristiques moyennes des transitoires : les trajectoires, les structures moyennes de la fréquence et de l'intensité.

A l'échelle inter-annuelle, les liens statistiques entre les caractéristiques des dépressions et des anticyclones (spécifiquement l'anti-phase entre la fréquence des dépressions et des anticyclones) sont correctement reproduits par le modèle. Cependant, le modèle présente certaines difficultés à simuler les structures spatiales de la variabilité inter-annuelle des caractéristiques des transitoires. De plus, dans le modèle, l'activité transitoire des moyennes latitudes du Pacifique Nord semble présenter des relations significatives avec la variabilité climatique dans le Bassin Arctique et des relations faibles avec les conditions

climatiques dans les tropiques alors que dans les Réanalyses NCEP-NCAR, c'est l'inverse qui est observé.

D'après le scénario SRES-A2, le modèle CNRM-CM3 prédit des dépressions moins nombreuses dans les moyennes latitudes du Pacifique Nord mais inversement plus nombreuses le long de la côte asiatique depuis la Mer d'Okhotsk jusque dans le Détroit de Béring. Les dépressions pourraient être régionalement plus creuses comme le long de la côte asiatique et dans le Golfe de l'Alaska. Sur le reste du domaine, l'intensité moyenne des dépressions pourrait être inchangée ou diminuée spécifiquement à l'Est du Japon, sur le centre du Pacifique Nord et au large de la Californie.

En ce qui concerne l'activité anticyclonique, le nombre de trajectoires des anticyclones ayant atteint les moyennes latitudes diminue légèrement. Mais ils tendent à avoir une durée de vie plus longue dans les moyennes latitudes (peut-être en raison de leur fusion avec les hautes pressions sub-tropicales). Régionalement, les anticyclones pourraient être moins fréquents le long de la côte asiatique, sur l'Ouest de la Mer de Béring et dans le Golfe de l'Alaska, mais plus fréquents depuis le centre du Pacifique Nord jusqu'aux côtes des Etats-Unis. Leur pression centrale pourrait être légèrement plus forte sur le Pacifique Nord au sud de 40°N mais moins forte dans le secteur du Kamchatka.

D'un point de vue général, des températures plus chaudes sur les continents ainsi que dans les hautes latitudes de l'Hémisphère Nord prédites par les modèles pourraient générer, comme l'ont suggéré des études antérieures, la diminution du gradient thermique nord-sud ainsi que la diminution du contraste thermique continent-océan. Ceci pourrait être défavorable à l'activité dépressionnaire dans les moyennes latitudes du Pacifique central et oriental. Ainsi, selon la projection SRES-A2 du modèle CNRM-CM3, les dépressions apparaissent davantage confinées dans les hautes latitudes et sur l'Ouest du Pacifique Nord, où l'activité des ondes baroclines pourrait être plus souvent présente. La circulation tempérée hivernale pourrait alors être déplacée vers le nord, au détriment, au nord, de la circulation polaire et au profit, au sud, de la circulation sub-tropicale. Sur la partie occidentale du Pacifique Nord, l'accentuation de l'activité dépressionnaire pourrait renforcer le transport sud-nord de chaleur depuis les plus basses vers les plus hautes latitudes, induisant un réchauffement des températures plus marqué et probablement des conditions plus humides le long de la côte asiatique. Inversement, dans le Pacifique Nord-Est, les dépressions pourraient être moins fréquentes et avoir des trajectoires plus septentrionales pénétrant par conséquent moins souvent dans les basses latitudes. Ainsi, les conditions anticycloniques pourraient être plus fréquentes sur le centre et le Nord-Est du Pacifique Nord. Ces modifications de l'activité transitoire pourraient limiter le réchauffement des températures le long de la côte ouest de l'Amérique du Nord et également favoriser et défavoriser les précipitations au nord et au sud de 45°N/50°N respectivement. Cette possibilité converge avec les résultats de Sewall (2005) notamment, qui prédisent une augmentation (diminution) des précipitations sur le Nord-Ouest (Sud-Ouest) de l'Amérique du Nord en réponse au déclin général de la banquise Arctique dû au fort réchauffement prévu dans les hautes latitudes. Selon cette même étude, le déclin de la banquise Arctique causera un décalage vers le nord du passage des dépressions (« storm track ») favorable aux précipitations sur l'Alaska et la Colombie Britannique et défavorable aux précipitations depuis l'Etat de Washington jusqu'en Californie.

Les modèles prévoient également une augmentation générale de l'humidité dans l'atmosphère (IPCC, 2001), ce qui pourrait avoir des influences régionales, selon le modèle CNRM-CM3, sur la force des dépressions avec par exemple des dépressions plus creuses le

long de la côte asiatique et dans le Golfe de l'Alaska, et qui pourrait influencer à leur tour l'intensité des précipitations.

De manière générale, les prévisions du modèle CNRM-CM3 en ce qui concerne l'activité transitoire des moyennes latitudes du Pacifique Nord, dans un contexte de réchauffement, aboutissent à un constat similaire aux études précédentes.

Conclusion générale

Objectifs de la thèse

L'un des buts de ce travail de thèse était d'estimer dans quelle mesure l'activité dépressionnaire et anticyclonique des moyennes latitudes du Pacifique Nord, influence les températures et les précipitations hivernales de l'Amérique du Nord-Ouest. Le diagnostic de la variabilité des caractéristiques hivernales des systèmes transitoires a été mené principalement à partir des Réanalyses NCEP-NCAR mais également à partir du modèle CNRM-CM3, et ce, dans deux simulations : une simulation historique et une simulation conforme au scénario SRES-A2.

Ainsi, nous avons,

- d'une part, étudié l'évolution observée de l'activité transitoire hivernale des moyennes latitudes du Pacifique Nord, au cours de la seconde moitié du 20^{ème} siècle ainsi que les liens avec les températures et les précipitations sur l'Ouest de l'Amérique du Nord,
- et d'autre part, analysé les possibles changements de l'activité transitoire dus à l'augmentation des gaz à effet de serre ainsi que les impacts possibles sur les températures et les précipitations en Amérique du Nord-Ouest.

Synthèse des résultats

1. Schéma automatique d'établissement des trajectoires des dépressions et des anticyclones des moyennes latitudes du Pacifique Nord

A partir des données de la pression au niveau de la mer moyenne journalière, nous avons construit les trajectoires des dépressions et des anticyclones transitoires des moyennes latitudes du Pacifique Nord au cours de la période 1950-2001. La construction des trajectoires des dépressions et des anticyclones transitoires est réalisée grâce à un algorithme que nous avons élaboré. Cet algorithme se compose de deux phases majeures de traitement successives.

- La première phase détermine la position spatiale (longitude / latitude) de tous les minima (dépressions) et maxima (anticyclones) locaux de pression à l'intérieur de chaque champ de la pression moyenne journalière. Les minima inférieurs à 1005 hPa et les maxima supérieurs à 1015 hPa ont été retenus pour cette étude.
- La seconde phase du traitement concerne les connexions inter-journalières des minima et maxima locaux de pression. Les connexions jour après jour permettent d'individualiser des trajectoires. Tous les systèmes transitoires ayant concerné, durant au moins un jour, dans les moyennes latitudes du Pacifique Nord (30°N-60°N / 120°E- 120°O) ont été répertoriés.

2. La climatologie de l'activité transitoire des moyennes latitudes du Pacifique Nord

L'analyse conjointe des paramètres comme la fréquence, l'intensité, la position spatiale, nous a permis de définir la saisonnalité de l'activité transitoire. Une saison hivernale,

centrée sur les mois de janvier, février et mars, s'oppose à une saison estivale centrée sur les mois de juillet, août et septembre.

Durant l'hiver, lorsque le gradient thermique nord-sud est le plus fort, l'activité dépressionnaire est plus intense (pression centrale des dépressions plus faible) et est décalée vers le sud-est. Cette configuration moyenne est alors défavorable à la formation et/ou à la propagation des anticyclones migrants sur le centre et l'Est du Pacifique Nord. Ainsi, l'activité anticyclonique, qui est également plus intense (pression centrale des anticyclones plus forte), reste davantage confinée sur l'Ouest du Pacifique Nord (Figure C).

La saison estivale présente des caractéristiques inverses à celles de l'hiver. Lorsque le gradient thermique nord-sud est réduit, l'activité dépressionnaire est plus faible (pression centrale des dépressions plus forte) et est décalée vers le nord-ouest, concernant davantage l'Ouest du Pacifique Nord. Cette configuration moyenne est alors favorable à la propagation et/ou à la formation des anticyclones, dont l'intensité est en revanche plus faible (pression centrale des anticyclones plus faible), sur le centre et l'Est du Pacifique Nord.

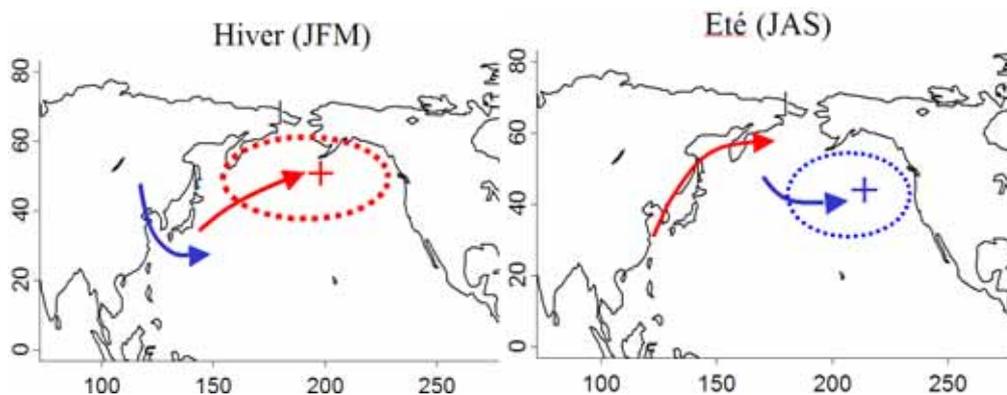


Figure C: Schéma de synthèse de la circulation moyenne des dépressions (en rouge) et des anticyclones (en bleu) en hiver (à gauche) et en été (à droite).

3. La variabilité inter-annuelle de l'activité hivernale dépressionnaire et anticyclonique des moyennes latitudes du Pacifique Nord

En considérant le nombre de trajectoires des systèmes transitoires et leur intensité, nous avons quantifié l'activité dépressionnaire et anticyclonique hivernale du Pacifique Nord-Est sur la période 1950-2001. Il est ressorti de cette analyse que durant la chronique 1950-1976, l'activité dépressionnaire est plus faible et en revanche l'activité anticyclonique est plus forte sur le Pacifique Nord-Est. A partir de 1977, le rapport est inversé avec une intensification de l'activité dépressionnaire au détriment de l'activité anticyclonique. Plus en détail, nous avons observé, durant la période 1950-2001, que la pression centrale des anticyclones au cours de leur trajectoire tend à diminuer significativement de l'ordre de 2 hPa et à partir de 1977, leur incursion sur l'Est du Pacifique Nord devient plus variable d'un hiver à l'autre. Réciproquement, à partir de 1977, les dépressions deviennent substantiellement plus creuses et leur incursion sur le nord-est du Pacifique devient plus variable d'un hiver à l'autre. C'est également à partir du milieu des années 70 que l'anti-phase entre l'activité dépressionnaire et anticyclonique du Pacifique Nord-Est devient significative.

Pour mieux comprendre comment la variation inter-annuelle de l'activité transitoire du Pacifique Nord-Est s'inscrit à l'échelle du Pacifique Nord, nous avons déterminé, dans un second temps, les principaux modes de variabilité spatio-temporelle des champs de la fréquence et de l'intensité des dépressions et des anticyclones. Il en résulte que les

dépansions des moyennes latitudes du Pacifique Nord s'intensifient graduellement depuis 1950 (comme l'ont observé Graham et Diaz, 2001). Cette intensification moyenne est accompagnée de changements dans la géographie de la fréquentation des dépansions :

- elles fréquentent des latitudes plus méridionales à partir des années 60 mais surtout aux cours de la décennie 90 ;
- à partir du milieu des années 70, elles pénètrent davantage vers l'est et deviennent clairement plus fréquentes sur l'Est des Aléoutiennes et au large de la Californie (Figure D et E).

En contre-partie, les anticyclones des moyennes latitudes du Pacifique Nord perdent graduellement de leur intensité et sont de moins en moins fréquents au cours de la période d'étude.

Fréquence et intensité (NCEP-NCAR)

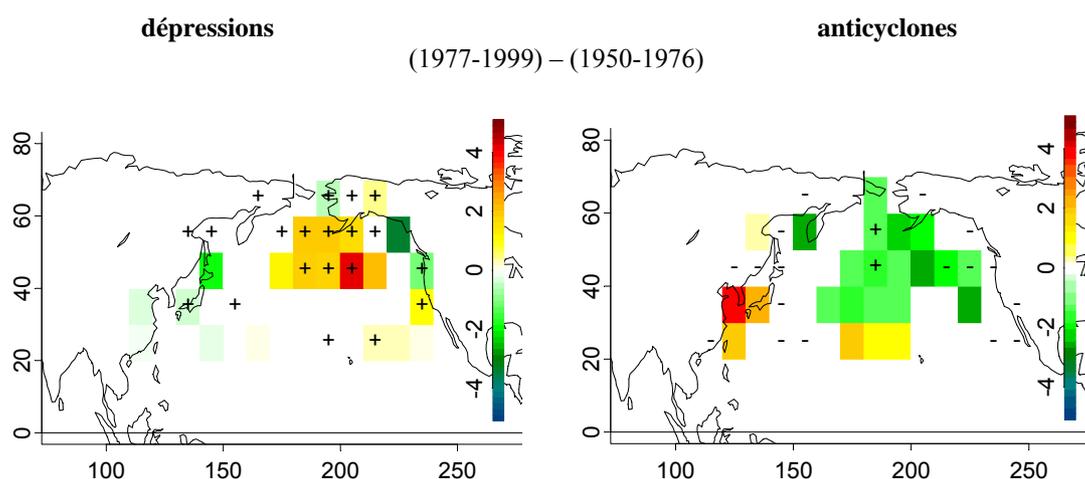


Figure D: Différences significatives (>90%) entre de la période 1977-1999 et la période 1950-1976 de la fréquence (couleurs) et de l'intensité (signes + et -) moyenne des dépansions (à gauche) et des anticyclones (à droite).

Ainsi, la rupture climatique du milieu des années 70 semble se manifester plus spécifiquement sur la partie orientale du Pacifique Nord avec une intensification brutale des dépansions qui circulent sur cet espace. Cette observation semble être induite par le fait que les cyclones extra-tropicaux très creux, originaire du secteur occidental, tendent à pénétrer plus souvent à l'Est de 180° selon Xioje et al. (2006). Ces dépansions se concentrent davantage sur l'Est de Aléoutiennes et sont également plus fréquentes au large de la Californie.

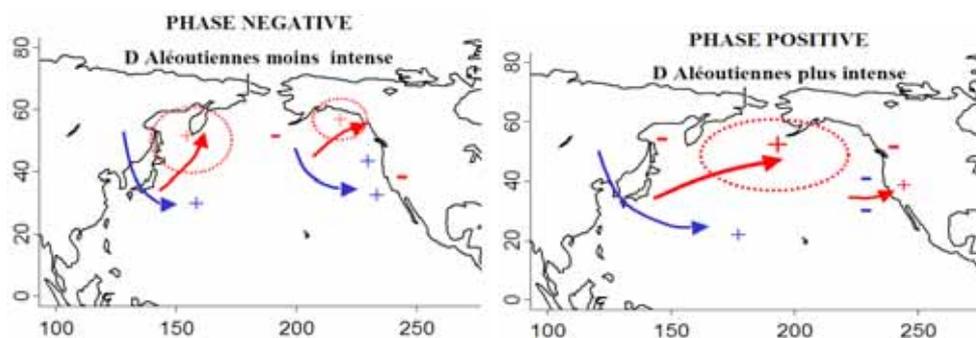


Figure E: Schéma de synthèse de la circulation moyenne des dépansions (en rouge) et des anticyclones (en bleu) en hiver, avant 1977 (à gauche) et après 1977 (à droite).

4. Les liens entre l'activité dépressionnaire / anticyclonique du Pacifique Nord et le climat global

Nous avons établi les relations entre différents indices qui quantifient l'activité transitoire du Pacifique Nord et les paramètres climatiques moyens de surface et proche de la surface ainsi que ceux de la moyenne et la haute troposphère. Nous avons également étudié les relations entre les indices de l'activité transitoire et les modes océaniques et atmosphériques qui régissent le Pacifique Nord tels que Pacific Decadal Oscillation (PDO), El Niño Southern Oscillation (ENSO), North Pacific Index (NPI) et Pacific North America pattern (PNA). Il apparaît que l'activité transitoire du Pacifique Nord varie de manière cohérente avec le climat moyen du secteur Pacifique Nord / Amérique du Nord-Ouest.

