Université Lille 1 Sciences et Technologies Ecole Doctorale Sciences Economiques, Sociales, de l'Aménagement et du Management Laboratoires Physico-Chimie des Processus de Combustion et de l'Atmosphère (UMR 8522 CNRS-Lille 1) et Territoires, Villes, Environnement et Société (EA 4477)

> Mémoire de thèse présenté en vue de l'obtention du grade de Docteur de l'Université Lille 1 Sciences et Technologies Discipline : Géographie

Influence de forçages anthropiques sur la circulation atmosphérique du niveau géopotentiel 500 hPa et sur la dispersion et les concentrations de polluants sur la région Nord-Pas de Calais au XXI^{ème} siècle

par Louise DECLERCK

Soutenue le 21/12/2012 devant la Commission d'Examen composée de

Président	Denis PETITPREZ	Professeur des Universités, PC2A, Lille 1
Rapporteurs	Claude KERGOMARD	Professeur des Universités, ENS, Paris
	Jean-Luc PONCHE	Maître de Conférences, LMSPC
Examinateurs	Bernard AUMONT	Professeur des Universités, LISA, Paris XII
	Philippe MIRABEL	Professeur des Universités, LMSPC
Directrice	Valérie FEVRE-NOLLET	Maître de Conférences, PC2A, Lille 1
Co-encadrante	Caroline NORRANT-ROMAND	Maître de Conférences, TVES, Lille 1
Invités	Jean-François PAUWELS	Professeur des Universités, PC2A, Lille 1
	Patrick LEBEGUE	Maître de Conférences, PC2A, Lille 1

Mes remerciements professionnels

Messieurs Claude Kergomard et Jean-Luc Ponche, je vous remercie d'avoir accepté le rôle de rapporteurs, merci également pour vos remarques et paroles prononcées au cours de la soutenance ainsi que pour vos corrections réalisées sur le manuscrit.

Je remercie Monsieur Bernard Aumont et Monsieur Philippe Mirabel d'avoir bien voulu être les examinateurs de ma thèse et pour leurs interventions lors de la soutenance.

Merci à Monsieur Denis Petitprez pour avoir accepté de présider la commission d'examen.

Merci également à Monsieur Patrick Lebègue ainsi qu'à Monsieur Jean-François Pauwels, invités du jury, pour leur présence en ce jour particulier.

Je remercie Madame Valérie Fèvre-Nollet et Madame Caroline Norrant-Romand, encadrantes de ma thèse. Malgré les difficultés rencontrées tout au long des quatre années de thèse, je tenais à vous remercier de m'avoir jugée capable d'effectuer ce travail en me proposant à la fin de la deuxième année de Master cette thèse. J'espère avoir fait mieux que ce que vous imaginiez.

Enfin je remercie les différents fournisseurs de données. Je remercie notamment Météo France, Atmo Nord-Pas de Calais, le World Climate Research Programme's (WCRP's) Coupled Model Intercomparison Project phase 3 (CMIP3) et le UK Met Office Hadley Centre.

Mes remerciements personnels

Ces quatre années n'ont pas toujours été toutes roses, toutes simples ou encore forts joyeuses. Les remerciements que j'adresse à Monsieur Jean-François Pauwels ne peuvent en être que plus grands et sincères. Monsieur, je vous remercie une fois encore de m'avoir « secoué les puces » et d'avoir autant insisté pour que je n'abandonne pas il y a quelques mois et même il y a un an. Maintenant *c'est fait* et j'en suis ravie. A toi aussi Patrick Lebègue je t'adresse d'énormes mercis, merci pour ta bonne humeur, tes encouragements constants, ton humanité mais aussi pour tes remarques et conseils que tu m'as donné pour le manuscrit. Il m'est tout simplement impossible de ne pas te remercier aussi pour le temps que tu as passé à me créer des scripts (en tout cas c'est comme ça que je les appelais) magiques et efficaces, on a réussi malgré tout à faire comprendre l'un à l'autre ce qu'on voulait !

Certes on n'a pas toujours le moral mais le bureau 108 est unique en cela qu'il ne me rappelle que de bons souvenirs vécus au cours des six dernières années. On s'est bien marrés, n'est-ce pas Maxence Mendez et Marion Carteret, merci pour ça, merci d'avoir été vous. Merci pour la gazette Marion (j'en rigole encore), pour nos fous rires et plus récemment pour notre danse (particulière) au River ! Maxou, je profite de l'opportunité que j'ai de mettre par écrit la gratitude et l'amitié que j'ai à ton égard. Pour être sérieuse, je te remercie pour tes innombrables conseils, corrections et ton soutien, notamment ces derniers mois et tout particulièrement la semaine avec la soutenance. Et pour être un peu plus sérieuse mais pas moins pour autant, à l'occasion je peux t'aider comme tu l'as fait, n'hésites pas! Je tiens également à souligner qu'on a été des doctorants modèles pour ne pas dire parfaits : une fin de thèse réalisée sur un demi-bureau et tout ça sans se plaindre ! Je dis Vive les cartes ! Puis, un jour, est arrivée Pauline La Sauvage (ou Prosper) qui l'est un peu moins maintenant, t'en es que plus adorable va ! Merci pour votre pack de survie (ps : si quelqu'un veut la choucroute ...). Un grand grand salut à Yathis Delicat et un grand merci pour les bons délires et plus simplement les bons moments passés avec toi, je n'oublie pas non plus ta présence le 21 qui m'a chaudement fait plaisir. Un merci aussi à Romain Vandepputte (qui aime la musique ;-), Damien Boufflers (qui tape avant d'entrer dans son propre bureau), Sébastien Germain, Alessandro Faccinetto (qui a fini par déménager !) pour ces quelques moments partagés au 108. D'autres personnes que j'ai connues plus ou moins tardivement et que j'espère vivement continuer à côtoyer, je pense particulièrement à Guillaume Chassard, Marion Blocquet, Gaël Loubert, Damien Boufflers, Thomas Mouton (avec un grand sourire), Saint-Phorien (Symphorien) Grimonprez. Je ne sais pas si *c'est normal* mais merci d'être restés jusqu'au bout le 21. Et longue vie au $N^{***} C^{***}$!

Merci à d'autres (même si pour certains ils ne sont plus au labo) pour les moments forts sympathiques qu'on a pu avoir le midi ou autre, mais ça c'était une autre époque ! Je pense notamment à Guillaume Vanhove, Xavier Mercier, Maxime Wartel mais aussi Raluca Ciuraru. Merci merci Marion et Coralie d'avoir assisté à ma répétition de thèse.

Un méga merci pour votre contribution, ce ne sera certainement pas la ville de Florence, mais Rome que je vais visiter.

Enfin et ce n'est pas rien, je tiens à citer plusieurs autres personnes du cadre horslabo avec qui j'espère passer encore beaucoup de temps ou avec qui j'ai passé beaucoup de temps : les forils (Mélanisette, Cécile et Marie-Eléonore) et les vrairils, Greg (courage ! chifoumi 1), Manon (chifoumi 2), Alban, Delphine, Romain, Nikita.

Merci La famille Declerck. Je ne sais pas si vous avez compris ce que j'ai raconté à la soutenance, ni même si vous avez bien capté ce que j'ai fait ces quatre dernières années, aussi je profite de cette exercice de style pour vous remercier de tout cœur, toutes et tous : le frère Hugues, la sœur Pauline, Bérénice, Pascal et la meilleure, ma mère. Nico, je te remercie, pour tout et tu sais à quel point ...

(Table des matières)

Introduction générale	. 1
Chapitre 1 Climat, circulation atmosphérique et qualité de l'air	. 7
[Partie 1] Contexte climatique	11
1. Climat et système climatique	11
1.1. Forçages naturels : facteurs des changements du climat	14
1.2. Forçage anthropique : effet de serre	14
2. Réchauffement : état des lieux	18
2.1. Changement climatique : conséquence du déséquilibre du bilan radiatif	18
2.2. Les scénarios climatiques	20
3. Prévisions climatiques : les modèles	21
4. Circulation et variabilités atmosphériques	25
4.1. Circulation de l'atmosphère	25
4.2. Variabilités de l'atmosphère	26
4.2.1. Structures de variabilité interannuelle	27
4.2.2. Structures de variabilité intrasaisonnière	33
4.2.3. Types de circulation	35
[Partie 2] Qualité de l'air	37
1. Pollution et polluants	38
1.1. Polluants primaires	40
1.2. Polluants primaires et secondaires	41
1.3. Polluants secondaires	42
2. Modèles de chimie-transport	43
2.1. Familles de modèles	43
2.1.1. Modèle statistique	43
2.1.2. Modèle déterministe	44
2.2. Dimension des modèles et domaine de modélisation	45
2.3. Transport des composés chimiques	46
2.4. Processus physico-chimiques	47
2.5. Distributions temporelles	48
[Partie 3] Influence du changement climatique sur les variabilités	
atmosphériques et les polluants	51
1. Structures de variabilité et changement climatique	52
1.1. Relations entre les schémas de variabilité et la météorologie	52
1.2. Résultats d'études	52
2. Evolutions des quantités de polluants atmosphériques	54
3. Positionnement de la thèse	57

Chapitre 2 Données, outils et méthodes
[Partie 1] Variabilité basse fréquence de la circulation atmosphérique. 63
1. Données et modèles
1.1. Hauteurs de géopotentiel
1.2. Forçages anthropiques
1.3. Simulations du Hadley Centre
1.4. Réanalyses NCEP/NCAR
1.5. Domaine géographique
2. Méthodes
2.1. Analyse en Composante Principale
2.2. Partitionnement en nuées dynamiques
[Partie 2] Qualité de l'air et simulation de la région Nord – Pas de
<i>Cului</i> 5
1 Caractérisation de la région d'étude
1.1 Emissions de cina polluants majeurs 71
1.2 Qualité de l'air en Nord – Pas de Calais
1.3 Situations dynamiques spécifiques 77
2. Système de modélisation
2.1. Situations météorologiques : WRF
2.2. Concentrations d'espèces chimiques : WRF-Chem
3. Séquences simulées
•
Chapitre 3 Influence de forçages anthropiques sur les structures de
variabilité atmosphérique87
[Partie 1] Modes de variabilité basse fréquence et changement
climatiaue
1. Empreintes spatiales dominantes
2. Evaluation du modèle climatique
2.1. Comparaison des matrices de données brutes
2.2. Comparaison des modes de variabilité
3. Changement des empreintes spatiales des modes de variabilité entre 20 ^{ème} et 21 ^{ème}
siècles
3.1. Comparaison des modes communs aux 5 simulations
3.1.1. Décembre
3.1.2. Janvier
3.1.3. Février
3.2. Evolution des empreintes spatiales

4. Evolution de la variabilité temporelle des modes dans un climat futur contraint :	à
forçage anthropique	131
4.1. Tendances linéaires	131
4.2. Fréquences d'occurrence des types de circulation	138
4.2.1. Types de circulations saisonniers	142
4.2.2. Types de circulations mensuels	146
4.2.3. Conclusion sur les fréquences d'occurrence des types de circulation	on 148
[Partie 2] Régimes de temps et changement climatique	. 153
1. Structures spatiales	154
2. Evolution des régimes de temps	157
2.1. Quelle reproductibilité des structures de régimes de temps pour le modé HadCM3 ?	ele 157
2.2. Comparaison des structures spatiales des régimes de temps	
2.3. Comparaison des fréquences d'occurrence des régimes de temps	
2.4. Comparaison des persistances movennes des régimes de temps	
Chapitre 4 Dispersion des polluants atmosphériques sur la région Nor Page de Calais	d- 160
	109
1. Présentation technique du modèle WRF-Chem	173
1.1. Les outils de calculs	173
1.1.1. Les mécanismes chimiques	173
1.1.2. Le mécanisme de chimie hétérogène	174
1.1.3. Options choisies dans la <i>namelist.input</i>	175
1.2. Les données d'émissions	175
2. Traitement des données météorologiques pour WRF	175
2.1. NCEP (actuel 1960-1989) : $ds090.0$	176
2.2. CNRM-CM3 (futur 2070-2099) : scénario A1B	176
3. Méthodologie de traitement des données d'émissions pour WRF-Chem	178
3.1. Base de données d'émissions	178
3.1.1. Les données EMEP	179
3.1.2. Les données ATMO Nord-Pas de Calais	180
3.2. Problème de compatibilité entre les données d'émissions et WRF-Chem	181
3.3. Méthodologie de EASYWRF-Chem	183
3.3.1. Traitements temporels des données d'émission	183
3.3.2. Traitement chimique des données d'émission : spéciation et	
agrégation	183
3.3.3. Interpolation spatiale des données d'émission	184
4. Nos simulations avec WRF et WRF-Chem	190
4.1. Séquences temporelles à modéliser	190
4.2. Différences entre les simulations actuelles et futures	192
4.2.1. Hausse généralisée des taux de particules	192

4.2.2.	Hausse marquée des taux de NO_2	
4.2.3.	Evolution mitigée des taux d'ozone	
4.2.4.	Types de circulation	
Conclusion		
Biblioaraphie		
2 to the graphice		
Anneres		237
110000000		

Liste des figures

FIGURE 1.1 – Représentation schématique des composantes du système climatique, leurs processus et leurs interactions // Le Treut et al., 2007.

FIGURE 1.2 – Description schématisée du phénomène d'effet de serre // UNEP-GRID, 2002.

FIGURE 1.3 – Variations des concentrations atmosphériques de trois gaz à effet de serre et forçages radiatifs associés // GIEC, 2007.

FIGURE 1.4 – Forçages radiatifs moyens à l'échelle mondiale en 2005 et leurs intervalles de confiance de 90 % pour divers agents et mécanismes de forçage. La colonne NCSc fait référence au niveau de connaissance scientifique. FR = forçage radiatif // GIEC, 2007.

FIGURE 1.5 – Variations observées de la température moyenne, du niveau moyen de la mer et de la couverture neigeuse dans l'hémisphère Nord. Les écarts sont calculés par rapport à la moyenne de la période 1961-1990 // GIEC, 2007.

FIGURE 1.6 – Concentrations de CO_2 associées aux scénarios d'émissions // Meehl et al., 2007.

FIGURE 1.7 – Complexité des modèles climatiques et addition de mécanismes physiques représentés schématiquement. FAR : first assessment report 1990 ; SAR : second assessment report 1996 ; TAR : thirst assessment report 2001 ; AR4 : fourth assessment report 2007 // Le Treut et al., 2007.

FIGURE 1.8 – Schéma de la circulation atmosphérique globale // NASA.

FIGURE 1.9 – Structure de l'Oscillation Nord Atlantique déterminée par ACP avec rotation sur les champs journaliers (deux fois par jour) de hauteurs de géopotentiel 700 hPa sur le mois de janvier au cours de la période 1950-84. La France est située par une étoile // Barnston et Livezey, 1987.

FIGURE 1.10 – Représentation schématique des influences météorologiques de l'ONA au cours de sa phase positive (gauche) et négative (droite).

FIGURE 1.11 – Structure de l'Est Atlantique déterminée par ACP avec rotation sur les champs journaliers (deux fois par jour) de hauteurs de géopotentiel 700 hPa sur le mois de décembre au cours de la période 1950-84. La France est située par une étoile // Barnston et Livezey, 1987.

FIGURE 1.12 – Localisation des pôles du schéma Mer
 du Nord – Mer Caspienne // Kutiel et al., 2002b.

FIGURE 1.13 – Structure de l'Est Atlantique – Ouest Russie déterminée par ACP avec rotation sur les champs journaliers (deux fois par jour) de hauteurs de géopotentiel 700 hPa sur le mois de janvier au cours de la période 1950-84 // Barnston et Livezey, 1987.

FIGURE 1.14 – Structure du mode Scandinavie déterminée par ACP avec rotation sur les champs journaliers (deux fois par jour) de hauteurs de géopotentiel 700 hPa sur le mois de janvier au cours de la période 1950-84. La France est située par une étoile // Barnston et Livezey, 1987.

FIGURE 1.15 – Quatre régimes de temps principaux identifiés à partir des anomalies de géopotentiel 500 hPa d'été sur le secteur Nord Atlantique – Europe sur la période 1950 – 2003 // Cassou et al., 2005.

FIGURE 1.16 – Cycle photolytique du dioxyde d'azote dans l'atmosphère en l'absence d'hydrocarbures (cycle de Chapman).

FIGURE 1.17 – Intervention des hydrocarbures dans le cycle photolytique du dioxyde d'azote.

FIGURE 1.18 – Différentes dimensions de modèles déterministes Eulériens. 0D (t), 1D (t, z), 2D (t, y, z), 3D (t, x, y, z) // Cours de Nicolas Marchand, Université de Provence, LCP-IRA.

 ${\rm FIGURE}~1.19$ – Configuration d'imbrication de domaines géographiques, représentation schématique.

FIGURE 2.1 – Répartition des émissions (en %) de cinq polluants primaires pour la France (inventaire CITEPA 2011) en 2009 (à gauche) et pour la région Nord – Pas de Calais (cadastre Atmo Nord – Pas de Calais 2005) en 2005 (à droite).

FIGURE 2.2 – Répartition des émissions (en %) des NOx par secteurs d'activités pour la France (inventaire CITEPA 2011) en 2009 (à gauche) et pour la région Nord – Pas de Calais (cadastre Atmo Nord – Pas de Calais 2005) en 2005 (à droite).

FIGURE 2.3 – Répartition des émissions (en %) des COVNM par secteurs d'activités pour la France (inventaire CITEPA 2011) en 2009 (à gauche) et pour la région Nord – Pas de Calais (cadastre Atmo Nord – Pas de Calais 2005) en 2005 (à droite).

FIGURE 2.4 – Répartition des émissions (en %) du CO par secteurs d'activités pour la France (inventaire CITEPA 2011) en 2009 (à gauche) et pour la région Nord – Pas de Calais (cadastre Atmo Nord – Pas de Calais 2005) en 2005 (à droite).

FIGURE 2.5 – Répartition des émissions (en %) des TSP par secteurs d'activités pour la France (inventaire CITEPA 2011) en 2009 (à gauche) et pour la région Nord – Pas de Calais (cadastre Atmo Nord – Pas de Calais 2005) en 2005 (à droite).

FIGURE 2.6 – Répartition des émissions (en %) du CH_4 par secteurs d'activités pour la France (inventaire CITEPA 2011) en 2009 (à gauche) et pour la région Nord – Pas de Calais (cadastre Atmo Nord – Pas de Calais 2005) en 2005 (à droite).

FIGURE 2.7 – Répartition des indices ATMO par agglomération en 2010 // ATMO Nord – Pas de Calais, 2011b.

FIGURE 2.8 – Historique des alertes de pollution en 2010 // ATMO-NPdC, 2011a.

 $\label{eq:FIGURE 2.9} FIGURE 2.9 - Représentation schématique du phénomène de l'îlot thermique urbain // Ressources Naturelles du Canada, www.rncan.gc.ca.$

FIGURE 2.10 – Représentation schématique des phénomènes de brise de mer (haut) et brise de terre (bas).

FIGURE 2.11 – Visualisation des trois domaines imbriqués utilisés lors des calculs de WRF.

 $\label{eq:FIGURE 2.12-Représentation schématique des principaux modules de calcul du modèle WRF-Chem et les mécanismes physico-chimiques associés. Sont également représentées par des flèches les interactions entre eux.$

FIGURE 2.13 – Séquence de cinq circulations journalières consécutives du géopotentiel 500 hPa (b à f) la plus représentative de la circulation moyenne mensuelle de décembre 1974 (a) pour la simulation NCEP, le mode ONA et l'extrême positif des scores (valeur de 1,69918).

FIGURE 3.1 - Tests de Student entre les réanalyses NCEP/NCAR et la simulation 20c3m pour la période 1960-1989. Le seuil de la valeur absolue de 1,96 définit les tests significativement différents représentés par les symboles en gras.

FIGURE 3.2 – Tests de Student entre les réanalyses NCEP/NCAR et la simulation 20c3m pour les mois de janvier et février sur la période 1960-1969. Les valeurs situées au-dessus des cartes correspondent aux moyennes des indices mensuels de l'ONA.

FIGURE 3.3 - Trois structures spatiales correspondant aux composantes principales avec rotation. Décembre : EA ; janvier : ONA ; février : NCP. A gauche : réanalyses ; à droite : 20c3m. La variance expliquée par chacune des composantes en % est indiquée au-dessus des cartes.

FIGURE 3.4 – Quelques écarts de corrélation associés aux configurations communes ayant les coefficients de corrélation les plus faibles.

FIGURE 3.5 – Scree test résultants des ACP calculées sur le champ mensuel de hauteurs de géopotentiel 500 hPa appliqué à a) la simulation 20c3m-actuel, 1960-1989 ; b) au scénario B1 ; c) au scénario B2 ; d) au scénario A1B ; e) au scénario A2, tous les quatre sur la période 2070-2099.

FIGURE 3.6 – Schémas spatiaux de l'ONA de décembre communs aux 5 simulations. La variance expliquée par chaque CP en % est indiquée en haut à droite de chaque schéma.

FIGURE 3.7 – Schémas spatiaux EA-WR de décembre communs aux 5 simulations. La variance expliquée par chaque CP en % est indiquée en haut à droite de chaque schéma.

FIGURE 3.8 – Schémas spatiaux EA de décembre communs aux simulations 20c3m, B1, B2 et A2. La variance expliquée par chaque CP en % est indiquée en haut à droite de chaque schéma.

FIGURE 3.9 – Schémas spatiaux EA-WR de janvier communs aux 5 simulations. La variance expliquée par chaque CP en % est indiquée en haut à droite de chaque schéma.

FIGURE 3.10 – Schémas spatiaux Est Atlantique de janvier communs aux 5 simulations. La variance expliquée par chaque CP en % est indiquée en haut à droite de chaque schéma.

FIGURE 3.11 – Schémas spatiaux Est Atlantique de février communs aux 5 simulations. La variance expliquée par chaque CP en % est indiquée en haut à droite de chaque schéma.

FIGURE 3.12 – Schémas spatiaux (oscillation nord Atlantique) des composantes principales de corrélations des hauteurs du géopotentiel 500 hPa mensuelles pour la simulation 20c3m-actuel (gauche) ; B1 (centre) et B2 (droite). La variance expliquée par chaque CP en % est indiquée en haut à droite de chaque schéma.

FIGURE 3.13 – Ecarts de corrélations du géopotentiel 500 hPa mensuel entre la simulation 20c3m et B1 (gauche) ; B2 (droite) associées à l'ONA en décembre. Intervalle entre les contours : 0,2.

FIGURE 3.14 – Schémas spatiaux des composantes principales de corrélations des hauteurs du géopotentiel 500 hPa mensuelles pour la simulation A1B (gauche) et A2 (centre et droite). La

dernière ligne représente la superposition des configurations situées au-dessus ; la carte ainsi obtenue n'est composée que des corrélations supérieures ou égales en valeur absolue à 0,7.

FIGURE 3.15 – Schémas spatiaux (mer du Nord – Caspienne) des composantes principales de corrélations des hauteurs du géopotentiel 500 hPa mensuelles pour la simulation 20c3m-actuel (gauche) ; A1B (centre) et A2 (droite). La variance expliquée par chaque CP en % est indiquée en haut à droite de chaque schéma.

FIGURE 3.16 – Ecarts de corrélations du géopotentiel 500 hPa mensuel entre la simulation 20c3m et A1B (gauche) ; A2 (droite) associées au mode NCP. Intervalle entre les contours : 0,2.

FIGURE 3.17 – Schémas spatiaux des composantes principales de corrélations des hauteurs du géopotentiel 500 hPa pour le mois de décembre de la simulation B2. La dernière ligne représente la superposition des configurations situées au-dessus ; la carte ainsi obtenue n'est composée que des corrélations supérieures ou égales en valeur absolue à 0.7.

FIGURE 3.18 – Schémas spatiaux (est Atlantique – ouest Russie) des composantes principales de corrélations des hauteurs du géopotentiel 500 hPa mensuelles pour la simulation 20c3m-actuel (haut-gauche) ; B1 (haut-centre) ; B2 (haut-droite) ; A1B (bas-gauche) et A2 (bas-droite). La variance expliquée par chaque CP en % est indiquée en haut à droite de chaque schéma.

FIGURE 3.19 - Ecarts de corrélations du géopotentiel 500 hPa mensuel entre la simulation 20c3m et B1 (haut-gauche) ; B2 (haut-centre) ; A1B (haut-droite) et A2 (bas) associées à EA-WR. Intervalle entre les contours : 0,2.

FIGURE 3.20 – Schémas spatiaux (Scandinavie) des composantes principales de corrélations des hauteurs du géopotentiel 500 hPa mensuelles pour la simulation 20c3m-actuel (gauche) ; B1 (haut-droite) ; A2 (bas-droite). La variance expliquée par chaque CP en % est indiquée en haut à droite de chaque schéma.

FIGURE 3.21 – Ecarts de corrélations du géopotentiel 500 hPa mensuel entre la simulation 20c3m et B1 associé au mode SCAN. Intervalle entre les contours : 0,2.

FIGURE 3.22 – Schéma spatial Est Méditerranée – Nord Ouest Europe // Hatzaki et al., 2006.

FIGURE 3.23 – Schémas spatiaux (est Atlantique – Méditerranée méridionale) des composantes principales de corrélations des hauteurs du géopotentiel 500 hPa mensuelles pour la simulation 20c3m-actuel (haut-gauche) ; B1 (haut-centre) ; B2 (haut-droite) ; A1B (bas-gauche) et A2 (bas-droite). La variance expliquée par chaque CP en % est indiquée en haut à droite de chaque schéma.

FIGURE 3.24 – Ecarts de corrélations du géopotentiel 500 hPa mensuel entre la simulation 20c3m et B1 (gauche) ; B2 (centre-haut) ; A1B (centre-bas) et A2 (droite) associées au mode EA-MM. Intervalle entre les contours : 0,2.

FIGURE 3.25 – Schémas spatiaux (est Atlantique) des composantes principales de corrélations des hauteurs du géopotentiel 500 hPa mensuelles pour la simulation 20c3m-actuel (haut-gauche) ; B1 (haut-centre) ; B2 (haut-droite) ; A1B (bas-gauche) et A2 (bas-droite). La variance expliquée par chaque CP en % est indiquée en haut à droite de chaque schéma.

FIGURE 3.26 – Ecarts de corrélations du géopotentiel 500 hPa mensuel entre la simulation 20c3m et B1 (gauche) ; B2 (centre) ; A1B (haut-droite) et A2 (bas-droite) associées au mode EA. Intervalle entre les contours : 0,2.

FIGURE 3.27 - Ecarts de corrélations du géopotentiel 500 hPa hivernal entre la simulation 20c3m et B2 (gauche) ; A1B (centre) et A2 (droite) associées au mode EA. Intervalle entre les contours : 0,2.

FIGURE 3.28 – Schémas spatiaux (côtes ouest Afrique) des composantes principales de corrélations des hauteurs du géopotentiel 500 hPa mensuelles pour la simulation 20c3m-actuel (haut-gauche) ; B1 (haut-centre) ; B2 (haut-droite) ; A1B (bas-gauche) et A2 (bas-droite). La variance expliquée par chaque CP en % est indiquée en haut à droite de chaque schéma.

FIGURE 3.29 – Schémas spatiaux (Arabie Saoudite) des composantes principales de corrélations des hauteurs du géopotentiel 500 hPa mensuelles pour la simulation 20c3m-actuel (gauche) ; B1 (centre) ; A1B (droite). La variance expliquée par chaque CP en % est indiquée en haut à droite de chaque schéma.

FIGURE 3.30 - Ecarts de corrélations du géopotentiel 500 hPa mensuel entre la simulation 20c3m et B1 (gauche) et A1B (droite) associées au mode Arabie Saoudite. Intervalle entre les contours : 0,2.

FIGURE 3.31 – Première composante principale d'anomalies de hauteurs du géopotentiel 500 hPa mensuelles de réanalyses NCEP pour la saison hivernale (décembre-février) sur la période 1960-1989 couvrant le domaine Nord Atlantique-Europe (60°W-60°E, 20°N-70°N). a) schéma spatial ; b) chroniques temporelles.

FIGURE 3.32 – Quelques types de circulation issus des pics d'intensité extrême des séries temporelles des modes de variabilité. a) circulation zonale ; b) circulation méridienne de nord-ouest ; c) marais barométrique ; d) circulation méridienne de sud-ouest accompagnée d'une diffluence du flux ; e) diffluence du flux ; f) crête de dorsale. Hauteurs du géopotentiel 500 hPa (mgp).

FIGURE 3.33 – Exemples de circulations méridiennes du mois de février avec le scénario A1B. a) circulations méridiennes de sud-ouest ; b) circulations méridiennes de nord-ouest. Hauteurs du géopotentiel 500 hPa (m).

FIGURE 3.34 – Régimes de temps de la circulation atmosphérique identifiés à partir d'anomalies journalières de hauteur géopotentielle à 500 hPa (mgp) issues des réanalyses NCEP/NCAR de novembre à mars et sur la période 1974-2007 (gauche : Cassou, 2008 et centre : nos résultats [d'après Cassou, 2008]) ; de décembre à février et sur la période 1958-2003 (droite : Yiou et Nogaj, 2004). a) régime de l'ONA+ ; b) régime de l'ONA– ; c) régime de blocage ; d) régime de dorsale Atlantique.

FIGURE 3.35 – Régimes de temps correspondant au régime de Blocage identifiés à partir d'anomalies journalières de hauteurs géopotentielles à 500 hPa (m) issues des réanalyses NCEP/NCAR (a) et de la simulation 20c3m (b).

FIGURE 3.36 – Régimes de temps correspondant au régime de Dorsale Atlantique identifiés à partir d'anomalies journalières de hauteurs géopotentielles à 500 hPa (m) issues des réanalyses NCEP/NCAR (a) et de la simulation 20c3m (b).

FIGURE 3.37 – Régimes de temps correspondant au régime de ONA– identifiés à partir d'anomalies journalières de hauteurs géopotentielles à 500 hPa (m) issues des réanalyses NCEP/NCAR (a) et de la simulation 20c3m (b).

FIGURE 3.38 – Régimes de temps correspondant au régime de ONA+ identifiés à partir d'anomalies journalières de hauteurs géopotentielles à 500 hPa (m) issues des réanalyses NCEP/NCAR (a) et de la simulation 20c3m (b).

FIGURE 3.39 – Indices de classifiabilité (en noir) calculés pour les jeux de hauteur géopotentielle hivernale (DJF) à 500 hPa, pour a) la simulation 20c3m (1960-1989), b) la simulation B2, c) la simulation A1B et d) pour la simulation A2. b), c) et d) concernent la période 2070-2099. En rouge, les intervalles de confiance des indices en fonction du nombre de classes.

FIGURE 3.40 – Régimes de temps d'anomalies journalières hivernales (DJF) de hauteur géopotentielle à 500 hPa (m) sur la région NAE et correspondants au régime de Blocage. Régimes calculés à partir a) de la simulation 20c3m, b) de la simulation B2 (addjd), c) de la simulation A1B (aenwh), d) de la simulation A2.

FIGURE 3.41 – Régimes de temps d'anomalies journalières hivernales (DJF) de hauteur géopotentielle à 500 hPa (m) sur la région NAE et correspondants au régime de Dorsale Atlantique. Régimes calculés à partir a) de la simulation 20c3m, b) de la simulation B2 (addjd), c) de la simulation A1B (aenwh), d) de la simulation A2.

FIGURE 3.42 – Régimes de temps d'anomalies journalières hivernales (DJF) de hauteur géopotentielle à 500 hPa (m) sur la région NAE et correspondants au régime ONA–. Régimes calculés à partir a) de la simulation 20c3m, b) de la simulation B2 (addjd), c) de la simulation A1B (aenwh), d) de la simulation A2.

FIGURE 3.43 – Régimes de temps d'anomalies journalières hivernales (DJF) de hauteur géopotentielle à 500 hPa (m) sur la région NAE et correspondants au régime ONA+. Régimes calculés à partir a) de la simulation 20c3m, b) de la simulation B2 (addjd), c) de la simulation A1B (aenwh), d) de la simulation A2.

FIGURE 4.1 – Maillage du cadastre EMEP et surface géographique couverte par celui-ci // Calculation and Mapping of Critical Thresholds in Europe : status report 1999, Coordination Center for Effects, RIVM Report No. 259101009 (http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/figures/eea-reprojected-emep-grid).

FIGURE 4.2 – Spatialisation des émissions de dioxydes de soufre (en t/an) issues du cadastre régional Nord – Pas de Calais pour la période 2007-2011.

FIGURE 4.3 – Diagramme schématisé des 3 modules de préparation des émissions anthropiques du cadastre EMEP pour le modèle WRF-Chem par EASYWRF-Chem.

FIGURE 4.4 – Variation mensuelle des émissions de NO_2 calculées pour une maille de la ville de Lille (cadastre ATMO).

FIGURE 4.5 – Variation mensuelle des émissions de NO_2 calculées pour une maille de la ville de Londres (cadastre EMEP).

FIGURE 4.6 – Variation mensuelle des émissions de $PM_{2,5}$ calculées pour une maille de la ville de Lille (cadastre ATMO).

FIGURE 4.7 – Variation mensuelle des émissions de $PM_{2,5}$ calculées pour une maille de la ville de Londres (cadastre EMEP).

FIGURE 4.8 – Variation hebdomadaire des émissions de NO_2 calculées pour une maille de la ville de Lille (cadastre ATMO).

FIGURE 4.9 – Variation hebdomadaire des émissions de NO_2 calculées pour une maille de la ville de Londres (cadastre EMEP).

FIGURE 4.10 – Variation hebdomadaire des émissions de $PM_{2,5}$ calculées pour une maille de la ville de Lille (cadastre ATMO).

FIGURE 4.11 – Variation hebdomadaire des émissions de $PM_{2,5}$ calculées pour une maille de la ville de Londres (cadastre EMEP).

FIGURE 4.12 – Impact sanitaire des concentrations de PM ($\mu g/m^3$). La perte de l'espérance de vie (en mois) peut être attribuée aux contributions anthropogéniques de PM_{2,5} pour l'année 2000 (à gauche) et pour 2020 (à droite).

FIGURE 4.13 – Taux de PM_{10} moyennés sur les 5 jours représentatifs de décembre 1974 (en haut à gauche) et 2099 (en haut à droite) (ONA+), et écarts de PM_{10} entre ces 2 périodes (bas).

FIGURE 4.14 – Taux de PM_{10} moyennés sur les 5 jours représentatifs de décembre 1989 (en haut à gauche) et 2097 (en haut à droite) (EA+), et écarts de PM_{10} entre ces 2 périodes (bas).

FIGURE 4.15 – Taux de $PM_{2,5}$ moyennés sur les 5 jours représentatifs de février 1969 (en haut à gauche) et 2070 (en haut à droite) (EA–), et écarts de $PM_{2,5}$ entre ces 2 périodes (bas).

FIGURE 4.16 – Taux de $PM_{2,5}$ moyennés sur les 5 jours représentatifs de décembre 1978 (en haut à gauche) et 2094 (en haut à droite) (ONA–), et écarts de $PM_{2,5}$ entre ces 2 périodes (bas).

FIGURE 4.17 – Taux de NO₂ moyennés sur les 5 jours représentatifs de janvier 1963 (en haut à gauche) et 2087 (en haut à droite) (ONA–), et écarts de NO₂ entre ces 2 périodes (bas).

FIGURE 4.18 – Taux de NO₂ moyennés sur les 5 jours représentatifs de décembre 1969 (en haut à gauche) et 2070 (en haut à droite) (EA–), et écarts de NO₂ entre ces 2 périodes (bas).

FIGURE 4.19 – Taux de NO₂ moyennés sur les 5 jours représentatifs de décembre 1978 (en haut à gauche) et 2094 (en haut à droite) (ONA–), et écarts de NO₂ entre ces 2 périodes (bas).

FIGURE 4.20 – Taux de NO₂ moyennés sur les 5 jours représentatifs de février 1977 (en haut à gauche) et 2079 (en haut à droite) (EA+), et écarts de NO₂ entre ces 2 périodes (bas).

FIGURE 4.21 - Taux de NO₂ moyennés sur les 5 jours représentatifs de février 1965 (en haut à gauche) et 2088 (en haut à droite) (ONA-), et écarts de NO₂ entre ces 2 périodes (bas).

FIGURE 4.22 – Taux de O_3 moyennés sur les 5 jours représentatifs de février 1969 (en haut à gauche) et 2070 (en haut à droite) (EA–), température moyenne à 2 mètres de février 1969 (centre à gauche) et de février 2070 (centre à droite), et écarts de O_3 entre ces 2 périodes (bas).

FIGURE 4.23 – Taux de O_3 moyennés sur les 5 jours représentatifs de février 1989 (en haut à gauche) et 2095 (en haut à droite) (ONA+), température moyenne à 2 mètres en février 1989 (centre à gauche) et en février 2070 (centre à droite), et écarts de O_3 entre ces 2 périodes.

$\left(\text{ Liste des tableaux } \right)$

TABLEAU 1.1 – Principaux modèles climatiques utilisés dans le cadre du quatrième rapport du GIEC // Randall et al., 2007.

TABLEAU1.2 – Différenciation des dynamiques troposphériques en fonction des échelles spatiotemporelles.

TABLEAU 1.3 – Critères nationaux de qualité de l'air de plusieurs polluants atmosphériques. CO : Monoxyde de Carbone ; COV : Composés Organiques Volatils ; Ni : Nickel ; Cd : Cadmium ; As : Arsenic ; Pb : Plomb ; SO₂ : Dioxyde de Soufre ; NO₂ : Dioxyde d'Azote ; PM : Particules en suspension ; O₃ : Ozone. // Airparif, 2012.

TABLEAU 2.1 – Spécificités spatiales des trois domaines géographiques utilisés dans le modèle WRF.

TABLEAU 2.2 – Spécification des années extrêmes positives et négatives de chaque mode de variabilité selon les mois et les simulations NCEP et A1B (CNRM-CM3) ainsi que leurs variances expliquées (en %).

TABLEAU 3.1 – Coefficients de corrélation (entre parenthèses) calculés pour les schémas spatiaux identiques entre les séries de poids factoriels (réanalyses et 20c3m) pour chacun des mois et pourcentages de variance expliquée (VE %) pour chaque configuration.

TABLEAU 3.2 – Composantes principales extraites par ACP-R à partir du champ de hauteur de géopotentiel à 500 hPa dans la simulation 20c3m et les simulations futures (B1, B2, A1B et A2) notées par ordre d'apparition. Les valeurs de variance expliquée (%) par chaque composante sont également notées.

TABLEAU 3.3 – Variances expliquées (VE) et cumulées (en %) associées aux six premières composantes principales avec rotation Varimax normalisé des champs de hauteur géopotentielle 500 hPa mensuels (décembre, janvier, février) des simulations 20c3m (1960-1989), B1, B2, A1B et A2 (2070-2099).

TABLEAU 3.4 – Modes de variabilité communs aux cinq simulations (simulation actuelle 20c3m 1960-1989 avec forçage observé et quatre simulations futures 2070-2099 avec forçages anthropiques hypothétiques, B1, B2, A1B et A2) et variances expliquées (%) associées.

TABLEAU 3.5 – Répartition des modes de variabilité en fonction des mois de décembre (d), janvier (j) et février (f) et selon les simulations (période actuelle : 20c3m et future : B1, B2, A1B et A2). La colonne 'total' indique le nombre d'extractions de chaque mode pour l'ensemble des simulations.

TABLEAU 3.6 – Distribution par mois et par scénarios des tendances linéaires en fonction de leur signe. + (–) signifie que la tendance est positive (négative) : valeur du coefficient directeur supérieure (inférieure) à 0,01 (–0,01). = signifie que la tendance est nulle : valeur du coefficient directeur comprise entre 0,01 et –0,01.

TABLEAU 3.7 – Signe des tendances linéaires associées aux modes de variabilité, en fonction des mois et des simulations.

TABLEAU 3.8 – Distribution par mois et par scénarios des tendances linéaires significatives en fonction de leur signe. La significativité est testée par le test de Kendall au niveau 0,05. + (–) signifie que la tendance est positive (négative) : valeur du coefficient directeur supérieure

(inférieure) à 0,01 (–0,01). = signifie que la tendance est nulle : valeur du coefficient directeur comprise entre 0,01 et –0,01.

TABLEAU 3.9 – Distribution des tendances significatives en fonction des modes de variabilité. La colonne 'total' indique le nombre de tendance significative positive par rapport au total de tendance positive pour chaque mode.

TABLEAU 3.10 – Spécification des années extrêmes positives et négatives de chaque mode de variabilité selon les mois et les simulations, ainsi que le type de circulation associé (Marais : marais barométrique ; SW : méridienne de sud-ouest ; NW : méridienne de nord-ouest ; N : méridienne de nord ; Z : zonale).

TABLEAU 3.11 – Evolution à l'échelle mensuelle et saisonnière des fréquences d'occurrence (%) des types de circulation de chaque scénario par rapport à la série de référence actuel-20c3m. M. Nord : méridienne de nord ; M. Sud W. : méridienne de sud-ouest ; Marais B. : marais barométrique ; entre parenthèses, augmentation ou diminution (en %) de chaque type de circulation futur par rapport à 20c3m.

TABLEAU 3.12 – Evolution à l'échelle mensuelle et saisonnière du nombre d'apparition (en année) des situations de hautes et basses pressions sur la région Nord – Pas de Calais pour chaque scénario par rapport à la série de référence actuel-20c3m. HP : hautes pressions ; BP : basses pressions.

TABLEAU 3.13 – Fréquences d'occurrence (%) de chacun des régimes de temps pour la période 1960-1989 (20c3m) et 2070-2099 (A2, A1B, B2).

TABLEAU 3.14 – Persistances moyennes (en jours) de chacun des régimes de temps pour la période 1960-1989 (20c3m) et 2070-2099 (A2, A1B, B2).

TABLEAU 4.1 – Variables météorologiques du scénario A1B fournies par le CNRM-CM3.

TABLEAU 4.2 – Codes grib des variables météorologiques spécifiés dans la Vtable. CNRM WRF.

TABLEAU 4.3 – Codes SNAP, niveau 1.

TABLEAU 4.4 – Séquences de jours à modéliser pour les périodes actuelle et future, selon les mois, les modes de variabilité et leurs phases (+ ou -).

TABLEAU 4.5 – Comparaison des valeurs simulées par WRF-Chem à celles mesurées par 16 stations météorologiques Météo France lors de la période estivale (en haut) et hivernale (en bas).

TABLEAU 4.6 – Tendances des taux de polluants sur la région Nord - Pas de Calais selon la phase d'intensité des modes de variabilité ONA et EA. + signifie une évolution à la hausse ; – signifie une évolution à la baisse ; = signifie stable. Entre parenthèses : écart maximal (en $\mu g.m^{-3}$ pour les $PM_{2,5}$ et PM_{10} , en ppb pour NO₂, O₃ et SO₂).

TABLEAU 4.7 – Tendances à la hausse (+), à la baisse (–) ou stable (=) des taux de particules $PM_{2,5}$ et PM_{10} , du dioxyde d'azote et d'ozone en fonction des types de circulation représentatifs des séquences temporelles sélectionnées.