Dans le Pacifique Nord-Est, lorsque l'activité dépressionnaire est plus forte et que l'activité anticyclonique est affaiblie, situation observée à partir du milieu des années 70, la dépression des Aléoutiennes est décalée vers l'est et est plus creuse (phase négative de NPI et positive de PNA) induisant une anomalie de la circulation des vents (v_{10m}), dans le sens cyclonique sur l'ensemble du Pacifique Nord. Sur le centre du Pacifique Nord les anomalies de vent de nord sont accompagnées par des températures (T_{a2m}) plus froides, et le long de la côte ouest de l'Amérique du Nord, les anomalies de vent de sud sont associées à des températures plus chaudes qui concernent également l'Alaska et l'Ouest du Canada (phase positive de PDO). A partir du milieu des années 70, cette configuration moyenne de l'activité transitoire du Pacifique Nord-Est est associée à des événements chauds de ENSO (El Niño) et à une structure symétrique de part et d'autre de l'Equateur des PNM, T_{a2m} et v_{10m} .

C'est également à partir du milieu des années 1970, que les relations entre l'activité transitoire et les paramètres moyens de la pression, de la température et du vent sont largement plus marquées, avec des coefficients de corrélation plus forts et des structures plus larges. La variation sur les échelles décennales de la magnitude de l'anti-corrélation entre l'activité dépressionnaire et anticyclonique pourrait contribuer à la variation des structures de corrélation avec les champs climatiques moyens, dans les moyennes latitudes du Pacifique Nord. Depuis le milieu des années 1970, les anomalies de l'activité dépressionnaire et anticyclonique, tendent à créer des impacts de même sens, sur le champ moyen de pression, chaque hiver. Inversement, avant le milieu des années 1970, l'anti-phase est peu voire pas significative, pouvant induire un effet de « neutralisation » des relations entre l'activité transitoire et les champs climatiques moyens.

A l'échelle du Pacifique Nord, les liens entre les caractéristiques de l'activité transitoire et les deux oscillations climatiques principales qui régissent notre espace d'étude, PDO (TSO extra-tropicales²⁶) et ENSO (TSO tropicales), sont les suivants :

- la variabilité nord-sud de la fréquentation des dépressions est en lien avec l'une des composantes de PDO, à savoir avec les TSO entre 20°N et 45°N, qui varient en opposition au niveau du Kuroshio et le long de la côte ouest nord-américaine ;
- la variabilité de la fréquence des dépressions sur l'Est des Aléoutiennes est en lien avec une autre composante de PDO, à savoir avec les TSO au nord de 45°N, qui varient en opposition au niveau de l'Oyashio et le long de la côte ouest nord-américaine, et est également en lien avec les anomalies de ENSO ;
- la variabilité de la fréquence des anticyclones dans les moyennes latitudes du Pacifique Nord est en lien avec PDO et avec ENSO ;

²⁶ Nous devons rappeler que selon Schneider et Cornuelle (2005), PDO synthétise différents modes de la variabilité des TSO extra-tropicales du Pacifique Nord (ex : celui du Kuroshio, Oyashio...)

- l'intensité des dépressions et des anticyclones des moyennes latitudes du Pacifique Nord sont en lien avec PDO et ENSO (modérément) et aussi avec la variation des températures sur la Sibérie pour l'intensité des anticyclones.

5. Influence de l'activité transitoire du Pacifique Nord sur les températures et les précipitations hivernales de l'Amérique du Nord-Ouest

A l'échelle inter-annuelle, l'activité transitoire hivernale explique davantage les températures nocturnes que diurnes sur l'Ouest de l'Amérique du Nord. A partir du milieu des années 70, le renforcement de l'activité dépressionnaire, au détriment de l'activité anticyclonique, sur le Pacifique Nord-Est, contribue à l'augmentation des températures sur l'Ouest de l'Amérique du Nord (à l'exception de certaines stations mexicaines). Ce sont les températures nocturnes qui sont plus fortement affectées, contribuant ainsi, à réduire l'amplitude thermique diurne. De plus, les contrastes thermiques inter-journaliers diminuent également sur l'ensemble du secteur d'étude, en lien avec l'évolution de l'activité transitoire du Pacifique Nord-Est.

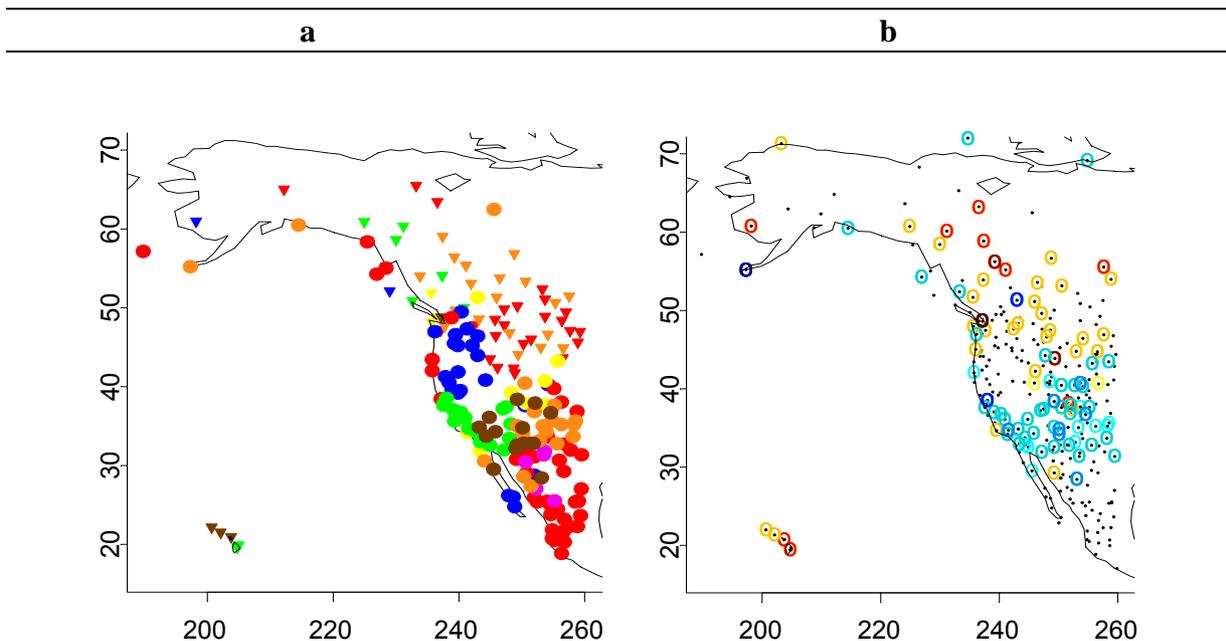


Figure F. Relations entre l'activité dépressionnaire et la fréquence des jours de pluie

a Corrélations significatives (> 95%) positives (cercles) et négatives (triangles), entre la fréquence des jours de pluie et :

- 1- La fréquence des dépressions entre 30°N et 50°N²⁷, en bleu;
- 2- La fréquence des dépressions sur l'Est des Aléoutiennes²⁸, en rouge;
- 3- L'intensité des dépressions dans les moyennes latitudes²⁹, en jaune ;
- 4-Violet : 1 + 2 ; 5-Vert : 1 + 3 ; 6-Orange : 2 + 3 ; 7-Marron : 1+ 2 + 3.

b, tendance observée de la fréquence des jours de pluie sur la période 1950-2001 (reprise de la figure 5.9.b), bleu = tendance positive significative (> 95%), orange : tendance négative significative (> 95%).

L'affaiblissement de l'intensité et de la fréquence des anticyclones, dans les moyennes latitudes du Pacifique Nord, accompagné d'une intensification graduelle des dépressions

²⁷ Reprise de la figure 7.5.i

²⁸ Reprise de la figure 7.6.i

²⁹ Reprise de la figure 7.7.i

(intensité marquée d'une rupture au milieu des années 1970 sur le secteur oriental pour les dépressions), pourraient contribuer, à la tendance au réchauffement observé sur l'Ouest de l'Amérique du Nord (tendance pour la plupart des stations de l'Ouest de l'Amérique du Nord au cours de la période 1950-2001).

L'évolution de l'activité transitoire des moyennes latitudes du Pacifique Nord influence également les précipitations sur l'Ouest de l'Amérique du Nord. Au cours des dernières décennies, les conditions tendent à être plus humides sur le Sud-Ouest des Etats-Unis et plus sèches sur l'Ouest du Canada. Plus précisément (Figure F):

- des dépressions plus fréquentes dans la zone 30°N-50°N, notamment au cours de la décennie 90, sont favorables aux précipitations le long du versant occidental de la cordillère nord-américaine au sud de 50°N, mais défavorables au nord de 50°N;

- depuis 1977, les dépressions sont plus nombreuses sur l'Est de Aléoutiennes ainsi qu'au large de la Californie, et favorisent les précipitations sur certaines stations dans le Golfe de l'Alaska ainsi que sur le sud-ouest des Etats-Unis et sur le Nord du Mexique mais en revanche sont défavorables aux précipitations à l'intérieur du continent au niveau du Canada et sur le Nord des Etats-Unis;

- l'intensification graduelle des dépressions dans les moyennes latitudes du Pacifique Nord (tendance) apparaît comme étant favorable à des conditions plus humides sur le Sud-Ouest des Etats-Unis, mais plus sèches sur l'Ouest du Canada et au Nord des Etats-Unis. L'évolution conjointe des caractéristiques de l'activité transitoire des moyennes latitudes du Pacifique Nord explique bien la structure spatiale des tendances observées au cours de la période 1950-2001 sur l'Ouest de l'Amérique du Nord.

6. Evolution de l'activité transitoire des moyennes latitudes du Pacifique Nord dans un contexte de forte augmentation des gaz à effet de serre et possibles impacts sur les températures et les précipitations en Amérique du Nord-Ouest

D'après la simulation historique, le modèle CNRM-CM3 reproduit correctement les trajectoires et la répartition géographique moyenne hivernale de la fréquence et de l'intensité des dépressions et des anticyclones transitoires des moyennes latitudes du Pacifique Nord. Malgré une sous-estimation de l'activité dépressionnaire en terme de fréquence et d'intensité, le modèle CNRM-CM3 montre comme dans les Réanalyses NCEP-NCAR que la zone de fréquentation des dépressions concerne principalement les latitudes se situant entre 30°N-60°N avec des dépressions très fréquentes surtout entre 40°N et 60°N. Deux secteurs de forte activité se distinguent : le Sud-Est du Kamchatka et le Golfe de l'Alaska. En ce qui concerne leur intensité, c'est dans le secteur des Aléoutiennes, de la Mer de Béring et de l'Alaska que les dépressions sont les plus creuses et plus fortement sur la Péninsule de l'Alaska.

Comme dans les Réanalyses, le modèle montre que les anticyclones sont très fréquents le long du continent asiatique et dans une moindre mesure le long de la côte ouest de l'Amérique du Nord, ainsi que dans la zone sub-tropicale, entre 20°N et 40°N et inversement sont clairement moins fréquents dans la région des Aléoutiennes. L'intensité des anticyclones est plus forte sur le Pacifique Nord-Ouest, depuis la Mer d'Okhotsk jusque sur la Mer de Chine et dans le Pacifique Nord-Est.

L'analyse de la variabilité inter-annuelle de l'activité transitoire des moyennes latitudes du Pacifique Nord montre que le modèle CNRM-CM3 reproduit correctement les structures moyennes de la variation inter-annuelle des caractéristiques des dépressions et des anticyclones. Les relations entre les caractéristiques des transitoires, et notamment l'anti-phase entre l'activité dépressionnaire et anticyclonique, sont correctement reproduites par le modèle. Cependant, il présente des difficultés à simuler les modes principaux de la variabilité spatio-temporelle des caractéristiques des dépressions et des anticyclones à l'échelle du Pacifique Nord. De plus, les relations entre la variation des conditions atmosphériques dans la zone inter-tropicale du Pacifique et l'activité transitoire des moyennes latitudes du Pacifique Nord ne sont pas reproduites par le modèle alors qu'elles sont clairement observables dans les Réanalyses. Le modèle CNRM-CM3 tend à établir un lien entre les conditions climatiques du Bassin Arctique, notamment les PNM, et l'activité transitoire des moyennes latitudes du Pacifique Nord alors que ce lien n'est pas observable dans les Réanalyses NCEP-NCAR.

Selon le modèle CNRM-CM3, dans un contexte de forte augmentation des gaz à effet de serre, les dépressions pourraient adopter des trajectoires plus septentrionales et leur fréquentation, pourrait en moyenne augmenter le long de la côte asiatique (Figure G et H). Ce décalage vers le nord-ouest de la fréquentation des dépressions pourrait favoriser la formation et/ou la propagation des anticyclones sur le centre et l'Est du Pacifique Nord. Ces modifications pourraient contribuer ainsi à :

- favoriser les anomalies de vents de nord le long de la côte ouest de l'Amérique du Nord et restreindre le réchauffement des températures;
- défavoriser les précipitations au sud de 45°N/50°N approximativement ;
- favoriser les précipitations au nord de 45°N/50°N approximativement.

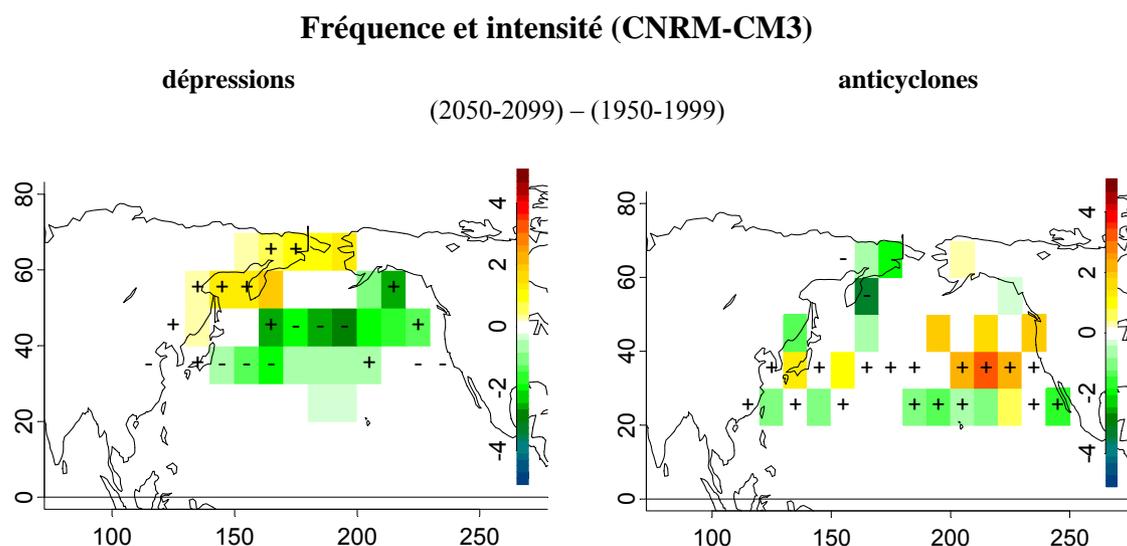


Figure G: Différences significatives (>90%) entre de la période 2050-2099 (SRES-A2) et la période 1950-1999 (XX1) de la fréquence (couleurs) et de l'intensité (signes + et -) moyenne des dépressions (à gauche) et des anticyclones (à droite).

L'augmentation des GES pourrait, selon le modèle CNRM-CM3, avoir un impact régional sur la force des dépressions avec, par exemple, des dépressions plus creuses le long de la côte asiatique et dans le Golfe de l'Alaska, qui pourraient influencer à leur tour les précipitations régionales.

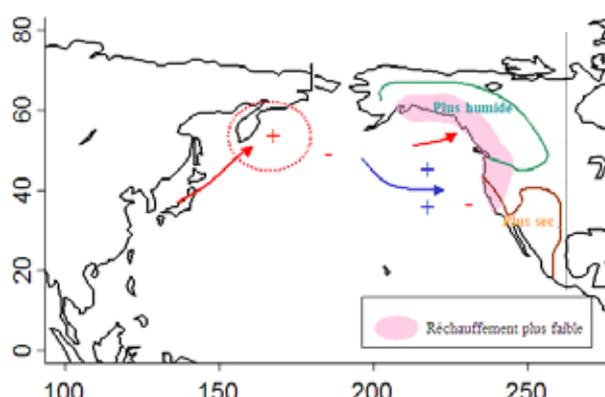


Figure H: Schéma de synthèse de la circulation hivernale des dépressions (en rouge) et des anticyclones (en bleu) pour la période 2050-2099 (SRES-A2) et conséquences possibles sur les températures et la fréquence des jours de pluie sur l'Ouest de l'Amérique du Nord.

Discussion

Y-a-t-il un signal du réchauffement climatique global lié aux activités anthropiques dans les tendances et ruptures climatiques observées de l'activité transitoire des moyennes latitudes du Pacifique Nord, au cours de la seconde moitié du 20^{ème} siècle?

Selon les observations, l'affaiblissement graduel de l'activité anticyclonique (fréquence et intensité) et l'intensification progressive de la force des dépressions, associée à des trajectoires plus méridionales ainsi qu'à l'augmentation de la fréquentation des dépressions sur l'Est des Aléoutiennes à partir du milieu des années 70, contribuent au réchauffement sur l'Ouest de l'Amérique du Nord et à l'augmentation des précipitations spécifiquement sur le Sud-Ouest des Etats-Unis. Ces observations au cours de la seconde moitié du 20^{ème} siècle sont généralement inverses aux prévisions climatiques du modèle CNRM-CM3, selon le scénario SRES-A2.

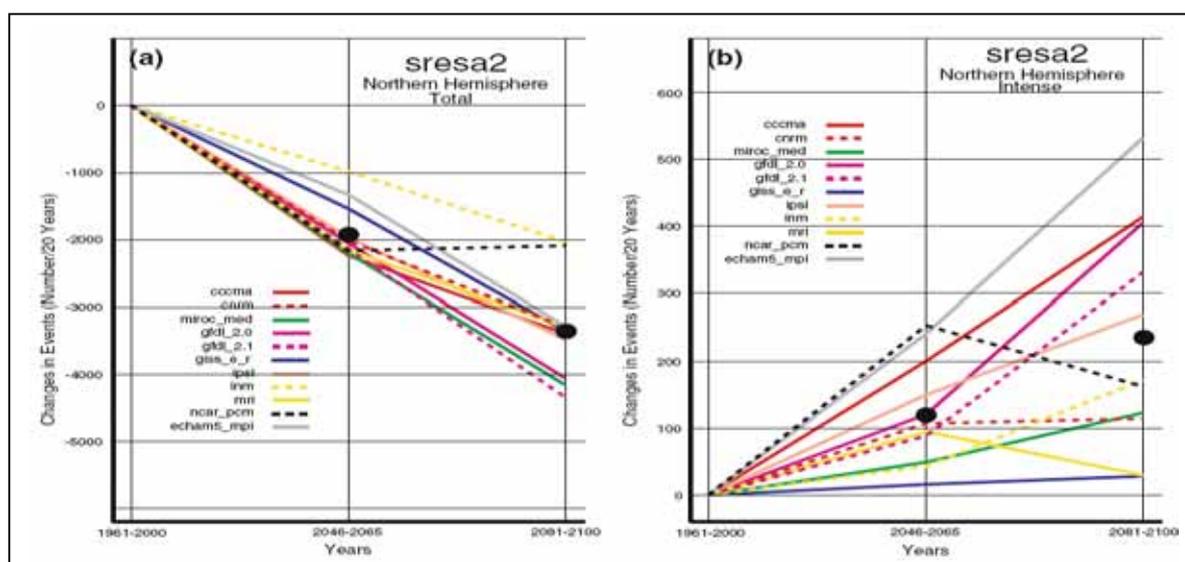


Figure I : Evolution des anomalies hivernales de la fréquence totale des dépressions (a) et de la fréquence des dépressions intenses (< 970 hPa, b) dans l'Hémisphère Nord depuis la période de référence 1961-2000 jusqu'en 2061-2100, selon le scénario SRES-A2. Les segments représentent l'évolution prévue par chacun des modèles et les points représentent la moyenne des 11 modèles (Lambert et Fyfe, 2006).

La diminution de la fréquence des dépressions hivernales à l'échelle globale (Figure I.a) est pourtant une caractéristique forte du changement climatique prévu par beaucoup de modèles (ex : Zhang et Wang, 1997 ; Sinclair et Watterson, 1999 ; Lambert et Fyfe, 2006 ; Watterson, 2006) en réponse à l'augmentation des agents de forçage radiatif due aux activités anthropiques. Le réchauffement plus fort des hautes latitudes, accompagné d'un déclin général de la banquise Arctique, réduirait le gradient thermique nord-sud, situation défavorable à l'instabilité barocline. Ceci provoquerait aussi un décalage vers le nord de la zone de fréquentation moyenne des dépressions. Cette tendance, ne semble pas observable pour le moment dans les moyennes latitudes du Pacifique Nord.

Beaucoup de sorties de modèles forcés par des scénarios de type SRES-A2, prévoient par contre une intensification des dépressions, avec par conséquent, une augmentation de la fréquence des dépressions très creuses (ex : Hall et al., 1994 ; Lambert, 1995 ; Carnell et Senior, 1998 ; Lambert et Fyfe, 2006, Figure I.b). Ces simulations iraient alors dans le même sens que les observations dans les moyennes latitudes du Pacifique Nord. De même pour les anticyclones, selon Zhang et Wang (1997), l'augmentation des GES causerait une forte diminution de leur fréquence (plus forte que pour les dépressions) notamment sur l'Ouest et l'Est du Pacifique Nord. Ce résultat irait également dans un sens similaire à celui des observations.

De manière générale, il semble tout de même difficile de préciser avec certitude dans quelle mesure l'évolution de la circulation transitoire observée sur le secteur Pacifique Nord est actuellement influencée par l'augmentation des GES. Notre période d'étude à partir des observations n'est pas suffisamment longue.

Au cours de la seconde moitié du 20^{ème} siècle, il apparaît que les modulations de l'activité transitoire sur les échelles inter-annuelles et décennales sont fortes. Ces modulations sont surtout en lien avec la variabilité des TSO extra-tropicales et tropicales et également dans une moindre mesure avec celles des conditions climatiques sur la Sibérie. En ce qui concerne le changement climatique du milieu des années 1970 qui a affecté le Pacifique Nord, son origine est communément attribuée au changement de phase de ENSO sur les échelles décennales qui s'est opéré entre 1976 et 1977. Cette entrée en phase chaude de ENSO a provoqué le changement de phase de PDO, via la circulation océanique et atmosphérique.

Une question centrale reste toujours en suspens, celle de savoir comment pourraient réagir ENSO et PDO au réchauffement climatique global. L'étape première est de bien comprendre les mécanismes qui font varier ces deux modes. En ce qui concerne PDO, le débat est toujours ouvert sur le rôle de la variabilité de la circulation atmosphérique sur les TSO extra-tropicales. A propos des changements de phase décennaux de l'ENSO, l'origine ou les origines en restent actuellement indéterminées.

Perspectives

1- Au point de vue méthodologique, certaines améliorations doivent être apportées à l'algorithme établissant les trajectoires des dépressions et des anticyclones. Pour avoir un meilleur suivi des systèmes et de leurs caractéristiques (formation, creusement, déclin...), il faudrait opter pour une résolution spatio-temporelle plus fine. Il est également nécessaire de trouver un moyen de s'affranchir autant que possible des seuils utilisés comme celui de la pression (1005 pour les dépressions et 1015 hPa pour les anticyclones) lors de la phase de détection des systèmes. Ces deux points nous permettront un diagnostic plus précis de l'évolution des caractéristiques des dépressions et des anticyclones au cours de leur trajectoire.

2- Le diagnostic de la variabilité de l'activité transitoire du Pacifique Nord devra être étendu aux autres saisons. Ainsi, nous pourrions étudier les liens entre les caractéristiques des dépressions / anticyclones et les champs climatiques moyens ainsi que les températures / précipitations sur l'Ouest de l'Amérique du Nord au printemps, en été et en automne.

3- L'étude des autres saisons nous permettra, aussi, d'analyser quand et comment les phases chaudes et froides de l'ENSO influencent l'activité transitoire des moyennes latitudes du Pacifique Nord. A l'échelle inter-annuelle, les changements de phase de l'ENSO se réalisent généralement (mais non exclusivement) au cours du printemps ou de l'été. Nous pourrions tenter de voir ainsi, si certaines caractéristiques des transitoires réagissent simultanément ou en différé à ces changements de phase. Nous devons, notamment, essayer de comprendre plus précisément comment l'« atmospheric bridge » (Alexander, 1992ab ; Alexander et al., 2002) intervient, sur la fréquence, l'intensité et les types des trajectoires empruntés par les dépressions et les anticyclones synoptiques sur le Pacifique Nord, ainsi que sur la force de l'anti-phase entre l'activité dépressionnaire et anticyclonique.

4- Par conséquent, notre travail devra être complété par des analyses de la circulation atmosphérique en altitude. Il apparaît qu'au cours de la saison hivernale, depuis le milieu des années 70, la zone d'instabilité barocline, favorable à la formation et au creusement des dépressions, tend à se propager plus largement sur l'Est du Pacifique Nord (au delà de 180° selon Xioje et al., 2006), peut-être en raison du décalage vers le sud de la ZCIT et de l'anticyclone sub-tropical (Hawaii / Californie).

5- L'étude des relations entre la variation des gradients thermiques nord-sud et l'activité transitoire nous permettra de mieux comprendre, notamment, comment l'évolution climatique des hautes latitudes (ainsi qu'au niveau de la Sibérie) peuvent agir sur l'activité transitoire du Pacifique Nord. Le fait que l'activité transitoire hivernale du Pacifique Nord présente peu de lien avec les champs climatiques moyens hivernaux de ces régions, n'induit pas l'absence de lien physique mais plutôt des relations beaucoup plus complexes.

6- A propos de l'évolution des caractéristiques des transitoires au cours du prochain siècle, les contributions sont de plus en plus concordants en ce qui concerne l'activité dépressionnaire et tendraient vers des résultats similaires en réponse à l'augmentation des GES (cf. plus haut). En revanche, l'activité anticyclonique, d'ordre synoptique, suscite beaucoup moins d'intérêt (ceci est également valable pour les observations), ainsi, notre effort devra être plus particulièrement porté sur ce sujet. En effet, beaucoup d'interrogations subsistent sur la genèse des anticyclones transitoires des moyennes latitudes et leur rôle dans la circulation de la basse et de la moyenne troposphère.

Bibliographie

- Alexander MA (1990) Simulation of the response of the North Pacific Ocean to the anomalous atmospheric circulation associated with El Niño. *Clim Dyn* 5: 53-65
- Alexander MA (1992a) Midlatitude atmosphere-ocean interaction during El Niño. Part I: The North Pacific. *J Clim* 5: 944-958
- Alexander MA (1992b) Midlatitude atmosphere-ocean interaction during El Niño. Part II: The north hemisphere atmosphere. *J Clim* 5: 944-958
- Alexander MA, Blade I, Newman M, Lanzante JR, Lau NC, Scott JD (2002) The atmospheric bridge: The influence of ENSO teleconnections on air-sea interaction over the global oceans. *J Clim* 15: 2205-2231
- Allen J, Komar P (2000) Are ocean wave heights increasing in the eastern North Pacific? *EOS, Amer. Geophys. Union* 81: 561-567
- Alpert PB, Neeman U, Shau-El Y (1990) Climatological analysis of Mediterranean cyclones using ECMWF data. *Tellus* 42A: 65-77
- An SI, Wang B (2005) The forced and intrinsic low-frequency modes of the North Pacific. *J Clim* 18: 876-885
- Anderson JR, Gyakum JR (1989) A diagnostic study of Pacific Basin circulation regimes as determined from extratropical cyclone tracks. *Mon Weather Rev* 117: 2672-2686
- Ayrault F, Lalaurette F, Joly A, Loo C (1995) North Atlantic ultra high frequency variability. *Tellus* 47A: 671-696
- Bakun A (1990) Global climate change and intensification of coastal ocean upwelling. *Science* 247: 198-201
- Barlow MS, Nigam S, Berbery EH (2001) ENSO, Pacific decadal variability, and U.S. summertime precipitation, drought, and streamflow. *J Clim* 14: 2105-2128
- Barnett TP, Pierce DW, Saravanan R, Schneider N, Dommengat D, Latif M (1999) Origins of the midlatitude Pacific decadal variability. *Geophys Res Lett* 26: 1453-1456
- Barnston AG, Livezey RE (1987) Classification, seasonality and persistence of low-frequency atmospheric circulation patterns. *Mon Weather Rev* 115: 1083-1126
- Beamish RJ, Bouillon DR (1993) Pacific salmon production trends in relation to climate. *Can J Fish Aquat Sci* 50: 1002-1016
- Bell GD, Bosart LF (1989) A 15-Year Climatology of Northern Hemisphere 500 mb closed Cyclone and Anticyclone Centers. *Mon Wea Rev* 117: 2142-2163
- Bitz CM, Battisti DS (1999) Interannual to decadal variability in climate and the glacier mass balance in Washington western Canada, and Alaska. *J Clim* 12: 3181-3196
- Bjerknes J (1966) A possible response of the atmospheric Hadley circulation to equatorial anomalies in ocean temperature. *Tellus* 18: 820-829
- Bjerknes J (1969) Atmospheric teleconnections from the equatorial Pacific. *Mon Wea Rev* 97: 163-172
- Bjerknes J (1972) Large-scale atmospheric response to the 1964-65 Pacific equatorial warming. *J Phys Oceanography* 2: 212-217
- Blackmon ML, Geisler JE, Pitcher EJ (1983) A general circulation model study of January climate anomaly patterns associated with interannual variation of equatorial Pacific sea surface temperatures. *J Atmos Sci* 40: 1410-1425
- Blackmon ML, Lee YH, Wallace JM, Hsu HH (1984) Horizontal structure of 500 mb height fluctuations with long, intermediate and short time scales. *J. Atmos Sci* 41: 961-979
- Blade L (1997) The effects of midlatitude ocean-atmosphere coupling on the low frequency variability of a general circulation model. Part I: No tropical forcing. *J Clim* 10: 2087-2106
- Blender R, Fraedrich K, Lunkeit F (1997) Identification of cyclone track regimes in the North Atlantic. *Q J R Meteorol Soc* 123: 727-741
- Bogard S, Schwing F, Mendelssohn R, Green-Jessen P (2002) On the changing seasonality over the North Pacific. *Geophys Res Lett* 29: 1333, doi:10.1029/2001GL013790
- Boyle JS, Bosart LF (1983) A Cyclone/Anticyclone Couplet over North America: An Example of Anticyclone Evolution. *Mon Wea Rev* 111: 1025-1045
- Boyle JS, Bosart LF (1986) A Cyclone/Anticyclone Couplet over North America. Part II: Analysis of a Major Cyclone Event over the Eastern United States. *Mon Wea Rev* 114: 2432-2465
- Branstator G (1995) Organization of storm track anomalies by recurring low-frequency circulation anomalies. *J Atmos Sci* 52: 207-226
- Brennan FE, Smith PJ (1978) The climatology of cyclones and anticyclones in the upper Mississippi and Ohio River Valleys and Great Lakes Region, 1950-74. *Proc. Indiana Acad. Sci.* 87:391-402
- Cai M, Van Den Dool HM (1992) Frequency waves and traveling storm tracks. Part II: Three-Dimensional structure. *J Atmos Sciences* 49: 2506-2524
- Cao HX, Mitchell JFB, Lavery JR (1992) Simulated Diurnal Range and Variability of Surface Temperature in a Global Climate Model for Present and Doubled CO₂ Climates. *J Clim* 5: 920-943
- Carnell RE, Senior CA (1998) Changes in mid-latitude variability due to increasing greenhouse gases and sulphate aerosols. *Clim Dyn* 14: 369-383