Liste des acronymes

AMS	American Meteorological Society
ACP-R	Analyse en Composantes Principales avec Rotation
ADEME	Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie
AOP	Aérosol Organique Primaire
AOS	Aérosol Organique Secondaire
APPA	Association pour la Prévention de la Pollution Atmosphérique
AR4	Fourth Assessment Report
ASSQA	Association Agréée de Surveillance de la Qualité de l'Air
CBM	Carbon Bond Mechanism
CCNUCC	Convention - Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques
CDAS-1	Climate Data Assimilation System 1
CITEPA	Centre Interprofessionnel Technique d'Etudes de la Pollution Atmosphérique
CLA	Couche Limite Atmosphérique
CNRM	Centre National de Recherches Météorologiques
CORINAIR	CORe INventory of Air emissions
СР	Composante Principale
EA	Est Atlantique
EA-MM	Est Atlantique – Méditerranée Méridionale
EA-WR	Est Atlantique-Ouest Russie
EMEP	European Monitoring and Evaluation Programme
EMP	East Mediterranean Pattern - Est Méditerranée Europe
GES	Gaz à Effet de Serre
GIEC	Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat
GOCART	Goddard Chemistry Aerosols Radiation and Transport
HadCM3	Hadley Centre Coupled Model 3
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
LAURE	Loi sur l'Air et l'Utilisation Rationnelle de l'Energie

MADE	Modal Aerosol Dynamics for Europe
MCGOA	Modèle de Circulation Générale Couplé Océan-Atmosphère
MCT	Modèle de Chimie Transport
MOSAIC	MOdel for Simulating Aerosol Interaction and Chemistry
NAE	Nord Atlantique Europe
NCAR	National Center for Atmospheric Research
NCEP	National Centers for Environmental Prediction
NCP	North Sea Caspian Pattern
OMM	Organisation Mondiale de la Météorologie
ONA	Oscillation Nord Atlantique
PNA	Pacific/North American - Pacifique Nord Amérique
PRG	Pouvoir de Réchauffement Global
RACM	Regional Atmospheric Chemistry Mechanism
RADM2	Regional Acid Deposition Model, version 2
SCAN	Scandinavie
SIG	Système d'Information Géographique
SNAP	Selected Nomenclature for Atmospheric Pollution
SORGAM	Secondary Organic Aerosol Model
TSP	Total Suspended Particle
UNECE	United Nations Economic Commission for Europe
US-EPA	United States – Environmental Protection Agency
WRF	Weather Research and Forecasting

(Introduction générale)

Bilan de situation du 16 mai 2011 d'un état de sécheresse par Météo France (Météo France, 2011) : Sous l'influence persistante de conditions anticycloniques, la France a connu ces dernières semaines un temps remarquablement chaud et sec. Le pays connait actuellement une sécheresse exceptionnelle sur une grande partie du territoire. Cette situation est la conséquence de deux composantes bien distinctes : un déficit pluviométrique durant la période de recharge des nappes souterraines avec des conséquences sur leur remplissage. Un déficit pluviométrique exceptionnel ces dernières semaines, accompagné de températures très nettement supérieures aux normales. Ces conditions ont eu pour conséquence un assèchement extrêmement précoce des sols superficiels.

Début avril 2011, la France a bénéficié de températures élevées jetant un air de vacances estivales expliquées par l'établissement d'un anticyclone fixe. Cette situation a aggravé le déficit pluviométrique déjà recensé depuis le début de l'année. Le bilan de situation de Météo France indique que des conditions anticycloniques persistantes ont engendré des « températures très nettement supérieures aux normales » renforçant le déficit pluviométrique. Ce bulletin ressemble à tant d'autres ces dernières années.

La température moyenne globale de la terre est d'environ +15°C et ce grâce au phénomène naturel d'effet de serre. Les températures observées du globe terrestre résultent des échanges radiatifs constants entre les basses latitudes et les hautes latitudes qui répartissent l'énergie solaire reçue par la région équatoriale. La chaleur reçue est répartie par les courants; ces échanges se déroulent au sein des milieux océanique et atmosphérique. Mais l'équilibre radiatif peut être déséquilibré. En effet, cet équilibre instauré par le processus naturel d'effet de serre peut être perturbé par les activités humaines (combustion fossiles, rejets supplémentaires de gaz et de particules). Les activités humaines ont modifié la composition chimique de l'atmosphère ce qui influence la quantité de chaleur absorbée par l'atmosphère par le phénomène d'effet de serre. La température moyenne globale augmente et entraîne avec elle des modifications au sein du système climatique. On parle de façon globale du changement climatique. Le problème des températures évoqué ici fait fréquemment l'affiche des médias et soulève différentes questions : les températures ont-elles augmentées au cours des dernières décennies? Si oui, cette hausse est-elle naturelle ou y jouons-nous un rôle ? Ce phénomène est-il ponctuel ou devons-nous nous attendre à ce qu'il perdure? Si le thermomètre global continue à monter, quelles en seront les conséquences ? L'augmentation des températures va-t-elle impacter d'autres phénomènes météorologiques ou est-elle la conséquence déjà visible d'un « dérèglement » ?

La pollution aux particules est un problème qui touche encore actuellement la France, comme explicité dans l'exemple suivant : la Commission Européenne a annoncé le 19 mai 2011 sa décision de poursuivre la France devant la Cour de justice de l'Union Européenne en raison de ses mauvais résultats en termes de pollution aux particules fines. "La France n'a pas pris à ce jour de mesures efficaces pour remédier au problème des émissions excessives de ce type de particules dans plusieurs zones du pays". La directive 2008/50/CE concernant la qualité de l'air impose en effet aux gouvernements de limiter l'exposition de la population aux microparticules appelées PM_{10}^{-1} . La législation fixe des valeurs limites d'exposition concernant à la fois la concentration annuelle (40 µg/m³) et la concentration quotidienne (50 µg/m³). Cette

 $^{^1\,\}mathrm{PM}_{10}$: particules en suspension dans l'air dont le diamètre aérodynamique est inférieur à 10 micromètres.

dernière valeur ne doit pas être dépassée plus de 35 fois au cours d'une même année civile. Depuis l'entrée en vigueur de la législation, en 2005, les valeurs limites applicables aux PM_{10} ne sont pas respectées dans seize zones de qualité de l'air en France. Les zones concernées sont Marseille, Toulon, Avignon, Paris, Valenciennes, Dunkerque, Lille, le territoire du Nord - Pas de Calais, Grenoble, Montbéliard/Belfort, Lyon, le reste de la région Rhône-Alpes, la zone côtière urbanisée des Alpes-Maritimes, Bordeaux, la Réunion et Strasbourg.

Nous remarquons que l'ensemble de la région Nord - Pas de Calais est concernée par le risque de dépassement de valeurs limites d'exposition aux particules dites PM_{10} . Ce problème a motivé notre souhait d'étudier cette source de pollution et de façon plus élargie, celle causée par les particules en suspension, par le biais de leurs zones spatiales de diffusion sur le Nord - Pas de Calais. La pollution sur la région sera analysée à travers le spectre du changement climatique et de la circulation atmosphérique : si le changement du climat modifie la circulation de l'atmosphère, cela peut-il impacter la diffusion régionale de polluants ?

Certaines des questions précitées ont directement orienté la problématique générale de la thèse qui est, en premier lieu, de s'interroger sur l'impact des changements climatiques sur la variabilité de la circulation atmosphérique et en second lieu, d'observer d'éventuelles modifications de diffusion spatiale de polluants ce qui fait appel à la notion de qualité de l'air.

Nous avons choisi d'étudier la circulation de l'atmosphère car celle-ci est responsable des mouvements de masses d'air et que le changement climatique peut théoriquement modifier sa variabilité. Le lien entre dynamique atmosphérique et dispersion de polluants sous influence du changement climatique est que la qualité de l'air est assujettie aux émissions de substances polluantes mais aussi aux conditions météorologiques qui peuvent conditionner leur dispersion ou leur accumulation. D'où l'intérêt d'étudier une fois combinés les deux thèmes évoqués précédemment.

Dans cette thèse la qualité de l'air à l'échelle régionale et le changement climatique à l'échelle globale sont donc associés afin d'évaluer les impacts d'une modification de la variabilité de la circulation atmosphérique sur la répartition spatio-temporelle d'espèces polluantes.

Articulation de la thèse.

La variabilité atmosphérique est étudiée dans cette thèse à travers les structures de grande échelle. Nous avons mené l'étude par l'approche des modes de variabilité et des régimes de temps, caractéristiques de variations basse et haute fréquence respectivement. Ces deux entités peuvent être influencées par les modifications climatiques. C'est pourquoi cette thèse a pour but, dans un premier temps, d'étudier leurs réponses à un forçage anthropique d'augmentation de gaz à effet de serre pour la fin du 21^{ème} siècle.

La première étape de travail de la thèse est donc d'identifier les principales structures spatiales de la variabilité de la circulation atmosphérique pour différentes périodes, sur la période 1960-1989 pour représenter le climat actuel et sur la période 2070-2099 pour rendre compte du climat futur sous forçage. La classification des modes de variabilité est opérée par la méthode d'Analyse en Composantes Principales avec Rotation (ACP-R) et celle des régimes de temps par la méthode des nuées dynamiques. Cette étape est menée à partir de données fournies par un modèle de circulation générale.

La seconde étape est de comparer les structures atmosphériques du climat récent à celles du climat sous forçage climatique, du point de vue de leurs configurations spatiales mais aussi de leurs caractéristiques temporelles – fréquence d'occurrence, persistance.

La dernière étape de cette thèse concerne le thème de la diffusion de polluants. Son but est de modéliser les périodes caractéristiques des modes de variabilité au cours desquelles ils sont les plus intenses, d'une part sur la période actuelle et d'autre part sur la période future, afin, par comparaison, de percevoir ou non l'influence du forçage anthropique par gaz à effet de serre sur la diffusion de polluants atmosphériques. Un modèle de chimie-transport est utilisé dans cette partie et s'intéresse plus particulièrement à la région Nord - Pas de Calais.

Plan de la thèse.

Le **premier chapitre** du manuscrit s'attache à dresser le cadre de la thèse en présentant les principales thématiques abordées tout au long du texte. Le **deuxième chapitre** présentera quant à lui les données et méthodes employées dans ce manuscrit. Le **troisième chapitre** traitera de la variabilité basse et haute fréquence de la circulation atmosphérique sur l'Atlantique Nord et de sa réponse au changement climatique. Nous analyserons les modes de variabilité et les régimes de temps. Au cours du **quatrième chapitre** nous nous pencherons sur la modélisation physicochimique des particules en suspension lors d'épisodes temporels particuliers des modes de variabilité sur la région Nord - Pas de Calais. Enfin, la **conclusion générale** viendra clore ce travail en présentant une synthèse des résultats ainsi que les perspectives que nous avons dégagées.

$\left(\begin{array}{c} \text{Chapitre 1} \end{array} \right)$

Climat, circulation atmosphérique et qualité de l'air
L'objectif de ce chapitre est d'introduire les notions qui vont être évoquées tout au long de l'ouvrage. Même si certains points présentés dans cette partie peuvent paraitre s'éloigner de la problématique, il m'a paru important, afin que chaque lecteur puisse replacer ce travail dans son contexte, de dresser une revue élargie des principales thématiques qui y sont abordées. Les questions climatiques sont particulièrement développées puisqu'elles sont au centre de notre étude. L'aspect pluridisciplinaire de la thèse apporte une difficulté supplémentaire, celle de fournir à tout à chacun toutes les clefs utiles à rendre ce document intelligible. C'est pourquoi, dans cette optique nous avons jugé nécessaire d'étoffer les concepts ayant trait à la climatologie au sens large et à la problématique de la qualité de l'air.

Les deux **premières parties** de ce chapitre évoquent les notions nécessaires à la bonne compréhension de ce travail. Elles sont destinées notamment à toute personne désireuse d'acquérir les notions générales rencontrées dans ce document, lesquelles en présentent de façon large le contexte scientifique. La **partie 1** traite des contextes climatiques, actuels et futurs tandis que la **partie 2** considère la question de la qualité de l'air. Dans chacune d'elles nous définissons les concepts majeurs, ainsi, les termes système climatique, scénarios, variabilité ou pollution atmosphérique sont abordés. A noter que les sujets de la modélisation climatique et de la qualité de l'air font l'objet de paragraphes à part entière. La **partie 3** aborde les deux thématiques majeures du manuscrit. Elle présente les résultats de divers travaux scientifiques traitant des liens entre, d'une part le changement du climat et les structures de variabilité atmosphériques et d'autre part, entre le changement du climat et la pollution de l'air. La présentation du positionnement de la thèse par rapport aux axes principaux soulevés précédemment clôt ce premier chapitre.

[Partie 1] Contexte climatique	
1. Climat et système climatique	
2. Réchauffement : état des lieux	
3. Prévisions climatiques : les modèles	
4. Circulation et variabilités atmosphériques	25
[Partie 2] Qualité de l'air	
1. Pollution et polluants	
2. Modèles de chimie-transport	

[Par	tie 3] Influence du changement climatique sur les variabilités	
atmo	sphériques et les polluants	51
1.	Structures de variabilité et changement climatique	52
2.	Evolutions des quantités de polluants atmosphériques	54
3.	Positionnement de la thèse	57

[Partie 1] Contexte climatique

1. Climat et système climatique

Que la réponse provienne du GIEC (Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat, IPCC pour Intergovernemental Panel on Climate Change en anglais), du glossaire de l'AMS (American Meteorological Society) ou d'un dictionnaire, toutes les définitions ont en commun de présenter le climat comme une synthèse statistique de variables météorologiques, décrite par des tendances et des moyennes, pour une période donnée et en un espace donné.

La définition du GIEC dans son rapport de 2007 (IPCC_A1, 2007) précise que le climat est sujet à des variations temporelles. Au sens étroit du terme, le climat désigne en général « le temps moyen » ou plus précisément, se réfère à une description statistique fondée sur les moyennes et la variabilité de grandeurs pertinentes sur des périodes variant de quelques mois à des milliers d'années. La période type, dite « normale », définie par l'Organisation Météorologique Mondiale, est de 30 ans, elle permet d'appréhender le climat à partir de normales climatologiques standards.

De nos jours, l'étude du climat s'intéresse aussi bien à ses diverses composantes qu'aux variations climatiques, notamment par l'étude des extrêmes (par exemple Schär et al., 2002 ; Lucio, 2004 ; André et al., 2008 ; Planton et al., 2008). Cependant, il fut un temps où l'étude du climat était en réalité plutôt limitée à répertorier l'ensemble des climats des régions du monde. Une des classifications majeures née de la climatologie descriptive est celle créée en 1900 par Wladimir Peter Köppen. Encore couramment utilisée de nos jours, cette classification est fondée sur la répartition des couvertures végétales naturelles ainsi que sur les températures et les précipitations. Généralement cinq grands groupes climatiques sont distingués : climats tropicaux, arides, tempérés, continentaux et polaires.

Il a fallu qu'à ma réponse « je prépare une thèse sur les conséquences du changement climatique », j'entende de trop nombreuses fois la question « quel temps fera-t-il alors ? » pour me conforter dans l'idée qu'il était impératif de définir dans ce manuscrit ce qu'est le climat et de le distinguer de la météorologie. Les définitions des termes climat et climatologie restent toutefois propices à confusion lorsque l'on parle de météorologie. A la différence de cette dernière, la climatologie s'attache à décrire le climat d'une région, d'un pays ou de la planète, par le biais de l'étude des distributions géographique et temporelle d'observations météorologiques à *long-terme*¹. Ces grandeurs météorologiques sont le plus souvent représentées par la température, les précipitations, le vent, l'humidité et les pressions.

La météorologie, quant à elle, s'emploie à décrire le temps qu'il fait et à prévoir le temps qu'il fera à *court terme* (quelques jours) et à *échelle locale*. Elle étudie l'état de l'atmosphère et ses variations à un temps t et cherche à prévoir son état futur à partir de son état actuel (Météo France, 2012²) Les variables atmosphériques utilisées en météorologie et qui spécifient le temps qu'il fait, correspondent généralement à la température de l'air, aux vents et aux précipitations. Ce sont leurs fluctuations au cours d'une journée ou sur plusieurs jours qui définissent « le temps ».

Le « temps qu'il fait » (météorologie) et le climat (climatologie) sont ainsi intimement liés malgré leurs différences. En d'autres termes, et pour définir de façon sommaire ces notions, nous pouvons dire que le climat est une moyenne du temps qu'il fait et que le temps qu'il fait est une représentation journalière du climat.

Comme énoncé par le GIEC, la notion de climat induit celle de système climatique (figure 1.1).

Le système climatique est un système en perpétuelle évolution constitué de cinq composantes :

- la cryosphère (glaces continentales et océaniques)
- la biosphère (le vivant)
- la lithosphère (terres émergées)
- l'atmosphère
- l'hydrosphère (eau liquide)

Le projet de thèse développé dans ce manuscrit propose de s'intéresser plus particulièrement à l'une d'entre elles. L'atmosphère, ce fluide constitué de gaz et de particules en suspension, entoure notre planète. La grande majorité des phénomènes atmosphériques qui déterminent le temps qu'il fait se produit dans la fine couche (d'environ 8 kilomètres d'épaisseur aux hautes latitudes et 15 aux basses latitudes) située au contact de la surface terrestre, la troposphère.

¹ Echelle de temps caractéristique de 30 années.

² http://files.meteofrance.com/files/glossaire/FR/glossaire/



FIGURE 1.1 – Représentation schématique des composantes du système climatique, leurs processus et leurs interactions // Le Treut et al., 2007.

Chacune des composantes du système climatique est en interaction avec les autres. L'atmosphère est en constante relation avec ces composantes, et est le lieu privilégié de multiples réactions et de phénomènes naturels variés. Le climat tel que nous le connaissons est le résultat direct de ces échanges qui se produisent au sein de ce que l'on appelle communément le système climatique. Ce dernier est régi par les lois de la physique mais aussi de la chimie : transfert radiatif, mécanique des fluides, thermodynamique se combinent autour de la source d'énergie de la machine climatique qu'est le rayonnement solaire (Delmas et al., 2007 ; Estienne et Godard, 1990).

Le système climatique est complexe, son fonctionnement n'est pas linéaire et sa nature est chaotique¹ (Fellous et Gautier, 2007). Cette propriété du système est communément définie par la métaphore de « l'effet papillon » énoncée comme suit pour la première fois par le météorologue Edward Lorenz en 1972, *le battement d'ailes d'un papillon au Brésil peut-il provoquer une tornade au Texas ?*² Ainsi, de faibles variations au niveau des conditions initiales (d'ensoleillement par exemple) occasionnent des évolutions qui diffèrent largement les unes des autres. C'est cette « sensibilité » du système climatique aux conditions initiales qui explique la difficulté des prévisions météorologiques en particulier à long-terme.

Nous l'avons vu, le système climatique et le climat qui en découle sont le produit de cinq grandes composantes et de leurs interactions. Mais le climat et son évolution dans le temps sont également définis par leurs réponses aux forçages. On parle de *forçage* pour évoquer toute

 $^{^1}$ Le système dynamique de Lorenz (ou oscillateur) a permis de mettre en évidence une structure dite attracteur de

Lorenz (ou attracteur étrange) ayant révélé le caractère chaotique et non linéaire de l'atmosphère (Lorenz, 1963).

² Traduction française de la conférence de 1972 à l'American Association for the Advancement of Science.

influence par un agent, qu'il soit naturel ou non, sur le système climatique. Il existe deux grands types de forçages (Fellous et Gautier, 2007), décrits tous deux ci-dessous.

1.1. Forçages naturels : facteurs des changements du climat

Les forçages internes au système l'affectent en raison de sa propre dynamique (IPCC, 2007). Ils sont responsables de la variabilité climatique naturelle. Les forçages externes eux affectent le système en raison de facteurs naturels tels que les éruptions volcaniques, les variations du rayonnement solaire, ou encore les phénomènes astronomiques.

1.2. Forçage anthropique : effet de serre

Les causes naturelles ne sont pas les seules à caractériser les forçages externes. En effet, les forçages anthropiques sont représentés par exemple par la modification de l'occupation des sols ou les émissions de gaz polluants. Le forçage anthropique externe le plus connu trouve son origine dans les quantités de composés chimiques émises dans l'atmosphère modifiant ainsi sa composition. Certaines de ces espèces chimiques sont présentes à l'état naturel dans l'atmosphère. Ayant la capacité à absorber le rayonnement émis par la Terre, elles sont généralement regroupées sous le terme de gaz à effet de serre (GES). Cette propriété, couplée à leurs temps de résidence dans l'atmosphère assez long, fait de ces composés chimiques des agents de forçage radiatif (Delmas et al., 2007).

Les quantités d'énergie reçues ou émises par la Terre dépendent du processus naturel de l'effet de serre (figure 1.2) (Delmas et al., 2007). Les rayons émis par le soleil traversent l'enveloppe atmosphérique, atteignent la surface terrestre et contribuent directement à chauffer la planète. La surface terrestre absorbe le rayonnement solaire infra-rouge, le transforme en rayonnement infrarouge tellurique et le renvoie en direction de l'espace. A cette gamme de longueur d'onde, le rayonnement tellurique infrarouge est diffusé et absorbé par des gaz présents à l'état de traces dans l'atmosphère. Parmi eux, le méthane (CH_4) , la vapeur d'eau (H_2O) , le gaz carbonique (CO_2) et le protoxy de d'azote (N_2O) ainsi que l'ozone (O_3) ont la capacité d'absorber le rayonnement tellurique, ce sont les principaux gaz à effet de serre naturels responsables du réchauffement atmosphérique. Leur influence en tant que gaz à effet de serre est évaluée à travers leur Pouvoir de Réchauffement Global (PRG). Le PRG permet d'évaluer le forçage radiatif des différents gaz à effet de serre en se basant sur le dioxyde de carbone (exprimé en kilogramme équivalent CO₂ par kilogramme de gaz concerné). Il est défini comme la capacité d'un gaz « à réchauffer le climat compte tenu de son temps de résidence et de son efficacité énergétique à absorber le rayonnement, par rapport au réchauffement provoqué par une même quantité de CO₂ » (Ducroux, 2004). Le PRG est donc calculé en prenant en compte le temps de résidence des gaz dans l'atmosphère. Ce dernier est fonction de la vitesse moyenne à laquelle un gaz est éliminé. Par exemple le temps de résidence du gaz carbonique est égal à 120 ans environ, celui du méthane de 8 à 13 ans et celui du protoxyde d'azote est de 114 à 120 ans environ. Le PRG du CO_2 vaut 1, celui du CH_4 , 21, cela signifie que pour le cas du méthane, ce gaz a un pouvoir de réchauffement 21 fois supérieur à celui du CO_2 pour une quantité égale (Ducroux, 2004). D'autres

composés gazeux émis par les activités humaines possèdent la même caractéristique, il s'agit des gaz fluorés et chlorés¹ (hexafluorure de soufre SF_6 , hydrocarbures perfluorés PFC, hydrofluorocarbures HFC, chlorofluocarbures CFC, hydrochlorofluorocarbures HCFC par exemple) (Delmas et al., 2007).



FIGURE 1.2 – Description schématisée du phénomène d'effet de serre // UNEP-GRID, 2002².

Le flux d'énergie solaire incident représente tout particulièrement un facteur de variabilité de l'état du système climatique. Le rayonnement solaire détermine donc le *bilan radiatif* de la Terre (Delmas et al., 2007 ; Estienne et Godard, 1990). Si le phénomène d'effet de serre n'existait pas, la température moyenne à la surface du globe serait estimée à -18° C au lieu des $+15^{\circ}$ C dans les conditions actuelles. Le bilan radiatif ainsi obtenu résulte donc d'un équilibre entre phénomènes d'absorption et de réflexion des composés chimiques. Par définition, le forçage radiatif représente toutes les interventions extérieures au système climatique qui modifient le bilan d'énergie radiative reçu par la troposphère. Il prend ici toute sa dimension car l'importance des quantités émises de gaz à effet de serre par les activités humaines vient à modifier le bilan radiatif terrestre vers une augmentation des températures (Delmas et al., 2007). Le GIEC déclare à ce sujet *que les émissions mondiales de gaz à effet de serre imputables aux activités humaines ont augmenté depuis l'époque pré-industrielle*³ (GIEC, 2007). L'Homme contribue ainsi à augmenter les concentrations de gaz à effet de serre (**figure 1.3**). La présence renforcée de ces derniers, couplée à leur temps de résidence long dans l'atmosphère participent au réchauffement

 $^{^1}$ Même si l'utilisation de ces gaz a été interdite par le Protocole de Montréal en 1987, ils sont encore présents dans l'atmosphère étant donnée leur très longue durée de vie.

² United Nations Environment Program/Global Resources Information Database,

http://www.grida.no/publications/vg/climate/page/3058.aspx

³ Époque avant 1750.

de l'air. L'Homme a modifié la composition chimique de l'atmosphère par des rejets d'émissions issues de l'utilisation et la combustion massive d'énergies fossiles telles que le charbon, le gaz et le pétrole (Delmas et al., 2007).



FIGURE 1.3 – Variations des concentrations atmosphériques de trois gaz à effet de serre $(CO_2, CH_4 \text{ et } N_2O)$ durant les 10 000 dernières années (grands graphiques) et depuis 1750 (médaillons). Les mesures proviennent des carottes de glace (symboles de couleurs différentes correspondant aux diverses études) et d'échantillons atmosphériques (lignes rouges). Les forçages radiatifs correspondants par rapport à 1750 sont indiqués sur les axes à droite des grands graphiques // GIEC, 2007.

Avant de passer en revue les conséquences de la modification de la composition de l'atmosphère, notons que d'autres forçages anthropiques (**figure 1.4**) perturbent le système du climat. Les changements de la couverture végétale (Jacques et Le Treut, 2004 ; Fellous et Gautier, 2007) et les émissions d'aérosols (Fellous et Gautier, 2007) perturbent aussi le système climatique. Outre les substances gazeuses, les particules en suspension contribuent également à l'effet de serre. L'aérosol atmosphérique désigne l'ensemble des particules en suspension liquides ou solides dont la taille est comprise entre quelques nanomètres et quelques dizaines de micromètres. D'origine naturelle ou anthropique, les particules participent au forçage radiatif (Delmas et al., 2005) en agissant par exemple comme un écran au rayonnement solaire incident ce qui participe à refroidir le système climatique par diffusion des rayons vers l'espace (CNES, 2004¹). On parle d'effet direct des aérosols sur le climat. Les aérosols ont également un impact sur la formation des nuages en servant de noyau de condensation et par la présence de gouttelettes ils peuvent participer à augmenter le pouvoir réfléchissant des nuages. On parle d'effet indirect refroidissant en raison de la diffusion du rayonnement solaire par les particules vers l'espace (Delmas et al., 2007).

Le changement climatique observé d'origine anthropique a été reconnu comme tel en 1992 par la Convention - Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques (CCNUCC). Toute la question est d'ailleurs de quantifier la part de responsabilité anthropique dans le réchauffement de la planète. C'est en outre ce à quoi le GIEC tente d'apporter des éléments de réponses au moyen de rapports synthétiques sur les changements climatiques réalisés à partir de publications scientifiques spécialisées.



FIGURE 1.4 – Forçages radiatifs moyens à l'échelle mondiale en 2005 et leurs intervalles de confiance de 90 % pour divers agents et mécanismes de forçage. La colonne NCSc fait référence au niveau de connaissance scientifique. FR = forçage radiatif // GIEC, 2007.

 $^{^{1}\,}http://smsc.cnes.fr/PARASOL/Fr/dossier_presse_parasol.pdf$

2. Réchauffement : état des lieux

2.1. Changement climatique : conséquence du déséquilibre du bilan radiatif

L'effet de serre anthropique ou additionnel implique une absorption accrue du rayonnement terrestre en raison de l'augmentation des concentrations de gaz à effet de serre dans l'atmosphère. La capacité de chacun de ces gaz à absorber le rayonnement infrarouge tellurique est d'ailleurs illustrée par leur pouvoir de réchauffement global (Delmas et al., 2007).

Par ces divers phénomènes évoqués ci-dessus et dans les parties précédentes, l'équilibre radiatif de la Terre a été perturbé, modifiant ainsi le climat global. Les perturbations climatiques sont de manière générale mentionnées sous le terme de changement climatique. Deux définitions de ce qu'est un changement climatique sont proposées.

Quatrième rapport d'évaluation de l'IPCC (IPCC_A1, 2007) :

Variation de l'état du climat, que l'on peut déceler (par exemple au moyen de tests statistiques) par des modifications de la moyenne et/ou de la variabilité de ses propriétés et qui persiste pendant une longue période, généralement pendant des décennies ou plus. Les changements climatiques peuvent être dus à des processus internes naturels, à des forçages externes ou à des changements anthropiques persistants dans la composition de l'atmosphère ou dans l'utilisation des terres.

Convention-Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques (CCNUCC, 1992) :

Changements de climat qui sont attribués directement ou indirectement à une activité humaine, modifiant la composition de l'atmosphère du globe et qui viennent s'ajouter à la variabilité naturelle du climat observée au cours de périodes comparables.

Le GIEC ne définit pas un changement climatique par la nature de sa cause. Il est précisé qu'il peut être dû à la variabilité naturelle du climat ou à l'activité humaine. Ainsi, d'après le GIEC le changement climatique est avant tout une variation du climat dans le temps. La situation est différente lorsque l'on regarde la définition de la Convention-Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques (CCNUCC). En effet, elle différencie les modifications climatiques à la variabilité climatique d'autre part. La nature de la cause d'une modification du climat est ici la base d'une définition différente. Cette distinction « anecdotique » souligne cependant le fait qu'actuellement certifier la responsabilité des activités humaines sur les changements climatiques est un exercice encore très difficile.

Le GIEC tente d'estimer quantitativement les conséquences des perturbations anthropiques sur le climat mondial par l'élaboration de rapports d'évaluation. Cette instance climatique a pour but de rendre compte des connaissances de la communauté scientifique internationale. Elle évalue les informations actuelles disponibles d'ordre scientifique, technique et socio-économique afin de cerner les mécanismes du changement climatique.

Dans ses rapports le GIEC établit que le changement climatique est sans équivoque (GIEC, 2007) et est représenté tout particulièrement par un réchauffement du système climatique. L'élévation des moyennes annuelles des températures concerne la quasi-totalité de la Terre mais de manière renforcée toutefois aux hautes latitudes de l'hémisphère nord (Christensen et al., 2007). Le dernier rapport d'évaluation estime que la tendance linéaire au réchauffement entre 1906 et 2005 est de 0,74°C. Cela a eu comme conséquences majeures la hausse de la température moyenne atmosphérique et océanique, une fonte des neiges et des glaces, ainsi qu'une élévation du niveau moyen des mers (figure 1.5).

Non seulement le réchauffement climatique observé est un fait avéré, mais il est aussi directement imputable, pour l'essentiel, aux activités humaines et à la hausse des concentrations de gaz à effet de serre associée (GIEC, 2007).



FIGURE 1.5 – Variations observées de la température moyenne, du niveau moyen de la mer et de la couverture neigeuse dans l'hémisphère Nord. Les écarts sont calculés par rapport à la moyenne de la période 1961-1990 // GIEC, 2007.

Dans le cadre du quatrième rapport de l'IPCC (IPCC, 2007), les projections climatiques indiquent que les tendances de température à la hausse qui ont été observées se poursuivront au

cours du 21^{ème} siècle, compte tenu du temps de résidence des gaz à effet de serre dans l'atmosphère et des propriétés d'inertie du système climatique.

2.2. Les scénarios climatiques

Afin de quantifier l'impact des activités humaines sur le climat pour le siècle à venir, il est en premier lieu indispensable de connaître, au mieux d'estimer, les futurs forçages anthropiques (Delmas et al., 2005 ; Delmas et al., 2007). Dans cette optique, les futurs forçages sont « traduits » en termes de *scénarios* d'évolution d'émissions en équivalent CO_2 puis en scénarios de concentrations atmosphériques de CO_2 . Les trajectoires d'évolution des sociétés, en fonction de facteurs démographique, économique et technologique, constituent plus précisément des *hypothèses* d'évolution auxquelles sont directement associées les émissions anthropiques de CO_2 , CH_4 , N_2O et de SO_2 et aux émissions des précurseurs d'aérosols. Il existe plusieurs scénarios d'émissions instaurés dans le cadre du quatrième rapport d'évaluation (AR4) de l'IPCC (**figure 1.6**), différenciés par familles, chacune correspondant à une voie de développement ayant privilégié le développement durable ou la production massive, ou encore un développement global ou plutôt local (Dalmedico et Guillemot, 2006). L'étude aura été l'occasion d'étudier quatre de ces scénarios, B1, B2, A1B et A2.



FIGURE 1.6 – Concentrations de CO_2 associées aux scénarios d'émissions // Meehl et al., 2007.

Le rapport spécial de l'IPCC sur les scénarios d'émissions (Nakicenovic et al., 2000) nous apprend que le scénario A1B décrit une « croissance économique très rapide avec l'apparition de technologies plus efficaces » introduites très tôt sur le marché, la population mondiale culminerait au milieu du siècle pour diminuer ensuite. Son système énergétique serait équilibré entre utilisation de combustibles fossiles et non fossiles. La même évolution de la population mondiale est prescrite dans le scénario B1 mais ce dernier diffère de A1B par « l'introduction de technologies propres ». Le scénario A2 décrit un monde motivé par l'autosuffisance, hétérogène, dans lequel la population mondiale s'accroit en continu. Le dernier scénario étudié dans ce document est le scénario B2 qui aboutit à un accroissement de la population moins rapide que le scénario A2.

Le scénario B1 prévoit une concentration de CO_2 atmosphérique en 2100 d'environ 550 ppm¹, le scénario B2 d'environ 600 ppm, le scénario A1B d'environ 700 ppm et le scénario A2 d'environ 850 ppm (**figure 1.6**). Pour rappel, le GIEC (IPCC, 2007) a estimé la concentration de CO_2 lors

¹ ppm signifie part per million (partie par million), il s'agit du nombre de molécules de gaz considéré par million de molécules d'air.

de la période préindustrielle à 280 ppm, notons que sa valeur en 2004 était de 380 ppm. Actuellement la concentration de CO_2 est de 389 ppm (OMM, 2011). Nous ne pouvons pas savoir quel scénario est en train de se produire.

Nous aurons l'occasion d'y revenir plus tard, notamment au cours du troisième chapitre réservé à l'étude de l'influence de plusieurs scénarios d'émissions sur la circulation de l'atmosphère.

3. Prévisions climatiques : les modèles

Pour évaluer les conséquences du changement climatique, il est de rigueur d'avoir recours à l'utilisation de scénarios d'évolution des émissions mondiales (Delmas et al., 2007). Mais pas seulement. Compte tenu du caractère complexe du système climatique, les scientifiques utilisent la modélisation pour prévoir les conditions climatiques des prochaines décennies. Selon l'utilité qui leur est vouée, il existe différents modèles. Nous évoquerons dans cette sous-partie les modèles de climat.

Lorsqu'un modèle de climat est employé à des fins de prospection pour connaître l'impact du changement climatique, les scénarios d'émissions sont spécifiés comme données d'entrée. Voyons tout d'abord ce qu'est un modèle.

Définition d'un modèle

Un modèle est un outil censé représenter mathématiquement et de façon réaliste un phénomène afin de reproduire son fonctionnement et d'étudier son comportement. Il permet de se soustraire de la réalité en ce sens qu'il offre la possibilité d'étudier le résultat d'une action sur un élément qu'il n'est pas possible d'effectuer « en vrai ». Un modèle reproduisant un phénomène x génèrera autant de simulations qu'il y a d'actions exercées sur les éléments constitutifs de x. Cela revient à formuler la question suivante : quel résultat obtient-on si l'on exerce une action sur l'élément x ?

Définition d'un modèle climatique

Modéliser le système climatique revient à définir les concepts qui le décrivent et les relations qui l'animent. Pour que le modèle reproduise l'état et le comportement du climat terrestre, il doit obligatoirement refléter les aspects de ce dernier tels que nous le connaissons.

Le système climatique est un système extrêmement complexe dans lequel intervient une multitude de processus appartenant à chacune des cinq composantes qui le constitue. Nous avons vu que ce système est le résultat d'interactions internes mais aussi de contraintes externes. Nous savons également que le système se caractérise par la présence de nombreuses rétroactions rendant par extension sa représentation un peu plus délicate. Le GIEC (IPCC_A1, 2007) parle

de rétroaction climatique lorsque *le résultat d'un processus initial provoque dans un second processus des changements qui influent à leur tour sur le processus initial.* La rétroaction modifie de ce fait la réponse finale au processus initial. Une rétroaction positive amplifie le processus initial tandis qu'une rétroaction négative l'atténue. Il existe plusieurs rétroactions faisant suite au forçage anthropique. Pour ne citer qu'un exemple, parlons du cas de la vapeur d'eau. L'intensification de l'effet de serre a pour effet d'augmenter la température atmosphérique. La quantité de vapeur d'eau contenue s'en verra plus grande. Or, la vapeur d'eau est un important gaz à effet de serre. De ce fait, le processus initial sera renforcé, à savoir l'effet de serre. Nous sommes en présence d'une rétroaction positive.

Une fois établies les diverses interactions du système climatique, les lois qui régissent son comportement – physique, mécanique des fluides et chimie – sont ensuite traduites en langage informatique. La complexité du système climatique et sa compréhension ont d'abord limité la traduction numérique des équations qui le reflètent. Dans ses rapports, le GIEC (Le Treut et al., 2007) évoque l'évolution des modèles climatiques vis-à-vis de la prise en compte des composantes et des interactions (**figure 1.7**). L'incorporation croissante de ces dernières tient du fait de l'augmentation des connaissances des mécanismes physiques qui entrent en jeu dans le système.

Nous pouvons voir sur la **figure 1.7** que les premiers modèles de climat étaient des modèles atmosphériques, c'est-à-dire des modèles climatiques simplifiés intégrant néanmoins les précipitations et la composition de l'atmosphère. Ils s'attachent à résoudre uniquement les équations qui décrivent le comportement de l'enveloppe atmosphérique. Outre la traduction numérique des processus physiques déterminant l'évolution de l'atmosphère, les modèles rendent compte de sa *variabilité*. Par la suite, afin de simuler de façon encore plus réaliste le système du climat, les modèles ont commencé à intégrer davantage de processus réactionnels d''ordre chimique, biochimique ou physique à mesure que la compréhension du système grandissait associée à l'augmentation des capacités informatiques. Comme évoqué plus haut, le comportement de l'atmosphère n'est plus le seul aspect pris en compte (Dalmedico et Armatte, 2004), à cela s'ajoute au cours de la décennie 1980 l'occupation des sols, la glace de mer et les nuages. Au fil des années et des différents rapports d'évaluation du GIEC, complémentairement aux processus déjà intégrés, les modèles climatiques traduisent d'autres éléments physiques tels que les émissions d'aérosols, l'activité volcanique, la circulation océanique, le cycle du carbone ou encore la couverture végétale.



FIGURE 1.7 – Complexité des modèles climatiques et addition de mécanismes physiques représentés schématiquement. FAR : first assessment report 1990 ; SAR : second assessment report 1996 ; TAR : thirst assessment report 2001 ; AR4 : fourth assessment report 2007 // Le Treut et al., 2007.

Comme évoqué à l'instant, le comportement de l'atmosphère n'est plus le seul aspect pris en compte, à cela s'ajoute celui des surfaces continentales, des masses océaniques, des régions couvertes de neige et de glace, ou encore de la biosphère ainsi que leurs interactions. Ces modèles, connus sous le nom de modèles de circulation générale couplés océan-atmosphère (MCGOA) intègrent le système climatique dans son ensemble. Ce type de modèle dispose généralement d'une résolution horizontale de l'ordre de la centaine de kilomètres (100 – 300 kilomètres) et de plusieurs dizaines de niveaux atmosphériques et océaniques (Jacques et Le Treut, 2004). Malgré l'amélioration constante des connaissances sur la machine climatique, les modèles ne peuvent traduire qu'une représentation simplifiée des mécanismes impliqués.

L'intérêt d'utiliser des modèles climatiques réside en deux aspects majeurs :

- en modifiant un élément du système et en étudiant le résultat obtenu, cela permet de mieux comprendre le fonctionnement du système,
- en simulant l'effet d'un forçage anthropique (scénario d'émissions par exemple), cela permet de prévoir les conséquences d'une perturbation et par là-même, d'agir (par l'élaboration de stratégies de réduction des émissions de CO₂ par exemple).

Dans le cadre des rapports d'évaluation du GIEC, un certain nombre de modèles climatiques sont utilisés (**tableau 1.1**) pour leur caractère prédictif afin de simuler l'évolution future du climat et plus particulièrement de la dynamique de l'atmosphère. Utiliser de tels outils pour détecter d'éventuels changements de la circulation atmosphérique nécessite de mener une évaluation de la capacité des modèles à reproduire sa dynamique. Le dernier rapport d'évaluation du GIEC paru en 2007 relate les performances des modèles de climat globaux couplés océan-atmosphère à représenter les caractéristiques de la variabilité de large échelle notamment suite à l'amélioration de leur résolution, des techniques de calculs, des paramétrisations et de l'intégration toujours croissante de processus physiques (Randall et al., 2007).

		Résolution spatiale			
Modèle	Développeurs	[Lat x	Long		
		Atmosphère	Océan		
BCC-CM1	Centre du climat, Pékin	$1,9^{\circ} \ge 1,9^{\circ}$	$1,9^{\circ} \ge 1,9^{\circ}$		
BCCR-BCM2.0	Centre de recherches Bjerknes pour le climat, Norvège	$1,9^\circ\ge 1,9^\circ$	$1,5^{\circ} \ge 1,5^{\circ}$		
CCSM3	CCSM3 Centre national pour la recherche atmosphérique, USA				
	Contra considion nour l'analyza et la madélization du	$2,8^{\circ} \ge 2,8^{\circ}$	$1,9^{\circ} \ge 1,9^{\circ}$		
CGCM3.1	climat. Canada	ou	ou		
	climat, Callada	$1,9^\circ\ge 1,9^\circ$	0,9° x 1,4°		
CNRM-CM3	CNRM-CM3 Météo-France/Centre national de recherches météorologiques, France				
CSIRO-MK3.0	1,9° x 1,9°	$0{,}8^\circ\ge 1{,}9^\circ$			
ECHAM/MPI-OM	Institut Max Planck pour la météorologie, Allemagne	$1,9^\circ\ge 1,9^\circ$	$1,5^\circ\ge 1,5^\circ$		
GFDL-CM2.0	Département du commerce américain/Administration nationale océanique et atmosphérique (NOAA)/Laboratoire géophysique des fluides dynamiques (GFDL), USA	2,0° x 2,5°	1,0° x 1,0°		
	Administration nationale de l'aéronautique et de	3° x 4°	$3^{\circ} \ge 4^{\circ}$		
GISS-AOM	l'espace (NASA)/Institut Goddard pour les études	et	et		
GISS-EH	spatiales (GISS), USA	$4^{\circ} \ge 5^{\circ}$	$2^{\circ} \ge 2^{\circ}$		
IPSL-CM4	Institut Pierre Simon Laplace, France	$2,5^{\circ} \ge 3,75^{\circ}$	$2^{\circ} \ge 2^{\circ}$		
MIROC3.2	Centre de recherche du système climatique (Université de Tokyo)/Institut national pour les études environnementales/Centre de recherche frontalier sur le changement climatique (JAMSTEC), Japon	1,1° x 1,1°	0,2° x 0,3°		
MRI-CGCM2.3.2	Institut de recherche météorologique, Japon	$2,8^{\circ} \ge 2,8^{\circ}$	$2{,}0^\circ\ge 2{,}5^\circ$		
PCM	PCM Centre national de recherche atmosphérique (NCAR), USA		0,7° x 1,1°		
UKMO-HadCM3	Centre Hadley nour la recherche et la prédiction	$2{,}5^{\circ}\ge 3{,}75^{\circ}$	1,25° x 1,25°		
UKMO-HadCFM1	climatique/Centre météorologique Boyaumo Uni	et	\mathbf{et}		
01110-11auGEMI	eminanque, Centre mercorologique, rioyaume-Om	$1,3^\circ\ge 1,9^\circ$	$1,0^\circ\ge 1,0^\circ$		

TABLEAU 1.1 – Principaux modèles climatiques utilisés dans le cadre du quatrième rapport du GIEC // Randall et al., 2007.

Mais cela n'est pas la seule utilisation qu'en fait le GIEC. De nombreuses simulations sont réalisées en se distinguant les unes des autres par l'intégration de conditions initiales différentes. Les résultats ainsi obtenus permettent d'estimer la part de responsabilité des éléments constitutifs du système climatique (Fellous et Gautier, 2007; Douguédroit, 2005), qu'ils soient d'ordre naturel ou anthropique.