- Carrera ML, Higgins RW, Kousky VE (2004) Downstream weather impacts associated with atmospheric blocking over the Northeast Pacific. *J Clim* 17: 4823-4839
- Cayan DR (1992) Latent and sensible heat flux anomalies over the northern oceans: the connection to monthly atmospheric circulation. *J Clim* 5: 354-369
- Cayan DR, Peterson DH (1989) The influence of North Pacific circulation on streamflow in the west. *Aspects of Climate Variability in the Pacific and Western Americas, Geophys. Monogr.*, No. 55, Amer Geophys Union: 365-374
- Cayan DR, Dettinger MD, Diaz HF, Graham NE (1998) Decadal variability of precipitation over Western North America. *J Clim* 11: 3148-3166
- Cayan DR, Kammerdiener SA, Dettinger MD, Caprio JM, Peterson DH (2001) Changes in the onset of spring in the western United States. *Bull Amer Meteor Soc* 82: 399-415
- Chapelon F, Douville H, Kosuth P, Oki T (2002) Off-line simulation of the Amazon water balance: a sensitivity study with implications for GSWP. *Clim Dyn* 19: 141-154
- Chelton DB, Davis RE (1982) Monthly mean sea-level variability along the west coast of North America. *J Phys Oceanogr* 12: 757-784
- Chen TC, Vanloon H, Wu KD, Yen MC (1992) Change in the atmospheric circulation over the North Pacific-North America Area since 1950. *J Meteor Soc Japan* 70: 1137-1146
- Christoph M, Ulbrich U, Speth P (1997) Midwinter suppression of Northern Hemisphere storm track activity in the real atmosphere and in GCM experiments. *J Atmos Sci* 54: 1589-1599
- Chung YS, Hage DA, Reinelt ER (1976) On lee cyclogenesis and air flow in the Canadian Rocky Mountains and the East Asian Mountains. *Mon Wea Rev* 104: 879-891
- Clark MP, Serreze MC (2000) Effects of variations in East Asian Snow Cover on modulating atmospheric circulation over the North Pacific. *J Clim* 13: 3700-3710
- Clarke AJ, Lebedev A (1999) Remotely driven decadal and longer changes in the coastal Pacific waters of the Americas. *J Phys Oceanogr* 29: 828-835
- Colucci SJ (1976) Winter cyclone frequencies over the eastern United States and adjacent western Atlantic. *Bull Amer Meteor Soc* 57: 548-553
- Cram RS, Tatum HR (1979) Record torrential rainstorms on the Island of Hawaii, January-February 1979. *Mon Wea Rev* 107: 1653-1662
- Dai A, Trenberth KE, Karl TR (1999) Effects of clouds, soil moisture, precipitation et water vapor on diurnal temperature range. *J Clim* 12: 2451-2473
- Davis RE (1976) Predictability of sea surface temperature and sea level pressure anomalies over the North Pacific Ocean. *J Phys Oceanogr* 6: 249-266
- Déqué M, Braum A, Piedelievre JP, Marquet P, Daudin P, Guérémy JF, Geleyn JF, Bazile E, Piriou JM, Yessad K, Courtier P, Rochas P (1999) ARPEGE version 3, documentation algorithmique et mode d'emploi (in French, available from CNRM/GMGEC, Météo-France, 42 avenue G. Coriolis, 31057 Toulouse, France)
- Derber JD, Parrish DF, Lord SJ (1991) The new global operational analysis system at the National Meteorological Center. *Wea. Forecasting* 6: 538-547
- Deser C, Alexander MA, Timlin M (1996) Upper ocean thermal variations in the North Pacific during 1970-91. *J Clim* 9: 1840-1855
- Deser C, Alexander MA, Timlin MS (1999) Evidence for a wind-driven intensification of the Kuroshio Current Extension from 1970s to 1980s. *J Clim* 12: 1697-1706
- Deser C, Alexander MA, Timlin MS (2003) Understanding the persistence of sea surface temperature anomalies in midlatitudes. *J Clim* 16: 52-72
- Deser C, Phillips AS, Hurrell JW (2004) Pacific interdecadal climate variability: Linkages between the tropics and North Pacific during boreal winter since 1900. *J Clim* 17: 3109-3124
- Dettinger MD, Cayan DR (1995) Large-scale of recent trends toward early snowmelt runoff in California. *J Clim* 8: 606-623
- Dettinger MD, Battisti DS, Garreaud McCabe GJ, Bitz CM (2001) Interhemispheric effects of interannual and decadal ENSO-like climate variations on the Americas. Present and past interhemispheric climate linkages in the Americas and their societal effects, Markgraf ed, pp 1-16
- Dettinger MD (2004) Fifty-two years of pineapple-express storms across the West Coast of North America: California Energy Commission, PIER Energy-Related Environmental Research report CEC-500-2005-004: 15p
- Dettinger M, Remond K, Cayan DR (2004) Winter orographic precipitation ratios in the Sierra Nevada-Large-scale atmospheric circulations and hydrologic consequences. *J Hydrometeorology* 5: 1102-1116
- Dettinger MD (2005) A long-term (~50-YR) historical perspective on flood-generating winter storms in the American river basin. Proceedings, 2005 California Extreme Precipitation Symposium, April 22, 2005: 62-72

- Dickson RR, Namias J (1976) North American influences on the circulation and climate of the North American sector. *Mon Wea Rev* 104: 1255-1265
- Diffenbaugh NS, Pal JS, Trapp RJ, Giorgi F (2005) Fine-scale processes regulate the response of extreme events to global climate change. *PNAS* 102: 15774-15778
- D'Odorico P, Yoo JC, Over TM (2001) An assessment of ENSO-induced patterns of rainfall erosivity in the southwestern United States. *J Clim* 14: 4230-4242
- Douglas AV, Cayan DR, Namias J (1982) Large-scale changes in North Pacific and North American weather patterns in recent decades. *Mon Wea Rev* 112: 1851-1862
- Douville H, Royer JF, Mahfouf JF (1995a) A new snow parametrization for the Météo-France climate model. Part I: Validation in stand-alone experiments. *Clim Dyn* 12: 21-35
- Douville H, Royer JF, Mahfouf JF (1995b) A new snow parametrization for the Météo-France climate model. Part II: Validation in a 3-D GCM experiments. *Clim Dyn* 12: 37-52
- Downton MW, Miller KA (1993) The freeze risk to Florida citrus. II: Temperature variability and circulation patterns. *J Clim* 6: 364-372
- Drijfhout SS (2003) Why Anticyclones can Split. *J of physical Oceanography* 33: 1579-1591
- Durre I, Wallace JM (2001) Factors Influencing the Cold-Season Diurnal Temperature Range in the United States. *J Clim* 14: 3263-3278
- Easterling DR (2002) Recent changes in frost days and the frost-free season in the United States. *Bull Amer Meteor Soc* 83: 1327-1332
- Eichler T, Higgins W (2006) Climatology and ENSO-Related variability of North America Extratropical cyclone activity. *J Clim* 19: 2076-2093
- Evans MN, Kaplan A, Cane MA, Villalba R (2001) Globality and optimality in climate field reconstructions from proxy data. Present and past interhemispheric climate linkages in the Americas and their societal effects, Markgraf ed, pp 53-72
- Favre A, Gershunov A (2006) Extra-tropical cyclonic/anticyclonic activity in North-Eastern Pacific and air temperature extremes in Western North America. *Clim Dyn* 26: 617-629
- Gates WL (1992) AMIP: the Atmospheric Model Intercomparison Project. *Bull Amer Meteor Soc* 73: 1962-1970
- Gates WL, Boyle JS, Covey C, Dease CG, Doutriaux CM, Drach RS, Fiorino M, Gleckler PJ, Hnilo JJ, Marlais SM, Phillips TJ, Potter GL, Santer BD, Sperber KR, Taylor KE, Williams DN (1999) An overview of the results of Atmospheric Model Intercomparison Project (AMIP1). *Bull Amer Meteor Soc* 80: 29-55
- Geng Q, Sugi M (2001) Variability of the North Atlantic cyclone activity in winter analysed from NCEP-NCAR Reanalysis data. *J Clim* 14: 3863-3872
- Geng Q, Sugi M (2003) Possible change of extratropical cyclone activity due to enhanced greenhouse gases and sulfate aerosols—Study with a high resolution AGCM. *J Clim* 16: 2262-2274
- Gershunov A (1998) ENSO influence on intraseasonal extreme rainfall and temperature frequencies in the contiguous US: Implications for long-range predictability. *J Clim* 11: 3192-3203
- Gershunov A, Barnett T (1998) Inter-decadal modulation of ENSO teleconnections. *Bull Amer Meteor Soc* 79: 2715-2725
- Gershunov A, Schneider N, Barnett T (2001) Low frequency modulation of the ENSO-Indian monsoon rainfall relationship: Signal or noise. *J Clim* 14: 2486-2492
- Gershunov A, Cayan D (2003) Heavy daily precipitation frequency over the contiguous United States: Sources of climatic variability and seasonal predictability. *J Clim* 16: 2752-2765
- Gershunov A, Roca R (2004) Coupling of latent heat flux and the greenhouse effect by large-scale tropical/subtropical dynamics diagnosed in a set of observations and model simulations. *Clim Dyn* 22: 205-222
- Gibelin AL, Déqué M (2003) Anthropogenic climate change over the Mediterranean region simulated by a global variable resolution model. *Clim Dyn* 18: 225-240
- Giorgi F, Brodeur CS, Bates GT (1994) Regional climate-change scenarios over the United-States produced with a nested regional climate model. *J Clim* 7: 375-399
- Graham NE (1994) Decadal-scale climate variability in the tropical and North Pacific during the 1970s and 1980s: observations and model results. *Clim Dyn* 10: 135-162
- Graham NE, Barnett TP, Wild R, Ponater M, Schubert S (1994) On the roles of tropical and midlatitude SSTs in forcing interannual and interdecadal variability in the winter Northern Hemisphere circulation. *J Clim* 7: 1416-1441
- Graham NE, Diaz HF (2001) Evidence for intensification of North Pacific winter cyclones since 1948. *Bull Amer Meteor Soc* 82: 1869-1992
- Groisman PY, Knight RW, Karl TR, Easterling DR, Sun B, Lawrimore JM (2004) Contemporary Changes Of The Hydrological Cycle Over The Contiguous United States: Trends Derived From In-Situ Observations. *J. Hydrometeor* 5: 64-85

- Gulev SK (1997) Climate variability of the intensity of synoptic processes in the North Atlantic midlatitudes. *J Clim* 10 : 574-592
- Gulev SK, Zolina O, Reva Y (2000) Synoptic and sub-synoptic variability in the North Atlantic as revealed by the Ocean Weather Station data. *Tellus* 52A : 323-329
- Gulev SK, Zolina O, Grigoriev S (2001) Extratropical cyclone variability in the Northern Hemisphere winter from the NCEP/NCAR reanalysis data. *Clim Dyn* 17: 795-809
- Gyakum JR, Anderson JR, Grumm RH, Gruner EL (1989) North Pacific cold-season surface cyclone activity. *Mon Weather Rev* 117: 1141-1155
- Hales JE (1974) Southwestern United States summer monsoon source-Gulfe of Mexico or Pacific Ocean? *J Applied Meteor* 13: 331-342
- Hall NMJ, Hoskins BJ, Valdes PJ, Senior CA (1994) Storm tracks in high-resolution GCM with doubled carbon dioxide. *Q.J.R.Meteorol.Soc.* 120: 1209-1230
- Hamlet AF, Mote PW, Clark MP, Lettenmaier DP (2005) Effects of temperature and precipitation variability on snowpack trends in the western United States. *J Clim* 18: 4545-4561
- Hanson HP, Long B (1985) Climatology of cyclogenesis over the East China Sea. *Mon Weather Rev* 113: 697-707
- Harman JR (1987) Mean monthly North America anticyclone frequencies, 1950-1979. *Mon Weather Rev* 115: 2840-2848
- Harnack RP (1980) An Appraisal of the circulation and temperature pattern for Winter 1978-79 and a comparison with the previous two winters. *Mon Wea Rev* 108: 37-55
- Held IM, Lyons SW, Nigam S (1989) Transients and the extratropical response during El Niño. *J Atmos Sci* 46: 163-174
- Ho L, Wang B (2002) The time-space of the Asian-Pacific summer monsoon: a fast annual Cycle view. *J Clim* 15: 2001-2019
- Hodges KI (1994) A general method for tracking analysis and its application to meteorological data. *Mon Wea Rev* 122 : 2573-2586
- Hodges KI, Hoskins BJ, Boyle J, Thorncroft C (2003) A Comparison of Recent Reanalysis Dataset Using Objective Feature Tracking : Storm Tracks and Easterly Waves. *Mon Wea Rev* 131 : 2012-2037
- Hoerling MP, Ting M (1994) Organization of extratropical transients during El Niño. *J Clim* 7: 745-766
- Holopainen EO (1983) Transient eddies in the mid-latitudes: Observations and interpretations. *Large-Scale Dynamical Processes in the Atmospheres*, B.J. Hoskins and R.P. Pierce, Eds., Academic Press: 201-233
- Holzworth GC (1962) A study of air pollution potential for the western United States. *J Appl Meteor* 1 : 366-382
- Hoskins BJ, Karoly DJ (1981) The steady linear response of a spherical atmosphere to thermal and orographic forcing. *J Atmos Sci* 38: 1179-1196
- Hoskins BJ, Hodges KI (2002) New perspectives on the Northern Hemisphere Winter Storm Tracks. *J Atmos Sciences* 59: 1041-1061
- Hosler DL, Gamage LA (1956) Cyclone frequencies in the United States for the period 1905-1954. *Mon Wea Rev* 84 : 388-390
- Hurley JC (1954) Statistics on the movement of and deepening of cyclones in the Middle West. *Mon Wea Rev* 82 : 116-122
- Hurrell JW, Van Loon H (1997) Decadal variations in climate associated with the North Atlantic oscillation. *Climatic Change* 36: 301-326
- Inman DL, Jenkins SA (1997) Changing wave climate and littoral drift along the California coast. *Proc. California and the World Ocean '97*, San Diego, CA, American Society of Civil Engineers: 538-549
- IPCC (2001) Working Group I, Climate Change 2001: The scientific basis
- Jhun JG, Lee EJ (2004) A new East Asian winter monsoon index and associated characteristics of the winter monsoon. *J Clim* 17: 711-726
- Joly A (1995) Le front polaire: un concept dépassé qui a la vie dure. *La Recherche* 273: 128-135
- Jones DA, Simmonds I (1993) A climatology of Southern Hemisphere extra-tropical cyclones. *Clim Dyn* 9: 131-145
- Jones DA, Simmonds I (1994) A climatology of Southern Hemisphere anticyclones. *Clim Dyn* 9, 333-348
- Jones PD, Parker DE, Osborn TJ, Briffa KR (1999) Global and Hemispheric temperature anomalies – land and marine instrumental records. In: *Trends: a compendium of data on Global Change*. Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, U.S. Department of Energy, Oak Ridge, Tennessee
- Jones SC, Harr PA, Abraham J, Bosart LF, Bowyer PJ, Evans JL, Hanley DE, Hanstrum BN, Hart RE, Lalaurette F, Sinclair MR, Smith RK, Thorncroft C (2003) The extratropical transition of tropical cyclones: forecast challenges, current understanding, and future directions. *Wea Forecasting* 18: 1052-1092
- Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, Collins W, Deaven D, Gandin L, Iredell M, Saha S, White G, Woollen J, Zhu Y, Leetmaa A, Reynolds B, Chelliah M, Ebisuzaki W, Higgins W, Janowiak J, Mo KC, Ropelewski