L'évolution future de la dynamique de l'atmosphère de l'hémisphère Nord est étudiée dans ce travail dans le chapitre 3, tout d'abord en évaluant la capacité d'un MCGAO à reproduire la dynamique observée et ensuite en analysant d'éventuels impacts du changement climatique sur la variabilité de la circulation atmosphérique.

4. Circulation et variabilités atmosphériques

Afin de clore cette première partie, nous présentons dans les paragraphes suivants une description non exhaustive de la dynamique atmosphérique globale. La circulation atmosphérique est la réponse du fluide atmosphérique à différentes contraintes telles que la rotation de la Terre et les variations du bilan radiatif.

4.1. Circulation de l'atmosphère

Nous avons vu dans la partie 1, section 1.2 que la température moyenne de la Terre est d'environ 15°C. Cette valeur cache en réalité des fluctuations spatiales de température d'un endroit à l'autre qui s'expliquent par la sphéricité du globe. Que l'on se situe aux pôles ou à l'équateur, les rayons du soleil n'arrivent pas à la surface avec le même angle d'incidence : un angle élevé indique qu'une même quantité d'énergie solaire va couvrir une plus grande surface (hautes latitudes), alors qu'un angle plus faible signifie que les rayons tendent à atteindre la surface perpendiculairement (basses latitudes), la même quantité d''énergie couvre alors une surface plus petite. Les quantités d'énergie reçues (et donc la température) à différentes localisations du globe sont alors empreintes d'une hétérogénéité spatiale et temporelle importante (Delmas et al., 2007).

Ce déséquilibre énergétique est compensé par un échange constant de chaleur des zones excédentaires vers les zones déficitaires, on parle de transport méridien (transfert nord-sud/sudnord) (Delmas et al., 2007). La chaleur est transportée majoritairement par le biais des deux enveloppes superficielles terrestres, que sont l'atmosphère et les océans. Ce transport méridien est soumis notamment à la force de Coriolis, force qui dévie les mouvements horizontaux des masses d'air, du fait de la rotation du globe lorsque nous considérons le fluide atmosphérique. La combinaison du transport méridien, la rotation de la Terre et la convergence des vents de basse couche aboutissent schématiquement à la formation de cellules destinées à répartir la chaleur par des mouvements ascendants et descendants (Delmas et al., 2007), au niveau des tropiques, on les nomme cellules de Hadley (**figure 1.8**).



FIGURE 1.8 – Schéma de la circulation atmosphérique globale // NASA.

Les cellules de Hadley caractérisent la réponse de l'écoulement de l'air des basses latitudes au bilan radiatif différentiel. Les contrastes thermiques horizontaux étant faibles, c'est le transport vertical qui prend le relais sous forme d'ascendance au-dessus de l'équateur et de subsidence au niveau de 30 degré de latitude (région subtropicale) dans chaque hémisphère. La circulation méridienne des tropiques est perturbée par des mouvements de surface zonaux ouest-est issus des contrastes thermiques entre océan et continent, les alizés. Au niveau des moyennes latitudes, la rotation du globe à travers la force de Coriolis dévie vers l'est le transport méridien d'altitude, transport destiné à diminuer les contrastes de température entre zones tropicale et extratropicale. Il s'en suit alors en surface une circulation zonale d'ouest caractérisée par les westerlies. Le contraste de températures méridien (pôle-équateur) forme un cisaillement du vent sous la forme d'un tube dans lequel la circulation zonale d'ouest « s'engouffre ». Ces vents, forts, peuvent atteindre les 100 m.s⁻¹ (360 km/h), on parle de courant-jet (Delmas et al., 2007).

La dynamique de la circulation de l'atmosphère est régie par une certaine organisation qui façonne la création de perturbations prédominantes, elles-mêmes hiérarchisées (e.g., Kondrashov et al., 2007). Ces fluctuations préférentielles reflètent entre autres la variabilité interannuelle ou intrasaisonnière de la dynamique atmosphérique ; elles sont regroupées sous les termes de *modes de variabilité* ou de *régimes de temps*.

4.2. Variabilités de l'atmosphère

Comme évoqué en partie 1, le climat est représenté par la moyenne de paramètres atmosphériques sur une période de 30 ans minimum. Les fluctuations autour de cette moyenne définissent ce que l'on nomme la variabilité climatique. Nous l'avons vu, les fluctuations climatiques s'expliquent notamment par les forçages internes et externes (interactions, rétroactions, activités humaines ...). L'atmosphère, qui détermine en grande partie le climat, peut aussi être appréhendée par sa *variabilité*. Cette dernière peut s'exprimer au cours d'une saison, au cours d'une année ou encore au cours d'un mois particulier.

Tout comme le système climatique, l'atmosphère fluctue en réponses à différents types de forçages. Il y a les fluctuations intrinsèques en réponse au fonctionnement de l'atmosphère ellemême. Cette variabilité interne ne fait pas intervenir d'autre composante du système climatique (l'océan par exemple). Et il y a les fluctuations en réponse à un forçage externe au système climatique ou faisant suite à l'interférence d'une autre composante du système climatique. On parle alors de variabilité externe. Pour ne citer qu'un exemple, la variabilité de l'atmosphère peut être modulée par l'océan. Marshall et al. (2001) précisent que les températures à la surface de la mer de l'océan nord Atlantique en hiver sont la réponse directe de l'océan aux flux air-mer dérivés de l'Oscillation Nord Atlantique (ONA).

Les paragraphes qui vont suivre s'attachent à présenter brièvement ces différentes variabilités sur l'hémisphère nord en synthétisant les structures interannuelles et intrasaisonnières de la circulation sur la région Nord Atlantique – Europe.

4.2.1. Structures de variabilité interannuelle

La circulation de l'atmosphère est définie spatialement et sur diverses échelles de temps. Sa variabilité s'illustre à travers des schémas spatiaux qui apparaissent de façon récurrente et qui persistent sur une large gamme temporelle. On se réfère aux *modes de variabilité* dits basse-fréquence pour caractériser les systèmes d'anomalies de pression sur une échelle de plus de 10 jours (Michelangeli, 1996) et d'échelle synoptique¹. Ils soulignent la variabilité interannuelle de la circulation atmosphérique, les modes se reproduisent donc d'une année sur l'autre.

Oscillation Nord Atlantique

L'Oscillation Nord Atlantique – ONA (Rogers, 1984) est le principal mode de variabilité basse-fréquence de la circulation atmosphérique de l'Atlantique nord. Il est marqué par une récurrence importante puisqu'il est présent toute l'année (Barnston et Livezey, 1987 ; Hurrell et al., 2003). Ce mode est caractérisé par un indice, l'indice ONA, calculé comme la différence d'anomalies de pression normalisées au niveau de la mer entre deux localisations, l'Islande (Reykjavik) et les Açores (Punta Delgada) (Rogers, 1984). Ce mode se traduit par l'oscillation des pressions entre l'anticyclone des Açores (Atlantique subtropical) et la dépression d'Islande (Arctique). Physiquement, l'oscillation nord Atlantique se présente donc sous la forme d'un dipôle de centres d'anomalies de pression de signe contraire (Hurrell, 1995), l'un situé près du Groenland et de l'Islande, l'autre proche de l'archipel des Açores (**figure 1.9**).

¹ L'échelle synoptique peut être définie comme l'échelle spatio-temporelle permettant de prendre en compte un grand domaine géographique de l'ordre du millier de kilomètres pour la dimension horizontale et de quelques jours pour la dimension temporelle. De ce fait les phénomènes atmosphériques qui s'y trouvent sont étudiés, lesquels retranscrivent l'évolution des systèmes anticycloniques et dépressionnaires ou les zones frontales.



FIGURE 1.9 – Structure de l'Oscillation Nord Atlantique déterminée par ACP avec rotation sur les champs journaliers (deux fois par jour) de hauteurs de géopotentiel 700 hPa sur le mois de janvier au cours de la période 1950-84. La France est située par une étoile // Barnston et Livezey, 1987.

Lorsque l'ONA est en phase positive (figure 1.10), l'anticyclone des Açores est renforcé et la dépression d'Islande davantage creusée. En phase négative, l'anticyclone et la dépression sont simultanément affaiblis (figure 1.10). Le passage d'une phase à l'autre implique des variations au niveau de la vitesse et de la direction du vent moyen sur l'Atlantique, des transports de chaleur et d'humidité (Hurrell, 1995) venant du bassin Atlantique mais aussi sur le nombre, l'intensité et les trajectoires des tempêtes (Hurrell et al., 2003). En effet, du point de vue climatologique, l'ONA en phase positive engendre, du fait d'un gradient de pression accentué, une intensification du flux d'ouest de l'Atlantique jusque sur l'Europe et un flux de sud sur l'est de l'Amérique du Nord tandis qu'un flux de nord traverse le Canada Arctique et la Méditerranée (Hurrell et al., 2003; Hurrell et Deser, 2009). La phase négative de l'ONA, quant à elle, crée un gradient de pression atténué qui implique un affaiblissement du flux d'ouest.



FIGURE 1.10 – Représentation schématique des influences météorologiques de l'ONA au cours de sa phase positive (gauche) et négative (droite).

L'ONA (Marshall et al., 2001 par exemple) explique une part importante (37 %) de la variabilité de la circulation atmosphérique du bassin Atlantique et, étant caractérisée par l'alternance de ses phases positive et négative, influence le climat européen. Nous venons de le voir, une phase positive renforce l'anticyclone des Açores et la dépression d'Islande produisant l'accélération du courant-jet et son déplacement vers le nord tandis qu'une phase négative affaiblit l'anticyclone et la dépression engendrant le ralentissement du jet et son décalage vers le sud¹. L'impact climatique sur l'Europe est un réchauffement en phase positive et un refroidissement en phase négative en réponse à l'arrivée d'air polaire. Les impacts climatiques en lien avec l'ONA sont une problématique grandement étudiée par les scientifiques, l'influence sur les températures et les précipitations a été étudié par van Loon et Rogers (1978), Rogers (1985), Hurrell (1995) ou encore Chen et Hellstrom (1999) pour les régions Europe du nord-ouest et Scandinavie ; Hurrell et van Loon (1997) pour les Îles Britanniques ; Hurrell et van Loon (1997) ou encore Ulbrich et Christoph (1999) pour les régions de l'Europe centrale et du sud-ouest (voir Marshall et al., 2001 pour plus d'informations). Chacune de ces études détermine la relation entre l'ONA et les variables températures et/ou précipitations intervenant sur les régions pré-citées.

 $^{^1 \ \}rm http://www.cru.uea.ac.uk/cru/info/nao/, juillet 2000.$

Est Atlantique

Le schéma Est Atlantique (EA) est le deuxième mode dominant la variabilité de l'Atlantique nord, il survient notamment lors des mois d'hiver et de printemps (Wallace et Gutzler, 1981; Barnston et Livezey, 1987). Lorsque l'EA est en phase positive le géopotentiel 500 hPa sur l'Atlantique nord et l'Atlantique subtropical ainsi que l'Europe de l'est est renforcé, tandis que le géopotentiel est affaibli lors de la phase négative.

Le mode EA est défini comme un dipôle d'anomalies, un premier centre d'action situé à l'ouest de la Grande-Bretagne (55°N, 20W), un deuxième, très étendu et de signe opposé, sur le centre de l'Atlantique aux basses latitudes, on le retrouve sur l'Afrique du nord, la mer Méditerranée et l'Europe de l'est (**figure 1.11**).



FIGURE 1.11 – Structure de l'Est Atlantique déterminée par ACP avec rotation sur les champs journaliers (deux fois par jour) de hauteurs de géopotentiel 700 hPa sur le mois de décembre au cours de la période 1950-84. La France est située par une étoile // Barnston et Livezey, 1987.

Mer du Nord - Mer Caspienne

Le mode mer du Nord – mer Caspienne (North Sea Caspian Pattern-NCP, Kutiel et Benaroch, 2002a et Kutiel et al., 2002b) existe toute l'année, ce dipôle est constitué d'un pôle sur la mer du Nord (0-10°E, 55°N) et d'un second sur la mer Caspienne (50°-60°E, 45°N). Lorsque l'indice de la NCP est négatif la circulation de sud-ouest vers les Balkans, l'ouest de la Turquie et

le Moyen-Orient est intensifiée, en résultent alors des températures supérieures à la normale ainsi que des précipitations inférieures à la normale sur ces mêmes régions.

Le schéma NCP se présente sous la forme d'un dipôle d'anomalies de pressions de signe contraire orienté nord-nord-ouest/sud-sud-est (figure 1.12). Un premier pôle se distingue au niveau de la mer du Nord, tandis qu'un second se dessine au-dessus ou à l'ouest de la mer Caspienne.



FIGURE 1.12 – Localisation des pôles du schéma Mer du Nord – Mer Caspienne // Kutiel et al., 2002b.

Est Atlantique – Ouest Russie

Le mode Est Atlantique – Ouest Russie (EA-WR) défini notamment par Barnston et Livezey (1987) est composé de deux centres d'action, l'un sur la plaine Russe, l'autre de signe opposé autour de la Grande-Bretagne (**figure 1.13**).



FIGURE 1.13 – Structure de l'Est Atlantique – Ouest Russie déterminée par ACP avec rotation sur les champs journaliers (deux fois par jour) de hauteurs de géopotentiel 700 hPa sur le mois de janvier au cours de la période 1950-84 // Barnston et Livezey, 1987.

La phase positive de l'EA-WR engendre des températures de surface inférieures à la moyenne audessus de l'ouest Russie et du nord-est de l'Afrique et des précipitations inférieures à la moyenne également sur l'Europe centrale (NOAA, 2011¹).

Scandinavie

Le schéma référencé comme le mode Scandinavie (SCAN) (Barnston et Livezey, 1987; Rogers, 1990) présente un large centre de pression sur l'ensemble de la péninsule scandinave (Suède, Norvège et Golfe de Botnie) et un second centre plus faible, en opposition, proche de la Méditerranée occidentale (**figure 1.14**). Les températures inférieures à la moyenne sur le centre de l'Europe et les précipitations elles aussi inférieures à la moyenne sont associées à la phase positive de SCAN (NOAA, 2011²).

 $^{^{1}\} http://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/teledoc/eawruss.shtml$

 $^{^{2}\} http://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/teledoc/scand.shtml$



FIGURE 1.14 – Structure du mode Scandinavie déterminée par ACP avec rotation sur les champs journaliers (deux fois par jour) de hauteurs de géopotentiel 700 hPa sur le mois de janvier au cours de la période 1950-84. La France est située par une étoile // Barnston et Livezey, 1987.

4.2.2. Structures de variabilité intrasaisonnière

La circulation atmosphérique est représentée par un nombre fini d'états caractérisés par des régions préférentielles (Michelangeli, 1996) dénommés *régimes de temps*. La variabilité de la circulation, quant à elle, peut s'expliquer comme l'alternance ininterrompue de régimes (Vautard, 1990). Les régimes de temps et donc la variabilité intrasaisonnière qu'ils caractérisent, peuvent être extraits lors de la saison hivernale et estivale (Cassou et al., 2005) (**figure 1.15**).



FIGURE 1.15 – Quatre régimes de temps principaux identifiés à partir des anomalies de géopotentiel 500 hPa d'été sur le secteur Nord Atlantique – Europe sur la période 1950 – 2003 // Cassou et al., 2005.

Les quatre régimes de temps que nous pouvons voir sur la **figure 1.15** ont été obtenus grâce à l'algorithme *k*-means de Michelangeli et al. (1995). Il s'agit des régimes de blocage, de dorsale Atlantique, de dépression Atlantique et de la phase négative de l'ONA.

La variabilité intrasaisonnière est ainsi animée par les transitions entre ces états préférentiels. La variabilité intrasaisonnière de la circulation atmosphérique peut donc être perçue comme l'alternance d'un régime à un autre (Kageyama et al., 1999). Michelangeli et al. (1995) caractérisent les régimes de temps par trois propriétés : persistance, récurrence et quasistationnarité.

L'étude des régimes de temps se révèle être un axe de recherche permettant d'améliorer les connaissances des processus impliqués dans la variabilité de la circulation atmosphérique ou de façon plus générale dans le système climatique (étude des régimes de temps et de la circulation océanique par Guemas, 2009 par exemple). Au cours de notre étude, l'identification des régimes de temps a été effectuée (chapitre 3, partie 2) afin de bénéficier d'indicateurs de la variabilité atmosphérique. La comparaison des régimes de temps associés à un climat actuel d'une part et à un climat sous forçage anthropique d'autre part sera la base de l'étude de l'influence du changement climatique sur de telles structures.

4.2.3. Types de circulation

Hess et Brezowsky ont classé les schémas de circulation large-échelle en types de temps (grosswetterlagen). Ce catalogue est le fruit d'une classification subjective, elle caractérise les flux atmosphériques journaliers sur l'Europe et le proche Atlantique en privilégiant les masses d'air (Hess et Brezowsky, 1952 ; Planchon et al., 2009). La classification identifie trois groupes de schémas de circulation (zonal, méridional et mélangé), lesquels sont divisés en cinq types majeurs – grosswettertypen (circulation d'ouest, circulation de sud, circulation de nord et de nord-ouest, circulation d'est et de nord-est et systèmes de haute ou basse pression sur l'Europe Centrale). A ceux-là s'ajoutent 29 sous-types, les grosswetterlagen. Douguédroit (2004) note qu'il y a confusion entre les termes de types de temps et types de circulation. Les types de temps s'attachent à une description plus générale tandis que les types de circulation se limitent à un type de donnée. Dans notre cas, nous étudions les types de circulation que nous représentons par des cartes de pression d'altitude à 500 hPa.

Dans cette étude, l'identification des modes de variabilité, des types de circulation et des régimes de temps est utilisée comme outils de recherches. En effet, ces différentes structures de variabilité nous servent de bases de travail pour détecter l'effet du changement climatique sur la qualité de l'air, c'est pourquoi la partie suivante introduit les concepts de la qualité de l'air.

[Partie 2] Qualité de l'air

Puisque le projet de la thèse revêt un caractère transdisciplinaire, à savoir coupler l'étude des structures de variabilité atmosphérique à la modélisation de la qualité de l'air, cette partie présente et explique le recours à un modèle de qualité de l'air.

Le temps qu'il fait et la pollution sont deux notions indissociables lorsque l'on parle du changement climatique anthropique (Kinney, 2008 ; Jacob et Winner, 2009). La localisation des champs de concentration de polluants dépend en partie des conditions météorologiques. A partir de ces connexions, un modèle de chimie-transport a pour vocation de simuler les concentrations de polluants, dans le temps et l'espace, en intégrant divers facteurs qui pilotent leurs quantités. Les émissions et leurs variations ainsi que les conditions météorologiques sont « reliées » au modèle en tant que données d'entrée. Les phénomènes de transport, ainsi que les mécanismes physico-chimiques déterminant la production ou la perte des espèces chimiques sont également traduits mathématiquement dans les modèles de chimie-transport (Delmas et al., 2005).

Précisons à ce niveau du manuscrit que la pollution de l'air se situe sur des échelles de temps et d'espace plus restreintes que l'étude du climat (**tableau 1.2**).

Ces trois échelles se distinguent par la dimension horizontale des phénomènes atmosphériques observés. La première dite synoptique ou macro-échelle de 1 000 km en moyenne regroupe les systèmes dépressionnaires ou anticycloniques qui se développent aux moyennes latitudes ainsi que les cyclones. Les activités atmosphériques telles que les fronts ou les brises thermiques se manifestent à méso-échelle (10 à 100 km). La dernière échelle, la micro-échelle, correspond à des évènements de dimension horizontale moyenne comprise entre 1 mètre et 10 km. Ces derniers concernent le déplacement des masses d'air polluées (panaches), la formation des nuages comme les cumulus ou encore la circulation urbaine.

Echelle Distance		Temps	Phénomènes atmosphériques
macro ou synoptique	100 – 1 000 km	Semaines Mois	Circulation atmosphérique Systèmes de hautes et basses pressions
méso	$10-100 \mathrm{km}$	Jours Heures	Brises de mer, de terre Vents de vallée Îlots de chaleur urbains
micro	$< 10 \mathrm{~km}$	Minutes	Dispersion d'un panache Circulation urbaine (rue canyon)

TABLEAU 1.2 – Différenciation des dynamiques troposphériques en fonction des échelles spatiotemporelles.

Poursuivons ce chapitre en définissant les notions de pollution atmosphérique et pollution photochimique.

1. Pollution et polluants

De nombreux polluants ont des effets sur la santé, sur les végétaux ou les bâtiments, c'est pourquoi certains d'entre eux font depuis plusieurs années l'objet d'une surveillance régulière. Ils sont d'ailleurs soumis aux directives européennes dont les principaux objectifs sont d'évaluer l'exposition des personnes et végétaux à la pollution et d'étudier les effets d'actions de réduction de pollutions. Les directives établissent également des critères de qualité de l'air permettant de définir des valeurs limites et des seuils d'alerte caractéristiques de chaque polluant (tableau 1.3). Les lois européennes sont transcrites au niveau de la législation française par des décrets et des réglementations spécifiques. L'une d'entres elles est représentée par la loi sur l'air et l'utilisation rationnelle de l'énergie (loi LAURE n°96-1236 du 30/12/96). Cette loi instaure entre autre la mise en place d'un réseau de surveillance de la qualité de l'air et d'information du public par la création des Associations Agréées de Surveillance de la Qualité de l'Air (AASQA). Chaque agglomération de plus de 250 000 habitants dispose d'une AASQA, l'ensemble de ces structures est regroupé au sein de la Fédération Atmo. Les procédures d'alerte à la pollution atmosphérique en agglomération sont précisées par des arrêtés préfectoraux. Tout d'abord, le seuil d'information et de recommandation est un niveau mesuré sur une heure à partir duquel les pouvoirs publics informent les habitants de la situation et font des recommandations pour réduire certaines émissions. Ensuite, la valeur limite correspond au niveau maximal de concentration de substances polluantes dans l'air à ne pas dépasser. Enfin, le seuil d'alerte calculé sur une heure correspond à un niveau de concentration atteint au-delà duquel l'exposition¹ justifie la mise en place de mesures d'urgence.

 $^{^1}$ Exposition au cours du temps de personnes à des concentrations de gaz ou particules.

TABLEAU 1.3 – Critères nationaux de qualité de l'air de plusieurs polluants atmosphériques. CO : Monoxyde de Carbone ; COV : Composés Organiques Volatils ; Ni : Nickel ; Cd : Cadmium ; As : Arsenic ; Pb : Plomb ; SO₂ : Dioxyde de Soufre ; NO₂ : Dioxyde d'Azote ; PM : Particules en suspension ; O₃ : Ozone. // Airparif, 2012¹.

Type de	Base de calcul	Polluant									
$ m seuil \ (\mu g/m^3)$		СО	COV	Ni	Cd	As	Pb	SO_2	NOx	PM	O_3
Seuil information	moyenne journalière									50	
et recomman- dation	moyenne horaire								200		180
Valeur limite	moyenne annuelle		$5^{\rm h}$				$0,\!5$		40^{3}	40	
	moyenne hivernale										
	moyenne journalière							125^{a}		50°	
	moyenne glissante sur 8 heures	10 000									
	moyenne horaire							$350^{\rm b}$	200		
Valeur cible	moyenne annuelle		$1^{\rm d}$	$20^{\rm d}$	5^{d}	6^{d}					
Niveau d'alerte	moyenne horaire							500^{e}	$\frac{400^{\rm e}}{200^{\rm f}}$		240
	moyenne journalière									80	

^a : à ne pas dépasser plus de 3 jours par an

^b : à ne pas dépasser plus de 24 heures par an

^c : à ne pas dépasser plus de 35 jours par an

 d : en nanogramme/m³, à l'échéance du 31/12/12

^e : sur 3 heures consécutives

^f : si la procédure d'information et de recommandation a été déclenchée la veille et le jour même et que les prévisions font craindre un nouveau risque de déclenchement pour le lendemain

La loi LAURE définit la pollution atmosphérique, source de nuisances pour l'Homme et son environnement, comme celle liée à l'introduction par l'homme, directement ou indirectement, dans l'atmosphère et les espaces clos, de substances ayant des conséquences préjudiciables, de nature à mettre en danger la santé humaine, à nuire aux ressources biologiques et aux écosystèmes, à influer sur les changements climatiques, à détériorer les biens matériels, à provoquer des nuisances olfactives excessives. Il ne s'agit pas d'un phénomène nouveau : des

 $^{^{1}\} http://www.airparif.asso.fr/reglementation/normes-francaises$

problèmes apparaissent avec l'utilisation croissante du charbon lors de la révolution industrielle au 19^{ème} siècle. Prenons l'exemple largement documenté d'un épisode de pollution au soufre à Londres en 1952 auquel est attribué la mort de 4 500 personnes (Bell et al., 2004).

La définition donnée précédemment réduit la pollution atmosphérique aux activités humaines, or plusieurs espèces polluantes sont d'origine naturelle : le dioxyde de soufre (SO_2) résulte aussi de l'activité volcanique par exemple ; le dioxyde de carbone (CO_2) est formé également par les feux de forêt ou de savanes. Le problème de la pollution est donc contraint par les proportions de ces substances, qu'elles soient liquides, gazeuses ou solides : l'Homme, de par ses divers secteurs d'activité contribue à augmenter les émissions de gaz et d'aérosols créant ainsi une accumulation dans l'atmosphère caractérisée par un « niveau de fond ».

Les polluants de l'air peuvent être classés selon leur état physique (gazeux, solide, liquide), leur composition chimique (composés azotés, carbonés, soufrés) ou selon leur mode de formation (polluant primaire ou secondaire).

Il y a deux familles de polluants. Certains des polluants qualifiés de primaires peuvent aboutir à la formation d'autres polluants dits secondaires par transformations et conversions (Delmas et al., 2007). Les polluants primaires, d'origine naturelle ou anthropique, sont ceux qui sont émis directement dans l'atmosphère, immédiatement à partir des sources émettrices. Les polluants secondaires sont issus de réactions entre substances chimiques, ils ne sont pas émis.

Une description des principaux polluants atmosphériques est présentée dans les lignes qui suivent, nous nous attacherons à préciser dès que possible, les sources et les effets sur la santé pour chacun d'eux (Airparif, 2012¹).

1.1. Polluants primaires

Monoxyde de Carbone – CO. Ce gaz primaire provient des combustions incomplètes, notamment présent à la sortie des pots d'échappement des véhicules. Il peut être à l'origine d'intoxications si de fortes teneurs sont atteintes.

 $Composés \ Organiques \ Volatils - COV.$ Le trafic routier, l'utilisation de solvants, le secteur résidentiel, certains procédés industriels mais aussi la végétation naturelle (émissions de terpènes et d'isoprènes) ou anthropique (sylviculture, cultures) représentent les émetteurs de COV. Nous les retrouvons des suites de l'évaporation de carburants ou dans les gaz d'échappement. Ces composés peuvent entraîner une diminution des capacités respiratoires jusqu'à des effets mutagènes. Les hydrocarbures sont l'une des familles auxquels appartiennent les COV. Au sein de cette famille les alcènes ou les hydrocarbures aromatiques représentent deux catégories de COV parmi les plus toxiques.

Métaux lourds. Le Plomb (Pb), le Mercure (Hg), le Cadmium (Cd), l'Arsenic (As) ou encore le Nickel (Ni) sont issus des processus de combustion du charbon, du pétrole ou des ordures ménagères. Par accumulation dans les organismes ils ont des effets toxiques.

 $^{^{1}}$ http://www.airparif.asso.fr/

Dioxyde de soufre – SO_2 . Ce gaz primaire provient des processus de combustion. La teneur en soufre des combustibles (charbon, fuel, gazoles) détermine les émissions de ce gaz, irritant pour les voies respiratoires supérieures et les muqueuses de la peau. Au contact de l'humidité il se transforme en acide sulfurique. Il est essentiellement émis par les secteurs industriels, par le transport (gazole) ou par les activités de chauffage urbain pour les sources anthropiques.

1.2. Polluants primaires et secondaires

Oxydes d'Azote – NOx. Il s'agit du monoxyde d'azote (NO) et du dioxyde d'azote (NO₂). Les émissions de NOx sont associées à l'utilisation de combustibles fossiles tels que le charbon, le pétrole, la biomasse et leurs dérivés les essences. Une part de la production de monoxyde d'azote est anthropique, elle est réalisée lors des processus de combustions à haute température. Le NO est donc émis par les installations de chauffage, d'incinération ou des centrales thermiques. Les moteurs à combustion des automobiles participent également à l'émission du NO. Ce dernier est oxydé en NO₂. A noter que le NO₂ appartient aux deux familles de polluants, en effet c'est un polluant primaire mais également un polluant secondaire lorsqu'il se forme par oxydation du monoxyde d'azote sous l'effet des rayons ultra-violets, des COV et de l'oxygène. C'est aussi un gaz irritant pour les bronches.

Particules en suspension – PM. Les particules peuvent se distinguer en fonction de leur diamètre aérodynamique. Pour un diamètre inférieur à 10 micromètres nous parlerons de PM_{10} . Pour un diamètre inférieur à 2,5 micromètres nous parlerons de particules fines, les PM_{25} . Toutes deux sont invisibles à l'œil nu. Elles ont différentes origines de formation (CITEPA, 2001). Soit elles appartiennent à la famille des polluants secondaires, comme c'est le cas par exemple des particules de nitrates issues du NO₂, des sulfates issus du SO₂, ou encore à partir d'ammoniac ou de COV, suite à des réactions chimiques à partir de substances gazeuses, soit elles sont directement rejetées dans l'atmosphère et dans ce cas doivent être considérées comme des polluants primaires. Cependant, les concentrations mesurées de PM₁₀ et PM₂₅ font également l'écho de remises en suspension, ces phénomènes peuvent être le résultat de l'action du vent ou de courants d'air comme ceux générés par la circulation routière. Les effets de ces particules sur la santé se différencient d'après leur taille ; de par leur caractère grossier, les PM_{10} (celles dont le diamètre est supérieur à 2,5µm) une fois inhalées sont stoppées dans les voies aériennes supérieures. Les PM_{25} , plus petites, pénètrent plus profondément jusqu'aux ramifications des voies respiratoires, les alvéoles. Ces deux familles de particules entraînent des complications respiratoires et des problèmes cardiovasculaires.

1.3. Polluants secondaires

 $Ozone - O_3$. Ce gaz, oxydant puissant, est source d'irritations des voies respiratoires chez les humains et de lésions au niveau des feuilles chez les végétaux (APPA, 2008¹).

L'ozone troposphérique dévoile un autre type de pollution, la *pollution photochimique*. Cette dernière nécessite l'intervention de la lumière du soleil. L'ozone n'est pas émis par les activités anthropiques mais se forme par réaction photochimique naturellement sur la base du cycle photolytique du dioxyde d'azote appelé cycle de Layton (1930). La **figure 1.16** reprend l'ensemble des mécanismes impliqués dans la formation de l'ozone troposphérique.



FIGURE 1.16 – Mécanismes impliqués dans la formation de l'ozone troposphérique (cycle de Layton pour l'ozone troposphérique).

Sous l'effet de la radiation solaire ultra-violet, le dioxyde d'azote (NO_2) est dissocié constituant une source d'oxygène atomique (O). En l'absence d'hydrocarbures, l'oxygène moléculaire (O_2) se combine à l'oxygène atomique et forment ainsi l'ozone. L'ozone ainsi formé va oxyder NO pour reformer NO_2 .

Les COV, par dégradation photochimique, libèrent des radicaux qui réagissent avec NO, NO est alors oxydé en NO_2 . L'intervention des hydrocarbures dans le cycle photolytique entraîne une accumulation d'ozone car la présence des radicaux empêche l'ozone de se décomposer en interagissant avec NO.

 $Peroxy-acétyl-nitrates - PAN (RCO_3NO_2)$. Ces composés chimiques sont formés dans les atmosphères des agglomérations par réactions photochimiques. Ces substances sont des irritants des yeux et de l'appareil respiratoire et sont toxiques pour la végétation.

 $^{^{1}\} http://www.appanpc.fr/_adminsite/Repertoire/7/Fichier/23-090304111156.pdf$

La qualité de l'air résulte des échanges entre les entrées et les sorties de polluants au sein d'une parcelle d'air. Les apports de polluants se font directement par les rejets dans l'air (émissions) tandis que les « pertes » sont consécutives à leurs transformations, éliminations et également à leur dispersion et dilution. C'est là que le transport des masses d'air intervient dans cet équilibre.

2. Modèles de chimie-transport

Les scientifiques utilisent la modélisation en mode pronostique pour prévoir l'évolution de la composition chimique de l'atmosphère de ces prochaines décennies. Nous évoquerons dans les sections suivantes le modèle de qualité de l'air.

La couche limite atmosphérique (CLA) est une couche atmosphérique en contact avec la surface terrestre. On y retrouve d'importants phénomènes de turbulence en raison de la friction et de la rugosité des surfaces continentales et océaniques qui perturbent l'écoulement de l'air. Les mouvements de l'air qui y sont présents ainsi que les émissions de composés chimiques (gazeux ou particulaires) concourent à rendre la couche limite très active dynamiquement et chimiquement du fait notamment de l'hétérogénéité des substances rencontrées. Les effets des turbulences favorisent l'augmentation des vitesses de mélange, et par là même, des processus d'oxydation des polluants (Magi, 1997). Cette couche s'étend typiquement jusqu'à une altitude de 1 500 mètres. Au-delà, l'influence de la surface terrestre est négligeable, les écoulements de l'air ne sont pas perturbés, il s'agit de « l'atmosphère libre ». La CLA représente donc un facteur déterminant dans la dispersion des polluants. Aussi, les modèles de chimie-transport déterminent le devenir des polluants en jeu dans la couche limite atmosphérique.

2.1. Familles de modèles

Deux types de modèles sont utilisés pour la simulation de la qualité de l'air : le modèle statistique et le modèle déterministe. Les principes de fonctionnement de ces modèles sont fondamentalement différents tout comme leurs applications.

2.1.1. Modèle statistique

Le modèle statistique se fonde uniquement sur des bases de données mesurées. Celles-ci concernent des paramètres météorologiques, tels que la température, les précipitations, la vitesse et la direction du vent, etc ..., de plus, elles listent des observations liées à la problématique de la qualité de l'air, comme par exemple, les concentrations de polluants ou les niveaux de pollution atteints. Un tel modèle comprend donc une analyse statistique d'observations en établissant des relations empiriques entre les données. Aucune formulation de processus physico-chimique n'intervient dans ces modèles.

2.1.2. Modèle déterministe

Les modèles déterministes, à l'inverse des modèles statistiques, se basent sur des équations mathématiques formulées à partir de lois physico-chimiques connues. Afin d'intégrer l'ensemble des composantes du système atmosphérique jouant un rôle en qualité de l'air, les modèles représentent mathématiquement la dynamique atmosphérique, les émissions et les processus chimiques et physiques. Il existe deux approches permettant de suivre l'évolution chimique et la dispersion de polluants : l'approche Lagrangienne et Eulérienne. Chacune d'elle est présentée dans les paragraphes ci-dessous.

Approche Lagrangienne

Ce type de modèle simule une parcelle d'air dont le référentiel est attaché au composé chimique, lequel est déplacé par le vent. Les changements de la composition chimique de la parcelle au cours du temps sont simulés par le modèle. Cette dernière étant soumise au vent local et notamment aux phénomènes d'advection, le modèle calcule également les concentrations en différents points dans l'espace, suivant sa trajectoire. Les échanges de matière que la parcelle peut réaliser avec les parcelles environnantes ne sont pas intégrés dans ce type de modèle, seuls les échanges de matière (émissions, dépôts) à la base de la parcelle sont paramétrés. Les modèles déterministes Lagrangiens sont essentiellement employés au sein des problématiques des risques industriels, ils servent par exemple à suivre l'évolution de panaches de fumées suite à un accident.

Approche Eulérienne

Les modèles déterministes Eulériens ne s'intéressent plus à suivre une parcelle d'air en mouvement dans l'espace, ils simulent une multitude de parcelles d'air fixes sur un domaine géographique prédéfini. Le domaine est discrétisé en une multitude de cellules en trois dimensions, qui ensemble caractérisent le maillage. Chaque maille, ou cellule, peut être perçue comme une « boîte », où pour chacune d'entres elles sont définies les équations chimiques et physiques utilisées pour décrire l'évolution des concentrations des substances atmosphériques présentes. Par rapport aux modèles Lagrangiens, l'approche Eulérienne prend en compte les échanges de matière par advection et diffusion à travers les parois des mailles, les échanges avec la surface en font partie. Les modèles en trois dimensions (3D) permettent de prendre en compte l'ensemble des directions x, y et z pouvant avoir un impact dans la dispersion des espèces chimiques. Ces modèles calculent donc le devenir des concentrations au cours du temps et pour chaque « boîte ». Ils sont notamment appliqués à la prévision de la pollution photochimique et/ou particulaire. Ils constituent également des outils privilégiés pour l'étude de l'influence du changement climatique. C'est en ce sens que nous allons utiliser un modèle eulérien dans cette thèse et tenter de percevoir d'éventuelles modifications de la qualité de l'air en fonction de différentes situations de la variabilité atmosphérique, elles-mêmes obtenues par modélisation après application d'un forçage anthropique.
2.2. Dimension des modèles et domaine de modélisation

La modélisation à partir de modèles déterministes Eulériens peut s'effectuer en zéro dimension (0D), en une (1D), en deux (2D) ou encore en trois dimensions (3D) selon l'échelle spatiale souhaitée (figure 1.18).

Le modèle de boîtes, ou 0D, intègre uniquement la variable temps t, dont dépendent les variables météorologiques et chimiques. De tels modèles sont employés par exemple afin de tester leur sensibilité à différentes paramétrisations chimiques ou physiques.

Le modèle 1D (colonne) prend en compte la composante verticale de l'écoulement ; l'altitude z, en plus du temps intervient comme facteur déterminant les échanges verticaux dans l'atmosphère.



FIGURE 1.18 – Différentes dimensions de modèles déterministes Eulériens. 0D(t), 1D(t, z), 2D(t, y, z), 3D(t, x, y, z) // Cours de Nicolas Marchand, Université de Provence, LCP-IRA¹.

Dans le modèle 2D l'évolution des variables dépend du temps, de l'altitude et de l'extension transversale x (gradients longitudinaux) ou y (gradients latitudinaux).

Enfin, le modèle 3D permet d'assimiler l'ensemble des variables, t, x, y et z, le réalisme du modèle est alors augmenté par les dimensions spatiales.

Le recours à la modélisation sous-entend de définir un domaine géographique sur lequel on souhaite calculer les fluctuations d'espèces chimiques. Une grille (ou maillage) représentant la résolution horizontale est alors virtuellement apposée sur le domaine. Un ensemble d'équations mathématiques est ensuite résolu en chaque nœud de la grille. L'augmentation des capacités informatiques associées aux temps de calculs réduits rendent plus facile l'utilisation d'une résolution horizontale fine. Toutefois, plus le domaine est grand, plus la résolution est grossière. En effet, une modélisation à l'échelle globale avec une résolution fine n'est pas envisageable d'un point de vue informatique. C'est pourquoi il est possible de procéder à l'imbrication de domaines géographiques de résolutions différentes (terme nesting en anglais, **figure 1.19**) (Delmas et al., 2005).

¹ http://gsite.univ-provence.fr/gsite/Local/lcp-

ira/dir/Nicolas/Base% 20 de% 20 model is ation% 20 M1% 20 Charme% 20 N% 20 Marchand% 20 part 2. pdf.



FIGURE 1.19 – Configuration d'imbrication de domaines géographiques, représentation schématique.

En effet, l'imbrication implique de définir un premier domaine (le domaine mère) dans lequel est « imbriqué » un second domaine (le domaine fille). Le domaine mère a une résolution plus grossière, il fournit par interpolation les conditions initiales et aux limites calculées au domaine fille. Le mode nesting expliqué ici fait référence au mode dit one-way (mode aller) (Krol et al., 2005). Il existe toutefois le mode two-way qui consiste en un échange des informations (composantes du vent, taux d'humidité, température potentielle ou encore composition chimique) entre les deux domaines. Les conditions limites du domaine fille sont fournies par le domaine mère et les résultats du domaine fille sont transmis au domaine mère.

2.3. Transport des composés chimiques

Le déplacement des masses d'air détermine la dispersion dans l'espace des composés atmosphériques. Selon les régions, les flux d'air peuvent favoriser le transport de la pollution sur de longues distances. Citons l'exemple de l'Europe occidentale dominée par d'importants vents d'ouest susceptibles d'apporter avec eux les polluants d'origine nord-américaine (Lasry, 2006). Les précurseurs d'ozone (NOx, COV) sont transportés en fonction du déplacement des masses d'air. Puisque la formation d'ozone nécessite un certain temps, les concentrations les plus soutenues sont mesurées à plusieurs dizaines de kilomètres des lieux d'émission de ses précurseurs, c'est-àdire notamment à la périphérie des grandes agglomérations (Delmas et al., 2005). Enfin, la distribution des polluants dans l'atmosphère dépend, en plus de la répartition et des quantités d'émissions, des mouvements qui affectent les masses d'air. La circulation atmosphérique engendre des phénomènes dynamiques de turbulence, d'advection ou encore de convection favorisant la dispersion ou au contraire l'accumulation d'espèces chimiques. A la circulation de l'atmosphère se conjuguent les particularités topographiques et thermiques régionales, voire locales, qui participent à la dispersion des polluants, telles que les phénomènes de brise de mer, brise de terre, brise de montagne ou encore d'îlot de chaleur urbain.

Les masses d'air polluées par les composés chimiques, qu'ils soient primaires ou secondaires, sont soumises à l'influence de la circulation atmosphérique. C'est pourquoi un modèle de pollution doit être « forcé » par la météorologie, c'est-à-dire qu'il intègre les conditions météorologiques telles que l'ensoleillement, la température ou l'humidité. Utiliser un tel modèle nécessite de fixer les conditions temporelles et spatiales initiales destinées à représenter l'état atmosphérique, il dispose alors en tant que données d'entrées des champs météorologiques.

2.4. Processus physico-chimiques

La pollution atmosphérique dépend fortement des conditions météorologiques (Giorgi et Meleux, 2007 par exemple). La définition du terme the chemical weather (Lawrence et al., 2005) souligne le rôle du temps qu'il fait sur la composition chimique de l'atmosphère. Mais le temps qu'il fait n'est pas le seul facteur déterminant de la qualité de l'air. Les émissions et leur composition chimique sont un paramètre majeur intervenant dans l'amplitude du phénomène de pollution par le biais des mécanismes physico-chimiques. C'est l'aspect chimique du modèle de pollution qui est ici évoqué. Ce dernier calcule les variations dans le temps et l'espace des concentrations de polluant en résolvant les réactions chimiques et physiques de l'atmosphère, retranscrites sous forme d'équations mathématiques (1) (Delmas et al., 2005). Cette équation de la diffusion atmosphérique traduit de façon mathématique les processus physiques et chimiques de l'atmosphère qui interviennent sur les concentrations de polluant. Nous avons les processus d'advection, de diffusion turbulente, des réactions chimiques, des dépôts secs et les sources. En d'autres termes la localisation d'espèces chimiques ainsi que leur durée de vie dépendent donc d'une série d'éléments tels que la répartition et les quantités des émissions, les phénomènes de transport ou les processus chimiques de production ou de perte (transformations chimiques et dépôts secs ou humides).