- C, Wang J, Jenne R, Joseph D (1996) The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project. *Bull Amer Meteor Soc* 77: 437-471
- Kanamitsu M (1989) Description of the NMC global data assimilation and forecast system. *Wea. Forecasting* 4: 334-342
- Kanamitsu M et al. (1991) Recent changes implemented into the global forecast system at NMC. *Wea. Forecasting* 6: 425-435
- Kaplan A, Cane MA, Kushnir Y, Clement AC, Blumenthal MB, Rajagopalan B (1998) Analysis of global sea surface temperature: 1856-1991. *J Geophys Res* 103: 567-18589
- Karl TR, Kukla G, Gavin J (1984) Decreasing Diurnal Temperature Range in the United States and Canada from 1941 through 1980. *J Applied Meteor* 23: 1489-1504
- Karl TR, Kukla G, Gavin J (1986) Relationship between decreased temperature range and precipitation trends in the United States and Canada, 1941-80. *J Applied Meteor* 25: 1878-1886
- Karl TR, Groisman PY, Knight RW, Heim RR (1993) Recent variations of snow cover and snowfall in North America and their relation to precipitation and temperature variations. *J Clim* 6: 1327-1344
- Keshavamurty RN (1982) Response of the atmosphere to sea surface temperature anomalies over the Equatorial Pacific and the teleconnections of the Southern Oscillation. *J Atmos Sci* 39: 1241-1259
- Kidson JW, Sinclair MR (1995) The influence of persistent anomalies on Southern Hemisphere storm tracks. *J Clim* 8: 1938-1950
- Kim J, Kim TK, Arritt RW, Miller NL (2002) Impacts of increased atmospheric CO₂ on the hydroclimate of the western United States. *J Clim* 15: 1926-1942
- Kistler R, Kalnay E, Collins W, Saha S, White G, Woollen J, Chelliah M, Ebisuzaki W, Kanamitsu M, Kousky V, van den Dool H, Jenne R, Fiorino M (2001): The NCEP-NCAR 50-Year Reanalysis: Monthly Means CD-ROM and Documentation. *Bull Amer Meteor Soc* 82: 247-267
- Klein WH (1957) Principal tracks and mean frequencies of cyclones and anticyclones in the Northern Hemisphere. Weather Bureau Research Paper No.40, U.S. Dept. of Commerce, NOAA, Washington, D.C., pp 60
- Klein WH (1958) The frequency of cyclones and anticyclones in relation to the mean circulation. *J Atmos Sci* 15: 98-102
- Koenig WR, Sausen R, Sielmann F (1993) Objective identification of cyclones in GCM simulations. *J Clim* 6: 2217-2231
- Korshover J (1967) Climatology of stagnating anticyclones east of the Rocky Mountains, 1936-1965. PHS Publ. No.999-AP-34, US Department of Health, Education and Welfare
- Krishnan R, Sugi M (2003) Pacific decadal oscillation and variability of the Indian summer monsoon rainfall. *Clim Dyn* 21: 233-242
- Kushnir Y, Wallace JM (1989) Low frequency variability in the Northern Hemisphere winter-geographical-distribution, structure and time scale dependence. *J Atmos Sci* 46: 3122-3142
- Lambert SJ (1988) A cyclone climatology of the Canadian Climate Centre General Circulation Model. *J Clim* 1: 109-115
- Lambert SJ (1995) The effect of enhanced greenhouse warming on winter cyclone frequencies and strengths. *J Clim* 8: 1447-14452
- Lambert SJ (1996) Intense extratropical Northern Hemisphere winter cyclone events: 1899-1991. *J Geophys Res* 101: 319-325
- Lambert SJ, Sheng J, Boyle J (2002) Winter cyclone frequencies in thirteen models participating in the Atmospheric Model Intercomparison Project (AMIP1). *Clim Dyn* 19: 1-16
- Lambert SJ, Fyfe JC (2006) Changes in winter cyclone frequencies and strengths simulated in enhanced greenhouse warming experiments: results from the models participating in the IPCC diagnostic exercise. *Clim Dyn* 26: 713-728
- Latif M, Barnett TP (1994) On the causes of decadal climate variability over the North Pacific and North America. *Science* 266: 634-637
- Latif M, Barnett TP (1996) Decadal Climate Variability over the North Pacific and North America: Dynamics and Predictability. *J Clim* 9: 2407-2423
- Lau NC (1988) Variability of the observed midlatitude storm tracks in relation to low frequency changes in the circulation pattern. *J Atmos Sci* 45: 2718-2743
- Lau NC (1997) Global SST anomalies and the midlatitude atmospheric circulation. *Bull Amer Meteor Soc* 78: 21-33
- Leathers DJ, Palecki MA (1992) The Pacific/North American teleconnection pattern and United States climate. Part II: Temporal characteristics and index specification. *J Clim* 5: 707-716
- Le Treut H, Kalnay E (1990) Comparison of observed and simulated cyclone frequency distribution as determined by an objective method. *Atmosfera* 3: 57-71

- Leung LR, Ghan SJ (1999) Pacific Northwest climate sensitivity simulated by a regional climate model driven by a GCM. Part II: 2*CO₂ simulations. *J Clim* 12: 2031-2053
- Leung LR, Quian Y, Bian XD, Washington WM, Han JG, Roads JO (2004) Mid-century ensemble regional climate change scenarios for the western United States. *Climate Change* 62: 75-113
- Lim EP, Simmonds I (2002) Explosive development in the Southern Hemisphere and a comparison with Northern Hemisphere events. *Mon Wea Rev* 130: 2188-2209
- Livezey RE, Masutani M, Leetmaa A, Rui H, Ji M, Kumar A (1997) Teleconnective response of the Pacific–North American region atmosphere to large central equatorial Pacific SST anomalies. *J Clim* 10: 1787–1820
- Lluch-Cota DB, Wooster WS, Hare SR (2001) Sea surface temperature variability in coastal areas of the northeastern Pacific related to the El Niño-Southern Oscillation and the Pacific Decadal Oscillation. *Geophys Res Lett* 28: 2029-2032
- Madec G, Delecluse P, Imbard M, Lévy C (1998) OPA version 8.1 Ocean General Circulation Model Reference Manual, Notes du Pôle de Modélisation, Institut Pierre-Simon Laplace, n°11, 91 pp [Available from Laboratoire d’Océanographie Dynamique et de Climatologie, Université Paris VI, Paris 75252, France]
- Mahfouf JF, Manzi A, Noilhan J, Giordani H, Déqué M (1995) The land surface scheme ISBA within the Météo-France climate model ARPEGE. Part I: Implementation and preliminary results. *J Clim* 8: 2039-2057
- Mantua NJ, Hare SR, Zhang Y, Wallace JM, Francis RC (1997) A Pacific Interdecadal Climate Oscillation with Impacts on Salmon Production. *Bull Amer Meteor Soc* 78: 1069–1079
- Mantua NJ, Hare SR (2002) The Pacific decadal oscillation. *J Oceanogr* 58: 35-44
- Martin JE, Grauman RD, Marsili N (2001) Surface cyclolysis in the North Pacific Ocean. Part I: A synoptic Climatology. *Mon Wea Rev* 129: 748-765
- Masumoto Y, Yamagata T (1991) Response of the western tropical Pacific to the Asian winter monsoon: the generation of the Mindanao Dome. *J Physical Oceanography* 21: 1386-1398
- McCabe GJ, Clark MP, Serreze MC (2001) Trends in Northern Hemisphere surface cyclone frequency and intensity. *J Clim* 14: 2763-2768
- McLay JG, Martin JE (2002) Surface cyclolysis in the North Pacific Ocean. Part III: Composite local energetics of tropospheric-deep cyclone decay associated with rapid surface cyclolysis. *Mon Wea Rev* 130: 2507-2529
- Meehl GA (1987) The annual cycle and interannual variability in the tropical Pacific and Indian Ocean regions. *Mon Wea Rev* 115: 27-50
- Miller AJ, Cayan TP, Barnett TP, Graham NE, Oberhuber JM (1994a) Interdecadal variability of the Pacific Ocean: Model response to observed heat flux and wind stress anomalies. *Clim Dyn* 9: 287-302
- Miller AJ, Cayan DR, Barnett TP, Graham NE, Oberhuber JM (1994b) The 1976-77 climate shift of the Pacific Ocean. *Oceanography* 7: 21-26
- Miller AJ, Cayan DR, White WB (1998) A westward intensified decadal change in the North Pacific thermocline and gyre-scale circulation *J Clim* 11: 3112-3127
- Miller AJ, Schneider N (2000) Interdecadal climate regime dynamics in the North Pacific Ocean: Theories, observations and ecosystem impacts. *Progress in Oceanography* 27: 257-260
- Miranda S (2003) Actualización de la base de datos ERIC II. Final report of the project TH-0226, IMTA internal reports
- Mote PW, Hamlet AF, Clark MP, Lettenmaier P (2005) Declining mountain snowpack in Western North America. *Bull Ame Meteor Soc* 86: 39-49
- Murray RJ, Simmonds I (1991) A numerical scheme for tracking cyclone centres from digital data. Part I: development and operation of the scheme. *Aust Meteorol Mag* 39: 155-166
- Nakamura H, Kasmin AS (2003) Decadal changes in the North Pacific oceanic frontal zones as revealed in ship and satellite observations. *J Geophys Res* 108: 3078
- Nakamura H, Lin G, Yamagata T (1997) Decadal Climate Variability in the North Pacific during the Recent Decades. *Bull Amer Meteor Soc* 78: 2215–2225
- Namias J (1959) Recent seasonal interactions between north Pacific waters and the overlying atmospheric circulation. *J Geophys Res* 64: 631-646
- Namias J (1963) Large-scale air-sea interactions over the north Pacific from summer (1962) through the subsequent winter. *J Geophys Res* 68: 6171-6186
- Namias J (1969) Seasonal interactions between the north Pacific Ocean and the atmosphere during the 1960s. *Mon Wea Rev* 97: 173-192
- Namias J (1971) The 1968-69 winter as an outgrowth of sea and air coupling during antecedent season. *J Phys Oceanography* 1: 65-81
- Namias J (1972) Experiments in objectively predicting some atmospheric and oceanic variables for the winter of 1971-72. *J Applied Meteor* 11: 1164-1174

- Namias J (1973) Thermal communication between sea surface and the lower troposphere. *J Phys Oceanography* 3: 373-378
- Namias J (1974) Longevity of a coupled air-sea-continent system. *Mon Wea Rev* 102: 638-648
- Namias J (1976a) Some statistical and synoptic characteristics associated with El Niño. *J Phys Oceanography* 6: 130-138
- Namias J (1976b) Negative ocean-air feedback systems over the North Pacific in the transition from warm to cold seasons. *Mon Wea Rev* 104: 1107-1121
- Namias J (1978) Multiple causes of the North American abnormal winter 1976-77. *Mon Wea Rev* 106: 279-295
- Namias J (1979) Premonitory signs of the 1978 break in the west coast drought. *Mon Wea Rev* 107: 1675-1681
- Namias J (1980) Causes of some extreme Northern Hemisphere climatic anomalies from summer 1978 through the subsequent winter. *Mon Wea Rev* 108: 1333-1346
- Namias J (1986) Persistence of flow patterns over North America and adjacent ocean sectors. *Mon Wea Rev* 114: 1368-1383
- Namias J, Yuan X, Cayan DR (1988) Persistence of north Pacific sea surface temperature and atmospheric flow patterns. *J Clim* 1: 682-703
- NCDC (2003) Data documentation for data set 3200 (DSI-3200) Surface land daily cooperative summary of the day. National Climatic Data Center, Asheville, NC, pp 36 [Available on line at: www.ncdc.noaa.gov/pub/data/documentlibrary/tddoc/td3200.pdf].
- Newman M, Compo GP, Alexander MA (2003) ENSO-forced variability of the Pacific decadal oscillation. *J Clim* 16: 3853-3857
- Nitta T, Yamada S (1989) Recent warming of tropical sea surface temperature and its relationship to the Northern Hemisphere circulation. *J. Meteor. Soc. Japan* 67: 375-382
- NOAA / NMC Development Division (1988) Documentation of the NMC global model. pp 244 [Available from NOAA/NCEP Environmental Modeling Center, 5200 Auth Rd., Washington, DC 20233]
- Noilhan J, Planton S (1989) A simple parameterization of land surface processes for meteorological models. *Mon Wea Rev* 117: 536-549
- Oki T, Sud YC (1998) Design of Total Runoff Intergrating Pathways (TRIP) A global river channel network. *Earth Interactions*, vol. 2, paper 1
- Oravec RJ, Bosart LF (1990) A migratory anticyclone event during Project GALE. *Mon Wea Rev* 118: 1289-1307
- Overland JE, Pease CH (1982) Cyclone Climatology of the Bering Sea and its Relation to Sea Ice Extent. *Mon Wea Rev* 110: 5-13
- Overland JE, Salo S, Adams JM (1999a) Salinity signatures of the PDO. *Geophys Res Lett* 26: 1337-1340
- Overland JE, Adams JM, Bond NA (1999b) Decadal variability of the Aleutian Low and its relation to high-latitude circulation. *J Clim* 12: 1542-1548
- Paciorek CJ, Risbey JS, Ventura V, Rosen RD (2002) Multiple indices of Northern Hemisphere cyclone activity, winters 1949-99. *J Clim* 15: 1573-1590
- Panagiotopoulos F, Shahgedanova M., Hannachi A, Stephenson DB (2005) Observed trends and teleconnections of Siberian High: a recently declining center of action. *J Clim* 18: 1411-1422
- Parker SS, Hawes JT, Colucci SJ, Hayden BP (1989) Climatology of 500 mb Cyclones and Anticyclones, 1950-85. *Mon Wea Rev* 117: 558-570
- Parrish D, Deber J (1992) The National Meteorological Center's Spectral Statistical-Interpolation Analysis System. *Mon Weather Rev*, 120: 1747-1763
- Peixoto JP, Oort AH (1992) *The physics of Climate*. American Institute of Physics, pp 496
- Pettersen S (1956) *Weather Analysis and Forecasting*, Vol.1 McGraw-Hill, pp 422
- Pezza AB, Ambrizzi T (2003) Variability of Southern Hemisphere Cyclone and Anticyclone Behavior: Further Analysis. *J Clim* 16: 1075-1083
- Piechota, T, Timilsena J, Tootle G, and Hidalgo H (2004) The Western U.S. Drought: How Bad Is It? *Eos* 85: 301-308
- Pierce DW (2001) Distinguishing coupled ocean-atmosphere interactions from background noise in the North Pacific. *Progress in Oceanography* 49: 331-352
- Pierce DW (2002) The role of sea surface temperatures in the interactions between ENSO and the North Pacific Oscillation. *J Clim* 15: 1295-1308
- Pierce DW, Barnett T, Latif M (2000) Connections between the Pacific Ocean tropics and midlatitudes on decadal time scales. *J Clim* 13: 1173-1194
- Pierce DW, Barnett T, Schneider N, Saravanan R, Dommenges D, Latif M (2001) The role of ocean dynamics in producing decadal climate variability in the North Pacific. *Clim Dyn* 18: 51-70
- Poccard I (2000) Etude diagnostique des nouvelles donnees climatiques: les reanalyses. Exemple d'application aux precipitations en Afrique tropicale. These, CRC, CNRS UMR 5080, Dijon, pp: 242

- Poccard I, Janicot S, Camberlin P (2000) Comparison of rainfall structures between NCEP/NCAR Reanalyses and observed data over tropical Africa. *Clim Dyn* 16: 897-915
- Polovina JJ, Mitchum GT, Evans GT (1995) Decadal and basin-scale variations in mixed layer depths and impact on biological production in the central and North Pacific. *Deep-Sea Res* 42: 1701-1716
- Qiu B (2003) Kuroshio Extension variability and forcing of the Pacific decadal oscillations: Responses and potential feedback. *J Phys Oceanogr* 33: 2465-2482
- Reed RJ, Albright (1986) A case study of explosive cyclogenesis in the eastern Pacific. *Mon Wea Rev* 114: 2297-2319
- Reitan CH (1974) Frequencies of cyclones and cyclogenesis for North America, 1951-1970. *Mon Wea Rev* 102: 862-868
- Reynolds RW, Smith TM (1994) Improved global sea surface temperature analysis using optimum interpolation. *J Clim* 7: 929-948
- Roebber PJ (1984) Statistical analysis and updated climatology of explosive cyclones. *Mon Wea Rev* 112: 1577-1589
- Roebber PJ (1989) On the statistical analysis of cyclone deepening rates. *Mon Wea Rev* 117: 2293-2298
- Roemmich D, McGowen J (1995) Climate warming and the decline of zooplankton in the California Current. *Science* 267: 1324-1326
- Rogers E, Bosart LF (1986) An investigation of explosively deepening oceanic cyclones. *Mon Wea Rev* 114: 702-718
- Rogers JC (1990) Patterns of Low-Frequency Monthly Sea Level Pressure Variability (1899–1986) and Associated Wave Cyclone Frequencies. *J Clim* 3: 1364–1379
- Rogers JC (1997) North Atlantic storm track variability and its association to the North Atlantic Oscillation and climate variability in the Northern Europe. *J Clim* 10:1635-1647
- Rogers JC, Rohli RV (1991) Florida citrus freezes and polar anticyclones in the Great Plains. *J Clim* 4: 1103-1113
- Rogers JC, Raphael MN (1992) Meridional eddy sensible heat fluxes in the extremes of the Pacific/North American teleconnection pattern. *J Clim* 5: 127-139
- Royer TC (1989) Upper ocean temperature variability in the northeast Pacific Ocean: is it an indicator of global warming? *J Geophys Res* 94: 18175-18183
- Ruggiero P, Kaminsky GM, Komar PD, McDougal WG (1997) Extreme waves and coastal erosion in the Pacific Northwest. *Proceeding of Waves 97, the Third International Symposium on Ocean Wave Measurement and Analysis*, BL Edge and JM Hemsley, Eds., ASCE: 947-961
- Saito K, Cohen J, Entekhabi D (2001) Evolution of atmospheric Response to Early-Season Eurasian Snow Cover Anomalies. *Mon Wea Rev* 129: 2746-2760
- Salas-Mélia D, Chauvin F, Déqué M, Douville H, Guérémy JF, Marquet P, Planton S, Royer JF, Tyteca S (soumis) Description and validation of the CNRM-CM3 global coupled model. *Clim Dyn*
- Sanders F, Gyakum JR (1980) Synoptic-dynamic climatology of the “bomb”. *Mon Wea Rev* 108: 1589-1606
- Schinke H (1993) On the occurrence of deep cyclones over Europe and the North Atlantic in the period 1930-1991. *Contrib Atmos Phys* 66: 223-237
- Schneider N, Cornuelle B (2005) The forcing of the Pacific Decadal Oscillation. *J Clim* 18: 4355-4373
- Schneider N, Miller A, Pierce DW (2002) Anatomy of North Pacific decadal variability. *J Clim* 15: 586-605
- Schubert M, Perlwitz J, Blender R, Fraedrich K, Lunkeit F (1998) North Atlantic cyclones in CO₂-induced wrm climate simulations: frequency, intensity, and tracks. *Clim Dyn* 14: 827-837
- Seager R, Kushnir Y, Naik N, Cane MA, Miller JA (2001) Wind-driven shifts in the latitude of the Kuroshio-Oyashio Extension and generation of SST anomalies on decadal timescales. *J Clim* 14: 4249-4265
- Seluchi M, Serafini YV, Le Treut H (1998) The impact of the Andes on transient atmospheric systems: a comparison between observations and GCM results. *Mon Wea Rev*: 895-912
- Serreze MC (1995) Climatological aspects of cyclone development and decay in the Arctic. *Atmosphere-Ocean* 33(1): 1-23
- Serreze MC, Carse F, Barry RG, Rogers JC (1997) Icelandic low cyclone activity: climatological features, linkages with the NAO, and relationships with the recent changes in the northern hemisphere circulation. *J Clim* 10: 453-464
- Sewall JO (2005) Preipitation shifts over western North America as a result of declining Arctic sea ice cover: The coupled system response. *Earth Interactions* 9 : 1-23
- Seymour RJ (1996) Wave climate variability in southern California. *J Waterway, Port, Coastal, Ocean Eng* 122: 182-186
- Seymour RJ, Strange RR, Cayan DR, Nathan RA (1984) Influence of El Niños on California’s wave climate. *Proc. 19th Int. Conf on Coastal Engineering*, Houston TX, American Society of Coastal Engineers: 577-592
- Simmonds I, Murray RJ (1999) Southern extratropical cyclone behavior in ECMWF analyses during the FROST Special Observing Periods. *Wea and Fore* 14: 878-891