Au-delà de ces aspects, un modèle de chimie-transport intègre également les concentrations situées aux limites de la région désignée. Enfin, la spécification des concentrations initiales de la période de temps étudiée complète l'ensemble des données d'entrée.

$$\frac{\partial \overline{C_{i}}}{\partial t} + \frac{\partial \overline{uC_{i}}}{\partial x} + \frac{\partial \overline{vC_{i}}}{\partial y} + \frac{\partial \overline{wC_{i}}}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K_{H} \frac{\partial \overline{C_{i}}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{H} \frac{\partial \overline{C_{i}}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{V} \frac{\partial \overline{C_{i}}}{\partial z} \right)$$

$$\frac{\text{diffusion turbulente}}{\text{réactions chimiques}} + \frac{R_{i}(\overline{C_{1}}, ..., \overline{C_{N}}, T)}{\text{sources}} + \frac{S_{i}(x, y, z, t)}{\text{dépôts secs}} = Eq. (1)$$

avec :

 C_i : concentration moyenne de l'espèce i

T: température

u, v, w: composantes horizontale et verticale de la vitesse du vent

 $K_{\rm H}, K_{\rm V}$: coefficients vertical et horizontal de la viscosité turbulente

 R_i : taux net de production du polluant i par réactions chimiques

 S_i : taux d'émission du polluant i

 L_i : taux net de retrait de polluant i par des processus d'absorption de surface

Comme spécifié au début du paragraphe, la transformation chimique des polluants et leur dispersion sont soumises aux facteurs météorologiques. Au cours d'une journée, les variations de l'insolation induisent des différences de conditions dispersives. Les transformations chimiques dépendent elles-aussi de la température, de l'humidité, de la circulation, du rayonnement solaire et de la couverture et l'aspect des nuages (Giorgi et Meleux, 2007 ; Seinfeld et Pandis, 2006). Par exemple, les émissions, biogènes ou particulaires, peuvent être favorisées par certaines variables

météorologiques telles que la température ou les vents (érosion des sols, mise en suspension de pollen, ORAMIP, 2011¹). Des températures élevées favorisent une réactivité plus intense tandis que les précipitations sont responsables du lessivage de l'atmosphère par les phénomènes de dépôts humides. Il en va de même pour les polluants secondaires. Si l'on prend l'exemple de la pollution photochimique, l'ozone qui est un composé gazeux formé par combinaison du dioxygène (O_2) et de l'oxygène (O), a un temps de résidence dans les basses couches de l'atmosphère qui dépend non seulement des conditions atmosphériques, mais aussi de la vitesse des réactions chimiques, lesquelles dépendent aussi de paramètres météorologiques.

2.5. Distributions temporelles

Les émissions d'espèces polluantes et les concentrations associées dévoilent des fluctuations temporelles, fonctions des variations au sein des activités sources. La distribution temporelle de certains polluants s'inscrit au sein de cycles dont l'un d'eux est marqué par une forte saisonnalité (cycle annuel). Pour exemple, la saison intervient sur les quantités d'émissions de dioxyde d'azote à travers les conditions météorologiques. En raison du chauffage résidentiel prépondérant et de la moindre transformation du NO₂ en ozone, la saison hivernale est propice à l'apparition de niveaux de dioxyde d'azote maximaux (Airparif, 2011). Les concentrations maximales d'O₃ suivent également un cycle annuel et sont observées au cours de la période estivale lors d'un fort rayonnement solaire, une durée d'insolation importante, une stagnation de l'air et des températures élevées, ces deux derniers paramètres résultant de conditions anticycloniques (Airparif, 2011).

Le rôle tenu par les activités humaines socio-économiques sur les émissions de polluants peut être appréhendé à travers les cycles hebdomadaire et journalier. L'étude des émissions liées au trafic routier caractérise deux profils, les jours ouvrés d'une part, les fins de semaine ainsi que les jours fériés d'autre part. On distingue donc un cycle hebdomadaire. Les heures de la journée, quant à elles, déterminent un cycle journalier. Les concentrations horaires ou journalières de polluants primaires liées aux émissions sont plus faibles les samedis et dimanches par rapport aux autres jours de la semaine parallèlement à la baisse du trafic. En revanche, elles sont plus élevées le matin et en soirée lors d'intenses trafics routiers propices à des émissions importantes.

L'évolution des concentrations est donc déterminée par les conditions météorologiques et les émissions par le biais, respectivement, des phénomènes de transports et des processus physicochimiques de production et de perte de substances chimiques. La volonté d'estimer l'évolution temporelle et spatiale de diverses espèces chimiques, fait des modèles de pollution un outil capital de la prévision de la qualité de l'air.

Le lien entre dynamique atmosphérique et dispersion des polluants est majeur, il intervient sur les concentrations d'espèces chimiques et sur l'établissement d'épisodes de pollution, notamment à travers la présence de situations anticycloniques et dépressionnaires. Le paramètre « dynamique » s'avère important, voilà pourquoi dans le but d'étudier la répartition spatio-temporelle d'espèces chimiques suite à l'hypothèse d'une modification de la circulation atmosphérique, nous utilisons

¹ http://www.oramip.org/oramip/index.php

dans cette étude un modèle de chimie-transport capable de simuler les concentrations de polluants en incorporant simultanément les champs météorologiques, les données d'émissions et les mécanismes physico-chimiques.

Les impacts du changement climatique sur les polluants (en termes de quantités notamment) sont évoqués au cours de la partie 3, section 2, située dans ce chapitre.

[Partie 3]

Influence du changement climatique sur les variabilités atmosphériques et les polluants

Les activités humaines ont par leurs rejets additionnels de polluants primaires, perturbé le bilan radiatif de la terre avec pour conséquence le réchauffement de l'atmosphère. D'un côté, l'élévation des émissions de polluants dans l'atmosphère impliquent d'ores et déjà un renforcement de la photochimie (Meleux et al., 2007 ; Vautard et Hauglustaine, 2007). De l'autre, le changement climatique, de par la hausse du thermomètre mondial, a des impacts sur l'étendue des surfaces enneigées et gelées, sur les précipitations mais aussi sur les systèmes agricoles ou économiques (IPCC, 2007). En résumé, si l'on connait déjà le rôle capital du climat, de la topographie et des émissions sur la pollution d'une région, la multiplicité des interactions présentes au sein du système climatique laisse la perspective du changement climatique ouverte. Aussi, ce dernier pourrait avoir des conséquences sur la circulation de l'atmosphère, dont les effets modifieraient alors sensiblement ou faiblement le transport des panaches pollués.

A travers ce chapitre presque exclusivement dédié à l'hémisphère nord, nous présentons dans les paragraphes suivants une description non exhaustive de la recherche scientifique ayant trait à l'influence du changement climatique sur les structures de variabilité atmosphérique d'une part (section 1), et d'autre part, nous parlerons des travaux s'étant intéressés aux impacts du changement climatique en termes de modification des concentrations d'espèces chimiques atmosphériques (section 2). Enfin, la dernière section replace la thèse au sein de ces deux thématiques.

1. Structures de variabilité et changement climatique

1.1. Relations entre les schémas de variabilité et la météorologie

Les schémas de circulation atmosphérique large-échelle influencent le climat et le temps qu'il fait à l'échelle régionale. Un régime de temps illustre les fluctuations de l'atmosphère et les transitions entre les régimes sont interprétées comme le temps qu'il fait (Cassou, 2004). Le temps local est donc fortement en relation avec la variabilité intrasaisonnière de la circulation atmosphérique.

La circulation atmosphérique est un facteur déterminant la distribution de variables atmosphériques comme la température ou les précipitations (Wibig, 1999; Tveito et Ustrnul, 2003) et par extension le temps qu'il fait. Les relations entre les structures de variabilité et le temps sur l'Europe de l'ouest ont été documentées entre autres par Slonosky et Yiou (2001) et Hurrell (1995) notamment pour l'ONA, sur les températures de surface et les pluies respectivement.

Xoplaki et al. (2000) tentent de comprendre à leur tour l'influence des schémas de circulation atmosphérique basse fréquence sur les variations des précipitations sur la Grèce. Par exemple, Ghasemi et Khalili (2008) ont étudié les relations entre le schéma de variabilité NCP et la distribution des températures hivernales en Iran.

D'autres études se sont attachées à rapprocher les régimes de temps aux variables météorologiques, c'est le cas par exemple de Plaut et Simonnet (2001) qui ont travaillé sur l'influence des régimes sur le temps local (température et précipitation) sur la région NAE, ou Yiou et Nogaj (2004) et Cassou et al. (2005) qui ont relié l'occurrence des régimes de temps hivernaux aux évènements extrêmes (température et précipitation) et celle des régimes estivaux aux vagues de chaleur en Europe, respectivement. La liste est, bien entendu, non-exhaustive.

L'aspect liens entre les régimes de temps et la météorologie est évoqué car, même si l'objectif de ce travail n'est pas d'étudier les conséquences du forçage sur le temps qu'il fait, cela montre l'influence que les régimes de temps ont sur la qualité de l'air. En effet, le temps local est un facteur déterminant la qualité de l'air. Dans le manuscrit nous voulons étudier l'influence du changement climatique sur les régimes de temps, non pas à travers les variables atmosphériques mais à travers les caractéristiques temporelles des régimes (persistance et occurrence). En effet, le forçage radiatif anthropique constitue un type de forçage externe à la circulation de l'atmosphère. Il est alors légitime de se demander s'il peut influencer les propriétés des régimes de temps et, par extension, avoir des conséquences sur la qualité de l'air.

1.2. Résultats d'études

La disponibilité de simulations climatiques futures contraintes par scénarios d'émissions permet d'étudier les éventuelles modifications de la variabilité de la circulation atmosphérique. Ainsi plusieurs publications sont consacrées à l'analyse du *signal* du changement climatique à

travers les modes de variabilité basse-fréquence de la circulation atmosphérique ou des régimes de temps.

Indice de l'Oscillation Nord Atlantique

La tendance positive de l'indice ONA lors de la saison hivernale observée depuis 1970 (Cassou, 2004) semble se maintenir dans les simulations sous forçage anthropique. Stephenson et al. (2006) expliquent que sur un total de 15 modèles couplés 14 simulent une tendance positive de l'indice ONA lorsque les concentrations de CO_2 augmentent. Cette étude corrobore celle d'Osborn. (2004), laquelle indique que le modèle HadCM3 prévoit une tendance positive de l'indice ONA sous forçage de gaz à effet de serre. Cela se traduit par un creusement des basses pressions et un renforcement des hautes pressions. Pour l'ONA, cela se caractérise respectivement par la dépression d'Islande et l'anticyclone des Açores.

Modes de variabilité

L'étude assez complète de Solman et Le Treut (2006) propose d'examiner la façon dont les modes de variabilité (déterminés par ACP-Analyse en Composantes Principales) changeraient dans une simulation sous forçage de Gaz à Effet de Serre (GES). Au moyen d'un modèle couplé ils observent que le forçage induit des changements significatifs des fréquences d'occurrence des modes de variabilité basse fréquence, reflétés par exemple dans l'augmentation de la phase négative de l'oscillation Antarctique. Brandefelt (2006) a étudié la réponse des modes de variabilité (déterminés par ACP) de l'hémisphère nord à un forçage par augmentation de gaz à effet de serre à l'aide d'un modèle de circulation générale. En comparant les deux premières composantes principales du climat actuel à celles du climat sous forçage de GES, elle conclut que les structures spatiales des modes de variabilité dominants changent (oscillation Arctique et schéma Pacifique - Nord Amérique –PNA). L'étude de Kysely et Huth (2006) s'intéresse aux modifications de la circulation atmosphérique sur l'Europe détectées notamment sur les modes de variabilité déterminés par la méthode objective de l'analyse en composantes principales. Malheureusement, seule une période passée est étudiée (1958-1998), aucun scénario d'émission anthropique n'est pris en compte.

Régimes de temps

L'influence du changement climatique peut également être étudiée par l'approche des régimes de temps. En effet, l'une des hypothèses des conséquences du changement climatique sur les caractéristiques de la variabilité de l'atmosphère a été formulée par Palmer (1993, 1998, 1999), laquelle précise que l'impact du changement climatique peut être perçu comme une modification dans la population des régimes de temps et non comme l'apparition de nouveaux schémas de variabilité. Hsu et Zwiers (2001) ont montré qu'un forçage par augmentation des concentrations de gaz à effet de serre pouvait modifier les statistiques des caractéristiques temporelles des schémas de variabilité, comme les fréquences d'occurrence, sur l'océan nord Pacifique.

Certains auteurs cherchent donc à évaluer les conséquences d'un forçage anthropique sur les régimes de temps. Par exemple, Cassou (2004) trouve en réponse aux forçages anthropiques des scénarios B2 et A2 une hausse de l'occurrence du régime de temps ONA+. Ces conclusions sont étoffées par l'étude de Boé et al. (2009) qui notent une hausse de l'occurrence des régimes estivaux (déterminés par ACP+k-means) ONA+ et dorsale Atlantique et une baisse de l'occurrence des régimes ONA- et dépression Atlantique pour la fin du 21^{ème} siècle sur l'Europe en réponse au forçage anthropique induit par le scénario d'émission A1B. L'augmentation de l'apparition des régimes ONA+ et dorsale Atlantique a pour conséquence la survenue plus fréquente d'hivers doux et humides sur l'Europe du nord et d'épisodes de sécheresse sur l'Europe et l'Afrique méditerranéennes.

Cette étude est l'occasion de rapprocher le géopotentiel 500 hPa (représentatif de la circulation atmosphérique) et le forçage pour déterminer d'éventuels impacts sur la diffusion de la pollution atmosphérique car la dispersion est pilotée par la dynamique des flux atmosphériques. Alors si les structures de variabilité et leurs caractéristiques (schémas spatiaux, fréquences d'occurrence des types de circulations, répartition des basses ou hautes pressions) venaient à être modifiées à l'avenir, cela pourrait influer sur la diffusion des masses d'air polluées. C'est pourquoi nous nous sommes intéressées aux conséquences potentielles du changement climatique consécutivement sur la variabilité de la circulation et sur la diffusion des masses d'air polluées en région Nord - Pas de Calais.

Dans ce document nous déterminons et identifions les modes de variabilité et les régimes de temps sur l'Europe Nord Atlantique.

2. Evolutions des quantités de polluants atmosphériques

Plusieurs études existent au sujet du rôle du changement du climat sur la modification du cycle des polluants. Elles se basent essentiellement sur l'utilisation de modèles de qualité de l'air, la plupart sont menées afin de mettre en évidence davantage les relations entre la qualité de l'air et le changement climatique.

Leung et Gustafson (2005), à l'aide du modèle de climat régional MM5, ont cherché à voir les influences du changement climatique (scénario A1B) sur la qualité de l'air des Etats-Unis mais à travers quelques variables atmosphériques. Sachant que les conditions météorologiques interviennent sur la qualité de l'air, ils ont rapproché les modifications de variables atmosphériques aux impacts que cela peut induire en termes de pollution de l'air. Dans le cas des particules en suspension, ils s'intéressent aux phénomènes de précipitations et de transport. Ils caractérisent alors les fréquences des précipitations puisque les particules peuvent être éliminées par dépôts humides. Ils s'attardent également sur la caractérisation d'épisodes de stagnation de l'air et sur le calcul d'un coefficient de ventilation, qui respectivement favorisent une mauvaise qualité de l'air et des mécanismes de dilution et d'élimination de polluants localement.

Certaines études scientifiques s'intéressent à l'évolution des concentrations d'ozone. Par exemple, par la mise en place d'un schéma de modélisation alliant un modèle climatique régional et un modèle de chimie (RegCM et CHIMERE), Giorgi et Meleux (2007) ont étudié les effets régionaux du changement climatique sur les quantités d'ozone en Europe. Ils ont démontré que le réchauffement et la sécheresse consécutive pouvaient impliquer la hausse des concentrations d'ozone car des températures accrues favorisent les émissions biogéniques et augmentent les vitesses des réactions photochimiques. Ils indiquent également que la baisse des précipitations estivales, imputable au réchauffement, peut limiter l'élimination de polluants par dépôts humides. L'étude de Pal et al. (2004, RegCM forcé par HadAM3H et HadCM3) ainsi que celle de Forkel et Knoche (2007, MCCM forcé par ECHAM4) concluent à une augmentation des concentrations d'ozone en raison de conditions anticycloniques davantage favorables ce qui met en lumière une fois encore le rôle que joue la météorologie sur l'état de la qualité de l'air.

De façon similaire, Meleux et al. (2007) ont également utilisé un modèle de chimie-transport (CHIMERE) conduit par des champs météorologiques issus de simulation de changement climatique – menées par un modèle de climat régional (RegCM) – dans le but de détecter des modifications de concentrations d'ozone en été sur l'Europe sous forçages de gaz à effet de serre (scénarios A2 et B2). Par comparaison d'une période actuelle à une période future (fin du 21^{ème} siècle), ils indiquent que les concentrations d'ozone augmenteraient, augmentation induite en partie par le réchauffement et par la hausse de la disponibilité de NOx (oxydes d'azote) pour la production d'ozone. La composition atmosphérique risque également d'être affectée par le changement climatique à travers l'augmentation des émissions naturelles de précurseurs, comme les NOx ou les émissions biogènes volatiles organiques, tels que l'isoprène (Sanderson et al., 2003 ont utilisé le modèle HadCM3 forcé par HadAM3 couplé au modèle STOCHEM avec les niveaux de CO₂ atmosphériques correspondants au scénario IS92a¹, Athanassiadou et al., 2010 ont employé le modèle HadRM3H forcé par HadCM3 et HadAM3H couplé à un modèle urbain ADMS, en travaillant à partir du scénario d'émissions A2, voir aussi Vautard et Hauglustaine, 2007 pour les publications références) comme l'ont évoqué Hogrefe et al. (2004). Cette même publication nous informe aussi que les concentrations d'ozone devraient diminuer dans une gamme de 5 à 15 ppb^2 dans les régions équatoriales et tropicales en raison de la hausse de la teneur en vapeur d'eau. Les auteurs ont utilisé les modèles MM5 et GISS couplés au modèle de chimie CMAQ.

Toujours par le biais d'un modèle climatique régional couplé à un modèle de chimie-transport, Langner et al. (2005) ont étudié, outre celle de l'ozone en surface, l'évolution de l'oxyde d'azote en Europe dans un contexte de changement du climat, à l'aide d'un modèle de chimie-transportdépôt régional MATCH couplé au modèle de climat régional RCA1. Ils trouvent une baisse des dépôts en Europe centrale et de l'ouest en raison de la baisse des dépôts humides, ce qui est cohérent avec la diminution des précipitations.

Racherla et Adams (2006) ont étudié l'évolution des concentrations d'ozone et des particules fines face au changement climatique (scénario A2). Les auteurs ont pour cela employé 3 modèles : un

 $^{^1}$ La concentration effective en CO2 dans le scénario IS92
a augmente de 1 % par an après 1990. Il s'agit de concentrations équivalents en GES et d'a
érosols de sulfate de 1850 à 2100.

 $^{^{2}}$ ppb signifie *part per billion* (partie par milliard), il s'agit d'une façon d'exprimer les concentrations. Cela définit le nombre de molécules de gaz considéré par milliard de molécules d'air.

modèle de circulation générale GISS II couplé à un modèle d'aérosol et de chimie troposphérique. En comparant les simulations correspondantes au climat actuel et au climat futur, les auteurs étudient les concentrations dans la couche de surface (984 à 934 hPa) et précisent que dans la situation future certaines régions présentent une augmentation ou une diminution des concentrations de surface de particules fines (nitrate NO_3^- , sulfate SO_4^{2-} , ammonium NH_4^+ , les suies -black carbon, et les aérosols organiques primaires et secondaires) mais avec des taux faibles proches de zéro. Les auteurs notent une hausse des concentrations de sulfate sur l'ouest et le centre du bassin méditerranéen, le long de la côte est des Etats-Unis et une baisse sur l'Europe du nord. Les concentrations d'aérosols organiques primaires (AOP) augmenteraient sur la zone centrale de l'Amérique du sud ainsi que sur le nord de l'Afrique, l'Europe centrale et sur le pourtour et notamment l'ouest du bassin méditerranéen. En revanche, les concentrations d'AOP diminueraient sur l'Europe du nord. Ils ajoutent que pour la plupart des régions et des espèces étudiées, l'évolution de ces concentrations est cohérente avec la tendance globale, à savoir une baisse des valeurs en raison d'une durée de vie des espèces de particules fines étudiées réduite. D'après leur étude, la moyenne annuelle globale des précipitations augmentant, les taux de dépôts humides augmenteraient. En ce qui concerne l'Europe de l'ouest, les concentrations de sulfates et d'aérosols organiques primaires augmentent entre 0,1 et 0,4 µg/m³.

Les exemples de travaux cités ci-dessus examinent les effets du changement climatique sur les distributions quantitatives de polluants, comme l'ozone. Tout comme les études d'Athanassiadou et al. (2010) ou de Leung et Gustafson (2005), certains travaux partent du consensus que la météorologie affecte la qualité de l'air, à travers les émissions, le transport, la dispersion et les dépôts, pour observer l'influence d'un scénario climatique sur diverses données météorologiques et la qualité de l'air.

L'étude de Rind et al. (2001) change en cela qu'elle s'intéresse aux éventuels impacts du changement climatique sur le transport de l'ozone et d'aérosols. A l'aide d'un modèle de circulation générale (GISS), les auteurs annoncent que dans une atmosphère au taux de CO_2 doublé, la convection augmenterait ce qui entrainerait une meilleure ventilation dans les basses couches de l'atmosphère, réduisant ainsi les concentrations de traceurs dans la couche limite. Un traceur est définit comme un composé chimique aisément identifiable et peu réactif permettant notamment de suivre des déplacements de matière dans l'environnement. Ils apportent des éléments de réponse aux concentrations observées. Holzer et Boer (2001) rapportent que si le réchauffement du climat modifie à la baisse la vitesse des vents, alors nous assisterions à des concentrations de traceurs plus importantes aux voisinages des sources.

Dans la lignée de ces deux études, les travaux de Liao et al. (2006) ont porté sur le rôle du changement climatique sur les prédictions globales des futures concentrations d'ozone et d'aérosols troposphériques. En utilisant un modèle de circulation générale (GISS II) couplé à un modèle de chimie-aérosols, ils ont simulé le climat au terme de l'année 2100 tel qu'il serait d'après le scénario A2. Les auteurs se sont intéressés entres autres aux distributions globales de *black carbon*, d'aérosols organiques primaires et secondaires ainsi qu'aux sels de mer et aux aérosols de poussières minérales. Ils déterminent tout d'abord que le réchauffement des hautes latitudes des deux hémisphères et les changements des profils verticaux de température peuvent amener des modifications au sein de la circulation atmosphérique. D'après leur étude, les auteurs annoncent un affaiblissement des cellules de Hadley dans les deux hémisphères. En accord avec

Holzer et Boer (2001), les conséquences d'un climat plus chaud couplé à l'affaiblissement des cellules de Hadley, apporteraient des vents plus faibles et consécutivement une part moins importante d'aérosols organiques primaires (AOP) et de black carbon serait transportée loin des régions sources (Afrique, Asie du sud et Amérique du sud). Pour les concentrations d'AOP en surface, les résultats indiquent généralement une baisse sur les moyennes et hautes latitudes pour les deux hémisphères en raison de l'augmentation des précipitations. Les effets de changement climatique sur les concentrations d'AOP sur l'Amérique nord, l'Europe et l'est de la Chine dépendent des modifications de précipitations et du transport. Alors qu'un transport affaibli sous un climat plus chaud augmenterait les concentrations d'AOP près des sources, la hausse des précipitations annuelles sur ces régions apporterait des dépôts humides plus importants des AOP hydrophiles avant pour conséquence une augmentation des concentrations d'AOP sur et autour de l'Europe de l'ouest et une diminution sur les Etats-Unis et l'est de la Chine. En ce qui concerne l'influence du changement climatique sur les distributions d'aérosols organiques secondaires (AOS), les précipitations plus grandes apporteraient une hausse des dépôts humides d'AOS (en surface -959 mb- sur l'Amérique du sud, l'Afrique centrale, l'Europe et l'Asie du sudest) et de leurs précurseurs en phase gaz, ainsi qu'une part réduite d'AOP disponible pour l'absorption d'AOS. Les concentrations d'aérosols organiques secondaires seraient donc réduites. La hausse des émissions de monoterpène et d'autres composés organiques volatils d'ici 2100 vient contrecarrer la baisse des AOS, l'effet de ces deux influences est une augmentation modeste des AOS globales d'ici 2100. Les prévisions d'émissions de sels de mer indiquent une baisse de 6 %suite à l'affaiblissement des vents de surface aux latitudes 30-60°S, 5°S-40°N et autour de 60°N. Ces réductions d'émissions associées à l'augmentation des précipitations seraient responsables de la baisse de 19 % des charges de sels de mer globales d'ici l'année 2100. Les émissions de poussières minérales, sensibles à la baisse de la vitesse des vents de surface au-dessus des déserts du Sahara et d'Asie centrale -les deux sources majeures de poussières minérales- et à l'augmentation des précipitations sur le nord de l'Afrique, seraient réduites de 14 % entre 2000 et 2100.

Les études citées dans les paragraphes précédents sont intéressantes car elles confirment l'importance du rôle joué par le climat sur la pollution de l'air. Néanmoins, elles traitent des futures quantités de polluants en réponse aux modifications de variables météorologiques mais ne se sont pas intéressées aux éventuelles modifications des distributions spatiales d'espèces chimiques en raison, par exemple, de changements de la circulation atmosphérique. C'est pourquoi, dans ce manuscrit, nous avons choisi de considérer le deuxième point ; aussi nous avons cherché à évaluer l'influence du changement climatique sur la qualité de l'air à travers les principales configurations de la circulation atmosphérique.

3. Positionnement de la thèse

Les activités humaines, par les rejets d'espèces chimiques qu'elles émettent dans l'atmosphère, ont participé à modifier la composition chimique de l'atmosphère. En augmentant ainsi les quantités de gaz capables d'absorber le rayonnement solaire, l'Homme a intensifié le phénomène de l'effet de serre naturel, modifiant ainsi le bilan radiatif planétaire (Delmas et al., 2007). La conséquence majeure est le réchauffement de l'air. Ce postulat est un problème non sans conséquences, particulièrement en matière d'évènements extrêmes, de fonte des glaces ou de circulation océanique. La machine climatique étant un système complexe et chaotique, qui plus est en évolution, il est dès lors légitime de considérer la circulation de l'atmosphère comme étant influencée par le changement du climat et comme initiatrice d'éventuelles modifications des zones de diffusion préférentielles de polluants.

Les résultats des modèles de circulation générale convergent pour indiquer que le changement climatique du 21^{ème} siècle pourrait augmenter la fréquence de situations propices à la stabilité des masses d'air sur le nord des continents des moyennes latitudes. Les principaux facteurs participatifs sont l'affaiblissement de la circulation générale, le déplacement des trajectoires des perturbations dépressionnaires des latitudes tempérées et la diminution de l'occurrence de fronts froids, qui justement participent à disperser les masses d'air pour l'Amérique du Nord et l'Europe notamment (se référer à Jacob et Winner, 2009 pour plus de détails).

A notre connaissance, il n'existe pas d'étude s'étant intéressée à l'influence que les changements climatiques pourraient avoir consécutivement sur les fluctuations préférentielles de la circulation atmosphérique – modes de variabilité et régimes de temps – et sur la diffusion de polluants.

Le but de ce travail est donc d'évaluer l'influence d'un forçage par gaz à effet de serre sur les fluctuations prédominantes de la circulation de la région Nord Atlantique Europe d'une part, et d'autre part, d'évaluer le rôle d'éventuels changements de ces fluctuations – modes de variabilité et régimes de temps – sur la répartition spatio-temporelle des particules en suspension sur la région Nord - Pas de Calais.

 $\left(\begin{array}{c} \text{Chapitre 2} \end{array} \right)$

Données, outils et méthodes

Le projet de recherche dans lequel s'inscrit le travail de cette thèse a pour objectif d'associer qualité de l'air et changement climatique afin d'évaluer les conséquences d'une modification de la variabilité de la circulation atmosphérique aux échelles interannuelle et intrasaisonnière sur la répartition spatio-temporelle de polluants sur la région Nord - Pas de Calais. Nous présentons donc en **partie 1** les données et les méthodes employées pour définir la variabilité de la circulation. Dans la **partie 2**, une première section propose de caractériser la région d'étude vis-àvis des émissions de polluants et de la qualité de l'air mais aussi de ses spécificités, une deuxième section présente le système de modélisation mis en place pour simuler les champs météorologiques et les concentrations d'espèces chimiques sur la région. Enfin, la partie 2 est clôturée par un récapitulatif des séquences temporelles que nous désirons étudier.

[Partie 1] Variabilité basse fréquence de la circulation atmosphéri	que63
1. Données et modèles	63
2. Méthodes	66
[Partie 2] Qualité de l'air et simulation de la région	
Nord-Pas de Calais	71
1. Caractérisation de la région d'étude	71

[Partie 1]

Variabilité basse fréquence de la circulation atmosphérique

1. Données et modèles

1.1. Hauteurs de géopotentiel

La hauteur du géopotentiel 500 hPa correspond à l'altitude, à partir du niveau moyen des mers, à laquelle nous atteignons cette même valeur, soit 500 hPa. L'altitude s'exprime alors en mètres géopotentiels (mgp) et constitue la façon de mesurer la pression en altitude¹. De cette manière, une carte de hauteur du géopotentiel représente des niveaux de pression constante mais pour lesquels les altitudes varient. Si nous prenons l'exemple du niveau du géopotentiel 500 hPa, les altitudes correspondantes à cette pression fluctuent en fonction de la pression au niveau de la mer mais également en fonction de la température de la colonne d'air entre la surface et la pression 500 hPa. La hauteur géopotentielle dépend fortement de la température moyenne de l'air et donc varie fortement en fonction de la latitude et de la période temporelle (Craddock et Flood, 1969). L'altitude à laquelle on atteint 500 hPa est en moyenne de 5 560 mètres géopotentiels.

Le travail présenté ici porte sur la hauteur de géopotentiel 500 hPa car ce niveau a été jugé comme étant fiable pour figurer la circulation atmosphérique d'altitude sans présenter la grande variabilité des pressions de surface due aux conditions locales (Wallace et Gutzler, 1981).

Notre analyse est limitée à l'étude des pressions hivernales et concerne les mois de décembre, janvier et février principalement car l'atmosphère est plus dynamique lors des mois d'hiver, la variabilité est alors plus grande et les variations ont des amplitudes plus prononcées ; de ce fait l'ONA est particulièrement marquée (Hurrell et al., 2003 ; Kageyama et al., 1999 ; Kimoto et

 $^{^1}$ La hauteur du géopotentiel étant l'énergie potentielle à un niveau donné, lorsqu'une parcelle d'air se soulève, son énergie potentielle augmente.

Ghil, 1993). L'individualisation des modes de variabilité et des types de circulation associés utilisent les hauteurs de géopotentiel 500 hPa au pas de temps mensuel, tandis que l'étude des régimes de temps utilise les données au pas de temps journalier.

Les hauteurs de géopotentiel 500 hPa sont au pas de temps mensuel pour l'individualisation des modes de variabilité – et des types de circulation associés – et sont utilisées au pas de temps journalier pour l'étude des régimes de temps.

1.2. Forçages anthropiques

Les données de hauteurs de géopotentiel 500 hPa employées pour identifier les modes de variabilité basse fréquence et les régimes de temps proviennent de simulations de modèles climatiques (Met Office Hadley Centre). L'un des objectifs de la thèse étant d'évaluer l'influence du forçage anthropique sur les structures de variabilité de la circulation atmosphérique sur la période 2070-2099, les données sont issues de simulations prédictives générées par plusieurs modèles de circulation générale.

Afin de représenter les forçages anthropiques futurs basés sur des hypothèses d'évolution des sociétés (voir partie 1 du chapitre 1), plusieurs scénarios d'émissions ont été élaborés par l'IPCC. Les quatre scénarios que nous avons sélectionnés ont été mis en place dans le cadre du quatrième rapport d'évaluation. Précisons que notre travail était déjà trop engagé pour tout recommencer lorsque les scénarios du cinquième rapport d'évaluation furent disponibles. Les scénarios se distinguent par la concentration de CO_2 estimée d'ici 2100, cela nous permet d'évaluer les impacts de différents forçages. Ceux que nous avons utilisés sont les scénarios B1 (environ 550 ppm) < B2 (environ 600 ppm) < A1B (environ 700 ppm) < A2 (environ 840 ppm), les jeux de données issues des scénarios couvrent la période 2070-2099. Les différences à court terme entre les données issues de différents modèles représentent davantage les divergences de paramétrisation des modèles. A long terme en revanche les différences de données entre modèles représentent le signal du changement climatique détecté.

Afin de détecter d'éventuels changements des modes de variabilité et des régimes de temps suite aux forçages anthropiques, nous avons mené des comparaisons entre période actuelle (1960-1989) et période future (2070-2099). Les données de géopotentiel de la période actuelle sont issues de la simulation dénommée 20c3m, elle représente le climat du 20^{ème} siècle sans prendre en compte de scénarios de forçages anthropiques. Elle nous sert de point de comparaison.

1.3. Simulations du Hadley Centre

Le Modèle de Circulation Générale couplé Océan-Atmosphère (MCGOA) HadCM3 (UKMO-HadCM3, Hadley Centre for Climate Prediction and Research / Met Office, UK; Gordon et al., 2000 ; Collins et al., 2001 ; Johns et al., 2004) nous fournit les données¹ de la simulation 20c3m et des scénarios d'émissions futures B1, B2, A1B et A2 (voir **figure 1.6**, chapitre 1). Ce dernier est constitué d'une composante atmosphérique, le modèle HadAM3 et d'une composante océanique avec le modèle HadOM3 qui inclut un modèle de glace de mer. HadAM3 (Pope et al., 2000) est

¹ https://esg.llnl.gov:8443/home/publicHomePage.do

un modèle de résolution horizontale de $2,5^{\circ}$ en latitude et de $3,75^{\circ}$ en longitude, générant une grille globale de 96x73 points. Il comprend 19 niveaux verticaux. Quant au modèle HadOM3 (Gordon et al., 2000), il possède une résolution horizontale plus fine de $1,25^{\circ} \ge 1,25^{\circ}$ pour 20 niveaux verticaux. Ce modèle a été utilisé dans le cadre des analyses effectuées pour le troisième et quatrième rapport de l'IPCC.

Le modèle HadCM3 nous a permis d'identifier les modes de variabilité à l'échelle mensuelle pour les simulations 20c3m, B1, B2, A1B et A2. Les régimes de temps à l'échelle journalière ont été détectés à partir des simulations 20c3m et A2 pour ce qui concerne le modèle HadCM3. Toutefois nous avons également eu recours au modèle HadCM3Q pour étudier les régimes de temps sur le scénario d'émissions A1B. Il diffère de HadCM3 car il procède à l'ajustement des flux de manière à disposer de valeurs de températures de surface de la mer (SST) proches des valeurs climatologiques au cours d'une période de contrôle. Malgré cela, les SST varient selon leur variabilité naturelle et selon un forçage atmosphérique tel qu'une hausse du CO_2 . Enfin, HadCM3Q (Gordon et al., 2000) inclut le cycle atmosphérique du soufre. Nous avons également identifié les régimes de temps à partir du scénario d'émissions B2, simulation fournie par le modèle de circulation générale atmosphérique HadAM3P¹ du Hadley Centre.

1.4. Réanalyses NCEP/NCAR

Lors de l'évaluation de la reproductibilité du modèle HadCM3 sur la période 1960-1989, les hauteurs de géopotentiel 500 hPa du modèle sont comparées à celles d'une série de référence : ce deuxième jeu de données est composé de réanalyses NCEP/NCAR² (National Centers for Environmental Prediction / National Center for Atmospheric Research) disponibles à la résolution 2,5° x 2,5° (Kalnay et al., 1996). Les réanalyses sont le produit d'observations et de simulations. Une part des données de réanalyse est constituée d'un certain nombre d'observations de variables atmosphériques mesurées sur des stations tandis qu'une autre est composée d'informations issues d'un modèle de circulation générale lancé en mode assimilation de données, le CDAS-1 (Climate Data Assimilation System I) (Kalnay et al., 1996). Les données de réanalyses du niveau géopotentiel 500 hPa sont considérées comme de catégorie A, c'est-à-dire qu'elles sont fiables et de bonne qualité, l'influence des données d'observations étant plus forte que celle du modèle (Kalnay et al., 1996).

1.5. Domaine géographique

L'étude des structures de variabilité de la circulation atmosphérique concerne donc l'hémisphère nord et se focalise sur une aire géographique englobant le Nord Atlantique et l'Europe (NAE). Aussi, la représentation des configurations atmosphériques spatiales sera réalisée sur une fenêtre qui s'étend de 20° à 70° nord et de 60° ouest à 60° est. La région NAE étant le

¹ HadAM3P succède au modèle HadAM3H, il fait preuve d'une meilleure représentation dans l'intensité et la position des trajectoires des tempêtes dans l'Atlantique Nord et d'une meilleure représentation de l'humidité atmosphérique et des nuages (Anagnostopoulou et al., 2007; Pope et al., 2000).

² http://iridl.ldeo.columbia.edu

siège de l'oscillation nord Atlantique (ONA), l'un des principaux modes de variabilité de la circulation atmosphérique, le choix de cette fenêtre permet ainsi d'intégrer son influence.

L'étude du niveau géopotentiel 500 hPa nous a permis d'identifier les structures de la variabilité interannuelle et intrasaisonnière de la circulation atmosphérique. Néanmoins plusieurs études (par exemple Wallace et Gutzler, 1981; Rogers, 1990; Stone et al., 2001) identifient les schémas de variabilité basse fréquence en catégorisant les pressions au niveau de la mer.

2. Méthodes

Il existe plusieurs méthodes pour classer la circulation atmosphérique large-échelle. Il y a les méthodes subjectives et objectives (Tveito et Ustrnul, 2003). Les premières ont le principal inconvénient de faire intervenir l'interprétation personnelle des résultats. Il s'agit entre autre de méthodes dites « manuelles » permettant la classification de types de temps telle la classification de Lamb sur les Iles Britanniques (Lamb, 1950) ou les *Grosswetterlagen* de Hess et Brezowski (Hess et Brezowski, 1977). Cette dernière comprend cinq principaux types de temps que sont les circulations d'ouest, les circulations de sud, les circulations de nord-ouest et de nord, les circulations de nord-est et d'est et enfin les zones de basse ou haute pression sur l'Europe Centrale (Planchon et al., 2009).

Le développement de calculs assistés par ordinateur a permis de manipuler des jeux de données plus conséquents et d'automatiser les analyses, généralisant l'utilisation des méthodes dites objectives. Parmi celles-ci notons l'*Analyse en Composantes Principales* (ACP) qui offre la possibilité de classifier la circulation atmosphérique en *schémas de circulation* associés à un mode de variabilité (tel l'ONA).

La circulation atmosphérique peut être appréhendée par un certain nombre de structures de circulation représentatifs de sa variabilité. Pour commencer nous présentons la technique d'ACP qui est une technique d'analyse factorielle, suivie par une présentation de l'algorithme k-means.

2.1. Analyse en Composantes Principales

L'étude de la variabilité des jeux de données de hauteurs de géopotentiel 500 hPa par les ACP permet dans ce travail de détecter les modes de variabilité de la circulation atmosphérique de la région Nord Atlantique – Europe (20°N, 70°N; 60°W, 60°E). Ce type d'analyse est couramment employé en climatologie (Craddock et Flood, 1969; Wallace et Gutzler, 1981; Barnston et Livezey, 1987; Wibig, 1999; Kysely et Huth, 2006; Solman et Le Treut, 2006), souvent associé à la rotation des composantes (Richman, 1986; Huth, 1996 par exemple).

Pour identifier les principaux modes de variabilité atmosphérique basse fréquence du géopotentiel 500 hPa d'hiver sur l'Atlantique Nord – Europe, nous avons utilisé des matrices de données disposées en « mode S » : points de grille en variables et temps en observations. Cette technique offre la possibilité de regrouper les variables ayant la même variance sur un même facteur (ou

composante principale). L'ACP permet donc de synthétiser les données en réduisant le nombre de variables qui forment la matrice de données. L'ACP nous sert à hiérarchiser la variance totale de la matrice. Les composantes principales ainsi créées constituent des groupes de variables présentant des relations entre elles. Chaque composante obtenue synthétise les corrélations (ou saturations) entre un groupe de variables. Nous avons choisi d'appliquer la rotation Varimax normalisé (Richman, 1986) lors de l'extraction des facteurs car elle permet de conserver l'orthogonalité des facteurs en maximisant la variance de chaque variable sur un même facteur. Si l'on considère la matrice de données comme un nuage de points, la première composante principale résume une partie de la dispersion disponible, elle renseigne donc une part de la variance de la matrice initiale (Chadule, 1997). Une fois la première composante principale extraite (ou axe factoriel), il reste néanmoins une certaine dispersion autour de l'axe. La seconde composante va à son tour maximiser une part de la variance restante, non captée par la composante précédente et ainsi de suite. Les facteurs sont dits orthogonaux car indépendants. En résumé, l'ACP transforme la matrice de données initiales corrélées entre elles en composantes principales non corrélées les unes aux autres (Huth, 1996).

Chaque composante principale détectée est constituée de variables similaires, chacune contribue donc à la variance totale de la matrice, on parlera de variance expliquée par chaque composante principale, cette part de variance diminue au cours de l'ACP-R (Analyse en Composantes Principales avec Rotation). Le choix du nombre de facteurs à extraire est subjectif, cependant il existe plusieurs recommandations. Pour décider du nombre de facteurs à extraire pour la rotation nous nous sommes appuyées sur l'analyse des valeurs propres et des courbes de variance cumulée, méthode du « scree test » (voir chapitre 3). Au-delà d'un certain nombre de composantes principales le tracé montre généralement une dégénérescence de la variance expliquée (Huth, 1996). Le point où cette rupture est détectée aide au choix du nombre de facteurs à retenir. De plus, nous avons cartographié les composantes principales à différentes rotations et observé l'apparition ou l'absence des structures dans le but de détecter jusqu'à combien de facteurs ces dernières persistent. Nous avons ainsi veillé à une certaine cohérence des régionalisations.

Nous interprétons deux résultats issus des ACP-R. Les premiers concernent les variables et désignent les corrélations entre les variables initiales et les facteurs créés, elles s'expriment sous le terme de saturations. Celles-ci sont déterminées selon un coefficient de corrélation compris entre -1,00 et +1,00. Les valeurs signifient différentes corrélations : si la valeur est +1,00, elle représente une corrélation positive parfaite ; dans le cas contraire, une valeur -1,00 signifie une corrélation négative parfaite entre la variable et le facteur. La valeur 0,00 quant à elle représente une indépendance totale, soit une absence de corrélation (Von Storch et Zwiers, 1996). La régionalisation, et donc la représentation d'une configuration, repose justement sur les saturations; les structures de variabilité basse fréquence sont représentées en un ou plusieurs centres d'action ayant le même signe de saturation. La relation entre la variable et le facteur constituée par le coefficient de corrélation doit être vérifiée par un test de significativité. Cette dernière dépend de la taille de l'échantillon à partir duquel le coefficient à été calculé. Le seuil de significativité du test de Bravais-Pearson (Chadule, 1997) n'étant pas assez restrictif, la limite prise en compte pour cartographier les saturations est celle déterminée par le coefficient de corrélation 0,7 qui équivaut à environ 50 % de variance commune entre le facteur et la variable. Les seconds résultats exprimés par l'ACP-R concernent les observations, ils sont constitués par les scores factoriels. Les séries de scores donnent pour chaque facteur les chroniques temporelles

standardisées¹ (amplitudes du facteur) du paramètre étudié. Les scores indiquent également l'intensité que revêt chaque année au sein du facteur (Norrant, 2004).

2.2. Partitionnement en nuées dynamiques

Ensuite, nous avons entrepris de classifier (réduire) la circulation atmosphérique en schémas de circulation et plus précisément en régimes de temps par l'application d'une technique objective² basée sur un algorithme mathématique.

On retrouve dans la littérature, deux principales méthodes de clustering³ pour extraire les régimes de temps : algorithme hiérarchique et algorithme de partitionnement. Le premier classe l'ensemble donnée après donnée d'après un critère de ressemblance, la distance par exemple. Le second type, majoritairement représenté par l'algorithme k-means de Michelangeli et al. (1995), classe l'ensemble en partant d'un nombre déjà défini de groupes. Cette technique nonhiérarchique des k-means, dite des *nuées dynamiques*, est souvent associée à une ACP sans rotation, elle permet de classer les schémas de circulation atmosphérique.

Plusieurs auteurs ont utilisé le couplage des méthodes ACP et *k*-means pour la classification des schémas de circulation en régimes de temps (Solman et Menendez, 2003 ; Solman et Le Treut, 2006 ; Esteban et al., 2006 ; Corte-Real et al., 1998) et en particulier pour l'étude de la région Nord Atlantique (Plaut et Simonnet, 2001 ; Moron et Plaut, 2003 ; Yiou et Nogaj, 2004 ; Cassou et al., 2005 ; Cassou, 2008).

L'algorithme k-means (Michelangeli et al., 1995) couplé à une ACP est la méthodologie que nous avons utilisée au cours de cette étude. Etant largement utilisée, il nous est alors possible de comparer nos résultats à ceux des publications. L'algorithme k-means que nous avons utilisé nous a été fourni par le Centre de Recherches de Climatologie (UMR 6282 CNRS/Université de Bourgogne). L'algorithme a pour but de détecter les objets aux caractéristiques similaires et de les grouper en clusters afin d'obtenir une partition des objets.

Le paragraphe suivant retranscrit l'ensemble de la procédure emboîtée ACP $+\ k$ -means que nous avons utilisée.

L'algorithme de partitionnement est appliqué après une analyse en composantes principales qui, elle, a pour but de réduire la matrice de données initiale. Les composantes principales (CP) extraites lors de l'ACP sont utilisées dans le *k*-means comme matrice d'entrée.

En assumant un nombre prédéfini de k clusters, l'algorithme du k-means permet de partitionner un groupe d'observations en k clusters (groupes) de manière à minimiser l'hétérogénéité intraclasse et de maximiser l'hétérogénéité inter-classe, mesurées par une distance. L'algorithme du kmeans nécessite de fixer préalablement un nombre de clusters k, le nombre final souhaité de données représentatives de nos observations, et une mesure de distance entre les observations, dans notre cas la distance euclidienne. L'algorithme s'initialise en choisissant aléatoirement les centroïdes initiaux des k clusters. Les observations sont alors affectées au centroïde qui lui est le plus proche, k clusters sont ainsi constitués, c'est la première partition. Itérativement, les

 $^{^1}$ La standardisation consiste à donner le même poids à chaque variable dans le but de les analyser selon un

référentiel unique, indépendamment de l'unité de mesure originelle (Norrant, 2004 ; Ullmann et Moron, 2007).

 $^{^{2}}$ C'est-à-dire automatisée, assistée par ordinateur.

 $^{^3}$ Regroupement, partition en français, nous utiliserons par la suite le terme cluster à de nombreuses reprises pour évoquer un groupe de variables.

moyennes des observations de chaque cluster redéfinissent les k nouveaux centroïdes. Les observations sont redistribuées au sein des nouveaux clusters. L'algorithme s'arrête quand les centroïdes ne changent plus. Le critère de minimisation de la variance intra-classe permet d'obtenir des classes constituées d'éléments étant les plus similaires au centroïde auquel ils appartiennent.

[Partie 2]

Qualité de l'air et simulation de la région Nord – Pas de Calais

1. Caractérisation de la région d'étude

L'objectif de cette première section est de caractériser la région Nord - Pas de Calais au regard de ses émissions et des particularités physiques et météorologiques pouvant intervenir dans les mécanismes physico-chimiques gouvernant le développement d'épisodes de pollution par exemple.

1.1. Emissions de cinq polluants majeurs

La région Nord - Pas de Calais compte un peu plus de 4 millions d'habitants (INSEE, 2011 : Pages de profils, n°87, janvier 2011¹), soit 6,48 % de la population française. D'une petite superficie (2,28 % de la superficie de la France), la région Nord - Pas de Calais a par conséquent une densité élevée (324 hab/km²) par rapport à la densité nationale (114 hab/km²). Les activités anthropiques sont donc importantes et représentent alors de potentielles sources émettrices de polluants primaires. Voici les parts d'émissions de cinq polluants majeurs (**figure 2.1**) d'après l'inventaire réalisé par le CITEPA (Centre Interprofessionnel Technique d'Etudes de la Pollution Atmosphérique, CITEPA, 2011) et le cadastre par Atmo Nord - Pas de Calais² (mise à jour en 2005 ; Terrenoire, 2009). Ajoutons ici qu'ayant conscience des différences de méthodologie entre un inventaire et un cadastre spatialisé nous avons malgré tout souhaité comparer des résultats

 $^{^{1} \} http://www.insee.fr/fr/themes/document.asp?reg_id=19\&ref_id=17038$

 $^{^2}$ http://www.atmo-npdc.fr/home.htm. Fédération de surveillance de la qualité de l'air dans le Nord – Pas de Calais.

issus de chacune de ces deux sources, nous considérons cette comparaison davantage comme quantitative.



FIGURE 2.1 – Répartition des émissions (en %) de cinq polluants primaires pour la France (inventaire CITEPA 2011) en 2009 (à gauche) et pour la région Nord – Pas de Calais (cadastre Atmo Nord – Pas de Calais 2005) en 2005 (à droite).

Le monoxyde de carbone (CO) représente 56,3 % des émissions régionales contre 41,3 % à l'échelle nationale ; le méthane (CH₄) totalise 14,8 % pour la région contre 26,7 % pour la France ; les composés organiques volatils non méthaniques (COVNM) comptent pour 12 % des émissions régionales, plus que les émissions nationales (9 %) ; les oxydes d'azote (NOx) représentent 12,4 % des émissions à l'échelle de la région, soit 1 % d'écart avec la France (11,5 %) ; enfin les particules totales en suspension (TSP : particules dont le diamètre aérodynamique est inférieur à 10µm) décrivent 4 % des émissions régionales, les émissions nationales sont elles de 11,2 %. Pour ce dernier cas, nous pouvons toutefois supposer que la valeur est sous-estimée sachant que la région dépasse fréquemment les normes de qualité de l'air.

Toujours concernant les émissions de ces cinq polluants, il est possible de spécifier leurs sources émettrices par activités d'après l'inventaire CITEPA et le cadastre Atmo Nord - Pas de Calais (figures 2.2 à 2.6). Le découpage des secteurs d'activités est réalisé selon la classification SECTEN¹.

Pour les NOx (figure 2.2) le caractère industriel des émissions est marqué par la part émettrice de l'industrie manufacturière. La région présente une dominance de ce secteur (34 %) par rapport au reste de la France (13 %). La part de l'activité de transformation d'énergie est plus faible, avec une part régionale de 11 % et de 8 % pour la France. Enfin, la part du transport routier régional est également importante (37 % des émissions), néanmoins inférieure à la part nationale de 54 %.

¹ Le format SECTEN restitue les émissions selon un découpage par secteurs d'activités principaux et sous-secteurs correspondant aux entités économiques traditionnelles (transports, résidentiel/tertiaire, transformation d'énergie, industrie et agriculture/sylviculture).



FIGURE 2.2 – Répartition des émissions (en %) des NOx par secteurs d'activités pour la France (inventaire CITEPA 2011) en 2009 (à gauche) et pour la région Nord – Pas de Calais (cadastre Atmo Nord – Pas de Calais 2005) en 2005 (à droite).

La même remarque, mais inversée, peut être formulée pour les émissions de COVNM (**figure 2.3**). En effet nous notons une part plus importante de l'industrie manufacturière au niveau du territoire national (36 %)par rapport à la région Nord - Pas de Calais (4 %). Nous constatons également un écart non négligeable de près de 35 % entre les parts du secteur du transport routier régional (49 %) et national (14 %). D'après Atmo Nord - Pas de Calais, les émissions de COVNM en région sont principalement dues aux secteurs du transport routier et résidentiel et tertiaire.



FIGURE 2.3 – Répartition des émissions (en %) des COVNM par secteurs d'activités pour la France (inventaire CITEPA 2011) en 2009 (à gauche) et pour la région Nord – Pas de Calais (cadastre Atmo Nord – Pas de Calais 2005) en 2005 (à droite).

En revanche la situation est différente pour les secteurs sources d'émissions de monoxyde de carbone (CO) (**figure 2.4**). En effet ce ne sont plus les secteurs de l'industrie et du transport routier qui représentent les émissions de CO. Les différences par rapport aux sources nationales s'expliquent par le secteur de l'agriculture et de la sylviculture qui compte 25 % des émissions pour la région contre 9,3 % pour la France. Cela s'explique principalement par le traitement des déchets dont la méthode de l'écobuage entraîne d'importantes émissions de monoxyde de carbone (ATMO Nord - Pas de Calais, 2006).



FIGURE 2.4 – Répartition des émissions (en %) du CO par secteurs d'activités pour la France (inventaire CITEPA 2011) en 2009 (à gauche) et pour la région Nord – Pas de Calais (cadastre Atmo Nord – Pas de Calais 2005) en 2005 (à droite).

En région Nord - Pas de Calais le secteur d'activité classé résidentiel et tertiaire constitue le secteur majoritaire pour les émissions de TSP avec 30 % contre 9 % pour le reste du territoire (**figure 2.5**). Vient ensuite le secteur de l'agriculture et de la sylviculture avec 29 % même si ce dernier contribue de façon moins importante qu'à l'échelle nationale (51,5 %). Le domaine de la transformation d'énergie, même s'il est le quatrième contributeur de TSP régional, se révèle nettement plus important qu'au niveau de la France, avec respectivement 10 % et 1 %.



FIGURE 2.5 – Répartition des émissions (en %) des TSP par secteurs d'activités pour la France (inventaire CITEPA 2011) en 2009 (à gauche) et pour la région Nord – Pas de Calais (cadastre Atmo Nord – Pas de Calais 2005) en 2005 (à droite).

Enfin, les principaux secteurs d'activité émetteurs de méthane (CH₄) en région Nord - Pas de Calais (**figure 2.6**) sont l'agriculture et la sylviculture (70 %) ainsi que l'industrie manufacturière (15 %). Les parts d'émissions des différents secteurs sont similaires entre la France et la région.



FIGURE 2.6 – Répartition des émissions (en %) du CH_4 par secteurs d'activités pour la France (inventaire CITEPA 2011) en 2009 (à gauche) et pour la région Nord – Pas de Calais (cadastre Atmo Nord – Pas de Calais 2005) en 2005 (à droite).

1.2. Qualité de l'air en Nord – Pas de Calais

En région Nord - Pas de Calais, Lille est l'agglomération qui a le plus enregistré d'indices de qualité de l'air Atmo¹ de valeur 8 à 10 (mauvais à très mauvais, en rouge sur la figure) au cours de l'année 2010 (ATMO-NPdC, 2011b) (**figure 2.7**).



FIGURE 2.7 – Répartition des indices ATMO par agglomération en 2010 (très bon à bon : indices 1 à 4 ; moyen à médiocre : 5 à 7 ; mauvais à très mauvais : 8 à 10) // ATMO Nord – Pas de Calais, 2011b.

 $^{^{1}}$ L'indice Atmo est un indice journalier permettant de caractériser la qualité de l'air d'une agglomération. Il caractérise la qualité de l'air d'une agglomération de plus de 100 000 habitants sur une échelle de 1 à 10. Les mesures de stations urbaines et périurbaines de concentrations de différents polluants permettent de calculer chaque jour l'indice.

Concernant les normes réglementaires de particules PM_{10} , les valeurs limites (en moyenne journalière) ont été dépassées en 2010 à Lille ainsi que celles du dioxyde d'azote (en moyenne annuelle) (ATMO-NPdC, 2011b). Ainsi treize épisodes de pollution se sont produits sur la région au cours de l'année 2010 (**figure 2.8**), les espèces responsables sont les particules en suspension, l'ozone et le dioxyde d'azote (ATMO-NPdC, 2011b).



FIGURE 2.8 – Historique des alertes de pollution en 2010 // ATMO-NPdC, 2011a.

La pollution par l'ozone fut la source de quatre épisodes en été, deux lors du mois de juin et deux lors du mois de juillet, chacun d'eux a concerné l'ensemble de la région. Les concentrations de dioxyde d'azote ont déclenché un épisode de pollution en mars, uniquement sur la région de Lille. Enfin, huit épisodes sur treize sont dus aux particules en suspension. Ils ont tous concerné l'ensemble du territoire régional. Les mois hivernaux et/ou à température faible sont ceux lors desquels ces épisodes ont eu lieu : trois en janvier, deux en février, un en mars, un en avril et un en décembre, d'où notre choix de ces polluants pour notre étude. Prenons l'exemple de deux épisodes de pollution imputables aux particules en suspension (PS) qui se sont déroulés en mars/avril 2007 sur la région Nord - Pas de Calais (ATMO-NPdC, 2007a, 2007b). Les stations de mesures automatiques ont relevé des niveaux élevés de PS. Le premier épisode a débuté le 13 mars et s'est terminé le 16, soit quatre journées consécutives ; le second, du 25 mars au 3 avril, a eu lieu sur dix jours consécutifs. Des conditions météorologiques favorables à l'accumulation des polluants ont été observées : faibles vents, températures supérieures aux normales saisonnières, absence de pluies depuis début mars et des inversions de température basses¹. Les sources d'émissions de particules naturelles et anthropiques sont diverses et participent à la dégradation de la qualité de l'air. Il s'agit des chantiers de travaux publics, des pots d'échappement des véhicules, des unités de chauffage individuel et collectif, des usines, de l'agriculture mais aussi des particules naturelles issues de l'érosion (sables) ou des végétaux (pollen). L'épisode de pollution ayant durant dix jours consécutifs du 25 mars au 3 avril 2007 s'explique d'après la fédération Atmo, par l'arrivée brutale de particules d'origine nord africaine conjuguée à des émissions issues des moyens de chauffage et à des conditions météorologiques défavorables à la dispersion des

 $^{^{1}}$ Une couche d'air plus chaude que celle située au niveau du sol fait effet de « couvercle » en empêchant les polluants de se disperser en altitude.

polluants (vents faibles, inversions de température matinales). L'ensemble de ces facteurs ont contribué à augmenter les concentrations de particules dans l'air.

1.3. Situations dynamiques spécifiques

Le département du Nord affiche une densité plus grande que celle du Pas de Calais, avec respectivement 447 et 219 habitants/km² (INSEE, 2011). La métropole Lilloise totalisait à elle seule 1 108 991 habitants en 2009¹. Les zones à forte densité urbaine impliquent un type de circulation particulier qui se développe au voisinage de ces régions. Le phénomène d'îlot de chaleur se caractérise par une élévation verticale des températures en milieu urbain par rapport aux régions rurales situées en périphérie. L'urbanisation implique la multiplication de matériaux susceptibles de stocker la chaleur et du chauffage urbain, le bilan thermique de surface est alors perturbé. L'amplitude thermique entre les deux zones est maximale la nuit et en hiver notamment du fait des activités anthropiques de chauffage. Un îlot de chaleur urbain est ainsi représenté comme un dôme de chaleur localisé (**figure 2.9**) pouvant favoriser l'accumulation des masses d'air polluées sur la ville. Yacine Charabi (Charabi, 2001) indique que l'îlot de chaleur urbain de la métropole lilloise peut dépasser 4°C par nuit claire et calme. Il précise également que ce phénomène est tripolaire car présent autour des agglomérations de Lille, Roubaix et Tourcoing et qu'il est « lié au beau temps, il s'estompe ou disparaît quand la vitesse du vent augmente et que le ciel se couvre ».



FIGURE 2.9 – *Représentation schématique du phénomène de l'îlot thermique urbain* // Ressources Naturelles du Canada, www.rncan.gc.ca.

La région Nord - Pas de Calais est également une région littorale, géographiquement bordée par la mer du Nord et la Manche sur 140 kilomètres. Cette situation géographique entraine un autre

¹ http://www.insee.fr/fr/regions/nord-pas-de-

 $calais/default.asp?page=themes/tableau_de_bord/TB02lmcu.htm\#population$

type de circulation spécifique caractérisé par les phénomènes de brises de mer et brises de terre (figure 2.10).



FIGURE 2.10 – Représentation schématique des phénomènes de brise de mer (haut) et brise de terre (bas).

La terre a une inertie thermique plus grande que les surfaces océaniques, elle se réchauffe donc plus vite que la mer. Ceci engendre un gradient de température horizontal journalier, lequel favorise la mise en place d'un flux d'air de la mer vers la terre en surface au cours de la journée, c'est la brise de mer. L'air étant plus chaud au-dessus du continent, l'air s'élève, est déplacé, se refroidit et suit enfin un mouvement descendant au-dessus de l'eau. En revanche, la brise de terre intervient après le coucher du soleil. La terre se refroidit plus rapidement que la mer, l'écart thermique entre les deux zones est alors inversé. Se met en place progressivement un courant d'air de la côte vers la mer. Cette particularité physique régionale peut intervenir dans les phénomènes de transport des masses d'air polluées. L'étude de Talbot et al. (2007) permet d'illustrer ce lien de cause à effet. Ils ont caractérisé le rôle de la brise de mer sur l'accumulation de SO_2 au niveau des côtes Dunkerquoises.

2. Système de modélisation

L'architecture générale du système de modélisation prenant en compte un Modèle régional de Chimie Transport (MCT) paramétré par des champs issus d'un modèle de climat régional, a pour but d'examiner l'effet du changement climatique sur la qualité de l'air (par exemple, Dawson et al., 2008).

Des scénarios d'émissions futures de gaz à effet de serre entrainent des simulations globales de changement climatique à l'aide d'un modèle de circulation générale couplé. Des données météorologiques issues de ces simulations sont alors fournies comme données d'entrée au Modèle de Climat Régional. L'avantage de cette technique de désagrégation d'échelle est de travailler sur la région d'intérêt à une résolution plus fine (Jacob et Winner, 2009), de l'ordre de quelques dizaines de kilomètres. Le modèle de climat régional, à son tour, 'transmet' les informations météorologiques nécessaires au modèle de chimie-transport afin de permettre la simulation de la dispersion (champs de vent) et la réactivité des polluants (température, ensoleillement, humidité ...). La composition initiale de l'air est quant à elle simulée à l'aide d'un modèle d'émissions et de conditions limites.

Dans cette étude nous choisissons de travailler sur la base de ce système de modélisation.

2.1. Situations météorologiques : WRF

Déterminer par simulations les concentrations d'espèces chimiques dans l'atmosphère nécessite l'emploi d'un modèle de chimie-transport. Ce dernier ayant besoin pour cela d'informations météorologiques disponibles pour chaque maille. La première étape du processus de modélisation de concentrations de polluants passe donc par le calcul de variables météorologiques. Dans cette optique nous utilisons le système numérique de prévision WRF. Le modèle non hydrostatique Weather Research and Forecasting / Advanced Research (WRF/ARW, dénommé WRF par la suite) est développé principalement par les National Centers for Environmental Prediction (NCEP) et le National Center for Atmospheric Research (NCAR). WRF est couramment employé à des fins de recherches atmosphériques mais aussi pour générer des prévisions météorologiques en temps réel. Dans le cadre de ce manuscrit, WRF est utilisé en tant que modèle de climat régional pour fournir au modèle de chimie-transport les données météorologiques dont il a besoin.

WRF dispose d'un système de pré-traitement, WPS, lequel permet de choisir une zone géographique sur laquelle on place une grille (dimension). WPS utilise également l'information orographique (élévation) et l'occupation des sols (information sur le terrain) pour calculer les données météorologiques.

La dernière étape effectuée par WPS est l'interpolation de données météorologiques d'entrée sur la grille WRF. En effet, pour générer des simulations climatiques, WRF a lui-même besoin au préalable de variables météorologiques. Ces données peuvent être représentées soit par des réanalyses soit par des données issues de simulations numériques. Dans notre cas, nous choisissons les deux options. L'utilisation de données météorologiques simulées nous est utile afin de percevoir d'éventuelles modifications au regard des concentrations d'espèces chimiques entre le climat actuel et un climat futur soumis à forçage par gaz à effet de serre. Les données représentant le climat dit actuel (1960-1989) proviennent des réanalyses NCEP/NCAR. Les données météorologiques futures pour WRF proviennent du CNRM-CM3 (Centre National de

Recherches Météorologiques, Salas-Mélia et al., 2005). Le modèle climatique global couplé océanatmosphère, version 3 du CNRM (CNRM-CM3) est basé sur divers modèles. Tout d'abord sur un modèle de circulation générale atmosphérique ARPEGE-Climat version 3 (Déqué et al., 1999; Gibelin et Déqué, 2003). Il fournit notamment les variables de température, de divergence, de concentration d'ozone, d'humidité spécifique, de pression de surface et de vorticité sur 45 couches. Le modèle CNRM-CM3 se fonde aussi sur le modèle de circulation générale océanique OPA8.1, développé par le laboratoire de l'IPSL/LOCEAN à Paris et décrit par Madec et al. (1998). Il possède 31 niveaux verticaux. Le modèle de glace de mer GELATO2 compose également le CNRM-CM3. Celui-ci est développé au CNRM, sa version 2 est décrite par Salas-Mélia (2002). Un schéma dédié aux processus de surface liés aux fleuves, le schéma TRIP (Total Runoff Integrated Pathways), est intégré au sein du modèle. Il s'intéresse aux ruissellements qu'il convertit en débits des rivières et transporte jusqu'aux océans. TRIP est développé à l'Université de Tokyo (Oki et Sud, 1998; Chapelon et al., 2002). Enfin, le CNRM-CM3 inclut également une paramétrisation de la chimie homogène et hétérogène de la chimie de l'ozone (Cariolle et al., 1990). Une interpolation des différentes grilles des modèles aboutit à une résolution d'environ 2° en longitude et de 0.5° près de l'équateur à environ 2° dans les régions polaires en latitude. Ce modèle de circulation générale atmosphérique fournit les données météorologiques futures (2070-2099) telles qu'elles pourraient être sous forçage par gaz à effet de serre. Il s'agit des données des simulations du scénario A1B. Les réanalyses NCEP serviront de série de référence permettant de comparer les concentrations modélisées entre les deux périodes temporelles.

Les champs météorologiques d'entrée de WRF issues des simulations du CNRM qui nous ont été fournis ont une résolution horaire de 6 heures (excepté pour la pression de surface) et disposent de 10 niveaux de pression verticaux. Elles caractérisent les conditions latérales aux limites de la grille de WRF. Les variables désignées sont :

- la pression de surface *ps* (Pa),
- les composantes zonale et méridienne du vent *ua* et *va* (m.s⁻¹),
- l'humidité spécifique hus au sol, huss (sur 10 niveaux) (kg/kg⁻¹) et l'humidité relative hur (%),
- la température potentielle ta (K) au sol et tas (sur 10 niveaux),
- la pression au niveau de la mer *psl* (Pa),
- l'équivalent en eau de l'épaisseur de neige snw (kg.m²).

Pour lancer WRF, nous utilisons la méthode d'imbrication de domaines. Dans ce manuscrit, le calcul des informations météorologiques est effectué sur trois domaines imbriqués (figure 2.11). La projection utilisée pour définir les domaines dans WRF est la projection Lambert conforme. WRF calcule tout d'abord les champs météorologiques sur le même domaine que celui utilisé pour l'identification des modes de variabilité de la circulation atmosphérique. Ce grand domaine (n°1 sur la figure 2.11) qui s'étend de 60°W à 60°E et de 20°N à 70°N représente le domaine mère. Au sein de ce domaine mère est imbriqué un domaine fille englobant l'Europe de l'ouest et le proche Atlantique (n°2 sur la figure 2.11). Un dernier domaine (n°3 sur la figure 2.11) est définit pour limiter les calculs sur une fenêtre géographique prenant en compte la moitié nord de la France ainsi que le Royaume-Uni, la Belgique, le Luxembourg, les Pays-Bas et les régions extrêmes ouest de l'Allemagne. Le tableau 2.1 récapitule les caractéristiques spatiales des domaines utilisés au cours de cette thèse.


FIGURE 2.11 – Visualisation des trois domaines imbriqués utilisés lors des calculs de WRF.

TABLEAU 2.1 – Spécificités spatiales des trois domaines géographiques utilisés dans le modèle WRF.

Domaine	Résolution	Nombre de	Nombre de	
		mailles en « ${\bf x}$ »	mailles en « ${\bf y}$ »	
n°	km x km	ouest - est	sud - nord	
1	120x120	80	45	
2	30x30	125	113	
3	7,5x7,5	141	121	

Pour résumer, trois domaines de taille différente sont donc ici employés. L'estimation des concentrations de polluants ainsi que leur distribution spatiale sont réalisées sur un domaine centré sur la région Nord - Pas de Calais (n°3 sur la **figure 2.11**), à l'aide d'un modèle de chimie-transport (WRF-Chem). Pour intégrer la composante atmosphérique dans ce modèle, ce dernier a besoin des variables météorologiques qui agissent sur le domaine mais également de celles situées aux limites du domaine. En effet, les conditions aux limites interviennent aussi sur l'évolution des polluants. L'identification des structures de variabilité qui caractérisent les variations de la circulation de l'atmosphère, est menée sur un domaine plus large (n°1 sur la **figure 2.11**) que la région afin de prendre en compte les flux atmosphériques extérieurs.

2.2. Concentrations d'espèces chimiques : WRF-Chem

Nous employons le modèle de chimie-transport WRF-Chem dans le but de simuler les champs de concentrations des particules en suspension au-dessus de la région Nord - Pas de Calais (**figure 2.11**). Un tel modèle nécessite d'être complété par des données d'entrée : il y a les informations sur la situation météorologique pour chaque maille (fournies par WRF), les émissions (biogènes –

GEIA¹– et anthropiques –RETRO², EDGAR³, GOCART⁴ ou EMEP⁵) et les informations relatives au terrain (données de surface du relief et de l'occupation des sols –classification MODIS⁶). A partir de ces lots d'informations, WRF-Chem résout une série de processus physico-chimiques à partir de trois modules principaux (en hachuré sur la **figure 2.12**) :

- les émissions ainsi que les processus d'élimination comme les dépôts secs et humides constituent le module des sources et puits d'espèces chimiques,
- les mécanismes de transformation chimique et photochimique, tels que les processus de chimie homogène et hétérogène, forment le module des transformations chimiques,
- les renseignements topographiques et d'occupation des sols ainsi que météorologiques définissent le module du transport des espèces chimiques.

WRF-Chem modélise les interactions entre chacun des modules par le biais des processus physico-chimiques représentés dans le code de calcul du modèle, représenté par le solveur dynamique ARW.

Dans ce manuscrit nous nous sommes intéressées à l'étude des particules en suspension de type PM_{10} et $PM_{2,5}$ lors de la saison hivernale. En effet, le choix de la période hivernale a été réalisé suite à l'étude des structures de variabilité de la circulation atmosphérique, cette dernière étant plus dynamique lors de cette période, cela facilite l'identification des modes de variabilité. La pollution aux particules étant une préoccupation de santé publique en raison des risques sanitaires qu'elle implique, le choix d'étude des particules en suspension s'est avéré pertinent.

 $^{^1 \ \}rm http://www.geiacenter.org/$

² http://retro.enes.org/

³ http://edgar.jrc.ec.europa.eu/

⁴ http://acd-ext.gsfc.nasa.gov/People/Chin/gocartinfo.html

⁵ http://www.emep.int/

⁶ Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer. Données d'occupation du sol obtenues à partir d'images satellite haute résolution dès les années 2000.



FIGURE 2.12 – Représentation schématique des principaux modules de calcul du modèle WRF-Chem et les mécanismes physico-chimiques associés. Sont également représentées par des flèches les interactions entre eux.

L'objectif de cette étude est de percevoir les éventuelles modifications dans la distribution spatiotemporelle des particules du fait du changement climatique. C'est pourquoi les informations relatives aux émissions transmises au modèle de chimie-transport sont identiques pour les deux périodes étudiées, à savoir entre la période actuelle et future. Les émissions correspondant à l'année 2010 (EMEP) et 2007 (cadastre régional ATMO) sont ainsi utilisées pour les simulations actuelles et futures (se reporter au chapitre 4). Le choix de la période temporelle est limité par la disponibilité des données d'émissions globales. Les données d'émissions issues du modèle RETRO¹ (composés inorganiques, alcools, alcanes, aromatiques ...) et EDGAR² (gaz à effet de serre, gaz précurseurs d'ozone notamment, CH_4 , CO, CO_2 , N_2O , COVNM, NOx, hexafluorure de soufre SF_6 , SO_2 , soufre) sont disponibles jusque l'an 2000, tandis que le modèle GOCART³ offre des données d'aérosols (sulfates, *black carbon* BC, carbone organique OC et poussières) à partir de l'année 2000. Les émissions issues de l'inventaire européen EMEP⁴ (European Monitoring and Evaluation Programme) sont disponibles depuis 1980 et comprennent des espèces gazeuses et particulaires.

 $^{^1}$ RE analysis of the TROpospheric chemical composition, http://retro.enes.org/data_emissions.shtml

² Emissions Database for Global Atmospheric Research, http://edgar.jrc.ec.europa.eu/index.php

³ Goddard Chemistry Aerosol Radiation and Transport model,

http://disc.sci.gsfc.nasa.gov/gesNews/gocart data V006

⁴ EMEP : http://www.emep.int/

Afin, de mettre l'accent sur l'influence des modes de variabilité sur la répartition des particules dans le contexte du changement climatique, seules les données météorologiques pour la période future reflètent le forçage anthropique. De cette manière on s'intéresse au rôle que peut avoir un forçage anthropique sur le champ géopotentiel à travers d'éventuelles modifications de paramètres météorologiques. Il s'agit des variables listées plus haut en section 2.1 : pression de surface, composantes zonale et méridienne du vent, humidité spécifique et relative, température potentielle, pression au niveau de la mer et équivalent en eau de l'épaisseur de neige.

3. Séquences simulées

Le choix des séquences temporelles à modéliser par le système de modélisation WRF/WRF-Chem a été « induit » par l'étude des modes de variabilité du géopotentiel 500 hPa (chapitre 3). Afin de bénéficier de séquences lors desquelles les modes de variabilité sont les plus intenses, nous avons choisi les phases extrêmes des modes de variabilité détectés d'une part à partir des réanalyses NCEP et d'autre part à partir de la simulation du scénario A1B du CNRM-CM3 (tableau 2.2). Pour rappel, chaque mode de variabilité fluctue dans le temps, les pressions qui le constituent varient en termes d'intensité et d'amplitude, le flux d'air est ainsi plus ou moins intense. C'est pourquoi nous nous limitons aux pics d'intensité extrême des modes de variabilité avant les valeurs de variance expliquée les plus élevées (surlignés dans le tableau). Afin de comparer des modes communs entre période actuelle et période future, nous avons choisi les trois modes les plus intenses en décembre de la période actuelle (EA, ONA et NCP) que nous retrouvons dans la période future. Pour janvier au cours de la période actuelle nous avons sélectionné les modes ONA et EA-MM. Le choix du second mode, malgré le fait qu'il ne fasse pas parti des trois modes les plus intenses, est motivé par sa présence au cours de la période future, d'autant plus qu'il y est classé comme deuxième mode le plus intense. Enfin, en février nous nous sommes limitées à deux modes (ONA et EA), étant particulièrement intenses dans la période actuelle. Les pics sont au nombre de deux par mode, représentant chacun une phase de circulation extrême, phase positive et phase négative.

TABLEAU 2.2 – Spécification des années extrêmes positives et négatives de chaque mode de variabilité selon les mois et les simulations NCEP et A1B (CNRM-CM3) ainsi que leurs variances expliquées (en %).

NCEP								
Mode	Phase	Année	Mode	Phase	Année	Mode	Phase	Année
Décembre			Janvier			Février		
EA	+	1989	ONA	+	1984	ONA	+	1989
(20,94%)	—	1969	(23,74%)	_	1963	(19,79%)	_	1965
ONA	+	1974	EA-WR	+	1972	EA	+	1977
(17,90%)	—	1978	(14,93%)	—	1976	(17, 86%)	—	1969
NCP	+	1981	NCP	+	1984	NCP	+	1963
(15,27%)	—	1971	(13, 53%)	—	1964	(11,57%)	_	1985
SCAN	+	1975	EA-MM	+	1987	SCAN	+	1984
(12,97%)	—	1984	(11,93%)	—	1969	(10, 80%)	_	1973
Oscill.M.	+	1960	Afr.W.	+	1983	Arabie S.	+	1987
(8,67%)	—	1974	(8,80%)	—	1972	(13, 81%)	_	1972
Arabie S.	+	1969	EA	+	1979	Afr.W.	+	1985
(9,11%)	-	1964	(9,57%)	—	1971	(10,91%)	_	1986
A1B								
Mode	Phase							
	1 mase	Année	Mode	Phase	Année	Mode	Phase	Année
Décembre	1 Hase	Année	Mode Janvier	Phase	Année	Mode Février	Phase	Année
Décembre ONA	+	Année 2099	Mode Janvier NCP	Phase +	Année 2081	Mode Février ONA	Phase +	Année 2095
ONA (19,61%)	+ _	Année 2099 2094	Mode Janvier NCP (9,95%)	Phase +	Année 2081 2070	Mode Février ONA (15,68%)	Phase +	Année 2095 2088
Décembre ONA (19,61%) EA	+ + +	Année 2099 2094 2097	Mode Janvier NCP (9,95%) ONA	Phase + - + +	Année 2081 2070 2092	Mode Février ONA (15,68%) EA	Phase + - + +	Année 2095 2088 2079
Décembre ONA (19,61%) EA (20,16%)	+ - + -	Année 2099 2094 2097 2070	Mode Janvier NCP (9,95%) ONA (20,35%)	Phase + - + +	Année 2081 2070 2092 2087	Mode Février ONA (15,68%) EA (16,25%)	Phase + - + - + + +	Année 2095 2088 2079 2070
Décembre ONA (19,61%) EA (20,16%) EA-WR	+ - + - +	Année 2099 2094 2097 2070 2077	Mode Janvier NCP (9,95%) ONA (20,35%) Ouest R.	Phase + - + - + + + + + + + + + + + + + + +	Année 2081 2070 2092 2087 2093	Mode Février ONA (15,68%) EA (16,25%) NCP	Phase + - + - + + + + + + + + + + + + + + +	Année 2095 2088 2079 2070 2095
Décembre ONA (19,61%) EA (20,16%) EA-WR (10,70%)	+ + + + + +	Année 2099 2094 2097 2070 2077 2074	Mode Janvier NCP (9,95%) ONA (20,35%) Ouest R. (12,45%)	Phase + - + - + + - + - + - + - + - + - + -	Année 2081 2070 2092 2087 2093 2094	Mode Février ONA (15,68%) EA (16,25%) NCP (13,54%)	Phase + - + - + - + - + + + + + +	Année 2095 2088 2079 2070 2095 2083
Décembre ONA (19,61%) EA (20,16%) EA-WR (10,70%) NCP	+ + + + + + +	Année 2099 2094 2097 2070 2077 2074 2092	Mode Janvier NCP (9,95%) ONA (20,35%) Ouest R. (12,45%) EA	Phase + - + + - + +	Année 2081 2070 2092 2087 2093 2094 2079	Mode Février ONA (15,68%) EA (16,25%) NCP (13,54%) EA-WR	Phase + - + + - + +	Année 2095 2088 2079 2070 2095 2083 2092
Décembre ONA (19,61%) EA (20,16%) EA-WR (10,70%) NCP (14,04%)	+ + + + + + + -	Année 2099 2094 2097 2070 2077 2074 2092 2090	Mode Janvier NCP (9,95%) ONA (20,35%) Ouest R. (12,45%) EA (10,77%)	Phase + - + + - + + - + - + - + - + - + - +	Année 2081 2070 2092 2087 2093 2094 2079 2088	Mode Février ONA (15,68%) EA (16,25%) NCP (13,54%) EA-WR (13,24%)	Phase + - + - + - + - + - + + + + + + + +	Année 2095 2088 2079 2070 2095 2083 2092 2090
Décembre ONA (19,61%) EA (20,16%) EA-WR (10,70%) NCP (14,04%) Oscill.M.	+ - + + - + + - + + +	Année 2099 2094 2097 2070 2077 2074 2092 2090 2077	Mode Janvier NCP (9,95%) ONA (20,35%) Ouest R. (12,45%) EA (10,77%) Oscill.M.	Phase + - + - + - + - + - + + - + + - + + - + + - + + - + + - +	Année 2081 2070 2092 2087 2093 2094 2079 2088 2084	Mode Février ONA (15,68%) EA (16,25%) NCP (13,54%) EA-WR (13,24%) EA-MM	Phase + - + - + - + - + - + + - + + - + + - +	Année 2095 2088 2079 2070 2095 2083 2092 2090 2099
Décembre ONA (19,61%) EA (20,16%) EA-WR (10,70%) NCP (14,04%) Oscill.M. (7,93%)	+ + + + + + + + + + + -	Année 2099 2094 2097 2070 2077 2074 2092 2090 2077 2073	Mode Janvier NCP (9,95%) ONA (20,35%) Ouest R. (12,45%) EA (10,77%) Oscill.M. (15,79%)	Phase + - + - + - + - + - + - + - + + + + + + + + + + + +	Année 2081 2070 2092 2087 2093 2094 2079 2088 2084 2080	Mode Février ONA (15,68%) EA (16,25%) NCP (13,54%) EA-WR (13,24%) EA-MM (13,71%)	Phase + - + - + - + - + - + - + - + + + + + +	Année 2095 2088 2079 2070 2095 2083 2092 2090 2099 2073
Décembre ONA (19,61%) EA (20,16%) EA-WR (10,70%) NCP (14,04%) Oscill.M. (7,93%) EA-MM	+ - + - + - + + - + + - + + - + + + + +	Année 2099 2094 2097 2070 2077 2074 2092 2090 2077 2073 2082	Mode Janvier NCP (9,95%) ONA (20,35%) Ouest R. (12,45%) EA (10,77%) Oscill.M. (15,79%) EA-MM	Phase + - + - + - + - + - + - + - + + - + + - + + - + + - + + - + + - +	Année 2081 2070 2092 2087 2093 2094 2079 2088 2084 2084 2080 2095	Mode Février ONA (15,68%) EA (16,25%) NCP (13,54%) EA-WR (13,24%) EA-MM (13,71%) Oscill.M.	Phase + - + - + - + - + - + - + - + - + - +	Année 2095 2088 2079 2070 2095 2083 2092 2090 2099 2099 2073 2077

Parmi ces pics d'années extrêmes, seules des séquences de 5 jours consécutifs ou plus en général sont modélisées par le système de modélisation WRF/WRF-Chem, auxquels on ajoute x jours faisant office de période d'initialisation du modèle, ce qui amène à un total de 10 jours de modélisation par année extrême. Ces séquences représentent les circulations journalières au niveau du géopotentiel 500 hPa qui ressemblent le plus aux circulations moyennes mensuelles (**figure 2.13**). Chaque séquence se rapporte donc à la circulation moyenne mensuelle du pic d'année extrême correspondant chacune à un mode de variabilité différent en fonction du mois et de la simulation sélectionnés.



FIGURE 2.13 – Séquence de cinq circulations journalières consécutives du géopotentiel 500 hPa (b à f) la plus représentative de la circulation moyenne mensuelle de décembre 1974 (a) pour la simulation NCEP, le mode ONA et l'extrême positif des scores (valeur de 1,69918).

Les **figures 2.13.b à 2.13.f** montrent un exemple d'une séquence de circulations journalières représentatives de la circulation mensuelle extrême en fonction d'un mode de variabilité (oscillation Nord Atlantique), d'une intensité de scores spécifique (année extrême positive 1974), d'une simulation (réanalyses NCEP) et d'un mois hivernal (décembre).

L'objectif de l'analyse de qualité de l'air est de voir si une modification des modes de variabilités suite à un forçage anthropique est perceptible à travers l'étude des champs de concentrations de particules au-dessus de la région Nord - Pas de Calais. C'est pourquoi nous nous sommes appuyées sur les phases extrêmes mensuelles car elles permettent d'identifier les circulations dominantes associées aux modes de variabilité des hauteurs de géopotentiel 500 hPa. L'analyse de modélisation est menée par comparaison entre les périodes hivernales actuelles (1960-1989) et les périodes futures (2070-2099). Les conditions météorologiques futures sont celles obtenues par le scénario A1B (CNRM-CM3). Les conditions actuelles proviennent des réanalyses NCEP/NCAR¹.

¹ http://dss.ucar.edu/datasets/ds090.0/

Chapitre 3

Influence de forçages anthropiques sur les structures de variabilité atmosphérique Nous avons étudié l'évolution des pressions d'altitude car elles sont associées au climat et que de par les gradients de pression qu'elles induisent, elles engendrent des mouvements au sein de l'atmosphère et des transferts de flux de chaleur. Dans le contexte de changement climatique global nous nous intéressons aux mouvements de l'atmosphère, c'est-à-dire à sa dynamique.

Afin d'éviter une redondance trop marquée, nous rappelons brièvement que le climat fluctue autour d'un état moyen du système climatique. Ce dernier étant perturbé par le forçage anthropique, l'état moyen en vient à être modifié. Outre le fait que les propriétés d'inertie du système climatique font en sorte que cette modification se produira sur des périodes de temps au minimum pluri-décennales, il n'en reste pas moins que les mécanismes du système climatique répondent au processus de réajustement vers un nouvel état d'équilibre du système (Guemas, 2009). Un nouvel état d'équilibre implique un nouvel état moyen et donc, potentiellement, de nouvelles variabilités.

Se peut-il que la variabilité de la circulation atmosphérique en soit perturbée et plus particulièrement la variabilité d'ordre interannuel et intrasaisonnier ? En d'autres mots, quel est le devenir des modes de variabilité et des régimes de temps au cours du 21^{ème} siècle sous l'hypothèse de forçages anthropiques par augmentation des concentrations de gaz à effet de serre.

La zone géographique utilisée pour cette étude est la région Nord Atlantique – Europe. Les variabilités analysées sont limitées aux modes de variabilité et aux régimes de temps de la circulation atmosphérique.

L'objectif de ce chapitre est de percevoir le signal du changement climatique – forçage anthropique – sur les structures spatiales de variabilité atmosphérique.

Précisons toutefois que le terme *signal* n'est pas utilisé ici comme étant l'objet de recherche principal de la détection statistique des changements climatiques. Il fera référence dans ce manuscrit aux modifications *détectées* dans les résultats lors des comparaisons de situations climatiques actuelles aux conditions climatiques futures et forcées par les scénarios d'émissions.

[Partie 1]

Modes de variabilité basse fréquence et changement climatique

L'atmosphère se décrit par ses variations temporelles et par sa dynamique. La circulation atmosphérique a la particularité d'être la combinaison d'un certain nombre de configurations préférentielles, regroupées sous le terme de modes de variabilité. Ces derniers peuvent être considérés comme une structure atmosphérique qui est en fait une situation prédominante du flux de l'atmosphère.

Les modes de variabilité basse fréquence (variations d'amplitude de plusieurs années, voir chapitre 1, partie 1, section 4) qui en découlent ont un rôle important dans le climat global (Cassou et Guilyardi, 2007), à travers les systèmes de basses et hautes pressions (centres d'action) qui les constituent. Pour ne citer qu'un exemple, l'influence climatique de l'ONA touche une large région allant de l'Europe à l'Amérique du nord (Marshall et al., 2001). Le spectre du changement climatique soulève la question d'éventuelles perturbations de la variabilité de la circulation. Peut-elle subir des modifications ?

1. Empreintes spatiales dominantes

Les modes de variabilité sont présents à l'échelle interannuelle, il est donc possible de les extraire à partir de données moyennées mensuellement, ce que nous avons fait dans ce chapitre. Directement issus des ACP-R, les poids factoriels, une fois cartographiés, représentent la « trace » spatiale du mode de variabilité, sa structure. Une partie des modes de variabilité basse fréquence que nous avons extraits des ACP-R (ONA, EA-WR, EA, SCAN, NCP) étant évoquée en chapitre 1, partie 1, section 4, nous ne les présenterons pas à nouveau dans cette partie.