- Simmonds I Keay K (2000a) Mean Southern Hemisphere extra-tropical cyclone behavior in the 40-year NCEP-NCAR Reanalysis. *J Clim* 13: 873-885
- Simmonds I Keay K (2000b) Variability of Southern Hemisphere extra-tropical cyclone behaviour, 1958-1997. *J Clim* 13: 550-561
- Sinclair MR (1994) An objective cyclone climatology for the Southern Hemisphere. *Mon Wea Rev* 122: 2239-2256
- Sinclair MR (1995) A climatology of cyclogenesis for the Southern Hemisphere. *Mon Wea Rev* 123: 1601-1619
- Sinclair MR (1996) A climatology of Anticyclones and Blocking for the Southern Hemisphere. *Mon Wea Rev* 124 : 245-264
- Sinclair (1997) Objective identification of cyclones and their circulation intensity and climatology. *Wea Forecasting* 12: 591-608
- Sinclair MR, Renwick JA, Kidson JW (1997) Low-frequency variability of Southern Hemisphere sea level pressure and weather system activity. *Mon Wea Rev* 125: 2531-2543
- Sinclair MR, Watterson IG (1999) Objective assessment of extra-tropical weather systems in simulated climates. *J Clim* 12: 3467-3485
- Sinclair MR, Revell MJ (2000) Classification and composite diagnosis of extratropical cyclogenesis events in the Southwest Pacific. *Mon Wea Rev* 128: 1089-1105
- Snyder MA, Bell JL, Sloan LC, Duffy PB, Govindasamy B (2002) Climate responses to a doubling of atmospheric carbon dioxide for a climatically vulnerable region *Geophys Res Lett* 29: doi:10.1029/2001GL014431
- Snyder MA, Sloan LC, Bell JL (2004) Modeled regional climate change in the hydrological regions of California: a CO₂ sensitivity study. *J Amer Water Resour Assoc* 40: 591-601
- Stewart IT, Cayan DR, Dettinger MD (2005) Changes toward earlier streamflow timing across Western North America. *J Clim* 18: 1136-1155
- Sun B, Ya P, Groisman I, Mokhov I (2001) Recent Changes in Cloud-Type Frequency and Inferred Increases in Convection over the United States and the Former USSR. *J Clim* 14: 1864-1880
- Taljaard JJ (1967) Development, distribution and movement of cyclones and anticyclones in the Southern Hemisphere during the IGY. *J App Met*: 973-987
- Taylor KE (1986) An analysis of the biases in traditional cyclone frequency maps. *Mon Wea Rev* 114: 1481-1490
- Ting MF, Held IM (1990) The stationary wave response to a tropical SST anomaly in an idealized general circulation model. *J Atmos Sci* 47: 2546-2566
- Ting MF, Hoerling MP (1993) The dynamics of stationary wave anomalies during the 1986/87 El Niño. *Clim Dyn* 9: 147-164
- Tomita T, Wang B, Yasunari T, Nakamura H (2001) Global patterns of decadal-scale variability observed in the sea surface temperature and lower-tropospheric circulation fields. *J geophys Res* 106 26805-26815
- Trenberth KE (1990) Recent Observed Interdecadal Climate Changes in the Northern Hemisphere. *Bull Amer Meteor Soc* 71: 988-993
- Trenberth KE (1991) Storm tracks in the Southern Hemisphere, *J Atmos Sci* 48: 2159-2178
- Trenberth KE, Hurrell JW (1994) Decadal atmosphere-ocean variations in the Pacific. *Clim Dyn* 9: 303-319
- Trenberth KE, Branstator GW, Karoly D, Kumar A, Lau NC, Ropelewski C (1998) Progress during TOGA in understanding and modeling global teleconnections associated with tropical sea surface temperatures. *J Geophys Res* 103: 14291-14324
- Trenberth KE, Caron JM (2000) The Southern Oscillation Revisited: sea level pressures, surface temperatures and precipitation. *J Clim* 13: 4358-4365
- Venrick EL, McGowen JA, Cayan DR, Hayward TL (1987) Climate and chlorophyll a: Long-term trends in the central North Pacific. *Science* 238: 70-72
- Vincent LA, Gullett DW (1999) Canadian historical and homogeneous temperature datasets for climate change analyses. *Int. J. of Clim* 19: 1375-1388
- Walker GT, Bliss EW (1932) "World Weather VI" *Memoirs of the Royal Meteorological Society*, vol.4, n39, London, England. Pp 119-139
- Wallace JM, Gutzler DS (1981) Teleconnections in the geopotential height field during the Northern Hemisphere winter. *Mon Weather Rev*, 109: 748-812
- Wallace JM, Lim GH, Blackmon (1988) Relationship between cyclone tracks, anticyclone tracks and baroclinic waveguides. *J Atmos Sci* 45: 439-462
- Wallace JM Smith C, Jiang Q (1990) Spatial patterns of atmosphere-ocean interaction in the Northern winter. *J Clim* 3: 990-998
- Wang Bin (1994) On the annual cycle in the tropical Eastern Central Pacific. *J Clim* 7: 1926-1942
- Wang XL, Swail VR, Zwiers FW (2006) Climatology and changes of extra-tropical cyclone activity: comparison of ERA-40 with NCEP-NCAR Reanalysis for 1958-2001. *J Clim* 19: 3145-3166

-
- Ware DM, Thompson RE (1991) Link between long-term variability in upwelling and fish production in the northeast Pacific Ocean. *Canadian Journal of Fisheries Aquatic Sciences* 48: 2296-2306
- Watterson IG (2006) The intensity of precipitation during extratropical cyclones in global warming simulations: a link to cyclone intensity? *Tellus* 58A: 82-97
- White WB, Walker E (1973) Meridional atmospheric teleconnections over the North Pacific from 1950 et 1972. *Mon Wea Rev* 101: 817-822
- Xiaoje Z, Jilin S, Zhengyu L, Qinyu L, Martin JE (soumis, 2006) A synoptic analysis of the interannual variability of winter cyclone activity in the Aleutian Low region
- Xie SP, Kunitani T, Kubokawa A, Nonaka M, Hosoda S (2000) Interdecadal thermocline variability in the North Pacific for 1958-1997: A GCM simulation. *J Phys Oceanogr* 30: 2798-2813
- Yamagata T, Masumoto Y (1992) Interdecadal natural climate variability in the western Pacific and its implication in global warming. *J. Meteorol Soc Japan* 70: 167-175
- Zhang Y, Wang WC (1997) Model-simulated northern winter cyclone and anticyclone activity under a greenhouse warming scenario. *J Clim* 10: 1616-1636
- Zhang Y, Wallace JM, Battisti DS (1997) ENSO-like interdecadal variability: 1900-93. *J Clim* 10: 1004-1020
- Zishka KM, Smith PJ (1980) The climatology of cyclones and anticyclones over North America and surrounding ocean environs for January and July, 1950-1977. *Mon Weather Rev* 108: 387-401
- Zolina O, Gulev SK (2002) Improving the accuracy of mapping cyclone numbers and frequencies. *Mon Weather Rev* 130: 748-759

Liste des figures

Figure A. Anomalies de la température de la surface océanique (couleurs), de la pression au niveau de la mer (contours) et de la tension du vent (flèches) associées aux phases hivernales typiques de PDO, chaude (en haut à gauche) et froide (en haut à droite). Valeurs mensuelles de l'indice PDO de janvier 1900 à novembre 2005 (en bas).....	2
Figure B. Climatologie hivernale (JFM) de la fréquence (occurrence / hiver) des cyclones extra-tropicaux (à gauche) et du nombre de cyclones extra-tropicaux (nombre de passages / hiver, à droite) établie sur la période 1958-1999 à partir des données Réanalysées NCEP-NCAR de la pression au niveau de la mer (PNM) au pas de temps de 6h. Zolina et Gulev, 2002. Exemple : lorsqu'un cyclone extra-tropical ne s'est pas déplacé entre 0h et 18 h, 4 occurrences seront enregistrées, en revanche, seulement 1 passage sera comptabilisé. Ainsi, en considérant simultanément les figures de gauche et de droite, on peut avoir une approximation de la vitesse de déplacement des cyclones extra-tropicaux.....	8
Figure 1.1. Densité des observations assimilées par les Réanalyses NCEP-NCAR, à l'échelle globale et par boîte de $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ (a) stations de surface continentale, (b) radiosondages, (c) navires et bouées et (d) satellites, de janvier 1948 à janvier 1998. Source : http://nomad3.ncep.noaa.gov	14
Figure 1.2. Moyenne annuelle (a) des pressions au niveau de la mer (PNM en hPa), (b) des températures de l'air à 2 mètres (Ta2m, en °C) et vent à 10m (v10m, en m/s), de 1950 à 2001. D= dépression des Aléoutiennes, A = anticyclone sub-tropical.....	17
Figure 1.3. (a) moyenne des PNM de janvier, (b) différence entre les PNM moyennes de janvier et les PNM moyennes annuelles, (c) moyenne des Ta2m et vent10m en janvier, (d) différence entre les Ta2m et vent10m moyens de janvier et les Ta2m et vent10m moyens annuels, de 1950 à 2001.....	18
Figure 1.4. (a) moyenne des PNM de juillet, (b) différence entre les PNM moyennes de juillet et les PNM moyennes annuelles, (c) moyenne des Ta2m et vent10m en juillet, (d) différence entre les Ta2m et vent10m moyens de juillet et les Ta2m et vent10m moyens annuels, de 1950 à 2001.....	20
Figure 1.5. Déplacement schématique des dépressions (D) et des anticyclones (A) transitoires dans l'Hémisphère Nord.....	21
Figure 1.6. De (a) à (f), pression moyenne journalière au niveau de la mer du 1 ^{er} au 6 janvier 2000. Source : http://www.cdc.noaa.gov	23
Figure 1.7. De (a) à (f), pression moyenne journalière au niveau de la mer du 1 ^{er} au 6 juillet 2000. Source : http://www.cdc.noaa.gov	26
Figure 1.8.(a) Trajectoires des cyclones extra-tropicaux dont la durée de vie est ≥ 3 jours, en hiver boréal (DJF) de 1979/80 à 1997-98, établies à partir des données de la pression au niveau de la mer moyenne journalière NCEP-NCAR (Geng et Sugi 2001, 2003). (b) Moyenne saisonnière de la fréquence des dépressions par maille de $5^{\circ} \times 5^{\circ}$ (lon*lat) pour (a) l'hiver (JFM), (b) le printemps (AMJ), (c) l'été (JAS) et (d) l'automne (OND) de haut en bas. Calcul sur la période 1950-2001 à partir des données Réanalysées NCEP-NCAR de la pression au niveau de la mer (PNM). Eichler et Higgins, 2006 ; Serreze, 1995 ; Serreze et al. 1997 (http://www.cpc.ncep.noaa.gov).....	27
Figure 1.9. (a) (a) champs de variation de la pression d'ouest en est, (b) minima locaux de pression par bande de latitude, (c) maxima locaux de pression par bande de latitude (01/01/1950).....	32
Figure 1.10. (a) (a) champs de variation de la pression du sud vers le nord, (b) minima locaux de pression par bande de longitude, (c) maxima locaux de pression par bande de longitude (01/01/1950).....	32
Figure 1.11. (a) minima et (b) maxima locaux de pression dans les quatre directions : ouest, est, sud, nord (01/01/1950).....	33
Figure 1.12. (a) minima < 1005 hPa et (b) maxima > 1015 hPa locaux de pression (01/01/1950).....	33
Figure 1.13. (a) minima < 1005 hPa et (b) maxima > 1015 hPa locaux de pression, séparés d'au moins 500 km (01/50/1950).....	34
Figure 1.14. (a) pression standard moyenne annuelle en 2001, (b) modèle numérique d'altitude.....	35
Figure 1.15. Connexion des minima (a) et maxima (b) locaux de pression, extrait du fichier répertoire des trajectoires des dépressions (c) et des anticyclones (d) entre le 01/01/1950 et le 02/01/1950. Les points non connectés ne sont pas représentés sur les cartes a et b.....	37
Figure 1.16. Schéma de synthèse de la routine d'établissement des trajectoires.....	38
Figure 1.17. Durée de vie des minima (a) et maxima (a) de pression au cours de l'année 1950.....	40
Figure 1.18. Fréquence des trajectoires supérieures ou égales à 2, 3, 4, et 5 jours, en 1950. Rouge=dépressions, Bleu=anticyclones. Nous avons vérifié pour l'ensemble de la période 1950-2001 que le nombre d'anticyclones était toujours supérieur à celui des dépressions.....	41
Figure 1.19. Trajectoires des dépressions (a) et des anticyclones (b) et PNM moyenne annuelle en arrière-plan, en 1950.....	42