En revanche, puisqu'elles ne seront pas mentionnées dans les parties du chapitre 3 qui suivent, les configurations mer Noire, Méditerranée occidentale, Afrique de l'ouest et oscillation Méditerranéenne, que nous avons extraites des ACP-R et non référencées à notre connaissance dans la littérature (excepté oscillation Méditerranéenne), seront présentées ici en dépit de leur faible occurrence.

La structure Afrique de l'ouest (non montrée) identifiée une seule fois au cours du mois de février de la simulation actuelle s'apparente au schéma côtes ouest Afrique mais suivant un décalage vers le nord-nord-ouest. D'après nos connaissances, ces configurations ne sont pas référencées dans la littérature. Le schéma oscillation Méditerranéenne de décembre-B1 s'apparente à la configuration de décembre-NCEP, un centre de géopotentiel 500 hPa fortement marqué situé à l'extrémité orientale de la Méditerranée, voire même sur la mer Noire dans le cas du scénario B1 accompagné d'un second centre plus faible centré au-dessus du détroit de Gibraltar. Ce mode de variabilité a été découvert par Conté et al. (1989) comme étant une oscillation de pressions 500 hPa entre les deux extrémités du bassin Méditerranéen. Douguédroit (1998) et Maheras et al. (1998) parmi d'autres ont cherché à relier les variations de paramètres climatiques à l'oscillation. Enfin, la configuration de géopotentiels 500 hPa Méditerranée occidentale détectée au cours du mois de décembre de la simulation actuelle a un pôle centré juste à l'est de l'Espagne, au-dessus des Îles Baléares. Cette configuration n'a pas été identifiée au cours d'études antérieures mais elle peut s'apparenter au pôle occidental du schéma oscillation Méditerranéenne.

Les configurations ouest Russie, mer Caspienne, mer du Nord, est Atlantique-Méditerranée méridionale, Europe centrale (et Groenland), centre Atlantique, côtes ouest Afrique et Arabie Saoudite sont quant à elles présentées au cours des sections suivantes 2 et 3.

2. Evaluation du modèle climatique

Evaluer l'influence du changement climatique sur la variabilité de la circulation atmosphérique pour la fin du 21^{ème} siècle est un travail rendu possible grâce aux modèles de simulation du climat, toutefois, leur utilisation suppose d'évaluer préalablement leur reproductibilité. En effet, on attend que les modèles globaux de climat sachent reproduire correctement les distributions de variables climatiques de la même façon qu'ils doivent être capables de reproduire les configurations de variabilité large échelle de la circulation atmosphérique. L'objectif de cette partie consiste donc à évaluer la qualité du champ géopotentiel tel qu'il est simulé par le modèle global couplé HadCM3 du Hadley Centre par rapport à une série de référence, la série de réanalyses NCEP. L'étude est menée pour chaque mois de la saison hivernale (décembre à janvier) sur la période actuelle 1960-1989 et est consacrée à la comparaison des données brutes (avant ACP-R) et des modes de variabilité (après ACP-R) communs aux deux séries de données (modèle et réanalyses).

2.1. Comparaison des matrices de données brutes

Deux séries de données de géopotentiels 500 hPa, les réanalyses NCEP et la simulation 20c3m du modèle HadCM3 sont comparées sur la période 1960-1989 restreinte aux trois mois d'hiver au moyen du test t (test de Student) à 5 % d'erreur (Sneyers, 1990). Son but est de déterminer si les séries sont statistiquement différentes. De cette manière nous obtenons trois cartes de tests correspondant aux mois de décembre, janvier et février (figure 3.1), chaque point de grille a fait l'objet d'un test de Student. A cette marge d'erreur, la valeur absolue 1,96 correspond au seuil de significativité. Les tests supérieurs à la valeur absolue 1,96 sont considérés comme significativement différents, seuls les tests compris entre -1,96 et +1,96 révèlent une bonne reproductibilité du champ de pression 500 hPa par le modèle HadCM3 sur notre fenêtre d'étude.



FIGURE 3.1 – Tests de Student entre les réanalyses NCEP/NCAR et la simulation 20c3m pour la période 1960-1989. Le seuil de la valeur absolue de 1,96 définit les tests significativement différents représentés par les symboles en gras.

De nombreux tests témoignent de différences significatives entre les observations et la simulation 20c3m, notamment sur les grands centres d'action, comme l'anticyclone des Açores et de Sibérie. En décembre la zone géographique de l'anticyclone des Açores ainsi que la partie est de la fenêtre d'étude sont mal reproduites. En janvier la comparaison de la répartition spatiale des pressions atmosphériques est meilleure, 256 tests sur 1029 significativement différents contre 494 pour décembre, la partie orientale est réduite à l'extrême nord-est et la région de la dépression d'Islande pour sa part n'affiche plus de divergences. Enfin, le mois de février conserve la majorité des dissemblances sur l'ouest de la Russie et au sud de la pointe du Groenland (336 tests significativement différents). Globalement nous constatons une mauvaise similitude de la répartition spatiale du géopotentiel 500 hPa aux abords du dipôle anticyclone des Açores/dépression d'Islande, or la variabilité de cette structure est associée au mode de variabilité ONA.

Les récurrences géographiques indiquées précédemment sembleraient se rattacher aux phases de l'ONA. Puisque la variabilité de l'ONA influence le climat sur le secteur de l'Atlantique nord – Europe nous décidons de vérifier s'il existe un lien entre la reproductibilité du modèle et les phases de l'ONA. Cette étude ne se situe plus à l'échelle d'une période trentenaire mais à l'échelle de la décennie. Notre période d'étude est ainsi subdivisée en trois décennies. Afin de caractériser les phases ONA nous employons les indices ONA¹ regroupés par décennie. La **figure 3.2** représente les cartes des tests t des mois de janvier et février 1960-1969.



FIGURE 3.2 – Tests de Student entre les réanalyses NCEP/NCAR et la simulation 20c3m pour les mois de janvier et février sur la période 1960-1969. Les valeurs situées au-dessus des cartes correspondent aux moyennes des indices mensuels de l'ONA.

 $^{^{1}\} http://www.cgd.ucar.edu/cas/jhurrell/indices.data.html\#naostatmon$

Nous avons remarqué que les mois d'été (non montrés ici) sont systématiquement mal reproduits quel que soit le signe de l'indice ONA, les mois d'hiver supposent quant à eux une meilleure reproductibilité du modèle. Pour les mois de janvier et février uniquement, lorsque l'ONA est fortement négative (moyenne des indices mensuels inférieure à -1), les cartes des tests ttémoignent d'une bonne reproductibilité des réanalyses par le modèle HadCM3 (figure 3.2). De façon générale, nous notons une bonne reproductibilité du modèle puisque quelques zones seulement sont statistiquement différentes, les centres d'action dynamiques caractérisés par le dipôle Açores/Islande affichent pour leur part une bonne similitude entre les séries.

Comme nous l'avons constaté, le modèle HadCM3 reproduit correctement le champ géopotentiel 500 hPa par rapport aux réanalyses NCEP lorsque l'ONA est en phase négative, lors des mois de janvier et février 1960-1969, pour lesquels les centres d'action sont affaiblis. Pour les autres décennies, le champ géopotentiel entre les deux séries témoignent davantage d'une mauvaise reproductibilité. Après la comparaison des données brutes, la variabilité spatio-temporelle du champ de pression 500 hPa est à son tour évaluée via les composantes principales.

2.2. Comparaison des modes de variabilité

Dans cette étude six facteurs ont été dégagés des matrices mensuelles (décembre à février) pour les réanalyses NCEP et la simulation Hadley Centre 20c3m. La comparaison des schémas spatiaux concerne exclusivement les modes identiques qui ont été extraits dans chacune des séries (réanalyses et 20c3m). De cette façon, la **figure 3.3** montre quelques modes dominants de la variabilité basse fréquence agissant sur la fenêtre d'étude, seuls trois types de configurations sont affichés. Le **tableau 3.1** complète les résultats par les coefficients de corrélation entre les réanalyses et la simulation 20c3m dont les calculs se fondent sur les poids factoriels associés aux modes de variabilité.

L'oscillation nord Atlantique est extraite pour chacun des mois d'hiver ainsi que le mode est Atlantique. En revanche, il n'en va pas de même pour les autres modes de variabilité, au cours du mois de décembre un autre schéma est commun aux séries, deux schémas pour janvier et quatre pour le mois de février (**tableau 3.1**). Sur certaines configurations, les centres d'anomalies de pression sont légèrement décalés (non montré). Voici quelques exemples : la structure ONA simulée de décembre a ses deux pôles d'action décalés à l'ouest ; le dipôle simulé du mode EA de janvier est translaté de vingt degrés vers l'est par rapport aux réanalyses ou encore au cours du mois de février, le mode NCP simulé qui affiche un pôle sur la Mer Caspienne plus grand.

Les rotations Varimax ont été effectuées à six facteurs, mais il est important de souligner que la majorité des schémas spatiaux des divers modes de variabilité est également apparue aux rotations 5 à 7 facteurs. L'occurrence répétée des schémas nous a aidé dans le choix du nombre de facteurs à retenir pour les rotations.



FIGURE 3.3 – Trois structures spatiales correspondant aux composantes principales avec rotation. Décembre : EA ; janvier : ONA ; février : NCP. A gauche : réanalyses ; à droite : 20c3m. La variance expliquée par chacune des composantes en % est indiquée au-dessus des cartes.

TABLEAU 3.1 – Coefficients de corrélation (entre parenthèses) calculés pour les schémas spatiaux identiques entre les séries de poids factoriels (réanalyses et 20c3m) pour chacun des mois et pourcentages de variance expliquée (VE %) pour chaque configuration.

	Réanalyses	Configuration	20c3m
	VE %	Nom	VE %
	20,94	Est Atlantique (0,85)	16,28
	17,90	Oscillation Nord Atlantique (-0,74)	15,98
	15,27	Mer du Nord – Caspienne (-0,58)	8,27
		Méditerranée occidentale	13,86
décembre		Est Atlantique – Ouest Russie	11,69
		Est Atlantique – Médit.Méridionale	14,23
	12,97	Scandinavie	
	8,67	Oscillation Méditerranéenne	
	9,11	Arabie Saoudite	
	23,74	Oscillation Nord Atlantique (0,91)	18,75
	14,93	Est Atlantique – Ouest Russie $(0,52)$	$16,\!25$
	11,93	Est Atlantique – Médit. Méridionale $(0,79)$	10,71
iontrion	9,57	Est Atlantique $(0,84)$	12,63
Janvier		Côtes ouest Afrique	10,26
		Scandinavie	12,39
	13,53	Mer du Nord – Caspienne	
	8,80	Afrique de l'ouest	
	19,79	Oscillation Nord Atlantique (0,94)	19,13
	17,86	Est Atlantique (-0,91)	17,92
fórmion	11,57	Mer du Nord – Caspienne $(0,84)$	14,31
leviter	10,80	Scandinavie $(0,79)$	12,42
	13,81	Arabie Saoudite $(0,61)$	7,39
	10,91	Afrique de l'ouest $(0,66)$	10,71

Les caractéristiques spatiales des schémas apparaissent largement similaires entre série de réanalyses et série simulée malgré la présence de corrélations non parfaites, quoique très élevées. Les coefficients de corrélation de l'ONA, pour chacun des mois, sont supérieurs à 0,74, soit environ 54 % de variance commune. Des coefficients élevées apparaissent également pour le schéma est Atlantique avec un minimum à 0,84 (environ 70 % de variance commune) et un maximum à 0,90 (environ 83 % de variance commune).

En résumé, les modes de variabilité observés sont correctement reproduits par le modèle HadCM3, 9 configurations sur 13 communes aux deux séries montrent des corrélations supérieures à 0,74. Cependant nous pouvons noter une reproductibilité inférieure pour les modes Mer du Nord – Caspienne de décembre, EA-WR de janvier et Arabie Saoudite et Afrique de l'ouest de février.

Nous pouvons noter que nos résultats sont cohérents avec ceux de Collins et al. (2001) qui concluent que le modèle HadCM3 offre une bonne capacité de reproduction dans la variabilité spatiale des modes basse fréquence sur la région Nord Atlantique – Europe.

Intéressons-nous maintenant aux cartes de différences de corrélations entre modes de variabilité communs aux deux séries. Les modes concernés sont donc les 13 configurations notées dans le **tableau 3.1** et évoquées dans les paragraphes précédents. Nous pouvons remarquer, **figure 3.4**, que les écarts de corrélations les plus importants sont associés aux configurations communes ayant les coefficients de corrélation les plus faibles.



FIGURE 3.4 – Quelques écarts de corrélation associés aux configurations communes ayant les coefficients de corrélation les plus faibles.

Au cours des mois de décembre, le modèle HadCM3 semble avoir des difficultés à reproduire correctement le mode Mer du Nord – Caspienne, le coefficient de corrélation entre série 20c3m et réanalyses NCEP est de 0,58. Sur la **figure 3.4** nous pouvons d'ailleurs noter que le modèle et les réanalyses ne sont pas en accord, ils présentent au plus fort un écart de variance de l'ordre de 64 % (écart de corrélation de 0,8 en valeur absolue) sur l'Europe de l'est ainsi que sur l'Irak.

En janvier les écarts de corrélation les plus élevés concernent la configuration EA-WR. La simulation 20c3m du modèle HadCM3 et les réanalyses NCEP montrent un écart de variance de l'ordre de 36 % (différence de corrélation de 0,6) sur l'Atlantique central, l'Europe du nord et sur une bande allant de l'Arabie Saoudite à la Mer Caspienne.

Lors des mois de février 1960-1989, le modèle et les réanalyses renseignent tous deux les modes de variabilité Arabie Saoudite et Afrique de l'ouest. Les coefficients de corrélation entre les saturations de chacune des séries étant relativement faibles (moins de 43 % de variance

commune), nous retrouvons pour ces deux modes de variabilité les écarts de corrélations entre simulation et réanalyses les plus importants. Au plus fort les deux séries ont une différence de l'ordre de 0,6 (différence de 36 % de variance) pour le mode Arabie Saoudite sur l'ouest Atlantique et de l'ordre de 0,8 (différence de 64 % de variance) pour le mode Afrique de l'ouest sur la région Mer du Nord – Scandinavie.

Le modèle HadCM3 reproduit correctement la variabilité basse fréquence du champ géopotentiel 500 hPa sur la région Nord Atlantique – Europe, du point de vue des schémas spatiaux. Parmi les modes de variabilité communs entre simulation 20c3m et réanalyses NCEP, en décembre, la configuration NCP a un coefficient de corrélation faible (0,58 = environ 34 % de variance commune). Ce coefficient est lié aux différences de variance expliquée par chacune des deux séries, environ 15 % pour les réanalyses et environ 8 % pour la simulation 20c3m. En janvier, le mode EA-WR, qui est également extrait en décembre mais uniquement pour 20c3m, est commun aux deux séries et qui, malgré des valeurs de variance expliquée similaires (14,93 % et 16,25 % pour les réanalyses et la simulation 20c3m, respectivement), a un coefficient de corrélation r faible (0,52 = environ 27 % de variance commune). Ce mode n'est pas renseigné en février. Les modes de variabilité ONA et EA sont systématiquement renseignés, quel que soit le mois, pour lesquels sont associés des coefficients de corrélation élevés (compris entre 0,74 et 0,94) et des écarts de saturations faibles (de l'ordre de 0,4).

Pour conclure, les **figures 3.3**, **3.4** et le **tableau 3.1** indiquent que parmi les configurations communes aux deux séries, le modèle reproduit globalement bien les deux modes dominants la variabilité basse fréquence 500 hPa sur la région NAE, à savoir l'oscillation nord Atlantique et l'est Atlantique. Les autres modes communs, NCP en décembre, EA-WR en janvier et Arabie Saoudite et Afrique de l'ouest en février sont plus difficilement reproductibles par le modèle HadCM3. En effet, aux faibles coefficients de corrélation sont associés des différences de saturations (**figure 3.4**) allant de 0,6 à 0,8, auxquelles correspondent respectivement une différence de 36 et 64 % de variance.

De façon générale, le modèle HadCM3 reproduit correctement la variabilité basse fréquence du champ géopotentiel 500 hPa sur la région Nord Atlantique – Europe mais pas « parfaitement » car une partie des modes de variabilité renseignés par le modèle sur la période 1960-1989 ne sont pas renseignés par les réanalyses sur la même période, pour les mois de décembre et janvier.

Les travaux de Dominguez et al. (2009) consistent à évaluer la capacité de plusieurs modèles climatiques couplés à représenter le climat du sud-ouest des Etats-Unis. En dépit de la différence de domaine d'étude, le modèle HadCM3 est l'un des « meilleurs » pour appréhender les températures et les précipitations saisonnières. L'étude de Solman et Pessacg (2006) s'intéresse quant à elle aux états préférentiels de la circulation même si la région concernée est située au sud de l'Amérique du sud. Les auteurs ont mis en place une étude d'évaluation d'une série de 8 MCGOA vis-à-vis de leur capacité à représenter la variabilité du niveau géopotentiel 500 hPa. Les principaux modes de variabilité basse fréquence issus du modèle HadCM3 sont en assez bon accord avec ceux issus des réanalyses NCEP. Enfin, Collins et al. (2001) précisent que le modèle HadCM3 simule l'ONA d'après une structure spatiale en accord avec les observations lors de la période hivernale dans l'hémisphère nord.

La variabilité temporelle interannuelle des modes de variabilité basse fréquence, communs à la fois aux réanalyses et à la simulation 20c3m, a également été étudiée. Comme évoqué chapitre 2, partie 1, les scores factoriels calculés par les ACP-R révèlent l'évolution temporelle des modes. Les tendances linéaires ont donc été calculées à partir des scores pour chaque configuration de chacun des mois. Nous avons comparé le signe des tendances entre simulation 20c3m du modèle HadCM3 et réanalyses NCEP. Il s'avère que le modèle HadCM3 semble avoir des difficultés à reproduire les variations temporelles des schémas spatiaux dans leur variabilité interannuelle. En effet, seule la tendance de l'ONA (signe positif) est correctement reproduite par les deux séries de données au mois de janvier sur un total de trois configurations. En février, sur quatre schémas communs aux séries, deux tendances aux signes positifs sont correctement reproduites, il s'agit des configurations est Atlantique – Méditerranée méridionale et est Atlantique. Enfin au mois de février, l'ensemble des six configurations extraites sur les réanalyses sont reproduites par le modèle, mais c'est seulement pour deux d'entre elles que le modèle HadCM3 a correctement répliqué le signe des tendances, cela concerne le mode EA (tendance sans évolution) et le mode Arabie Saoudite (signe positif).

Au vu de la complexité des phénomènes impliqués et de l'échelle spatiale considérée, les simulations générées par les modèles de circulation générale supposent d'inévitables simplifications. Ces simplifications ainsi que la sensibilité des modèles peuvent expliquer la relative difficulté du modèle HadCM3 à reproduire correctement les variations temporelles des modes de variabilité basse fréquence de la région Nord Atlantique – Europe. En revanche le champ géopotentiel 500 hPa simulé par HadCM3 renseigne de façon satisfaisante les schémas spatiaux des modes de variabilité basse fréquence, c'est pourquoi nous avons décidé de poursuivre les analyses menées dans le cadre de cette étude à partir des simulations prédictives pour la fin du 21^{ème} siècle (2070-2099) générées par le modèle couplé HadCM3.

3. Changement des empreintes spatiales des modes de variabilité entre $20^{\text{ème}}$ et $21^{\text{ème}}$ siècles

Après avoir mené une étude sur la capacité du modèle HadCM3 à reproduire les configurations de la variabilité basse fréquence du champ de hauteur de géopotentiel à 500 hPa (Z500) sur la région NAE, nous nous intéressons aux éventuels changements dans la structure spatiale de ces configurations suite à un forçage anthropique. Cela nous amène donc à considérer les modes de variabilité dans la période du « passé récent » et ceux dans la période future. Etant donné que la simulation du Z500 du climat récent (1960-1989) nommée 20c3m par le GIEC et produite par le modèle HadCM3 reproduit correctement les modes de variabilité basse fréquence par rapport aux réanalyses NCEP/NCAR, nous procédons dans cette partie à la comparaison de la variabilité interannuelle du Z500 de la simulation 20c3m à celle des simulations futures soumises à un forçage anthropique. Nous rappelons que ces deux jeux de données sont produits par le modèle couplé HadCM3. Nous considérons la période 1960-1989 pour la simulation 20c3m et la période 2070-2099 pour les simulations futures soumises aux forçages anthropiques. Ces derniers sont représentés par les scénarios d'émissions futures B1, B2, A1B et A2, tous les quatre

étudiés dans cette partie. Pour rappel, le scénario d'émission B1 prévoit une concentration de CO_2 de 550 ppm à l'horizon 2100 ; B2, 600 ppm ; A1B, 700 ppm et A2, 850 ppm.

Le **tableau 3.2** répertorie l'ensemble des structures de variabilité basse fréquence et leur part de variance au sein de chacun des mois et des simulations (20^{ème} siècle et scénarios d'émissions futures) dans l'ordre d'apparition.

TABLEAU 3.2 – Composantes principales extraites par ACP-R à partir du champ de hauteur de géopotentiel à 500 hPa dans la simulation 20c3m et les simulations futures (B1, B2, A1B et A2) notées par ordre d'apparition. Les valeurs de variance expliquée (%) par chaque composante sont également notées.

	Décembre		Janvier		Février	
	Médit.Oc.	13,86	EA-WR	$16,\!25$	EA	17,92
20c3m	\mathbf{EA}	$16,\!28$	ONA	18,75	ONA	$19,\!13$
	EA-WR	$11,\!69$	Côtes WAf	$10,\!26$	NCP	$14,\!31$
	EA-M.M	$14,\!23$	SCAN	$12,\!39$	SCAN	$12,\!42$
	NCP	8,27	EA-M.M	10,71	Afrique W	10,71
	ONA	$15,\!98$	EA	$12,\!63$	Arabie S.	$7,\!39$
			т.			
	Décemb	ore	Janvie	r	Févrie	r
	ONA	20,96	EA-M.M	23,89	EA-M.M	19,38
	EA-WR	17,69	ONA	20,59	ONA DA IND	17,92
B1	Arabie S.	7,86	Centre A.	11,28	EA-WR	15,98
	EA	12,54	EA-WR	10,28	EA	18,88
	EA-M.M	9,66	Côtes WAf	8,61	Arabie S.	7,96
	Oscill. M.	13,21	SCAN	11,07	Côtes WAf	6,02
	Décemb	ore	Janvie	r	Février	
	ONA	20.52	EA	17 59	EA	18.56
B2	EA	17.18	ONA	15 48	ONA	23 63
	EA-WR	14.82	EA-WR	13.88	EA-MM	12.84
	Caspienne	10.39	Europe C.	13.02	Quest R.	13.19
	mer Nord	10.48	EA-M.M	12.27	mer Nord	11.32
	Côtes WAf	9,57	mer Nord	10,77		,=_
				*		
	Décemb	ore	Janvier		Février	
	ONA	$18,\!60$	ONA	$18,\!93$	Euro C+G	$24,\!05$
	EA-WR	$15,\!66$	EA	$19,\!06$	NCP	20,75
A1B	Côtes WAf	$11,\!98$	EA-WR	$11,\!27$	Centre A.	$17,\!04$
	NCP	$13,\!84$	Arabie S.	$10,\!10$	EA-WR	$10,\!55$
	Europe C.	$13,\!13$	NCP	$14,\!51$	Arabie S.	$7,\!37$
	EA-M.M	11,04	Europe C.	$11,\!47$	Côtes WAf	$5,\!28$
	Dácomh	vro	Innuior		Février	
ONA 16.20		$\frac{1}{Centre \Delta}$	<u>15 14</u>	$\frac{1}{\text{Centre } \Delta}$	15.08	
	EA_WR	15.40	Euro $C \perp C$	1770	NCP	15,00
	$E\Delta_MM$	13.89	EA-WR	19.45	EA-MM	15 39
A2	EA	14.57		12,40	$E_{\rm H} = 0$	10,02
		14,07		12,99	Euro C+G	10,01
	SUAN	9,29	EA-MM	12,76	EA-WR	9,97
	Europe C.	$13,\!45$	Côtes WAf	14,61	Côtes WAf	9,21

Dans le but d'identifier les principaux modes de variabilité de la circulation atmosphérique basse fréquence, l'analyse en composantes principales a été appliquée à chaque matrice de données mensuelles de hauteurs du géopotentiel 500 hPa. Dans la majorité des cas, les six premières composantes principales ont été retenues pour l'exécution de la rotation Varimax normalisé (Richman, 1986). Ce choix a été appuyé par l'analyse des valeurs propres et des courbes de variance cumulée (figure 3.5, tableau 3.3).



FIGURE 3.5 – Scree test résultants des ACP calculées sur le champ mensuel de hauteurs de géopotentiel 500 hPa appliqué à a) la simulation 20c3m-actuel, 1960-1989 ; b) au scénario B1 ; c) au scénario B2 ; d) au scénario A1B ; e) au scénario A2, tous les quatre sur la période 2070-2099.

et A2 (2070-2099). 20c3m B1B2A1B A2D CPVE VEC VE VEC VE VEC VE VEC VE VEC Е 1 24,26 24,26 26,85 26,8528,0528,0523,9023,9024,69 24,69 С $\mathbf{2}$ 19,22 43,47 19,35 46,19 16,9845,0321,11 45,0014.85 39,54 Е М 3 $12,\!63$ 56,1112,91 59,11 59,93 15,2760,28 14,66 54,2114,90В 49,88 65,98 9,84 68,95 11,84 71,77 12,5072,78 13,06 67,27 R 573,40 6,29 79,07 76,94 7,41 8,16 77,11 5,8577,62 9,68 Ε 6 6,91 80,31 82,97 5,1984,26 6,03 82,98 4,81 81,92 5,36 CP VE VEC VE VE VEC VE VEC VEC VE VEC J А 1 22,41 22,4128,69 28,69 23,2923,29 23,67 23,6729,46 29,46Ν 219,28 21,85 21,63 22,34 46,01 45,2941,69 50,5444,92 15,83 V 3 56,97 12,66 15,2863,20 13,4058,32 15,4561,46 13,36 58,65Ι 411,65 68,62 9,93 73,149,76 68,0810,9372,39 12,4271,07 Е 57,28 75,90 6,7379,87 8,55 76,63 7,54 79,93 9,67 80,74 R 6 80,99 5,85 6,39 83,02 85,33 5,1085,72 5,405,0085,75 CPVE VEC VE VEC VE VEC VE VEC VE VEC F

25,21

23,96

13,67

9,56

7,15

25,21

49,17

62,84

72,40

79,55

25,07

24,10

15,05

10,76

5,91

4,17

25,07

49,17

64,22

74,97

80,88

85,05

26,58

19,93

12,10

10,60

8,46

6,73

26,58

46,51

58,61

69,21

77,67

84,40

23,98

46,65

63, 48

74,95

81,71

86,14

Ε

V

R

Ι

E R 1

 $\mathbf{2}$

3

4

5

6

25,02

21,69

13,05

10,08

6,59

5,46

25,02

46,71

59,76

69,84

76,43

81,88

23,98

22,67

16,83

11,47

6,76

4,43

TABLEAU 3.3 – Variances expliquées (VE) et cumulées (en %) associées aux six premières composantes principales avec rotation Varimax normalisé des champs de hauteur géopotentielle 500 hPa mensuels (décembre, janvier, février) des simulations 20c3m (1960-1989), B1, B2, A1B et A2 (2070-2099).

Les six premiers facteurs expliquent environ 80 % de la variance du géopotentiel 500 hPa sur la région Nord Atlantique – Europe. Le gain de variance entre 5 et 6 facteurs plus important que le gain entre 6 et 7 facteurs, ainsi que la récurrence de la majorité des schémas spatiaux aux rotations 5 et 7 facteurs, ont participé au choix de 6 facteurs pour les rotations des ACP-R. De plus, le projet de recherche mené au cours de ce travail s'intéresse à l'influence du forçage anthropique par gaz à effet de serre sur les régimes de temps. Une des principales méthodes utilisée pour détecter les régimes de temps est l'algorithme des k-means (chapitre 2), elle sera utilisée plus loin dans le texte à cette fin (chapitre 3, partie 2). Cette technique combine ACP-R et algorithme k-means. Nous avons remarqué que plusieurs études qui ont mené une classification des régimes de temps par les techniques combinées ACP-R et k-means utilisent un seuil de variance expliquée élevé, de l'ordre de 85 %. Ces observations nous ont confortées dans le choix de 6 facteurs pour l'exécution des rotations Varianx normalisé.

Nous avons donc stoppé les rotations à six composantes pour l'ensemble des matrices de données excepté février-B2. En effet, dans ce cas particulier le phénomène de sur-rotation est apparu à six composantes synthétisant 83,50 % de variance. De ce fait, les cinq premières composantes,

totalisant 79,55 % de variance, ont été retenues pour la rotation de février-B2, ce qui explique l'absence de valeurs de la colonne B2 en février pour un sixième facteur. De plus, la sixième composante obtenue lors de la rotation Varimax à 6 facteurs ne présente aucune corrélation au facteur supérieure à 0,7. Or pour mener la régionalisation nous avons fixé comme limite de prise en compte les corrélations supérieures (inférieures) ou égales à 0,7 (-0,7) (en gras sur les figures 3.6 à 3.12, 3.14 à 3.15, 3.17 à 3.18, 3.20, 3.23, 3.25 et 3.28 à 3.29). Ce seuil signifie que la variable et le facteur ont environ 50 % de variance en commun.

3.1. Comparaison des modes communs aux 5 simulations

Certains modes de variabilité sont extraits et identifiés de façon récurrente quel que soit le mois ou le scénario. Dans l'optique de voir l'évolution des structures de variabilité de l'atmosphère entre période actuelle et période future sous forçage anthropique, le **tableau 3.4** reporte les modes de variabilité qu'il est possible de retrouver aussi bien sur la période actuelle 1960-1989 que sur la période future 2070-2099, laquelle est associée à différents forçages. Les paragraphes qui suivent présentent donc brièvement les modes de variabilité qui *demeurent* à la fin du 21^{ème} siècle.

TABLEAU 3.4 – Modes de variabilité communs aux cinq simulations (simulation actuelle 20c3m 1960-1989 avec forçage observé et quatre simulations futures 2070-2099 avec forçages anthropiques hypothétiques, B1, B2, A1B et A2) et variances expliquées (%) associées.

DECEMBRE	actuel- 20c3m	B1	B2	A1B	A2
ONA	15,98	20,96	20,52	18,60	16,39
EA-WR	11,69	$17,\!69$	14,82	15,66	15,40
EA	$16,\!28$	12,54	17,18	-	$14,\!57$
JANVIER	actuel- 20c3m	B1	B2	A1B	A2
EA	18,75	11,28	17,59	19,06	15,14
EA-WR	$16,\!25$	10,28	13,88	$11,\!27$	12,45
FEVRIER	actuel- 20c3m	B1	B2	A1B	A2
EA	17,92	18,88	18,56	17,04	15,98

Le mois de décembre partage donc trois configurations à l'ensemble des 5 simulations (ONA, EA-WR et EA excepté A1B), le mois de janvier en partage deux également (EA et EA-WR). Février montre une seule configuration similaire à toutes les simulations, il s'agit de la configuration EA. Dans cette partie du manuscrit, nous comparons le mode EA-WR dénommé tel quel, extrait au cours des mois de décembre et janvier pour toutes les simulations. Par contre, nous verrons par la

suite (section 3.2) que la composante 'est Atlantique' de sa dénomination n'a plus vraiment de raison d'être conservée.

3.1.1. Décembre

Les configurations ONA, EA-WR et EA ont été extraites et identifiées en décembre de la simulation 20c3m-actuel. Nous les retrouvons également sous forçage anthropique (figures 3.6 et 3.7). En effet, quel que soit le forçage, B1, B2, A1B ou A2, l'ONA, l'EA-WR et l'EA persisteraient à la fin du 21^{ème} siècle et seraient encore acteurs de la circulation atmosphérique sur la région Nord Atlantique – Europe (excepté lors du scénario A1B pour EA).

Oscillation Nord Atlantique.

Les configurations partagent des parts de variance expliquée similaires par rapport à celle de la période actuelle (15,98 %), le scénario A2 étant le plus similaire d'entres eux.



FIGURE 3.6 – Schémas spatiaux de l'ONA de décembre communs aux 5 simulations. La variance expliquée par chaque CP en % est indiquée en haut à droite de chaque schéma.

Nous notons toutefois des différences spatiales entre les schémas de variabilité. Elles se traduisent par des déplacements des centres d'action ou par une extension longitudinale des corrélations de pression. Par rapport à l'actuel, le centre d'action septentrional est déplacé à l'est pour les scénarios A1B et B1 (décalage d'environ 25°) sur ou aux alentours de l'Islande. Le centre d'action méridional de B1 et notamment d'A2 présentent, par rapport à la simulation 20c3m, une extension longitudinale des corrélations supérieures à 0,7 vers l'est. Nous pouvons voir sur la figure 3.6 que les pôles d'action de l'ONA en décembre pour la période actuelle sont plutôt spatialement limités, avec le pôle nord centré sur la pointe du Groenland. L'ONA détectée avec le scénario B2, malgré une différence d'environ 5 % de variance expliquée, présente de grandes similitudes avec la simulation 20c3m de par la localisation des centres d'action. L'ONA représentée pour les autres scénarios (B1, A1B et A2) montre des pôles d'anomalies de pression plus étirés en comparaison avec 20c3m. Ces observations sont cohérentes avec la position actuelle de l'ONA qui présente habituellement certaines variations d'amplitude spatiale (Hurrell, 1995).

L'étude de Dong et al. (2011) ne s'est pas intéressée à l'influence d'un forçage par gaz à effet de serre sur la variabilité interannuelle de l'ONA dans une période future mais explique que le décalage vers l'est des centres d'action de l'ONA remarqué au milieu des années 1970 s'expliquerait par l'augmentation des concentrations de gaz à effet de serre dans l'atmosphère.

Est Atlantique – Ouest Russie.

Les parts de variance expliquée des divers scénarios sont proches de la variance 20c3m malgré un écart de 6 % avec le scénario B1. Tout d'abord nous pouvons voir que seul le pôle ouest Russie est fortement marqué (corrélations supérieures en valeur absolue à 0,7) pour l'ensemble des cartes (**figure 3.7**). Sa situation géographique entre les simulations ne présente que peu de décalages, le pôle étant toujours compris entre 25°E et 50°N.

Contrairement aux autres scénarios, B1 qui reflète le taux de CO_2 estimé en 2100 le plus faible, montre un second pôle d'anomalies de pressions fortement corrélées sur l'Europe centrale. Il peut s'apparenter au pôle est Atlantique mais décalé (Barnston et Livezey, 1987). Enfin, les scénarios A1B, B2 et A2, ainsi que la simulation 20c3m ne présentent pas de pôle marqué (corrélations < 0,7) sur la zone de l'est Atlantique. Celui-ci est d'ailleurs situé autour de la Grande-Bretagne en fonction des différents forçages. Dans le futur, le mode de variabilité EA-WR continuerait donc d'affecter le climat (température et précipitation) de l'ouest Russie et d'Europe centrale (NOAA, 2011¹).

Nous n'avons pas trouvé dans la littérature de références sur d'éventuelles modifications du mode EA-WR en raison d'un forçage anthropique dans le futur.

 $^{^{1}\} http://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/teledoc/eawruss.shtml$



FIGURE 3.7 – Schémas spatiaux EA-WR de décembre communs aux 5 simulations. La variance expliquée par chaque CP en % est indiquée en haut à droite de chaque schéma.

Est Atlantique.

La figure 3.8 nous montre un dipôle d'anomalies de pression avec un gradient nord – sud sur l'Atlantique nord. Un premier pôle septentrional est généralement situé à la latitude 50°N et à la longitude 30°W, même si celui-ci est visible plus à l'est dans le scénario A2 (10°W, 50°N). Pour l'ensemble des scénarios, les corrélations sont supérieures à 0,7 sur ce pôle. Le second pôle, méridional, se distingue par son caractère longitudinal dans les scénarios B2 et A2. Globalement, le centre du pôle se situe autour de 35°W, 25°N sauf pour A2. Dans le cas de ce scénario, le pôle méridional présente un centre sur l'est par rapport aux autres simulations (10°W). Les parts de variance expliquée des trois scénarios sont relativement proches de la part de variance de la simulation actuelle-20c3m, avec un écart plus prononcé pour le scénario B1 (écart de près de 4 %). Dans le futur, le mode de variabilité EA continuerait donc d'être une composante de la circulation atmosphérique à 500 hPa.



FIGURE 3.8 – Schémas spatiaux EA de décembre communs aux simulations 20c3m, B1, B2 et A2. La variance expliquée par chaque CP en % est indiquée en haut à droite de chaque schéma.

3.1.2. Janvier

Les configurations Est Atlantique – Ouest Russie et Est Atlantique apparaissent au cours des mois de janvier, aussi bien lors de la période 1960-1989 que 2070-2099.

Est Atlantique – Ouest Russie.

Nous pouvons noter la présence d'anomalies de pression sur l'ouest Russie pour l'ensemble des simulations, anomalies qui s'étendent jusqu'à la moitié nord de la mer Caspienne dans le cas de la simulation 20c3m-actuel (figure 3.9).



FIGURE 3.9 – Schémas spatiaux EA-WR de janvier communs aux 5 simulations. La variance expliquée par chaque CP en % est indiquée en haut à droite de chaque schéma.

Les parts de variance expliquée par le mode EA-WR pour chacun des scénarios sont inférieures au pourcentage de variance de la simulation actuelle avec le plus grand écart entre 20c3m et B1 de l'ordre de 6 %. En effet, nous pouvons voir sur la **figure 3.9** que seul 20c3m montre au mois de janvier un second pôle d'anomalies de pression et de signe opposé centré sur la mer du Nord (5°E, 55°N). Ce dernier correspond au centre est Atlantique. De cette façon, cette configuration est assimilée à la description du mode Est Atlantique – Ouest Russie de Barnston et Livezey (1987). Le champ de hauteurs du géopotentiel 500 hPa de la fin du 21^{ème} siècle tel qu'il est simulé d'après les scénarios de la **figure 3.9** ne présente plus ce deuxième centre de pressions, néanmoins nous pouvons clairement le deviner pour A1B. Cela signifierait un affaiblissement du gradient de pression entre les deux pôles d'anomalies et donc un ralentissement du flux d'air zonal, quel que soit le scénario.

Est Atlantique.

Pour plus de lisibilité, nous avons identifié et intitulé les configurations sur la **figure 3.10** Est Atlantique. Or le schéma des scénarios B1 et A2 a été identifié comme le mode *Centre* Atlantique. Mais dans cette section nous parlerons d'Est Atlantique. Le cas des modes Centre Atlantique est évoqué dans la section suivante (3.2). Les configurations se présentent sous la forme d'un dipôle d'anomalies de pression, un premier situé sur l'Atlantique nord et un second plus ou moins marqué au niveau des côtes ouest de l'Afrique du nord. L'association des deux pôles de signe opposé peut soit correspondre à la description du mode Est Atlantique de Barnston et Livezey (1987) notamment en ce qui concerne la localisation du pôle nord des simulations 20c3m et B2, soit correspondre à la description faite par Wallace et Gutzler (1981) pour ce qui est de la localisation du pôle méridional des simulations 20c3m, A1B, B2 et A2.



FIGURE 3.10 – Schémas spatiaux Est Atlantique de janvier communs aux 5 simulations. La variance expliquée par chaque CP en % est indiquée en haut à droite de chaque schéma.

Chacune des séries a en commun la présence du pôle d'anomalies fortement corrélées situé sur le centre de l'Atlantique nord accompagné d'un second pôle qui se dessine à la limite sud du domaine (30°W, 25°N). Cette similitude est atténuée par le glissement du pôle septentrional de quelques degrés de latitude. La localisation des anomalies septentrionales varient selon les séries, situées à 50°N pour 20c3m, A1B et B2, elles sont présentent à 40°N pour B1 et A2 au niveau de l'archipel des Açores. Au vu des résultats, le champ de hauteurs de géopotentiel 500 hPa sous forçage anthropique continue d'être animé du mode de variabilité est Atlantique lors des mois de janvier dans le futur.

Nous n'avons pas trouvé d'études ayant porté sur d'éventuelles modifications du mode EA en raison d'un forçage anthropique dans le futur.

Nous reviendrons plus tard dans le texte (section 3.2, paragraphe ONA) sur la situation un peu particulière du mode EA des scénarios B1 et A2 du mois de janvier 2070-2099, nous amenant à utiliser le nom de *Centre Atlantique*.

3.1.3. Février

En février, seul le mode Est Atlantique est commun aux deux périodes temporelles et à l'ensemble des simulations.

Est Atlantique.

Le mode Est Atlantique détecté en février est commun à l'ensemble des simulations. Le schéma spatial de la matrice 20c3m présente d'importantes similitudes à celui de janvier (figure 3.10), nous pouvons noter la présence des deux pôles sur l'Atlantique central (figure 3.11). Les corrélations des scénarios A1B et A2 montrent également un pôle fortement marqué sur le bassin océanique mais leurs structures se distinguent par la présence d'un seul centre d'action fortement corrélé situé à 40°N présentant par ailleurs une certaine extension latitudinale de l'ordre de 10 degrés.

Pour le forçage A1B, nous pouvons voir l'esquisse du second pôle de signe opposé au large des côtes africaines. Nous aurons à nouveau l'occasion d'évoquer le cas particulier du mode centre Atlantique des scénarios A1B et A2 pour lesquels nous sommes en présence des mêmes particularités que le mois de janvier.

Les configurations citées ci-dessus sont donc reconnaissables entre simulation actuelle 20c3m et simulations de forçages d'émissions anthropiques. Nous avons vu que les modes ONA, EA-WR et EA en décembre, EA-WR et EA en janvier et EA en février extraits pour la période de la fin du $20^{\text{ème}}$ siècle (1960-1989) continueraient d'apparaître sous forçage de gaz à effet de serre et d'aérosols à la fin du siècle (2070-2099) quel que soit le taux de CO₂ estimé dans l'atmosphère en 2100. Cette observation est commune à l'ensemble des 4 scénarios étudiés précédemment excepté au mois de décembre pour le mode Est Atlantique du scénario A1B. Les forçages ne semblent donc pas affecter l'occurrence de ces modes de variabilité pour la fin du siècle.



FIGURE 3.11 – Schémas spatiaux Est Atlantique de février communs aux 5 simulations. La variance expliquée par chaque CP en % est indiquée en haut à droite de chaque schéma.

Nos conclusions font écho à l'étude de Hatzaki et al. (2006) qui a notamment cherché d'éventuelles modifications spatiales du mode de variabilité Est Méditerranée et nord-ouest Europe (EMP). D'une part les auteurs détectent la présence de ce mode pour une période actuelle et une période future reflétant deux scénarios d'émissions de gaz à effet de serre. D'autre part, ils notent des décalages spatiaux du mode EMP sous forçages A2 et B2.

Les décalages spatiaux des centres d'actions que nous avons présentés ci-dessus nous amènent à passer en revue les différences spatiales des modes de variabilité communs entre simulation actuelle et simulations futures prises individuellement et ce pour chaque structure de variabilité identifiée, contrairement à la section 3.1 qui s'est intéressée à étudier les modes communs entre les 5 simulations.

3.2. Evolution des empreintes spatiales

Chaque composante principale extraite par les ACP-R a été identifiée. Le tableau **3.5** donne un aperçu des composantes principales et distingue les modes de variabilité en fonction des mois au cours desquels ils apparaissent selon les divers scénarios d'émissions.

TABLEAU 3.5 - Répartition des modes de variabilité en fonction des mois de décembre (d), janvier (j) et février (f) et selon les simulations (période actuelle : 20c3m et future : B1, B2, A1B et A2). La colonne 'total' indique le nombre d'extractions de chaque mode pour l'ensemble des simulations.

	actuel 20c3m	B1	B2	A1B	A2	Total /15
ONA	d j f	d j f	d j f	d j	d	12
NCP	d f			d j f	j f	7
EA-WR	d j	d j f	d j	d j f	d j f	13
SCAN	j f	j			d	4
EA-MM	d j	d j f	j f	d	d j f	11
Centre Atl.		j		f	j f	4
Arabie S.	f	d f		j f		5
Médit. Occid.	d					1
Afrique ouest	f					1
Côtes Afr.W.	j	j f	d	d f	j f	8
EA	d j f	d f	d j f	j	d	10
Caspienne			d			1
Mer du Nord			d j f			3
Ouest Russie			f			1
Oscillation M.		d				1
Europe C.			j	d j	d	4
Europe C.+G				f	j f	3

Le **tableau 3.5** permet de se rendre compte de l'évolution de l'occurrence des modes. Il y a deux trajectoires illustrées dans le tableau. Premièrement, certains modes apparaissant lors de la simulation actuelle et/ou de scénario à faible taux de CO_2 en 2100 (B1 : 550 ppm et B2 : 600 ppm) 'disparaissent' à mesure que le taux de CO_2 des scénarios augmente (A1B : 700 ppm et A2 : 850 ppm), c'est le cas des modes SCAN, Arabie Saoudite, Méditerranée occidentale, Afrique de l'ouest. Deuxièmement, d'autres modes apparaissent principalement ou uniquement sous forçage anthropique, comme c'est le cas des modes côtes ouest Afrique, mer Caspienne, mer du Nord, ouest Russie, Europe centrale et Europe centrale – Groenland.

L'oscillation Nord Atlantique.

L'oscillation nord Atlantique apparait pour chacun des mois de la simulation 20c3m et des simulations des scénarios B1 et B2 (**figure 3.12**). Cela reflète l'occurrence prédominante de ce

mode et par là-même la variabilité interannuelle et/ou inter-décennale de la circulation atmosphérique. Rappelons simplement que l'oscillation nord Atlantique est la manifestation dominante de la variabilité de la circulation atmosphérique aux latitudes tempérées de l'hémisphère nord en hiver.

Le champ de géopotentiel 500 hPa simulé sous forçages B1 et B2 renseigne toujours le mode de variabilité ONA quel que soit le mois d'hiver concerné. Les parts de variance expliquée détenues par les configurations futures sont chacune plus élevées que celles de la période actuelle. Cette dernière affiche des pourcentages inférieurs à 20 % alors que les mois de décembre et janvier B1 et décembre et février B2 ont des valeurs supérieures à 20 % (figure 3.12). Dans ces cas là le mode ONA explique une plus grande part de la variabilité du géopotentiel 500 hPa de la région Nord Atlantique – Europe. La situation des deux pôles d'anomalies de signe opposé situés sur l'Atlantique nord est fortement identique que l'on regarde les configurations de la période actuelle ou de la période future : deux pôles fortement marqués au niveau des Açores et aux environs du Groenland et de l'Islande. Ce qui change en revanche c'est l'apparition en janvier du scénario B1 et en décembre et février 3.12). Il s'agit de l'extension de la bande d'anomalies de l'archipel des Açores. Ce troisième pôle est néanmoins déjà amorcé sous la simulation 20c3m (figure 3.12).



FIGURE 3.12 – Schémas spatiaux (oscillation nord Atlantique) des composantes principales de corrélations des hauteurs du géopotentiel 500 hPa mensuelles pour la simulation 20c3m-actuel (gauche); B1 (centre) et B2 (droite). La variance expliquée par chaque CP en % est indiquée en haut à droite de chaque schéma.

Pour ces configurations et en comparaison à la simulation 20c3m, l'ONA semble évoluer majoritairement en décembre du scénario B1 (**figure 3.13**). On remarque sur cette figure la présence d'écarts négatifs de géopotentiel 500 hPa sur les côtes nord-ouest de l'Afrique et au niveau de la Mer Caspienne (écarts de saturation de 0,4) accompagnés d'écarts positifs plus

importants (0,8) au niveau de la Mer du Nord et de la Scandinavie. Les écarts entre simulation 20c3m et scénario B1 laissent supposer une différence de géopotentiel 500 hPa du mode ONA de décembre et qui présage une hausse des pressions lorsque l'écart est positif ou une baisse des pressions lorsque l'écart est négatif. Si l'on continue sur le cas de décembre-B1, nous remarquons que les pressions se renforceraient sur la Scandinavie tandis que les pressions se creuseraient davantage au niveau du Détroit de Gibraltar et de la Mer Caspienne, comparé aux pressions de la simulation 20c3m. Ce renforcement des zones de pression implique un gradient de pression plus grand qui entraine une accélération du flux d'air entre Scandinavie et Détroit de Gibraltar mais aussi du flux Scandinavie et Mer Caspienne.



FIGURE 3.13 – Ecarts de corrélations du géopotentiel 500 hPa mensuel entre la simulation 20c3m et B1 (gauche) ; B2 (droite) associées à l'ONA en décembre. Intervalle entre les contours : 0,2.

L'évolution des pressions est différente si l'on s'intéresse au mois de décembre du scénario B2 (**figure 3.13**). Nous pouvons remarquer une différence de saturation comprise entre -0,4 et -0,6 au-dessus du bassin Méditerranéen, ce qui laisse penser que cette région serait, au cours des mois de décembre de la période 2070-2099, parcourue de pressions plus faibles que lors de la période 1960-1989 lorsque le mode ONA est actif.

Le mode de variabilité ONA serait donc toujours acteur de la circulation atmosphérique de la région Nord Atlantique-Europe pour la fin du siècle sous forçages B1 et B2. En revanche, lorsque les forçages A1B et A2 sont appliqués, l'occurrence de l'ONA diminue (**tableau 3.5**). Elle est identifiable pour deux mois sur trois pour A1B (décembre, janvier) et pour un mois sur trois pour A2 (décembre). Les mois manquants montrent des configurations un peu particulières visibles sur la **figure 3.14**. L'ONA semble « dissociée » en deux configurations et ce quel que soit le nombre de facteurs utilisés pour les rotations des ACP-R (rotations à 4 et 5 facteurs pour la configuration de février pour le scénario A1B, rotation à 5 facteurs pour le mois de janvier et février du scénario A2), éliminant de ce fait l'intervention du phénomène de sur-rotation dans la dissociation de l'ONA.



FIGURE 3.14 - Schémas spatiaux des composantes principales de corrélations des hauteurs du géopotentiel 500 hPa mensuelles pour la simulation A1B (gauche) et A2 (centre et droite). La dernière ligne représente la superposition des configurations situées au-dessus ; la carte ainsi obtenue n'est composée que des corrélations supérieures ou égales en valeur absolue à 0,7.

En effet, à l'inverse des composantes principales saisonnières pour lesquelles l'ONA est identifiée aisément pour chacune des simulations (variances expliquées similaires, non montré), aux mois de février-A1B et jan-fév-A2 l'ONA n'est pas clairement identifiable. Ses deux pôles d'anomalies qui la constituent semblent divisés en deux configurations distinctes (figure 3.14). Une première structure montre deux centres d'action fortement corrélés, l'un sur ou au sud du Groenland pouvant être assimilé au pôle d'anomalies négatives septentrional de l'ONA, accompagné d'un centre d'anomalies de signe opposé sur le centre de l'Europe. Nous avons dénommé cette configuration *Europe centrale – Groenland*. Notons que ce schéma ressemble grandement aux situations rencontrées précédemment (figure 3.12). Une deuxième structure, que nous avons intitulée *centre Atlantique (un pôle)*, affiche quant à elle un pôle d'anomalies dominant situé sur ou juste à l'ouest des Açores. Celui-ci peut être identifié comme la composante anticyclonique de
l'ONA. Si l'on superpose les structures citées ci-dessus nous obtenons un schéma semblable à l'ONA tel qu'il est décrit dans la littérature (Hurrell, 1995) : un dipôle d'anomalies de pressions nord-sud, accompagné du reste du pôle Europe centrale. Il est difficile d'attribuer catégoriquement ce scindement de l'ONA aux forçages climatiques A1B et A2.

Mer du Nord – Caspienne.

Extrait deux fois lors de la simulation 20c3m-actuel, le mode Mer du Nord – Caspienne réapparait également sous forçages A1B et A2. Par contre l'occurrence est nulle lorsque les scénarios B1 et B2 sont appliqués. Comparons tout d'abord les structures NCP actuelles aux structures NCP futures (**figure 3.15**).



FIGURE 3.15 – Schémas spatiaux (mer du Nord – Caspienne) des composantes principales de corrélations des hauteurs du géopotentiel 500 hPa mensuelles pour la simulation 20c3m-actuel (gauche) ; A1B (centre) et A2 (droite). La variance expliquée par chaque CP en % est indiquée en haut à droite de chaque schéma.

Le mode de variabilité NCP (Kutiel et al., 2002b) est extrait aux mois de décembre et février lors de la simulation actuelle 20c3m. Lorsque le scénario A1B est appliqué, le champ de géopotentiel continue de renseigner ce mode de variabilité, on remarque la distinction très nette des deux centres d'action pour chaque mois par rapport à la simulation 20c3m et ce malgré quelques décalages spatiaux, notamment de la part du pôle septentrional. Le scénario A2, qui pourtant traduit le forçage en gaz à effet de serre et aérosols le plus important, est celui qui montre les configurations NCP étant tout particulièrement fidèles à la description faite par Kutiel et al. (2002). Ajoutons que le scénario B2 renseigne au cours du mois de février le mode de variabilité NCP, son schéma spatial (non montré) peut se reporter à celui de janvier-A2, c'est-à-dire avec la présence d'un seul pôle de pressions fortement marquées au-dessus de la mer du Nord.

Les écarts de corrélations de géopotentiel entre simulation actuelle et simulations futures illustrés figure 3.16 représentent l'évolution du géopotentiel 500 hPa résultant des forçages A1B et A2 pour la fin du 21^{ème} siècle.



FIGURE 3.16 – Ecarts de corrélations du géopotentiel 500 hPa mensuel entre la simulation 20c3m et A1B (gauche) ; A2 (droite) associées au mode NCP. Intervalle entre les contours : 0,2.

Si l'on se limite à la configuration de décembre-A1B, les écarts de saturation sont assez importants et laissent supposer une hausse du géopotentiel 500 hPa au-niveau des Etats Baltes (écart de 0,4) et une baisse élevée (écart de -1) sur une large région englobant l'Arabie Saoudite nord et l'extrême sud de la Mer Caspienne.

La configuration de février du scénario A1B présente des différences positives de saturations au niveau de l'Afrique du nord-ouest, pour lesquelles nous pouvons déduire une augmentation des pressions.

La carte d'écarts de février du scénario A2 ne présente aucune similarité avec celle du scénario A1B que nous venons d'évoquer. En effet c'est la région Scandinave qui serait soumise à une baisse de pression au cours des mois de février 2070-2099 par rapport à la période 1960-1989.

Ce schéma ainsi que celui de décembre-A1B sont particulièrement intéressants car ils laissent entrevoir un renforcement du gradient de pression entre les régions de diminution de pressions et les régions d'augmentation de pressions. Les courants atmosphériques engendrés par le gradient risquent alors d'être accentués.

Même si aucune configuration extraite sous forçage B2 n'est clairement identifiée comme étant le mode NCP, l'apparition des configurations Mer Caspienne et Mer du Nord (décembre) laisse à penser que le mode NCP se scinderait sous l'influence du forçage anthropique B2 (figure 3.17).



FIGURE 3.17 – Schémas spatiaux des composantes principales de corrélations des hauteurs du géopotentiel 500 hPa pour le mois de décembre de la simulation B2. La dernière ligne représente la superposition des configurations situées au-dessus ; la carte ainsi obtenue n'est composée que des corrélations supérieures ou égales en valeur absolue à 0,7.

La division des pôles de pressions du mode de variabilité NCP représentée **figure 3.17** pourrait être la marque du forçage anthropique B2 sur la variabilité spatiale basse-fréquence de la circulation atmosphérique Nord Atlantique – Europe. Le schéma en bas de la figure montre la superposition des corrélations fortement marquées (limite située à 0,7) appartenant aux deux configurations individualisées mer du Nord et mer Caspienne. De cette manière nous obtenons une structure qui se rapporte au mode NCP décrit par Kutiel et al. (2002b). Notons enfin qu'une structure similaire à celle du mode mer du Nord a aussi été identifiée sur les mois de janvier et février du scénario B2 mais sans détecter de pôle sur la mer Caspienne.

L'échelle saisonnière à laquelle nous avons également extrait les composantes principales indique que le mode de variabilité NCP est clairement identifiable pour chaque simulation, ces dernières renseignent d'ailleurs des valeurs de variance expliquée similaires (10,56 % en moyenne). L'échelle saisonnière « masque » l'apparition mois par mois des modes de variabilité.

Est Atlantique – Ouest Russie.

Comme cela a déjà été évoqué dans la partie précédente, le mode de variabilité que nous avons détecté et dénommé EA-WR dans la littérature (Barnston et Livezey, 1987) diffère de la description qui en est faite. Habituellement constitué de deux pôles sur la région Nord Atlantique – Europe, seules deux configurations sur un total de 14 extractions se rapportent

entièrement à cette définition, celle de janvier de la simulation actuelle 20c3m et celle de décembre de la simulation B1, comme nous pouvons le constater sur la **figure 3.18**.

Les deux composantes principales constituées des deux pôles d'action ont des pourcentages de variance expliquée autour de 16-17 % tandis que les autres composantes, constituées elles d'un seul pôle fortement corrélé affichent des valeurs de variances inférieures, allant jusque 10,28 % (figure 3.18). Chaque champ de géopotentiel mensuel renseigne le pôle d'anomalies ouest Russie, centré globalement sur 25°-60°E, 50°-70°N, il en va de même lorsque les ACP-R sont exécutées sur une base saisonnière. Comme il est possible d'apercevoir l'ébauche du pôle est Atlantique pour certaines configurations (décembre-20c3m, B2, A1B et A2, janvier-A1B), nous pouvons émettre l'hypothèse que la hausse simulée du taux de CO₂ dans l'atmosphère, quel que soit le scénario d'émissions employé, influence la répartition spatiale des centres de pressions du mode est Atlantique – ouest Russie.



FIGURE 3.18 – Schémas spatiaux (est Atlantique – ouest Russie) des composantes principales de corrélations des hauteurs du géopotentiel 500 hPa mensuelles pour la simulation 20c3m-actuel (haut-gauche) ; B1 (haut-centre) ; B2 (haut-droite) ; A1B (bas-gauche) et A2 (bas-droite). La variance expliquée par chaque CP en % est indiquée en haut à droite de chaque schéma.

Les configurations mensuelles similaires entre période actuelle (20c3m) et période future (scénarios) sont comparées entre elles, pour cela nous avons calculé les différences de saturations (**figure 3.19**).



FIGURE 3.19 – Ecarts de corrélations du géopotentiel 500 hPa mensuel entre la simulation 20c3m et B1 (haut-gauche); B2 (haut-centre); A1B (haut-droite) et A2 (bas) associées à EA-WR. Intervalle entre les contours : 0,2.

En janvier, nous remarquons pour l'ensemble des forçages des écarts positifs laissant présager une hausse du géopotentiel sur l'Europe du nord et une baisse plus légère sur l'Atlantique nord-ouest ainsi que sur une bande orientée sud-sud-ouest/nord-nord-est partant de l'Afrique nord-est à la mer Caspienne. En décembre, la carte B1 montre d'importants écarts de saturations. Comparativement à la simulation 20c3m, la structure du scénario B1 montre des écarts négatifs (-0,8) sur l'ensemble de l'Europe qui peuvent être traduits par une diminution du géopotentiel 500 hPa au cours des mois de décembre de la période 2070-2099 lorsque le mode EA-WR est actif.

Les cartes d'écarts des saturations calculés sur les composantes principales de l'EA-WR à l'échelle saisonnière (non montré) ne présentent pas de différences supérieures à 0,4. La carte de janvier présente en particulier une configuration similaire aux cartes mensuelles, à savoir des écarts négatifs à l'ouest et à l'est du domaine et des écarts positifs au centre du domaine, sur l'Europe.

Scandinavie.

Les valeurs de variance expliquée du mode de variabilité Scandinavie sont similaires que les configurations soient extraites sur la période future (B1 et A2) ou sur la simulation actuelle. Les configurations futures de la **figure 3.20** n'illustrent que peu de changements relativement à 20c3m. Effectivement, le mode SCAN (Barnston et Livezey, 1987) maintient un centre de pression très vigoureux centré sur la Scandinavie et un second pôle plus faible et de signe opposé, facilement détectable (excepté B1), au-dessus de l'Espagne et l'Atlantique et la Méditerranée adjacents.



FIGURE 3.20 – Schémas spatiaux (Scandinavie) des composantes principales de corrélations des hauteurs du géopotentiel 500 hPa mensuelles pour la simulation 20c3m-actuel (gauche); B1 (haut-droite); A2 (bas-droite). La variance expliquée par chaque CP en % est indiquée en haut à droite de chaque schéma.

Il semblerait d'après la figure que ce mode est également bien renseigné dans le futur (2070-2099) sous forçages B1 et A2. Ici la survenue du mode SCAN ne semble pas affectée par l'intensité du scénario d'émissions.

La comparaison des schémas entre 20c3m et B1 pour le mois de janvier nous permet de voir que les écarts de saturation calculés sont négatifs (-0,4) sur une partie de l'océan Atlantique subtropical et sur l'Arabie Saoudite (**figure 3.21**) et sont positifs (0,2 à 0,6) sur l'ensemble de l'Europe. Le géopotentiel 500 hPa serait donc au cours des mois de janvier 2070-2099 plus faible sur la partie sud du domaine et plus élevé sur l'Europe comparativement à celui de la période actuelle 1960-1989. Ainsi les pressions de géopotentiel 500 hPa se creuseraient sur l'Atlantique et

l'Arabie Saoudite renforçant de ce fait l'intensité du gradient de pression entre régions du sud et Europe. Le flux atmosphérique induit serait donc plus fort.



FIGURE 3.21 – Ecarts de corrélations du géopotentiel 500 hPa mensuel entre la simulation 20c3m et B1 associé au mode SCAN. Intervalle entre les contours : 0,2.

Est Atlantique – Méditerranée Méridionale.

A notre connaissance aucune description de la structure de variabilité représentée **figure 3.23** n'est répertoriée dans la littérature si ce n'est la structure spatiale de l'étude de Hatzaki et al. (2006), laquelle identifie le schéma Est Méditerranéen – Nord Ouest Europe (EMP) (**figure 3.22**) à partir d'une ACP avec rotation sur le champ du niveau géopotentiel 500 hPa d'hiver. Sur cette figure les auteurs détectent notamment l'EMP à partir d'une simulation sous forçage B2 par le modèle HadAM3P. Nous pouvons noter une forte ressemblance des corrélations entre leur résultat et le notre (**figure 3.23**).

Néanmoins cette structure spatiale a montré une forte récurrence lors des différents tests de rotation des ACP. Composé d'un centre très vigoureux, plus ou moins étendu, sur la Méditerranée orientale et d'un centre secondaire sur l'extrême est Atlantique, le mode de variabilité que nous avons dénommé EA-MM (*Est Atlantique – Méditerranée Méridionale*) est renseigné pour chaque simulation, il en est de même pour les ACP-R saisonnières.



FIGURE 3.22 – Schéma spatial Est Méditerranée – Nord Ouest Europe // Hatzaki et al., 2006.



FIGURE 3.23 – Schémas spatiaux (est Atlantique – Méditerranée méridionale) des composantes principales de corrélations des hauteurs du géopotentiel 500 hPa mensuelles pour la simulation 20c3m-actuel (haut-gauche) ; B1 (haut-centre) ; B2 (haut-droite) ; A1B (bas-gauche) et A2 (basdroite). La variance expliquée par chaque CP en % est indiquée en haut à droite de chaque schéma.

Certaines configurations montrent le pôle est Atlantique constitué d'anomalies de pressions fortement corrélées (supérieures à 0,7), les variances expliquées sont alors plus grandes (de l'ordre de 20 %) que les autres structures (de l'ordre de 13 %), il s'agit des schémas de janvier et février B1. La configuration de décembre-A1B présente elle aussi un dipôle d'anomalies de pression fortement marquées mais la bande méridionale est largement moins étendue.

Le signal de changement spatial pour ce mode de variabilité est relativement modéré, en effet la présence du pôle méditerranéen perdure indépendamment de l'intensité du scénario d'émissions. Toutefois, les schémas du scénario A2 présentent un étirement de la bande d'anomalies de la Méditerranée orientale sur l'Afrique du nord.

Les faibles différences spatiales de saturations entre période actuelle et période future qu'il est possible de voir **figure 3.23** ne dévoilent que peu d'écarts entre les modes EA-MM 20c3m et scénarios similaires (**figure 3.24**).



FIGURE 3.24 – Ecarts de corrélations du géopotentiel 500 hPa mensuel entre la simulation 20c3m et B1 (gauche) ; B2 (centre-haut) ; A1B (centre-bas) et A2 (droite) associées au mode EA-MM. Intervalle entre les contours : 0,2.

Les différences de saturations n'excèdent pas 0,4, qu'il s'agisse d'écarts négatifs ou positifs. La carte de différence entre 20c3m et B2 présente le moins d'évolution. Les forçages d'émissions anthropiques B2 et A2 ne semblent pas influencer de façon importante le champ de géopotentiel 500 hPa du mode EA-MM pour la fin du 21^{ème} siècle. Les cartes B1 et A1B en revanche indiquent des écarts de saturations sous forme de larges et longues bandes. L'exemple de janvier-A1B présente des écarts négatifs (positifs) qui laissent présager une baisse (hausse) des géopotentiels 500 hPa et donc un creusement (renforcement) des pressions. Nous pouvons émettre l'hypothèse que le flux d'air généré suite au gradient de pression (intensifié) dans le cas du mois de janvier-B1 entre l'Atlantique nord-est et les côtes Africaines ou la Mer Caspienne serait ainsi accentué.

Les observations sont différentes pour les composantes principales EA-MM lorsque celles-ci sont extraites à l'échelle saisonnière (non montré). La carte du scénario B1 ne présente aucun écart supérieur à 0,2. Par contre, les cartes de différentes entre 20c3m d'un côté et B2, A1B et A2 de l'autre indiquent chacune une zone étendue d'écarts positifs (0,8) au niveau des mers Caspienne et noire. La région d'écarts positifs du scénario A1B est accompagnée d'écarts négatifs (-0,8) suivant un gradient ouest-est, juste à l'ouest du Détroit de Gibraltar. Les écarts de saturations entre 20c3m-B2 et 20c3m-A2 sont regroupés en deux zones privilégiées, une première déjà évoquée est constituée d'écarts positifs (0,8) au-dessus du bassin Méditerranéen oriental, de la Mer Caspienne et la Mer Noire et une seconde formée d'écarts négatifs (-0,8) sur la Scandinavie. A cette échelle nous pouvons émettre l'hypothèse que les forçages d'émissions anthropiques B2, A1B et A2 influencent les champs de pression 500 hPa dans le sens d'un renforcement des pressions à l'est de la Méditerranée et un creusement des pressions sur les côtes d'Espagne et d'Afrique (A1B) ou sur la région Scandinave (B2 et A2). Le flux d'air généré suite aux gradients de pression entre ces deux zones géographiques serait ainsi accentué.

Est Atlantique.

Certaines configurations que nous avons obtenues se rapportent au mode de variabilité *Est Atlantique* (Barnston et Livezey, 1987; Rogers 1990; Wallace et Gutzler, 1981), composé de deux pôles distincts dont l'un d'eux est souvent bien placé par rapport à la description qui en est faite. Le schéma EA (**figure 3.25**) présente une récurrence marquée lors des calculs des ACP-R, on le retrouve à plusieurs reprises lors des rotations 5 à 7 facteurs au cours des mêmes mois et scénarios représentés **figure 3.25**.



FIGURE 3.25 – Schémas spatiaux (est Atlantique) des composantes principales de corrélations des hauteurs du géopotentiel 500 hPa mensuelles pour la simulation 20c3m-actuel (haut-gauche) ; B1 (haut-centre) ; B2 (haut-droite) ; A1B (bas-gauche) et A2 (bas-droite). La variance expliquée par chaque CP en % est indiquée en haut à droite de chaque schéma.

Les structures présentées **figure 3.25**, telles que nous les obtenons, correspondent aux descriptions faites par Barnston et Livezey (1987), Wallace et Gutzler (1981), Pokorna (2005). La situation du pôle à l'ouest de la Grande-Bretagne se rapporte davantage à celle décrite par Rogers (1990) et Wibig (1999). Le schéma EA est extrait à toutes les simulations (**tableau 3.5**), on le retrouve aussi bien à la simulation actuelle 20c3m que lors des projections B1, B2, A1B et A2, ainsi qu'aux ACP-R saisonnières.

La figure **3.25** montre que quelle que soit la simulation prise en compte nous retrouvons toujours deux centres, le pôle septentrional situé généralement entre la Grande-Bretagne et la pointe de Terre-Neuve et le pôle méridional présenté sous la forme d'une longue bande d'anomalies de signe opposé. Lorsqu'un schéma montre seulement un pôle fortement corrélé ou des pôles plus limités dans l'espace (janvier de 20c3m à 12,63 % et décembre de B1 et A2 à 12,54 et 14,57 %), le pourcentage de variance expliquée est plus faible que la variance expliquée par deux pôles vigoureux (moyenne de 17,92 %).

Le champ de hauteurs du géopotentiel 500 hPa couvrant la région Nord Atlantique – Europe renseigne le mode de variabilité EA pour la fin du siècle (2070-2099), même soumis à des scénarios d'émissions anthropiques. En effet le pôle nord est toujours renseigné (corrélations supérieures à 0,7). Néanmoins nous pouvons noter l'extension plus restreinte du pôle sud sur l'Europe pour les scénarios B2 et A2.

La récurrence du mode de variabilité EA entre période actuelle (1960-1989) et période future (2070-2099) ne doit pas masquer les écarts de saturations calculés entre ces deux périodes (**figure 3.26**).



FIGURE 3.26 – Ecarts de corrélations du géopotentiel 500 hPa mensuel entre la simulation 20c3m et B1 (gauche) ; B2 (centre) ; A1B (haut-droite) et A2 (bas-droite) associées au mode EA. Intervalle entre les contours : 0,2.

Les cartes d'écarts de saturations mises à jour pour le mois de février-B1, janvier-A1B et décembre-A2 ont en commun des écarts négatifs (allant jusque -0,6 pour A1B et A2) au-dessus de la Scandinavie et bien au-delà, sur le Royaume-Uni et l'extrême ouest Russe. La situation de ces configurations indique que le géopotentiel 500 hPa situé au-dessus de ces régions diminuerait au cours de la période 2070-2099 lorsque le mode Est Atlantique est actif. L'évolution mensuelle du géopotentiel est « dissimulée » à l'échelle saisonnière (hiver, DJF) qui présente par ailleurs des cartes d'écarts partiellement similaires entre forçages (**figure 3.27**).



FIGURE 3.27 - Ecarts de corrélations du géopotentiel 500 hPa hivernal entre la simulation 20c3m et B2 (gauche); A1B (centre) et A2 (droite) associées au mode EA. Intervalle entre les contours : 0,2.

La carte d'écarts de saturations entre 20c3m et B1 n'est pas représentée sur la **figure 3.27** car aucun écart ne dépasse la valeur 0,2. Les cartes de différences entre 20c3m d'un côté et B2, A1B et A2 de l'autre qu'il est possible de visualiser **figure 3.27** indiquent pour chacune d'entre elle des écarts négatifs formés par une large et longue bande latitudinale (25°-45°N) couvrant, sur le domaine, la moitié sud du bassin océanique (-0,6) ainsi que la Mer Méditerranée et l'Europe (-0,4). Les cartes A1B et A2 présentent également une zone d'écarts positifs (0,4) au sud de l'Islande (60°N ; 25°W). D'après nos résultats, les gradients de pression engendrés entre les deux pôles d'écarts de saturations de géopotentiel seraient plus intenses sur la période 2070-2099 par rapport à la période 1960-1989 au cours de la saison hivernale si les forçages anthropiques A1B et A2 venaient à se produire. Le flux d'air résultant serait aussi intensifié.

Côtes ouest Afrique.

A partir des ACP-R des hauteurs de géopotentiel 500 hPa nous avons identifié une structure récurrente, non répertoriée à notre connaissance dans la littérature et présente à toutes les simulations, il s'agit de la structure que nous avons dénommée *côtes ouest Afrique* (figure 3.28). Elle présente un centre de pressions fortement corrélées situé soit juste à l'ouest des côtes africaines soit à proximité de la Péninsule Ibérique. Le schéma côtes ouest Afrique se présente sous la forme d'un pôle d'anomalies de géopotentiel 500 hPa fortement corrélées au-dessus des pays côtiers et de l'espace océanique adjacent au niveau de l'Afrique du nord-ouest et de la Péninsule Ibérique. Un deuxième pôle, nettement plus faible, complète le schéma, il est situé à l'est de la pointe de Terre-Neuve (50°N, 40°W).



FIGURE 3.28 – Schémas spatiaux (côtes ouest Afrique) des composantes principales de corrélations des hauteurs du géopotentiel 500 hPa mensuelles pour la simulation 20c3m-actuel (haut-gauche); B1 (haut-centre); B2 (haut-droite); A1B (bas-gauche) et A2 (bas-droite). La variance expliquée par chaque CP en % est indiquée en haut à droite de chaque schéma.

La simulation actuelle ne renseigne qu'à une reprise ce mode de variabilité, au cours du mois de janvier et détient 10,26 % de la variance totale du mois. Les parts de variance expliquée par les simulations futures fluctuent autour de cette valeur avec un minimum de 5,28 % (février-A1B) et un maximum de 14,61 % (janvier-A2). Les cartes d'écarts de corrélations entre janvier actuel et janvier B1 et A2 (non montré) indiquent peu de différences de corrélations (inférieures à 0,4). Au cours des mois de janvier de la période future 2070-2099, le champ de géopotentiel 500 hPa du mode côtes ouest Afrique ne devrait pas évoluer par rapport à la période actuelle 1960-1989.

Arabie Saoudite.

Le mode que nous avons intitulé *Arabie Saoudite* auquel, à notre connaissance, ne se rapporte aucune référence dans la littérature, est constitué d'un unique pôle d'anomalies de pression à proximité de l'Arabie Saoudite (**figure 3.29**). Ce schéma persiste lors des calculs des ACP, les rotations à 5 et 7 facteurs (8 dans le cas de B1 et A1B) renseignent également la structure Arabie Saoudite confortant notre choix de rotation à 6 facteurs.



FIGURE 3.29 – Schémas spatiaux (Arabie Saoudite) des composantes principales de corrélations des hauteurs du géopotentiel 500 hPa mensuelles pour la simulation 20c3m-actuel (gauche) ; B1 (centre) ; A1B (droite). La variance expliquée par chaque CP en % est indiquée en haut à droite de chaque schéma.

Ce schéma est présent lors de la simulation actuelle et au cours des simulations des scénarios ayant les émissions anthropiques les moins élevées, notamment lors des mois de février (voir **tableau 3.5**). Les parts de variance expliquée par chaque mode sont largement similaires entre période actuelle et période future (8,13 % en moyenne). Il en va de même des empreintes spatiales futures qui ne présentent pas d'évolution notable par rapport à la simulation 20c3m.

La figure 3.30, qui représente les écarts des saturations entre le mode Arabie Saoudite extrait sur la période actuelle (20c3m) et celui sur la période future (B1 et A1B), permet de nuancer l'absence d'évolution spatiale du mode de variabilité.



FIGURE 3.30 – Ecarts de corrélations du géopotentiel 500 hPa mensuel entre la simulation 20c3m et B1 (gauche) et A1B (droite) associées au mode Arabie Saoudite. Intervalle entre les contours : 0,2.

Comparé à février-A1B qui présente des écarts de saturations allant jusqu'à -0,4 au niveau de l'archipel des Açores (25°-30°N; 60-20°W), la carte de février-B1 montre des écarts plus grands, nous retrouvons des écarts de corrélations positifs (0,6 à l'ouest des côtes africaines et 0,8 au-

dessus de l'Europe) traduisant une hausse du géopotentiel sur la période 2070-2099 et des écarts négatifs (-1,0) sur le centre Atlantique (50°N) et l'Arabie Saoudite exprimant une baisse du géopotentiel sur la même période. Les gradients de pression générés entre le pôle européen et celui d'Arabie Saoudite et océanique seraient accentués lors des mois de février 2070-2099 si le scénario B1 venait à se concrétiser.

A notre connaissance il n'y a pas d'études sur d'éventuelles modifications des modes de variabilité en raison d'un forçage anthropique pour une période future à partir desquelles nous pouvons comparer nos résultats pour ce mode.

4. Evolution de la variabilité temporelle des modes dans un climat futur contraint à forçage anthropique

Les configurations préférentielles de la circulation atmosphérique sont marquées par une stationnarité spatiale mais elles évoluent dans le temps. Les scores factoriels sont un des résultats exprimés par les ACP-R, ils permettent de retranscrire les fluctuations temporelles des modes de variabilité à travers la période analysée, 1960-1989 pour la simulation HadCM3 20c3m et 2070-2099 pour les simulations prédictives des scénarios B1, B2, A1B et A2. C'est directement à partir des scores factoriels que nous avons calculé les tendances linéaires. En effet, l'évolution des scores à la baisse ou à la hausse indique respectivement un affaiblissement ou un renforcement au cours de la période d'étude des systèmes de pression. C'est aussi à partir des scores qu'il est possible d'étudier la propriété d'occurrence des modes, celle-ci sera analysée grâce aux fréquences d'occurrence des *types de circulation* propres aux scores les plus importants.

4.1. Tendances linéaires

Chaque mode extrait par les ACP-R représente une structure de variabilité de la circulation atmosphérique de la région Nord Atlantique – Europe. Ces dernières ont été identifiées sur une période de trente ans, l'intensité des structures fluctue donc au cours du temps. L'analyse des tendances linéaires des variations des modes de variabilité a été menée afin de voir si nous constations des évolutions. Les tendances linéaires des modes présents sous climat actuel (1960-1989) sont comparées à celles des modes simulés sous un climat contraint par forçage anthropique (2070-2099).

L'analyse de l'évolution de la variabilité temporelle *future* des modes de variation concerne la globalité des configurations disponibles, c'est-à-dire 71 modes (6 configurations x 3 mois x 4 simulations moins 1).

Voyons tout d'abord les résultats de toutes les configurations disponibles (tableau 3.6).

TABLEAU 3.6 – Distribution par mois et par scénarios des tendances linéaires en fonction de leur signe. + (-) signifie que la tendance est positive (négative) : valeur du coefficient directeur supérieure (inférieure) à 0,01 (-0,01). = signifie que la tendance est nulle : valeur du coefficient directeur comprise entre 0,01 et -0,01.

	Ι	Décembr	е		Janvier			Février			Total	
	+	_	—	+	_	—	+	_	=	+	_	=
B1	3	1	2	1	1	4	1	2	3	5	4	9
B2	1	3	2	2	-	4	4	-	1	7	3	7
A1B	4	-	2	4	-	2	4	-	2	12	-	6
A2	3	1	2	4	2	-	4	-	2	11	3	4
Total	11	4	8	11	3	10	13	2	8	35	10	27
actuel 20c3m	2	-	4	2	_	4	1	2	3	5	2	11

Lorsque nous totalisons les résultats, il est à noter que 35 tendances futures affichent une évolution à la hausse (tendance positive) sur 71 et 10 sont à la baisse (tendance négative). Quand au reste, 27 tendances ne présentent pas d'évolution marquée, c'est-à-dire que le champ de géopotentiel 500 hPa reste inchangé. Nous constatons donc une dominance des tendances positives futures marquée par les scénarios A1B et A2 (respectivement 12 et 11 tendances). Cela implique que les pressions d'altitude à 500 hPa évolueraient de façon à ce que les pôles positifs (centres d'action de hautes pressions) se renforcent et les pôles négatifs (centres d'action de basses pressions) se creusent davantage. Le nombre de tendances négatives est similaire quel que soit le scénario désigné, au nombre de trois ou quatre. La colonne « = » reprend les tendances sans évolution marquée (coefficient directeur de la droite de tendance compris entre -0,01 et 0,01). A partir du **tableau 3.6**, nous constatons que le nombre de ces tendances diminue à mesure que le taux de CO₂ du forçage anthropique augmente (4 tendances au minimum pour A2, 9 au maximum pour B1). Notons également, lorsque les résultats sont triés par mois, qu'aucun d'entre eux ne se démarque (11 tendances positives pour décembre et janvier, 13 pour février).

Mis à part la dominance d'un scénario particulier en termes de nombre de tendances que nous donne le **tableau 3.6**, il est important de noter que le scénario B1 ne montre pratiquement aucun changement dans sa répartition de tendances saisonnières par rapport à la période actuelle 20c3m. En effet le nombre de tendances positives reste à cinq, celui des tendances négatives et sans évolution marquée ne change que de deux. Cela signifie que les anomalies de géopotentiel 500 hPa associées aux pôles positifs et aux pôles négatifs restent inchangées. Les scénarios A1B, B2 et A2 montrent en revanche des évolutions de tendances par rapport à 20c3m plus marquées. Commençons par B2 pour lequel une diminution modérée (perte de 4) de tendances nulles (signe =) est visible. Nous pouvons voir également que la baisse du nombre de tendance nulle de scénarios A1B et A2 par rapport à 20c3m, respectivement de 5 et 7, est compensée dans la hausse du nombre de tendances positives, respectivement 7 et 6. Dans les cas d'A1B et A2, la majorité des pôles négatifs et positifs des modes de variabilité affectant la zone Atlantique Nord - Europe se renforceraient, accentuant par là-même le gradient de pression entre les centres d'action. Le flux d'air alors plus intense affecterait les zones concernées en fonction des modes.

Notons pour terminer, que la part des tendances négatives n'évoluent que très peu entre simulation du $20^{\text{ème}}$ siècle et scénarios du $21^{\text{ème}}$ siècle. Dans quelques cas, notamment au cours des mois de décembre 2070-2099 sous scénario B2, les hautes et basses pressions s'atténueraient réduisant ainsi la vitesse du flux d'air.

Comme noté plus haut, l'analyse de la variabilité temporelle de l'ensemble des modes via l'étude des tendances révèle une part importante des évolutions à la hausse. Nous pouvons donc orienter l'étude de façon à détecter à quels modes sont associées les tendances (**tableau 3.7**).

En dressant la liste des modes disponibles extraits par les ACP-R, en fonction des scénarios et des mois (tableau 3.7), nous détectons une dominance forte du mode *Est Atlantique – Méditerranée Méridionale* (EA-MM) totalisant 9 tendances positives pour tous les scénarios, avec une occurrence marquée lors des scénarios B1 et A2. Au cours de ces deux forçages, c'est l'ensemble des trois mois (décembre-février) qui est marqué par l'évolution à la hausse des scores factoriels. Plus précisément, ici, c'est la totalité des tendances linéaires du mode Est Atlantique - Méditerranée Méridionale qui présente des coefficients directeurs positifs. Ainsi, dans des conditions climatiques futures conditionnées par de fortes concentrations de gaz à effet de serre et d'aérosols (scénario A2), les zones de basses pressions du mode EA-MM seraient amenées à se creuser plus fort et les zones de hautes pressions à s'accentuer davantage. Comparé au climat actuel (1960-1989), cette évolution des anomalies de pressions n'est pas nouvelle. En effet, nous notons déjà deux tendances positives dans la simulation du climat actuel (tableau 3.7).

D'autres modes, tels que *Est Atlantique – Ouest Russie* (A1B et A2) et *Mer du Nord – Caspienne* (A1B) totalisent chacun 4 tendances positives. L'évolution des pressions d'altitude vers des tendances positives se traduit, en termes de systèmes atmosphériques, par l'intensification des hautes et des basses pressions. Ces deux modes se distinguent également par l'absence de tendances négatives quel que soit le scénario : le mode NCP présente pourtant une tendance négative au cours des mois de février 1960-1989.

L'Oscillation Nord – Atlantique (ONA) ne montre pas d'évolution marquée en fonction des scénarios d'émissions. Malgré le fait que le mode ONA ait été extrait un nombre de fois important (9 sur 12), il apparait que 4 modes ont des tendances linéaires positives ou négatives (coefficient directeur supérieur à 0,01 ou inférieur à -0,01), contre 5 modes qui ne montrent pas d'orientation 'franche' de leur droite de tendance. Le coefficient maximal reste d'ailleurs modéré avec une valeur absolue de 0,03.

TABLEAU 3.7 – Signe des tendances linéaires associées aux modes de variabilité, en fonction des mois et des simulations.

			B1			B2			A1.	В		Α	5		-	Total			actu 20C3	el M
	<u> </u>	D	ſ	Ц	D	ſ	Гц	D	Ŀ	Ч	D	ſ	ĽÍ	r-	+	I		D	ſ	Ч
ONA		+	Ш	I	I				+						2	2	IJ	+		Ш
NCP								+	+	+		+			4		1	II		Ι
EA-WR					II	ΙΙ		II	+	+	II	+	+		4		2	II		
SCAN			I								+									II
EA-MM		+	+	+		+	+	+			+	+	+		6			+	+	
Centre Atl.										+		I	+	1	2	-	1			
Arabie S.									+	+					2		2			+
Médit. Occid.																		II		
Afrique ouest																				Ι
Côtes ouest Afr.								+		II		+	+	1	ç		4		II	
EA		+		I	Ι	II	+		II		+				ŝ	2	2	II	+	II
Mer Caspienne					Ι															
Mer du Nord					+	+	+								ŝ					
Oscillation Médit.		Ι																		
Ouest Russie							+								1					
Europe C.						II		+			I				1		2			
Europe C. + Groenland										II		I					2			
	+	3	1	1	1	2	4	4	4	4	3	4	4		35			2	2	1
Total			1	2	co						1	2				6				2
		2	4	3	2	4	1	2	2	2	2		C 4	0			27	4	4	3

La configuration Arabie Saoudite « disparait » lors des simulations prédictives aux plus forts taux de CO_2 . Il n'y a pas d'orientation des droites de tendances privilégiée. Il en va de même pour le mode EA au niveau des tendances positives, une seule tendance positive détectée sous simulation actuelle et autant sous scénarios B1, B2 et A2. Il est également possible de remarquer que le mode Côtes ouest Afrique, pour lequel aucune tendance positive n'est détectée au cours de la simulation 20c3m, en présente deux sous scénario A2. La dominance des tendances positives sous forçage anthropique pour la fin du siècle est visible par l'exemple du mode de variabilité Mer du Nord. Ce mode est apparu trois fois avec le scénario B2, l'orientation de ses droites de tendances est marquée à la hausse quel que soit le mois.

Apparu au cours des simulations sous forçage anthropique, nous ne remarquons pas d'orientation préférée des scores factoriels associés aux configurations *Europe centrale, Europe centrale/Groenland* et *centre Atlantique*, tout comme le schéma SCAN à la différence que celui-là fut identifié pour la simulation actuelle 20c3m.

Significativité des tendances.

L'évolution des pressions du géopotentiel 500 hPa est-elle un artefact statistique et due au hasard ou a-t-elle une réalité physique ? Pour tenter de répondre à cette question, intéressons-nous maintenant à la significativité des tendances (tableaux **3.8 et 3.9**). Celle-ci est testée au moyen du test de Kendall au niveau 0,05.

Remarque. Lorsqu'une tendance est significative, cela revient à dire qu'il y a 95 % de probabilité que l'hypothèse « la pente est nulle » soit fausse.

TABLEAU 3.8 – Distribution par mois et par scénarios des tendances linéaires significatives en fonction de leur signe. La significativité est testée par le test de Kendall au niveau 0,05. + (-) signifie que la tendance est positive (négative) : valeur du coefficient directeur supérieure (inférieure) à 0,01(-0,01). = signifie que la tendance est nulle : valeur du coefficient directeur comprise entre 0,01 et – 0,01.