Figure 2.1. Limites de l'espace géographique à l'intérieur duquel les trajectoires des systèmes transitoires ont été établies (lignes pleines noires), limites de l'espace géographique à l'intérieur duquel les systèmes transitoires ont circulé durant au moins 1 jour (lignes en tiret noires, 30°N-60°N / 120°E-120°O ou 120-240 en °E par rapport au méridien de Greenwich).....	45
Figure 2.2. Histogrammes des caractéristiques des dépressions.....	47
Figure 2.3. Histogrammes des caractéristiques des anticyclones.....	51
Figure 2.4. Fréquences moyennes mensuelles des dépressions (a) et des anticyclones (b). Segments verticaux=écart-type.....	53
Figure 2.5. Pressions moyennes mensuelles des dépressions (rouge) et des anticyclones (bleu), (a) pression moyenne au cours des trajectoires, pression minimale (b) et maximale (c) atteinte. Segments verticaux=écart-type.....	54
Figure 2.6. Durée moyenne mensuelle des trajectoires des dépressions et des anticyclones (a et b), distance parcourue (c et d), vitesse de déplacement (e et f). Segments verticaux=écart-type.....	55
Figure 2.7. Moyennes mensuelles des caractéristiques spatiales en latitude des dépressions (a, b, c, g) et des anticyclones (d, e, f, h), latitude moyenne, latitude minimale, latitude maximale, amplitude latitudinale, au cours des trajectoires. Segments verticaux=écart-type.....	57
Figure 2.8. Moyennes mensuelles des caractéristiques spatiales en longitude des dépressions (a, b, c, g) et des anticyclones (d, e, f, h), longitude moyenne, longitude minimale, longitude maximale, amplitude longitudinale, au cours des trajectoires. Segments verticaux=écart-type.....	58
Figure 2.9. Exemples de trajectoires des dépressions (a) et des anticyclones (b), et PNM moyenne de 1950 à 1954 en JFM. Le symbole « * » matérialise le début de trajectoire.....	62
Figure 2.10. Exemples de trajectoires des dépressions (a) et des anticyclones (b), et PNM moyenne de 1950 à 1954 en JAS. Le symbole « * » matérialise le début de trajectoire.....	63
Figure 2.11. Exemples de trajectoires des dépressions (a) et des anticyclones (b), et PNM moyenne de 1950 à 1954 en AMJ. Le symbole « * » matérialise le début de trajectoire.....	64
Figure 2.12. Exemples de trajectoires des dépressions (a) et des anticyclones (b), et PNM moyenne de 1950 à 1954 en OND. Le symbole « * » matérialise le début de trajectoire.....	65
Figure 2.13. Position et intensité moyenne mensuelle de l'activité dépressionnaire et de l'activité anticyclonique. Les lettres représentent les mois et les couleurs la pression moyenne (en hPa).....	66
Figure 3.1. Trajectoires des dépressions ayant atteint la zone 40°N-60°N / 150°E-140°O, au cours des mois de décembre – janvier - février (DJF), 1976-77 (A1), 1982-1983 (A2), 1986-1987 (A3), 1968-1969 (B1), 1970-1971 (B2), 1971-1972 (B3). A gauche, (A) correspondent les hivers durant lesquels la dépression des Aléoutiennes est intensifiée et à droite, (B) anormalement affaiblie. Xioje et al. (2006).....	71
Figure 3.2. Exemple de trajectoires des dépressions ayant atteint le Pacifique Nord-Est en JFM (1950), PNM JFM 1950, limite spatiale de filtrage (ligne pleine : 170°O ou 190°E).....	74
Figure 3.3. Exemple de trajectoires des anticyclones ayant atteint le Pacifique Nord-Est en JFM (1950), PNM JFM 1950, limite spatiale de filtrage (ligne pleine : 170°O ou 190°E).....	75
Figure 3.4. Séries temporelles des caractéristiques des dépressions ayant atteint le Pacifique Nord-Est en JFM de 1950 à 2001.....	78
Figure 3.5. Séries temporelles des caractéristiques des anticyclones ayant atteint le Pacifique Nord-Est en JFM de 1950 à 2001.....	81
Figure 3.6. Indice standardisé de l'activité dépressionnaire (anomalies standardisées des fréquences – anomalies standardisées des pressions).....	85
Figure 3.7. Indice standardisé de l'activité anticyclonique (anomalies standardisées des fréquences + anomalies standardisées des pressions).....	86
Figure 3.8. Corrélations glissantes entre l'indice D et l'indice A, dont la taille de la fenêtre est égale à 11 ans (vert) et égale à 21 ans (noir). Les lignes horizontales en tirets représentent les seuils de corrélation significative à 95% (t-test unilatéral) pour une période de 11 ans (-0.51) et de 21 ans (-0.36). Les principales périodes de décrochement d'après les fenêtres de 11 ans et de 21 ans sont mentionnées en vert et en noir respectivement.....	87
Figure 3.9. Indice standardisé de l'activité transitoire (Indice D standardisé – Indice A standardisé).....	88
Figure 3.10. Anomalies des PNM et trajectoires des dépressions et des anticyclones en JFM 1962 (a) 1974 (b) et 1983. Ces hivers représentent un exemple de la phase négative, neutre et positive de l'indice DA respectivement.....	89
Figure 4.1. Cartes des coefficients de corrélation linéaire entre les pressions au niveau de la mer et l'indice D (a), l'indice A (b) et l'indice DA (c), JFM de 1950 à 2001 (couleurs=sig.>95%, t-test bilatéral).....	93

Figure 4.2. Cartes des coefficients de corrélation linéaire entre les températures de l'air à 2 mètres (couleurs), le vent à 10 mètres (vecteurs) et l'indice D (a), l'indice A (b) et l'indice DA (c), JFM de 1950 à 2001 (couleurs=sig.>95%, t-test bilatéral).....	94
Figure 4.3. Cartes des coefficients de corrélation linéaire entre l'altitude du géopotential 500 hPa et l'indice D (a), l'indice A (b) et l'indice DA (c), JFM de 1950 à 2001 (couleurs=sig.>95%, t-test bilatéral).....	98
Figure 4.4. Cartes des coefficients de corrélation linéaire entre les températures (couleurs), le vent à 500 hPa (vecteurs) et l'indice D (a), l'indice A (b) et l'indice DA (c), JFM de 1950 à 2001 (couleurs = sig.>95%, t-test bilatéral).....	98
Figure 4.5. Cartes des coefficients de corrélation linéaire entre l'altitude du géopotential 200 hPa et l'indice D (a), l'indice A (b) et l'indice DA (c), JFM de 1950 à 2001 (couleurs=sig.>95%, t-test bilatéral).....	99
Figure 4.6. Cartes des coefficients de corrélation linéaire entre les températures de l'air (couleurs), le vent à 200 hPa (vecteurs) et l'indice D (a), l'indice A (b) et l'indice DA (c), JFM de 1950 à 2001 (couleurs=sig.>95%, t-test bilatéral).....	100
Figure 4.7. (a) Indice PDO et (b) carte des coefficients de corrélation linéaire entre l'indice PDO et les températures de surface océanique, JFM de 1950 à 2001 (couleurs=sig.>95%, t-test bilatéral). L'indice PDO est calculé à partir des TSO de la zone représentée sur la figure b.....	103
Figure 4.8. (a) Indice NINO3.4 et (b) carte des coefficients de corrélation linéaire entre l'indice NINO3.4 et les températures de surface océanique, JFM de 1950 à 2001 (couleurs=sig.>95%, t-test bilatéral). L'indice NINO3.4 est calculé à partir des TSO de la zone représentée sur la figure b.....	103
Figure 4.9. (a) Indice NP et (b) carte des coefficients de corrélation linéaire entre l'indice NP et les pressions au niveau de la mer, JFM de 1950 à 2001 (couleurs=sig.>95%, t-test bilatéral). L'indice NP est calculé à partir des PNM de la zone représentée sur la figure b.....	104
Figure 4.10. (a) Indice PNA et (b) carte des coefficients de corrélation linéaire entre l'indice PNA et l'altitude du géopotential 500 hPa, JFM de 1950 à 2001 (couleurs=sig.>95%, t-test bilatéral).....	105
Figure 5.1. Pourcentage moyen d'observations journalières par hiver pour les 276 stations (a), pourcentage d'observations pour chaque hiver et pour toutes les stations classées du sud (n°1) vers le nord (n°276) au cours de la période 1950-2001 (b), nombre d'hiver sans observation (c). Le nombre d'observations est le même pour les Tmin, Tmax et P.....	110
Figure 5.2. Fréquence des stations en fonction de l'altitude en mètre (a), altitude des stations en mètres (b)..	110
Figure 5.3. Moyenne hivernale (JFM) des Tmin (a), Tmax (b), variabilité inter-journalière des Tmin (c), Tmax (d) et amplitude thermique diurne (e) en degré Celsius, 1950-2001.....	113
Figure 5.4. Moyenne hivernale (JFM) des cumuls des précipitations en millimètres (a) et des fréquences de jour de pluie (b), 1950-2001.....	113
Figure 5.5 : Aires climatiques de l'Amérique du Nord-Ouest.....	114
Figure 5.6. Tendances linéaires des Tmin (a), Tmax (b), Amplitudes thermiques diurnes (c) en JFM, au cours de la période 1950-2001 (couleurs = sig. > 95%, t-test bilatéral). Cf. Annexes, figure A5.2 pour visualiser l'évolution des Tmin pour 4 stations.....	115
Figure 5.7. Anomalies standardisées des Tmin (a) et Tmax (b) en JFM au cours de la période 1950-2001. Les stations sont classées du sud (1) vers le nord (276). La station n°1 se situe à 17.05°N, la n°50 à 30.45°N, la n°100 à 36.58°N, la n°150 à 41.25°N, la n°200 à 46.57°N, la n°250 à 55.20°N et la n°276 à 76.23°N...	116
Figure 5.8. Analyse en Composantes Principales des Tmin (à gauche) et Tmax (à droite) JFM 1950-2001, pourcentage de variance expliquée par chaque composante (a, b), première composante principale (c, d, e, f), deuxième composante principale (g, h, i, j), troisième composante (k, l, m, n) et quatrième composante (o, p, q, r). Sur les cartes sont représentés les coefficients de corrélation linéaire (couleurs = sig. > 95%, t-test bilatéral).....	118
Figure 5.9. Tendances linéaires des cumuls de précipitations (a) et fréquences des jours de pluie (b) en JFM au cours de la période 1950-2001 (couleurs = sig. > 95%, t-test bilatéral). Cf. Annexes, figure A5.3 pour visualiser l'évolution des cumuls de précipitations pour 4 stations.....	119
Figure 5.10. Anomalies standardisées des cumuls des précipitations (a) et des fréquences des jours de pluie (b) en JFM, au cours de la période 1950-2001. Les stations sont classées du sud (1) vers le nord (276). La station n°1 se situe à 17.05°N, la n°50 à 30.45°N, la n°100 à 36.58°N, la n°150 à 41.25°N, la n°200 à 46.57°N, la n°250 à 55.20°N et la n°276 à 76.23°N.....	120
Figure 5.11. Analyse en Composantes Principales avec rotation Varimax des cumuls de précipitations (à gauche) et des fréquences des jours de pluie (à droite) en JFM 1950-2001, pourcentage de variance expliquée par chaque composante (a, b, c), première (d, e, f, g), deuxième (h, i, j, k), troisième (l, m, n, o) et quatrième (p, q, r, s) composante principale avec rotation varimax. Sur les cartes sont représentés les coefficients de corrélation linéaire (couleurs = sig. > 95%, t-test bilatéral).....	122

Figure 5.12. Coefficients de corrélations linéaires entre les Tmin et les indices D, A et DA (a, b, c) en JFM 1950-2001. Même chose mais avec les Tmax (d, e, f). (couleurs = sig. > 95%, t-test bilatéral).....	124
Figure 5.13. Coefficients de corrélations linéaires entre la variabilité inter-journalière des Tmin et les indices D, A et DA (a, b, c) en JFM 1950-2001. Même chose pour la variabilité inter-journalière des Tmax (d, e, f). (couleurs = sig. > 95%, t-test bilatéral).....	126
Figure 5.14. Coefficients de corrélations linéaires entre l'amplitude thermique diurne et les indices D, A et DA (a, b, c) en JFM 1950-2001. (couleurs = sig. > 95%, t-test bilatéral).....	126
Figure 5.15. Coefficients de corrélations linéaires entre la fréquence des nuits extrêmement chaudes (Tmin90) et les indices D, A et DA (a, b, c) en JFM 1950-2001. Même chose pour la fréquence des journées extrêmement chaudes (Tmax90) (d, e, f). (couleurs = sig. > 95%, t-test bilatéral).....	128
Figure 5.16. Coefficients de corrélations linéaires entre la fréquence des nuits extrêmement froides (Tmin10) et les indices D, A et DA (a, b, c) en JFM 1950-2001. Même chose pour la fréquence des journées extrêmement froides (Tmax10) (d, e, f). (couleurs = sig. > 95%, t-test bilatéral).....	129
Figure 5.17. Coefficients de corrélations linéaires entre les cumuls hivernaux (JFM) des précipitations et les indices D, A et DA (a, b, c) 1950-2001. (couleurs = sig. > 95%, t-test bilatéral).....	130
Figure 5.18. Coefficients de corrélations linéaires entre les fréquences des jours de pluie (JFM) des précipitations et les indices D, A et DA (a, b, c) 1950-2001. (couleurs = sig. > 95%, t-test bilatéral).....	130
Figure 6.1. Moyenne hivernale (a et b) de la pression au niveau de la mer (PNM en hPa), (c et d) de la température de l'air à 2 mètres (Ta2m, en °C) et du vent à 10 mètres (v10m, en m/s), de 1950 à 1999 d'après les Réanalyses NCEP-NCAR (à gauche) et d'après la simulation XX1 du modèle CNRM-CM3 (à droite).....	139
Figure 6.2. Moyenne hivernale (a et b) de la pression au niveau de la mer (PNM en hPa), (c et d) de la variabilité inter-journalière des PNM (en hPa) de 1950 à 1999 pour l'espace 0°N-90°N / 80°E-110°O d'après les Réanalyses NCEP-NCAR (à gauche) et d'après la simulation XX1 du modèle CNRM-CM3 (à droite). 141	141
Figure 6.3. Evolution de la pression au niveau de la mer Globale (a) et dans l'espace 0°-9°0N / 80°E-110°O (b), évolution de la température de l'air à 2 mètres globale (c) d'après les Réanalyses NCEP-NCAR en JFM de 1950 à 1999. Idem d'après le modèle CNRM-CM3 (d, e, f).....	140
Figure 6.4. Trajectoires des dépressions inférieures à 1005 hPa et d'une durée de vie supérieure ou égale à 2 j (a et b), cartographie de la fréquence des dépressions sur une grille de 2.5*2.5 (c et d) et sur une grille de 10*10 (e et f) en JFM 1950 d'après les Réanalyses NCEP-NCAR (à gauche) et d'après la simulation XX1 du modèle CNRM-CM3 (à droite). Nous devons préciser que la simulation XX1 du modèle n'est pas supposée reproduire les conditions climatiques réelles année par année, donc les trajectoires pour l'hiver 1950, comme pour les autres hivers, ne doivent pas être comparées strictement. Dans cet exemple, nous pouvons dire que les trajectoires et la répartition géographique de l'occurrence des dépressions sont cohérentes dans le modèle CNRM-CM3.....	144
Figure 6.5. Comme figure 6.4 mais pour les anticyclones supérieurs à 1015 hPa.....	145
Figure 6.6. Moyenne des fréquences de formation (a et b) et de déclin (c et d) des dépressions ayant circulé dans le Pacifique Nord en JFM (1950-99), d'après les Réanalyses NCEP-NCAR (à gauche) et d'après la simulation XX1 du modèle CNRM-CM3 (à droite).....	146
Figure 6.7. Fréquence (a, b) et pression centrale (c, d) des dépressions d'après les Réanalyses NCEP-NCAR (à gauche) et la simulation XX1 du modèle CNRM-CM3 (à droite). Différence entre b et a (e, fréquence) et différence entre d et c (f, pression centrale). Les informations sur les continents ne sont pas représentées (masque). Sur les cartes a et b les valeurs comprises entre 0 et 1 ne sont pas perceptibles car sont représentées en blanc. En réalité, au sud de 30°N, leur moyenne hivernale est simplement inférieure à 1 par maille et supérieure à 0 pour toutes les mailles de couleurs représentées sur les figures c et d.....	147
Figure 6.8. Moyenne des fréquences de formation (a et b) et de déclin (c et d) des dépressions ayant circulé dans le Pacifique Nord en JFM (1950-99), d'après les Réanalyses NCEP-NCAR (à gauche) et d'après la simulation XX1 du modèle CNRM-CM3 (à droite).....	151
Figure 6.9. Fréquence (a, b) et pression centrale (c, d) des anticyclones d'après les Réanalyses NCEP-NCAR (à gauche) et la simulation XX1 du modèle CNRM-CM3 (à droite). Différence entre b et a (e, fréquence) et différence entre d et c (f, pression centrale). Les informations sur les continents ne sont pas représentées (masque).....	152
Figure 7.1. (a) Variation inter-annuelle des PNM en JFM de 1950 à 1999 d'après les Réanalyses NCEP-NCAR et (b) d'après la simulation XX1 du modèle CNRM-CM3 (Ecart-types en hPa).....	156

- Figure 7.2. Variation inter-annuelle de la fréquence (a, b), de la pression centrale (c, d) des dépressions, d'après les Réanalyses NCEP-NCAR (à gauche) et d'après la simulation XX1 du modèle CNRM-CM3 (à droite). Différence entre b et a (e) et entre d et c (f). 157
- Figure 7.3. Variation inter-annuelle de la fréquence (a, b), de la pression centrale (c, d) des anticyclones, d'après les Réanalyses NCEP-NCAR (à gauche) et d'après la simulation XX1 du modèle CNRM-CM3 (à droite). Différence entre b et a (e) et entre d et c (f). 158
- Figure 7.4. Cartes des coefficients de corrélation linéaire entre la fréquence des dépressions et des anticyclones d'après les Réanalyses NCEP-NCAR (a) d'après et la simulation XX1 du modèle CNRM-CM3 (JFM, 1950-99). 160
- Figure 7.5. Première composante principale de la fréquence des dépressions, indices CP1-FD (a, b), carte des coefficients de corrélation linéaire entre les indices précédents et la fréquence des dépressions (c, d), les pressions au niveau de la mer (e, f), les températures de l'air à 2 m et le vent à 10m (g, h). Les couleurs = corrélations sig.> 95%. A gauche d'après les Réanalyses et à droite d'après la simulation XX1 du modèle CNRM-CM3. (i) carte des coefficients de corrélation linéaire entre l'indice CP1-FD.NCEP-NCAR et les températures minimales (cercles jaunes / verts, rouges / bleus correspondent à des coef. positifs / négatifs, sig. > 95% , sig. > 99% respectivement) et les cumuls des précipitations (signes + / - correspondent à des coef. positifs / négatifs, gris = sig. > 95% et noirs = sig. > 99%). JFM 1950-99. 164
- Figure 7.6. Deuxième composante principale de la fréquence des dépressions, indices CP2-FD (a, b), carte des coefficients de corrélation linéaire entre les indices précédents et la fréquence des dépressions (c, d), les pressions au niveau de la mer (e, f), les températures de l'air à 2 m et le vent à 10m (g, h). Les couleurs = corrélations sig.> 95%. A gauche d'après les Réanalyses et à droite d'après la simulation XX1 du modèle CNRM-CM3. (i) carte des coefficients de corrélation linéaire entre l'indice CP2-FD.NCEP-NCAR et les températures minimales (cercles jaunes / verts, rouges / bleus correspondent à des coef. positifs / négatifs, sig. > 95% , sig. > 99% respectivement) et les cumuls des précipitations (signes + / - correspondent à des coef. positifs / négatifs, gris = sig. > 95% et noirs = sig. > 99%). JFM 1950-99. 167
- Figure 7.7. Première composante principale de l'intensité des dépressions (**intensité = inverse de la pression centrale pour les dépressions**), indice CP1-ID (a, b), carte des coefficients de corrélation linéaire entre les indices précédents et l'intensité des dépressions (c, d), les pressions au niveau de la mer (e, f), les températures de l'air à 2 m et le vent à 10m (g, h). Les couleurs = corrélations sig.> 95%. A gauche d'après les Réanalyses et à droite d'après la simulation XX1 du modèle CNRM-CM3. (i) carte des coefficients de corrélation linéaire entre l'indice CP1-ID.NCEP-NCAR et les températures minimales (cercles jaunes / verts, rouges / bleus correspondent à des coef. positifs / négatifs, sig. > 95% , sig. > 99% respectivement) et les cumuls des précipitations (signes + / - correspondent à des coef. positifs / négatifs, gris = sig. > 95% et noirs = sig. > 99%). JFM 1950-99. 170
- Figure 7.8. Première composante principale de la fréquence des anticyclones, indices CP1-FA (a, b), carte des coefficients de corrélation linéaire entre les indices précédents et la fréquence des anticyclones (c, d), les pressions au niveau de la mer (e, f), les températures de l'air à 2 m et le vent à 10m (g, h). Les couleurs = corrélations sig.> 95%. A gauche d'après les Réanalyses et à droite d'après la simulation XX1 du modèle CNRM-CM3. (i) carte des coefficients de corrélation linéaire entre l'indice CP1-FA.NCEP-NCAR et les températures minimales (cercles jaunes / verts, rouges / bleus correspondent à des coef. positifs / négatifs, sig. > 95% , sig. > 99% respectivement) et les cumuls des précipitations (signes + / - correspondent à des coef. positifs / négatifs, gris = sig. > 95% et noirs = sig. > 99%). JFM 1950-99. 174
- Figure 7.9. Deuxième composante principale de la fréquence des anticyclones, indices CP2-FA (a, b), carte des coefficients de corrélation linéaire entre les indices précédents et la fréquence des anticyclones (c, d), les pressions au niveau de la mer (e, f), les températures de l'air à 2 m et le vent à 10m (g, h). Les couleurs = corrélations sig.> 95%. A gauche d'après les Réanalyses et à droite d'après la simulation XX1 du modèle CNRM-CM3. (i) carte des coefficients de corrélation linéaire entre l'indice CP2-FA.NCEP-NCAR et les températures minimales (cercles jaunes / verts, rouges / bleus correspondent à des coef. positifs / négatifs, sig. > 95% , sig. > 99% respectivement) et les cumuls des précipitations (signes + / - correspondent à des coef. positifs / négatifs, gris = sig. > 95% et noirs = sig. > 99%). JFM 1950-99. 176
- Figure 7.10. Première composante principale de l'intensité des anticyclones (CP1-IA.NCEP-NCAR : **intensité = pression centrale pour les anticyclones**), indices CP1-IA (a, b), carte des coefficients de corrélation linéaire entre les indices précédents et l'intensité des anticyclones (c, d), les pressions au niveau de la mer (e, f), les températures de l'air à 2 m et le vent à 10m (g, h). Les couleurs = corrélations sig.> 95%. A gauche d'après les Réanalyses et à droite d'après la simulation XX1 du modèle CNRM-CM3. (i) carte des coefficients de corrélation linéaire entre l'indice CP1-IA.NCEP-NCAR et les températures minimales (cercles jaunes / verts, rouges / bleus correspondent à des coef. positifs / négatifs, sig. > 95% , sig. > 99% respectivement) et les cumuls des précipitations (signes + / - correspondent à des coef. positifs / négatifs, gris = sig. > 95% et noirs = sig. > 99%). JFM 1950-99. 179

Figure 7.11. Deuxième composante principale de l'intensité des anticyclones (CP2-IA.CNRM-CM3 : intensité = pression centrale pour les anticyclones), indice CP2-IA.CNRM-CM3 (a), carte des coefficients de corrélation linéaire entre l'indice CP2-IA.CNRM-CM3 et l'intensité des anticyclones (b), les pressions au niveau de la mer (c), les températures de l'air à 2 m et le vent à 10m (d). Les couleurs = corrélations sig.> 95%. JFM 1950-99, simulation XX1.....	181
Figure 8.1 : Evolution de la température de l'air à 2 m globale (a, b) et de PNM (c, d) d'après la simulation XX1 (à gauche, de 1950 à 1999) et la simulation SRES-A2 (à droite, de 2050 à 2099) du modèle CNRM-CM3 en JFM.....	185
Figure 8.2 : Moyenne hivernale de la température de l'air à 2 mètres et du vent à 10 mètres (a) et de la pression au niveau de la mer (b), de 2050 à 2099 d'après la simulation SRES-A2 du modèle CNRM-CM3. Différence entre la simulation SRES-A2 et XX1 du modèle CNRM-CM3 (b et d).....	185
Figure 8.3: Moyenne hivernale de la température de l'air à 2 mètres et du vent à 10 mètres (a) et de la pression au niveau de la mer (b), de 2050 à 2099 d'après la simulation SRES-A2 du modèle CNRM-CM3 pour l'espace 0°N-90°N / 80°E-110°O. Différence entre la simulation SRES-A2 et XX1 du modèle CNRM-CM3 (b et d).....	186
Figure 8.4 : Fréquence moyenne hivernale des dépressions dans la simulation SRES-A2 (a). Différence de la fréquence moyenne des dépressions entre la simulation SRES-A2 et la simulation XX1 (b, couleur = sig. > 95%). Pression centrale moyenne des dépressions dans la simulation SRES-A2 (c). Différence de la pression centrale moyenne des dépressions entre la simulation SRES-A2 et la simulation XX1 (d, couleur = sig. > 95%).....	188
Figure 8.5 : Fréquence moyenne hivernale des anticyclones dans la simulation SRES-A2 (a). Différence de la fréquence moyenne des anticyclones entre la simulation SRES-A2 et la simulation XX1 (b, couleur = sig. > 95%). Pression centrale moyenne des anticyclones dans la simulation SRES-A2 (c). Différence de la pression centrale moyenne des anticyclones entre la simulation SRES-A2 et la simulation XX1 (d, couleur = sig. > 95%).....	190
Figure 8.6 : Indice mode 1 (a) mode 2 (b) de la fréquence des dépressions. Indice mode 1 de l'intensité des dépressions (c). Intensité = inverse de la pression centrale pour les dépressions.....	193
Figure 8.7 : Indice mode 1 (a) mode 2 (b) de la fréquence des anticyclones. Indice mode 1 de l'intensité des anticyclones (c). Intensité = pression centrale pour les anticyclones.....	194
Figure C: Schéma de synthèse de la circulation moyenne des dépressions (en rouge) et des anticyclones (en bleu) en hiver (à gauche) et en été (à droite).....	199
Figure D: Différences significatives (>90%) entre de la période 1977-1999 et la période 1950-1976 de la fréquence (couleurs) et de l'intensité (signes + et -) moyenne des dépressions (à gauche) et des anticyclones (à droite).....	200
Figure E: Schéma de synthèse de la circulation moyenne des dépressions (en rouge) et des anticyclones (en bleu) en hiver, avant 1977 (à gauche) et après 1977 (à droite).....	200
Figure F. Relations entre l'activité dépressionnaire et la fréquence des jours de pluie a Corrélations significatives (> 95%) positives (cercles) et négatives (triangles), entre la fréquence des jours de pluie et : 1- La fréquence des dépressions entre 30°N et 50°N, en bleu; 2- La fréquence des dépressions sur l'Est des Aléoutiennes, en rouge; 3- L'intensité des dépressions dans les moyennes latitudes, en jaune ; 4-Violet : 1 + 2 ; 5-Vert : 1 + 3 ; 6-Orange : 2 + 3 ; 7-Marron : 1+ 2 + 3. b , tendance observée de la fréquence des jours de pluie sur la période 1950-2001 (reprise de la figure 5.9.b), bleu = tendance positive significative (> 95%), orange : tendance négative significative (> 95%).....	202
Figure G: Différences significatives (>90%) entre de la période 2050-2099 (SRES-A2) et la période 1950-1999 (XX1) de la fréquence (couleurs) et de l'intensité (signes + et -) moyenne des dépressions (à gauche) et des anticyclones (à droite).....	204
Figure H: Schéma de synthèse de la circulation hivernale des dépressions (en rouge) et des anticyclones (en bleu) pour la période 2050-2099 (SRES-A2) et conséquences possibles sur les températures et la fréquence des jours de pluie sur l'Ouest de l'Amérique du Nord.....	205
Figure I : Evolution des anomalies hivernales de la fréquence totale des dépressions (a) et de la fréquence des dépressions intenses (< 970 hPa, b) dans l'Hémisphère Nord depuis la période de référence 1961-2000 jusqu'en 2061-2100, selon le scénario SRES-A2. Les segments représentent l'évolution prévue par chacun des modèles et les points représentent la moyenne des 11 modèles (Lambert et Fyfe, 2006).....	205

Liste des tableaux

Tableau 1.1. Critères de départ pris en compte dans le schéma d'établissement automatique des trajectoires des dépressions et des anticyclones.....	30
Tableau 2.1. Paramètres de dispersion des caractéristiques trajectoires des dépressions : minimum (min), premier (Q25), deuxième (Q50), troisième (Q75) quartiles et maximum (max), au cours de la période 1950-2001.....	45
Tableau 2.2. Paramètres de dispersion des caractéristiques des trajectoires des anticyclones : minimum (min), premier (Q25), deuxième (Q50), troisième (Q75) quartiles et maximum (max).....	49
Tableau 2.3. Statistiques moyennes mensuelles des caractéristiques des dépressions et anticyclones (1950-2001). Cf. Annexes, Tableau A2.1 et A2.2.....	53
Tableau 2.4. Variation inter-mensuelle (standardisées) des caractéristiques des dépressions (a) et des anticyclones (b), couleur orange = période de plus forte activité, de type hivernal, basée sur le mois de janvier, couleur bleue = période de plus faible activité, de type estival, basée sur le mois d'août. <i>La pression maximale et minimale atteintes par les dépressions et les anticyclones respectivement ont été supprimées de l'analyse car ces paramètres ne révèlent en rien l'intensité générale (effet trop important du seuil de pression, cf. figures 2.2 et 2.3).</i>	60
Tableau 3.1. Statistiques moyennes hivernales (JFM) des caractéristiques des dépressions ayant circulé dans le Pacifique Nord-Est durant au moins 1 jour, de 1950 à 2001. F : fréquence, Pmoy : pression moyenne, Pmin : pression minimale atteinte, Pmax : pression maximale atteinte, Dur : durée de vie, Dist : distance parcourue, V : vitesse de déplacement, Latmoy : latitude moyenne, Latmin : latitude minimale atteinte, Latmax : latitude maximale atteinte, Latampl : amplitude latitudinale, Lonmoy : longitude moyenne, Lonmin : longitude moyenne atteinte, Lonmax : longitude maximale atteinte, Lonampl : amplitude longitudinale.....	73
Tableau 3.2. Statistiques moyennes hivernales (JFM) des caractéristiques des anticyclones ayant circulé dans le Pacifique Nord-Est durant au moins 1 jour, de 1950 à 2001.....	74
Tableau 3.3. Coefficients de corrélation linéaire entre les caractéristiques des dépressions ayant atteint le Pacifique Nord-Est en JFM de 1950 à 2001 (valeurs soulignées= sig. > 95% et en gras=sig. > 99%, t-test bilatéral).....	79
Tableau 3.4. Coefficients de corrélation linéaire entre les caractéristiques des anticyclones ayant atteint le Pacifique Nord-Est en JFM de 1950 à 2001 (valeurs soulignées= sig. > 95% et en gras=sig. > 99%, t-test bilatéral).....	82
Tableau 3.5. Coefficients de corrélation linéaire entre les caractéristiques des dépressions et des anticyclones ayant atteint le Pacifique Nord-Est en JFM de 1950 à 2001 (valeurs soulignées= sig. > 95% et en gras=sig. > 99%, t-test bilatéral).....	84
Tableau 4.1. Données réanalysées NCEP-NCAR utilisées pour l'analyse en surface (ou proche de la surface) en JFM de 1950 à 2001.....	92
Tableau 4.2. Données réanalysées NCEP-NCAR utilisées pour l'analyse en altitude (à 500 hPa et à 200 hPa) en JFM de 1950 à 2001.....	97
Tableau 4.3. Coefficients de corrélation linéaire, les valeurs en gras= sig. > 95% et soulignées= sig. > 99% (t-test bilatéral).....	106
Tableau 6.1. Données CNRM-CM3 utilisées pour l'analyse en surface (ou proche de la surface) : pression moyenne journalière au niveau de la mer (PNM Jour.), et, pression au niveau de la mer (PNM), température de l'air à 2 mètres (Ta2m), composante zonale et méridienne du vent à 10 mètres (u10m et v10m), moyennes saisonnières en JFM de 1950 à 1999 pour XXI et de 2050 à 2099.....	138
Tableau 6.2. Caractéristiques moyennes de l'activité dépressionnaire dans les moyennes latitudes du Pacifique Nord (30°N-60°N / 130°E-120°O). Limite de la zone A sur la Figure 6.7.a.....	149
Tableau 6.3. Caractéristiques moyennes de l'activité anticyclonique dans les moyennes latitudes du Pacifique Nord (30°N-60°N / 130°E-120°O). Limite de la zone A sur la Figure 6.7.a.....	152
Tableau 7.1. Coefficients de corrélation linéaire entre les caractéristiques (n.Traj. : nombre de trajectoires, Dur. : durée moyenne des trajectoires, Freq. : fréquence (points d'impact journalier), Press. : pression centrale) des dépressions (D) et des anticyclones (A) d'après les Réanalyses NCEP-NCAR (à gauche) et d'après la	

simulation XX1 du modèle CNRM-CM3 (à droite) dans la zone A (limites sur la figure 7.4). sig. > 95% en gras.....	160
Tableau 8.1. Caractéristiques moyennes de l'activité dépressionnaire dans les moyennes latitudes du Pacifique Nord (30°N-60°N / 130°E-120°O). Limite de la zone A sur la Figure 8.4. * différence entre SRES-A2 et XX1 sig. > 95%.....	189
Tableau 8.2 : Caractéristiques moyennes de l'activité anticyclonique dans les moyennes latitudes du Pacifique Nord (30°N-60°N / 130°E-120°O). Limite de la zone A sur la Figure 8.4. * différence entre SRES-A2 et XX1 sig. > 95%.....	190