	Ι	Décembr	e		Janvier	ſ		Février			Total	
	+	_	=	+	-	=	+	_	=	+	_	=
B1	1			1						2		
B2				2			1			3		
A1B							2			2		
A2	2	1		3			2			7	1	
Total	3	1		6			5			14	1	
actuel 20c3m	1			1						2		

	B1	B2	A1B	A2	Total	actuel 20C3M
EA	+ 0,04				1+/3	
EA-MM	$+ 0,\!05$	+ 0.04 + 0.04		$^{+ 0,07}_{+ 0,05}_{+ 0,07}$	6+/9	$^{+ 0,06}_{+ 0,04}$
EA-WR			$+ 0,\!05$	$^{+0,04}_{+0,05}$	3+/4	
Arabie Saoudite			+ 0,05		1+/2	
Scan.				+ 0,04	1+/2	
Europe centrale				-0,04	1–	

TABLEAU 3.9 – Distribution des tendances significatives en fonction des modes de variabilité. La colonne 'total' indique le nombre de tendance significative positive par rapport au total de tendance positive pour chaque mode.

Les deux tableaux permettent de dégager plusieurs conclusions. Tout d'abord, le **tableau 3.8** renseigne que pour l'ensemble des 71 tendances de la période 2070-2099, 15 d'entre elles ont été testées significatives au test de Kendall (niveau 0,05). Ensuite, par la différenciation entre tendance positive et tendance négative, il nous permet de constater que les tests de significativité qui se sont révélés concluants concernent presque exclusivement des tendances positives (14 tendances sur 15). Enfin, on constate une élévation du nombre de tendances significatives à mesure que les émissions de gaz à effet de serre et d'aérosols estimés par les scénarios augmentent. Pour terminer, ajoutons que le nombre de tendances positives du scénario A2 augmente sensiblement (+5), il atteint le nombre de 7.

Le **tableau 3.9** est primordial car il indique quels modes de variabilité sont concernés par les tendances significatives. Il nous montre tout particulièrement que les structures Est Atlantique - Méditerranée Méridionale (EA-MM) et Est Atlantique - Ouest Russie regroupent à elles deux près des 2/3 des tendances significatives positives (9 tendances sur 15). Sur un total de 9 tendances positives, le mode EA-MM présente 6 tendances significatives, dont 3 lorsque le scénario A2 est utilisé. On note d'ailleurs une progression du nombre de tendances significatives en fonction du caractère « pessimiste » des scénarios, d'1 tendance en B1, nous passons à deux en B2 pour terminer à 3 tendances en A2.

Quant au mode de variabilité Est Atlantique - Ouest Russie, il est à noter que 3 tendances positives sur un total de 4 sont significatives d'après le test de Kendall. Parmi elles, deux sont extraites pour le plus « pessimiste » des scénarios, le scénario A2. Enfin, le cas du mode Scandinavie est à mentionner car sur les deux tendances positives qui sont disponibles chacune d'elles est significative d'après le test. De plus, il s'agit des scénarios B2 et A2, c'est-à-dire ceux qui estiment les plus fortes concentrations de gaz à effet de serre et d'aérosols dans l'atmosphère d'ici 2100. Il y a 95 % de chance que l'évolution des pressions 500 hPa qui constituent les centres d'action des modes EA-MM, SCAN et EA-WR ne soit pas un artefact statistique mais éventuellement l'influence du changement climatique. Même si par deux fois les anomalies de pression du mode EA-MM tendaient déjà vers une accentuation des pressions au cours de la période 1960-1989, ce n'est pas le cas des modes EA-WR et SCAN. En effet ces deux structures de variabilité ne présentent aucune tendance positive au cours de la période actuelle. Mais des tendances positives apparaissent lors des scénarios A1B et A2 pour le mode EA-WR et lors des scénarios B2 et A2 pour le mode SCAN. Le fait que les pentes des courbes de tendance sont significatives d'après le test de Kendall rend ces modifications intéressantes dans le contexte du changement climatique.

Comparativement au **tableau 3.7**, nous ne retrouvons pas le mode Mer du Nord – Caspienne (NCP). Malgré un total de quatre tendances positives, aucune n'a été décelée comme étant significative. Il en va de même pour le mode ONA, ni les tendances positives, ni les tendances négatives ne sont significatives.

En guise de conclusion il est important de spécifier que les tendances positives dominent globalement avec 35 tendances sur 71 qui présentent la pente de la courbe de tendance à la hausse. Ceci traduit une évolution des anomalies de pressions positives à la hausse et des anomalies négatives à la baisse, majoritairement pour les simulations climatiques sous scénario A1B et A2. Les modes de variabilité Est Atlantique - Méditerranée Méridionale (EA-MM), Est Atlantique - Ouest Russie (EA-WR) et Mer du Nord - Caspienne (NCP) détiennent la moitié des tendances positives (9, 4 et 4 respectivement). La part des tendances négatives reste identique entre les différents scénarios, au nombre de trois pour chacun. L'hypothèse B1, le plus « optimiste » des scénarios, a une part importante de tendances stables (9 tendances sur 18), sans évolution marquée par rapport à la simulation 20c3m. La part des tendances positives augmente ensuite avec l'hypothèse A1B, s'élevant de 5 à 12 tendances; le nombre de courbes négatives et stables est ainsi réduit. En revanche, l'hypothèse du scénario B2, davantage « pessimiste » que les deux précédents, perd près de la moitié des tendances positives au détriment des tendances négatives (3 sur 18). L'évolution des pressions de géopotentiel 500 hPa se démarque de plus en plus, que ce soit vers une tendance positive ou négative. En effet, par rapport à la simulation 20c3m sur la période 1960-1989, le nombre de tendances futures sans évolution marquée sur la période 2070-2099 diminue au fur et à mesure que « l'agressivité » des scénarios d'émissions grandit ; sur un total de 18 tendances détenu par chaque scénario, la part des tendances stables passe de 9 (B1) à 7 (B2) puis 4 (A2) tendances (**tableau 3.6**).

Parmi les 71 tendances extraites pour l'ensemble des modes de variabilité, 15 d'entre elles sont significatives, dont 14 se révèlent être positives. Le mode EA-MM détient 6 courbes de tendances significatives sur 9, EA-WR 3 sur 4. Cette conclusion laisse à penser que les pôles positifs (centres d'action de hautes pressions) se renforceraient et les pôles négatifs (centres d'action de basses pressions) se creuseraient davantage. Les dipôles seraient accentués impliquant alors des amplitudes de gradients de pression plus grandes. Ces modifications aboutiraient à une intensification de la circulation atmosphérique sur les zones d'influence des modes de variabilité concernés. Il s'agit des modes EA-MM, EA-WR, NCP et SCAN. Dans le cas de la tendance significative négative du mode Europe centrale l'impact sur la circulation atmosphérique serait différent, nous assisterions à un ralentissement du flux d'air. Notons que le test de Kendall révèle que le renforcement du flux atmosphérique entre les pôles d'anomalies de pression négative et positive associés aux modes susmentionnés ne serait pas un artefact statistique de la méthode d'ACP-R dans 95 % des chances, mais soit le fruit du changement climatique.

4.2. Fréquences d'occurrence des types de circulation

Chaque mode de variabilité fluctue dans le temps, les pressions qui le constituent varient en termes d'intensité et d'amplitude. La **figure 3.31.b** montre un exemple de variations temporelles du mode de variabilité ONA sur la période de temps 1960-1989. Nous pouvons voir que les centres d'action (pôles de pressions) se distinguent par leur signe et leurs localisations géographiques (**figure 3.31.a**). La figure montre plus précisément un dipôle, c'est-à-dire une opposition de phase entre les deux pôles. L'un se situe au niveau du Groenland de signe négatif, tandis que l'autre occupe l'espace autour de l'Archipel des Açores (30°W, 35°N) et est de signe positif.

C'est ainsi que l'ONA présente deux types de circulation distingués chacun par le signe des pôles d'action. Nous parlerons ici de *types de circulation* auxquels sont associés une phase positive et une phase négative. La variabilité temporelle représentée en **figure 3.31.b** montre l'intensité de la circulation/du flux d'air de l'ONA sur l'ensemble de la période. C'est pourquoi, pour étudier les types de circulation, nous nous limitons aux *pics d'intensité extrême* de chaque série temporelle des modes de variabilité. Chaque phase est représentée par les scores extrêmes qui lui appartiennent. Pour rappel, les scores représentent l'évolution du géopotentiel 500 hPa sur les points de grille les mieux corrélés au facteur (ici, l'ONA). Nous obtenons donc l'évolution des géopotentiels 500 hPa du facteur dans le temps.

Pour obtenir les scores associés aux pics, nous avons fixé le seuil des scores d'intensité extrême à 1 en valeur absolue. En effet, si nous prenions la limite de 0,5 en valeur absolue, les circulations obtenues s'éloignaient alors plus fortement des circulations des scores extrêmes positifs et négatifs. Plusieurs types de circulations différents les uns des autres auraient été retenus et mélangés. Avec la limite à 1 en valeur absolue, le nombre de scores extrêmes ainsi comptabilisés varie de 2 à 8 par mode de variabilité, nous disposons donc d'un total de 670 types de circulation futurs sur 30 ans.



FIGURE 3.31 - Première composante principale d'anomalies de hauteurs du géopotentiel 500 hPa mensuelles de réanalyses NCEP pour la saison hivernale (décembre-février) sur la période 1960-1989 couvrant le domaine Nord Atlantique-Europe (60°W-60°E, 20°N-70°N). a) schéma spatial; b) chroniques temporelles.

L'objectif de cette analyse est de voir si une modification des types de circulation futurs peut être perçue par rapport aux types de circulation actuels. Nous avons pour cela calculé les fréquences d'occurrences sur la base de deux périodes de 30 ans. Premièrement, les conditions climatiques futures (période 2070-2099) sous forçage anthropique par gaz à effet de serre sont représentées par les scénarios d'émissions B1, B2, A1B et A2. Nous analysons les champs de hauteurs de géopotentiel 500 hPa directement issus des simulations climatiques forcées par ces scénarios. La variable géopotentiel 500 hPa sert à caractériser la circulation atmosphérique d'altitude (Wallace et Gutzler, 1981). Deuxièmement, les conditions climatiques actuelles (période 1960-1989) sans scénario d'émissions sont représentées pour leur part par la simulation 20c3m.

Les types de circulation sont identifiés grâce la position des isobares vis-à-vis de la région Nord-Pas de Calais. En effet, l'objectif de ce travail est d'étudier l'impact d'éventuelles modifications de la circulation atmosphérique suite à un forçage anthropique sur la distribution spatio-temporelle de polluants sur la région Nord-Pas de Calais. Nous nous sommes donc appuyées sur les types de circulation calculés à partir des scores extrêmes (**tableau 3.10**) et nous les avons considérés comme représentatifs des circulations dominantes associées aux modes de variabilité des hauteurs de géopotentiel 500 hPa sur les mois considérés.

TABLEAU 3.10 - Spécification des années extrêmes positives et négatives de chaque mode de variabilité selon les mois et les simulations, ainsi que le type de circulation associé (Marais : marais barométrique ; SW : méridienne de sud-ouest ; NW : méridienne de nord-ouest ; N : méridienne de nord ; Z : zonale).

$ \begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $		20	c3m			I	31]	32	
$ \begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $	Mode		Année	Type	Mode		Année	Type	Mode		Année	Type
$\begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$		Déce	embre			Déce	embre			Déce	embre	
$ \begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	M Occid	+	1979	Marais	ONA	+	2098	N	ONA	+	2076	Marais
$\begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	11100014	_	1976	SW	01.11	_	2086	Z	01.11	_	2088	SW
$\begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	EA	+	1978	SW	EA-WB	+	2086	Z	EA	+	2000	SW
$\begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	Lit	_	1982	NW		_	2000	SW	Lit	_	2093	Z
$ \begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	EA-WR	+	1984	Z	Arabie S	+	2074	NW	EA-WR	+	2082	NW
$ \begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$		_	1983	Z	THUBIC 5	_	2081	Z		_	2082	SW
$\begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	EA-MM	+	1979	Marais	EA	+	2001	NW	Casp	+	2000	NW
$\begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$		_	1962	NW		_	2006	Z	Cup	_	2085	NW
$\begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	NCP	+	1980	N	EA-MM	+	2000	Marais	Mer N	+	2000	Z
$\begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	1001	_	1961	Z		_	2072	Z		_	2079	SW
$\begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	ONA	+	1985	NW	Oscil M	+	2082	SW	CôtesWA	+	2096	N
$\begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	01111	_	1987	Z	Obolini	_	2092	Z	0000000000	_	2000	Z
$ \begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$			1001				2000				2000	
$\begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$		Jai	nvier			Jar	nvier			Jaı	nvier	
$\begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	EA-WR	+	1976	NW	EA-MM	+	2081	NW	EA	+	2072	Ζ
$\begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$		_	1968	NW		_	2070	Ζ		_	2074	NW
$\begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	ONA	+	1967	Z	ONA	+	2090	Ζ	ONA	+	2070	Ζ
$\begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$		_	1978	NW		_	2089	Ζ		_	2097	Marais
$ \begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	CôtesWA	+	1964	Ζ	Centre A	+	2071	Ν	EA-WR	+	2094	Ζ
$\begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$		_	1986	Ν		_	2097	SW		_	2070	Ζ
$ \begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	SCAN	+	1989	Z	EA-WR	+	2076	Ζ	Europe C	+	2080	SW
$\begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$		_	1975	NW		_	2097	SW	*	_	2082	NW
$ \begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	EA-MM	+	1973	Z	CôtesWA	+	2094	SW	EA-MM	+	2086	Ζ
$\begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$		_	1960	NW		_	2079	NW		_	2087	NW
$\begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	EA	+	1986	Ν	SCAN	+	2075	NW	Mer N	+	2083	Ζ
$ \begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$		_	1979	SW		_	2077	SW		_	2071	Z
$\begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $												
$ \begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$		Fé	vrier			Fé	vrier		Février			
$\begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	EA	+	1974	NW	EA-MM	+	2089	Ζ	EA	+	2081	SW
ONA + 1969 Z ONA + 2089 Z ONA + 2093 Z - 1966 N - 2090 Z - 2084 NW NCP + 1971 Z EA-WR + 2080 Z EA-MM + 2087 N - 1968 N - 2096 Z - 2091 NW SCAN + 1983 N EA + 2086 SW Ouest R + 2074 Marais - 1978 N - 2087 N - 2071 Z		_	1979	Ζ		_	2087	Ν		_	2076	NW
$ \begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	ONA	+	1969	Ζ	ONA	+	2089	Ζ	ONA	+	2093	Z
$ \begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$		_	1966	Ν		_	2090	Ζ		_	2084	NW
$ \begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	NCP	+	1971	Ζ	EA-WR	+	2080	Ζ	EA-MM	+	2087	Ν
$\begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$		_	1968	Ν		_	2096	Z		_	2091	NW
– 1978 N – 2087 N – 2071 Z	SCAN	+	1983	Ν	EA	+	2086	SW	Ouest R	+	2074	Marais
		_	1978	Ν		_	2087	Ν		_	2071	Ζ
m Afr.W + 1965 Marais Arabie S + 2085 N Mer N + 2085 N	Afr.W	+	1965	Marais	Arabie S	+	2085	Ν	Mer N	+	2085	Ν
– 1976 N – 2078 SW – 2075 Z		_	1976	Ν		_	2078	SW		_	2075	Z
Arabie S $+$ 1981 NW Côtes WA $+$ 2070 Z	Arabie S	+	1981	NW	CôtesWA	+	2070	Z				
- 1965 Marais $-$ 2074 N		_	1965	Marais		_	2074	Ν				

TABLEAU 3.10 – suite

	А	.1B			-	A2	
Mode		Année	Type	Mode		Année	Type
	Déce	embre			Déc	embre	
ONA	+	2078	Ζ	ONA	+	2081	Ζ
	_	2073	Ν		—	2076	Ν
EA-WR	+	2090	Ζ	EA-WR	+	2073	NW
	-	2081	Ν		—	2070	NW
CôtesWA	+	2084	Ζ	EA-MM	+	2097	Ν
	_	2086	NW		—	2073	NW
NCP	+	2094	Ζ	EA	+	2080	Ν
	_	2096	Marais		—	2072	Ζ
EuropeC.	+	2099	Ζ	SCAN	+	2090	Marais
	_	2079	SW		—	2070	NW
EA-MM	+	2099	Ζ	EuropeC.	+	2073	NW
	_	2071	Ν		—	2075	SW
	Jar	nvier			Ja	nvier	
ONA	+	2090	Ζ	Centre A.	+	2079	SW
	_	2083	SW		_	2077	Ν
EA	+	2094	SW	Eur.C+G	+	2084	Z
	_	2087	NW		_	2072	NW
EA-WR	+	2075	Ζ	EA-WR	+	2096	Ζ
	_	2072	Marais		_	2097	Ζ
Arabie S.	+	2097	NW	NCP	+	2093	Marais
	_	2080	Ζ		_	2071	Ζ
NCP	+	2083	SW	EA-MM	+	2092	SW
	_	2092	NW		_	2074	NW
EuropeC.	+	2088	NW	CôtesWA	+	2098	Ζ
-	_	2084	SW		_	2077	Ν
	Fé	vrier			Fé	vrier	
Eur C+G	+	2085	SW	Centre A	+	2080	N
Edite + G	_	2088	N	Contro II.	_	2000	N
NCP	+	2000	Z	NCP	+	2035	Z
1101	_	2050	N	1101	_	2085	Z
Centre A	+	2012	N	EA-MM	+	2000	Marais
Contro 11.	_	2000	Z		_	2030	N
EA-WB	+	2089	SW	Eur.C+G	+	2000	N
	_	2005	NW	Lui.0+0	_	2032	Z
Arabie S	-	2000	NW	EA-WB	+	2086	Z
manic D.		2030	Z	TTT- 4410	T _	2000	Z
CôtesW∆	-	2004	N	CôtesWA	+	2005	NW
COUCSWA		2083	NW	COUGWA	1°	2054	Marais
	_	2000	TAAA		_	2012	11121213

Les principaux types de circulation identifiés sur la région Nord Atlantique – Europe, et plus précisément sur la région Nord-Pas de Calais, sont la circulation *zonale*, la circulation *méridienne de nord et de nord-ouest*, la circulation *méridienne de sud-ouest* et le *marais barométrique*. Ces quatre dynamiques atmosphériques s'accompagnent de spécificités de flux d'air que sont la confluence du flux, la diffluence du flux, le talweg ou encore le système de dorsale (**figure 3.32**).



FIGURE 3.32 – Quelques types de circulation issus des pics d'intensité extrême des séries temporelles des modes de variabilité. a) circulation zonale ; b) circulation méridienne de nord-ouest ; c) marais barométrique ; d) circulation méridienne de sud-ouest accompagnée d'une diffluence du flux ; e) diffluence du flux ; f) crête de dorsale. Hauteurs du géopotentiel 500 hPa (mgp).

4.2.1. Types de circulations saisonniers

Nous avons donc répertorié les 670 pics d'intensité extrême appartenant à l'ensemble des modes de variabilité futurs, distingués par scénario et par mois, plus les 162 pics issus de la simulation 20c3m. Celle-ci constitue la série dite de référence, c'est la base sur laquelle nous menons la comparaison entre types de circulation des conditions climatiques actuelles (simulation 20c3m) et types de circulation des conditions climatiques qu'elles pourraient être sous forçages anthropiques (simulations intégrant les scénarios d'émissions B1, B2, A1B et A2). Le **tableau 3.11** permet donc

d'étudier l'évolution des fréquences d'occurrence des types de circulation à l'échelle saisonnière. A noter, que la ligne intitulée « total scores » spécifie le nombre total de scores comptabilisés comme scores extrêmes (limite fixée à 1 en valeur absolue).

TABLEAU 3.11 – Evolution à l'échelle mensuelle et saisonnière des fréquences d'occurrence (%) des types de circulation de chaque scénario par rapport à la série de référence actuel-20c3m. M. Nord : méridienne de nord ; M. Sud W. : méridienne de sud-ouest ; Marais B. : marais barométrique ; entre parenthèses, augmentation ou diminution (en %) de chaque type de circulation futur par rapport à 20c3m.

		série réf. actuel 20c3m	B1	B2	A1B	A2
DECEMDDE	Zonale	40%	53%~(+34%)	18% (-55%)	65%~(+65%)	54%~(+35%)
DECEMBRE	M.Nord	42%	24% (-44%)	39%~(-6%)	16% (-61%)	34% (-19%)
	M.Sud W.	15%	$12\% \ (-19\%)$	39%~(+169%)	16%~(+12%)	9%~(-39%)
	Marais B.	4%	12% (+182%)	4% (-14%)	2% (-51%)	4% (-14%)
	Diffluence	33%	22% (-35%)	29% (-14%)	10% (-69%)	30% (-9%)
	Total scores	48	51	56	49	56
	Zonale	39%	41% (+4%)	55%~(+39%)	43% (+10%)	54% (+36%)
JANVIEN	M.Nord	41%	33% (-20%)	28% (-31%)	37%~(-9%)	20% (-52%)
	M.Sud W.	9%	$18\% \; (+102\%)$	$9\%\;(+6\%)$	16%~(+84%)	$25\%\ (+180\%)$
	Marais B.	11%	8% (-23%)	8% (-30%)	3% (-72%)	2% (-83%)
	Diffluence	30%	13% (-57%)	25%~(-19%)	24% (-21%)	29% (-6%)
	Total scores	56	61	53	67	56
FEVBIEB	Zonale	31%	43%~(+39%)	29% (-6%)	50%~(+61%)	$47\% \; (+53\%)$
	M.Nord	66%	36%~(-45%)	$56\% \ (-14\%)$	36%~(-45%)	39%~(-40%)
	M.Sud W.	0%	10%	10%	14%	5%
	Marais B.	3%	10% (+200%)	4% (+21%)	0% (-100%)	8% (+146%)
	Diffluence	24%	21% (-14%)	$38\%\;(+55\%)$	9% (-63%)	15% (-37%)
	Total scores	58	58	48	56	59
SAISON	Zonale	36%	45% (+24%)	$34\% \ (-7\%)$	52% (+42%)	51% (+41%)
57115017	M.Nord	50%	31% (-38%)	41% (-18%)	31%~(-38%)	31%~(-38%)
	M.Sud W.	7%	$14\%\;(+83\%)$	20%~(+175%)	16%~(+112%)	13%~(+74%)
	Marais B.	6%	$10\% \ (+62\%)$	5% (-17%)	2% (-72%)	5% (-24%)
	Diffluence	29%	18% (-37%)	30%~(+3%)	15% (-48%)	25% (-15%)
	Total scores	162	170	157	172	171

Scénario B1.

Nous remarquons en premier lieu une importante hausse de la fréquence d'occurrence de circulation zonale par rapport au climat actuel, de 36 % à 45 % qui se traduit par une augmentation de 24 %(soit un passage de 59 à 77 scores). L'augmentation transcrit principalement l'évolution des mois de décembre et février. La baisse de circulation méridienne de nord et de nord-ouest, également visible lorsque l'étude est menée mois par mois, est retrouvée pour le scénario B1. Par rapport à la période actuelle, si les conditions climatiques de l'hypothèse B1 venaient à se produire, la fréquence d'occurrence de circulation méridienne de nord ou de nord-ouest qui soufflerait sur la région Nord-Pas de Calais passerait de 50 % à 31 %. Enfin, nous pouvons noter une augmentation de la fréquence d'apparition des situations de marais barométrique, passant de 6 % à 10 %, soit une augmentation de 62 %, rehaussant ainsi l'occurrence sous scénario B1. Comparé aux circulations de la fin du 20^{ème} siècle, celles de la fin du 21^{ème} siècle seraient dominées par la présence d'une circulation zonale apportant en plus grand nombre des perturbations atlantiques à l'origine d'épisodes pluvieux. Ces derniers peuvent favoriser la réduction des concentrations de polluants dans l'atmosphère par suite d'événements de lessivage plus fréquents. Au vu de la baisse d'occurrence de situations méridiennes de nord et de nord-ouest, nous pouvons dire que les flux d'air reçus sur la région Nord-Pas de Calais seraient davantage expliqués par la présence de circulations zonales, faisant par la même occasion profiter la région de l'influence océanique atlantique. La fréquence d'occurrence des circulations méridiennes de sud-ouest à la fin du 21^{ème} siècle montre une évolution notable par rapport au 20^{ème} siècle avec une augmentation de 83 % (passage des fréquences de 7 % à 14 %). Le phénomène de diffluence entraine un ralentissement du flux causé par un élargissement des isobares de géopotentiel. De ce fait, la durée de résidence des polluants transportés par les masses d'air et qui arrivent audessus de la région Nord-Pas de Calais est augmentée jusqu'à destruction chimique ou lessivage par dépôt sec ou humide des substances polluantes présentes dans les basses couches de l'atmosphère. A titre d'exemple, les épisodes de sécheresse qu'a connu la France au cours de l'année 1976 s'expliquent en partie par le phénomène de diffluence (Brochet, 1977). Pour le forçage B1, nous pouvons voir que la fréquence d'occurrence au cours de la saison est largement inférieure à celle de la période actuelle, passant de 29 % à 18 % (soit une diminution de 37 %). Si le champ de pressions 500 hPa estimé par le scénario B1 se produit pour la fin du siècle, alors il se pourrait que les habitants de la région Nord-Pas de Calais soient exposés moins souvent à des épisodes de pollution.

Scénario B2.

Aucune évolution marquée des circulations zonales (fréquences de 36 % à 34 %) et de marais barométrique (fréquence de 6 % à 5 %) n'est à constater par rapport à la série de référence. En revanche, il est important de souligner la forte baisse de la fréquence d'occurrence appartenant au type de circulation « méridienne de nord » par rapport à 20c3m passant de 50 % à 41 % (soit une diminution de 18 %), ce qui revient à un écart de fréquence entre les deux périodes de 9 %. De ce fait l'évolution en termes de types de circulations se situe d'une part, au niveau de la baisse de fréquence du type « méridienne de nord » que nous venons d'évoquer et d'autre part, au niveau de la hausse du type « méridienne de sud - ouest ». Cette dernière s'illustre par l'évolution des fréquences respectives entre période actuelle et période future de 7 % à 20 %, soit 175 % d'augmentation. Au niveau de la saison et du phénomène de diffluence du flux, l'exposition de la région Nord-Pas de Calais ne serait pas modifiée à la fin du $21^{\text{ème}}$ siècle par rapport à la situation actuelle.

Scénario A1B.

Les fréquences d'occurrence des 4 types de circulations futurs répertoriés au cours du scénario A1B laissent apparaitre des évolutions particulières par rapport à la période actuelle. Tout d'abord une évolution à la baisse de l'apparition de marais barométrique fait passer de 6 % à 2 % les fréquences d'occurrence. Ensuite, les circulations méridiennes de nord et nord-ouest accusent également une diminution importante de leurs fréquences appartenant respectivement à la simulation 20c3m et A1B traduite par une diminution de 38 % (fréquences de 50 % à 31 %). Ceci revient à un écart de fréquence de 19 %. Cette baisse est toutefois contrecarrée par l'augmentation de l'apparition d'un courant d'air de sud-ouest, passage des fréquences de 7 % à 16 %, soit une augmentation de 112 %. Les mouvements atmosphériques zonaux présentent également une hausse très marquée. L'apparition de ce type de circulation par rapport aux conditions actuelles augmente de 42 %. Il s'agit en outre d'un écart de fréquence de 15 % entre 20c3m et A1B, traduite par un gain pour le type « zonal ». Notons également que la présence de situations atmosphériques dites de « diffuence » diminue fortement sous scénario A1B. La région Nord-Pas de Calais serait donc moins souvent soumise à une baisse de vitesse du courant atmosphérique (diminution de 48 % de l'occurrence). Au cours d'une saison hivernale, la région serait donc balayée par un flux d'ouest atlantique (zonal) rapide environ 52 % du temps. Enfin, la région continuerait d'être influencée, d'un côté par les circulations méridiennes de nord et nord-ouest, par transport de polluants émis dans les grandes villes du Royaume-Uni, et de l'autre, par les substances chimiques en provenance de la Péninsule Ibérique ou de Bretagne déplacées par les circulations méridiennes de sud-ouest.

Scénario A2.

Le scénario A2 le plus « pessimiste » montre deux modifications majeures par rapport à la période actuelle en termes de nombre de scores extrêmes. Sous l'angle de la saison, le type de circulation « méridienne nord et nord-ouest » apparaitrait moins souvent à la fin du $21^{\text{ème}}$ siècle par rapport à la fin du $20^{\text{ème}}$ siècle Cela représente un passage de fréquence de 50 % à 31 % soit une diminution de 38 %. Cela signifie un écart de fréquence de 19 %. Le type de circulation « zonale » présenterait lui aussi une évolution marquée par rapport à la période actuelle avec une hausse des fréquences d'occurrence de 36 % à 51 %, soit une augmentation de 41 %. Une faible différence de fréquence (1 %) est à noter pour les circulations de marais barométrique, avec une baisse d'apparition de 24 %. Le tableau indique aussi que les circulations de type « méridienne de sud-ouest » seraient plus nombreuses à la fin du $21^{\text{ème}}$ siècle sous forçage A2 avec une augmentation marquée des fréquences d'occurrence de 74 % (passage des fréquences de 7 % à 13 %). Les résultats ainsi énoncés indiquent

que les situations atmosphériques issues du champ géopotentiel 500 hPa présent au-dessus de la région Nord-Pas de Calais pour la période 2070-2099 montrent des changements par rapport à la période 1960-1989 du point de vue des fréquences d'occurrence. La région serait davantage soumise aux flux d'air océaniques apportant des perturbations Atlantiques à l'origine d'épisodes pluvieux. Cela se répercuterait sur les phénomènes de lessivage des polluants dans l'atmosphère. Enfin, la région serait moins souvent exposée aux masses d'air potentiellement polluées du Royaume-Uni. La baisse du flux atmosphérique caractérisée par le phénomène de diffluence serait en légère baisse sous le forçage anthropique A2 par rapport à la situation actuelle au cours de la saison hivernale (fréquence d'occurrence d'environ 29 % à 25 %).

4.2.2. Types de circulations mensuels

Cette partie reprend l'évolution de l'occurrence des types de circulation, non plus à l'échelle saisonnière mais à l'échelle mensuelle.

Le tableau indique le nombre d'occurrence de chaque type de circulation identifié en deuxième colonne. Les valeurs de la série de référence servent de base au calcul de l'évolution des types de circulation futurs, les gains ou les pertes d'occurrence figurent dans le tableau, ainsi que la fréquence d'occurrence des types de circulation. En comparant les résultats de chaque scénario à la période de référence nous pouvons voir que les résultats sont hétérogènes.

Tout d'abord nous notons une augmentation du type zonal pour tous les mois et tous les scénarios sauf pour décembre et février du forçage B2 (baisse de fréquence de 55 % et 6 % par rapport à 20c3m). Parmi ces augmentations, certaines sont marquées, comme c'est le cas pour le mois de décembre sous forçage A1B avec une fréquence d'occurrence passant de 40 % à 65 % entre la période actuelle et la période future. Une situation similaire est constatée pour le mois de février sous les forçages A1B et A2, avec respectivement des fréquences passant de 31 % à 50 % et 47 %. La circulation de type zonale serait donc plus présente et entrainerait avec elle des perturbations d'origine atlantique. Les masses d'air, chargées d'humidité après leur passage au-dessus du bassin Atlantique, seraient à l'origine de précipitations capables d'intervenir sur les quantités de particules en suspension. Le lessivage des particules consécutif aux pluies réduirait ainsi leurs concentrations dans l'air.

Ensuite, pour ce qui se rapporte aux circulations de type « méridienne nord et nord - ouest » lors des mois de décembre nous pouvons voir un consensus général qui se dégage des résultats allant vers une diminution des fréquences d'occurrence plus ou moins marquée (de -6 % à -61 %) de l'occurrence de ce type de circulation au-dessus de la région Nord-Pas de Calais. En janvier et février, il n'y eut quasiment que des baisses d'apparition de détectées. La totalité des 12 situations futures possibles présenteraient une baisse des fréquences d'occurrence des circulations méridiennes de nord et nord – ouest.

Concernant les circulations de type « méridienne sud - ouest », nous notons uniquement des augmentations d'occurrence sauf sous scénarios B1 et A2 lors des mois de décembre (respectivement

passage d'une fréquence de 15 % à 12 % et 9 %). Globalement, nous pouvons signaler une hausse de ce type de circulation sur la région Nord-Pas de Calais pour la fin du 21^{ème} siècle. Dans ce cas l'arrivée de masses d'air provenant du sud-ouest de la région serait plus fréquente. De façon plus générale, pour les circulations méridiennes, les quantités de polluants retrouvées en région Nord-Pas de Calais dépendraient alors de l'environnement traversé par les masses d'air sur leurs trajectoires, d'autant plus que les polluants peuvent être transportés sur de longues distances, loin de leur zone de rejet. Par exemple, une baisse des circulations méridiennes de nord - ouest signifierait une moindre part jouée par la Grande - Bretagne dans la diffusion de polluants sur la région. Malgré tout, le flux d'air arrivant sur la région Nord-Pas de Calais serait préférentiellement sous influence zonale quel que soit le scénario d'émission. Dans le cas d'un flux de sud-ouest, le courant atmosphérique transporterait sur la région les polluants potentiellement issus de la pointe de la Bretagne ou de la côte occidentale de la péninsule Ibérique (**figure 3.33**). La circulation de nord-ouest quant à elle risque d'apporter sur la région les masses d'air polluées en provenance de Grande - Bretagne (**figure 3.33**).



FIGURE 3.33 – Exemples de circulations méridiennes du mois de février avec le scénario A1B. a) circulations méridiennes de sud-ouest; b) circulations méridiennes de nord-ouest. Hauteurs du géopotentiel 500 hPa (m).

Le type de circulation « marais barométrique » présente des évolutions par rapport à la situation actuelle intéressantes et ce quel que soit le mois et le scénario. D'importantes hausses apparaissent, comme celles associées au forçage B1 en décembre et février (augmentations respectives de fréquence de 182 % et 200 %) ou celle du forçage A2 de février (augmentation de fréquence de 146 %). Toutefois, la tendance générale est marquée par la baisse d'apparition des marais barométriques. En effet, sur 12 situations atmosphériques futures possibles, 8 laisseraient apparaitre moins souvent ce type de phénomène. Afin d'illustrer nos propos voici quelques exemples. Une importante chute de fréquence d'occurrence concerne le scénario A2 en janvier (diminution de fréquence de 83 %). Le forçage A1B au cours des mois de janvier et février serait lui aussi responsable des baisses de

fréquence respectives des marais barométriques de 72 % et 100 %. Dans ce dernier cas, cela signifie que les situations de marais n'apparaitraient plus à la fin du $21^{\text{ème}}$ siècle au cours des mois de février appartenant aux années associées aux pics d'intensité les plus extrêmes. Un marais barométrique est définit comme une zone dans laquelle les isobares sont espacées. Les variations de pression y demeurent donc très faibles. De telles situations atmosphériques étant favorables à la stationnarité de l'air, elles sont souvent associées par exemple à des épisodes de smog.

Enfin, la tendance générale est engagée vers une baisse d'occurrence des situations de diffluence du flux atmosphérique pour la fin du $21^{\rm eme}$ siècle. Excepté une hausse de fréquence de 55 % (fréquence d'occurrence de 24 % à 38 %) lors du mois de février sous forçage B2, les autres possibilités d'évolution sont soit une situation similaire (décembre et janvier A2), soit une baisse d'occurrence. Dans ce dernier cas, certaines baisses sont plus marquées que d'autres comme c'est le cas de décembre A1B (-51 % de fréquence), de janvier B1 (-57 % de fréquence) et de février A1B (-63 % de fréquence).

4.2.3. Conclusion sur les fréquences d'occurrence des types de circulation

Lorsque l'on observe les fréquences d'occurrence sous l'angle de la saison, nous nous apercevons que les valeurs des fréquences sont partagées entre hausse et baisse entre la période actuelle et la période future représentée par les 4 scénarios d'émissions. Les valeurs d'occurrence de la circulation zonale sont majoritairement à la hausse hormis une diminution lors du scénario B2 (36 % à 34 %). Ce constat laisse présager d'une influence plus grande du bassin océanique de l'Atlantique et du flux d'ouest sur la répartition des polluants sur la région Nord-Pas de Calais. La situation est complètement différente pour les circulations méridiennes de nord et nord-ouest. Comparé à la période 1960-1989, l'ensemble des 4 scénarios présentent des modifications d'occurrences traduisant des diminutions. En effet, des baisses de 18 % à 38 % sont à noter, l'apport de polluants en provenance de Grande-Bretagne sur la région Nord-Pas de Calais en serait donc réduit. Les circulations méridiennes de sud-ouest et de diffluence évoluent quelque peu vers une augmentation et une diminution des fréquences d'occurrence respectivement. Nous remarquons d'importantes hausses de fréquences de 112 % (A1B) ou 175 % (B2) causant potentiellement l'arrivée plus fréquente de masses d'air de sudouest (circulations méridiennes de sud-ouest) et de substances chimiques émises en Bretagne, au Portugal ou encore en Espagne. Du côté des phénomènes de diffluence, nous remarquons une tendance à la baisse des fréquences d'occurrence, notamment dans le cas de la simulation du scénario A1B. Le type diffuence implique un ralentissement du flux atmosphérique sur la région et sa diminution d'apparition induit par conséquent un risque moins élevé du phénomène de stagnation des polluants. L'apparition de situation de marais barométrique est globalement diminuée entre période actuelle et période future. La simulation du scénario A1B montre une diminution d'apparition de ce type de circulation de 72 %. Ceci reste toutefois à nuancer car le scénario B1 dévoile quant à lui une augmentation marquée d'occurrence (+62 %).

L'échelle saisonnière dissimule les variations d'occurrence à l'échelle mensuelle. Malgré tout, si nous nous limitons aux variations à l'échelle mensuelle, nous pouvons voir que les conclusions précédentes persistent. Si l'on s'en tient à l'ensemble des scénarios disponibles, nous constatons différentes évolutions des fréquences d'occurrence :

- une hausse généralisée des circulations méridiennes de sud-ouest. Sur les 12 situations atmosphériques futures possibles, seules deux seraient responsables de la baisse des fréquences d'occurrence de ce type de circulation, toutes deux en décembre,
- une hausse généralisée des circulations zonales. Dix situations atmosphériques futures engageraient un flux d'air d'origine océanique. Les deux diminutions de fréquence que nous ayons notée apparaissent sous l'hypothèse du scénario B2 ;
- une baisse commune à tous les mois et scénarios des circulations méridiennes de nord et nordouest. L'apport moins grand de polluants sur la région Nord-Pas de Calais en provenance du Royaume - Uni serait donc perceptible ;
- une baisse des situations de marais barométriques constatées pour 8 situations atmosphériques futures sur un total de 12. Les hausses de fréquences sont toutefois répertoriées principalement au cours des mois de février. A noter que parmi les 4 augmentations, deux appartiennent au scénario B1 ;
- une baisse généralisée des phénomènes de diffluence sur la région Nord-Pas de Calais.

Situations de hautes et basses pressions sur la région Nord-Pas de Calais.

Le **tableau 3.12** permet de se rendre compte de l'évolution des situations de hautes et de basses pressions sur la région Nord-Pas de Calais. Rappelons que les valeurs présentées dans ce tableau considèrent les circulations moyennes mensuelles sur l'ensemble de la période d'étude, soit 30 années (1960-1989 pour 20c3m et 2070-2099 pour les scénarios B1, B2, A1B et A2). L'étude se fonde donc sur une série de 30 variables (1 variable = circulation moyenne sur 1 année) selon le mois considéré. Le **tableau 3.12** complète le **tableau 3.11**. Enfin, précisons que certaines circulations moyennes mensuelles ne sont pas comptabilisées dans le tableau à cause de l'impossibilité d'associer la région à des hautes ou des basses pressions.

		série réf. actuel 20c3m	B1	B2	A1B	A2
DECEMBRE	BP	20	15	19	15	13
	HP	10	13	7	13	15
JANVIER	BP	26	21	26	17	19
	HP	3	7	4	13	10
FEVRIER	BP	29	21	23	18	18
	HP	1	8	5	10	9
SAISON	BP	75	57	68	50	50
	HP	14	28	16	36	34

TABLEAU 3.12 – Evolution à l'échelle mensuelle et saisonnière du nombre d'apparition (en année) des situations de hautes et basses pressions sur la région Nord-Pas de Calais pour chaque scénario par rapport à la série de référence actuel-20c3m. HP : hautes pressions ; BP : basses pressions.

Commençons par limiter l'analyse à l'échelle mensuelle. Sur un total de 12 situations atmosphériques futures possibles, 10 d'entres elles montrent une baisse du nombre d'années lors desquelles la région se situe sous des basses pressions et ce par rapport à la situation actuelle. C'est lors de la simulation par le forçage B2 que ce nombre d'années varie le moins, en effet au cours des mois de décembre et janvier les valeurs restent stables (respectivement 19 et 26). Ceci se traduit en termes météorologiques par l'ascension de l'air responsable de la baisse des températures. La masse d'air peut atteindre sa valeur de saturation en humidité, s'en suit la condensation de la vapeur d'eau et la formation de nuages.

Pour l'évolution des situations de hautes pressions pour la région, l'évolution est inversée par rapport aux basses pressions. En effet, 8 situations atmosphériques futures sur 12 montrent une augmentation du nombre d'années pour lesquelles le territoire régional du Nord-Pas de Calais est situé sous des hautes pressions par comparaison à la situation actuelle. La hausse concerne au minimum une augmentation de 4 années. A ces 8 situations, nous pouvons ajouter 2 situations correspondant à des hausses plus modérées de 3 années (décembre B1 et A1B). Une zone de haute pression concerne du point de vue météorologique la subsidence de la colonne d'air et donc l'augmentation de sa température. Le sol est alors échauffé et sec ce qui limite la formation des nuages.

Concernant l'évolution à l'échelle saisonnière, les résultats sont concordants avec les conclusions précédentes. Toutefois, si les diminutions d'apparition des situations des basses pressions concernent tous les mois et les scénarios, il n'en est pas de même pour l'augmentation des situations de hautes pressions. C'est le scénario B2 qui présente le moins de changement par rapport à la situation actuelle (1960-1989). Cette situation s'explique par le fait que d'une part, une baisse d'apparition de hautes pressions, même légère, se produit au cours des mois de décembre, et d'autre part les hausses en janvier et février restent modérées (+1 et +4 respectivement).

En raison de la reproductibilité imparfaite du modèle, il est important de rappeler que l'estimation des futures modifications au sein des modes de variabilité réalisée dans ce manuscrit nécessite une certaine précaution vis-à-vis de la robustesse des résultats.
[Partie 2]

Régimes de temps et changement climatique

De par les situations atmosphériques qu'ils représentent, les *régimes de temps* sont associés aux conditions météorologiques à l'échelle régionale. En effet, en guise d'exemple, la localisation des systèmes de pressions (dépressions, anticyclones) et l'amplitude du gradient de pression entre les cellules déterminent la trajectoire et la force des vents.

La persistance moyenne et la fréquence d'occurrence des régimes sont deux notions qui les caractérisent. Si le forçage anthropique venait à les modifier, les conséquences météorologiques (du point de vue des statistiques) pourraient elles aussi être influencées. Rappelons que l'étude n'a pas pour objectif de s'intéresser directement à la relation entre régimes de temps et temps qu'il fait, mais devant son importance nous nous devions de l'évoquer. C'est pourquoi, pour faire écho à ce lien, même partiellement, ce chapitre s'intéresse à l'éventuelle influence que peut avoir le forçage anthropique sur les régimes de temps en termes de structures spatiales, de persistance et de fréquence d'occurrence.

Méthode choisie pour la détermination des régimes de temps.

Dans ce document, l'algorithme de partitionnement utilisé pour réaliser la classification des régimes de temps est fondé sur l'algorithme de Michelangeli et al. (1995). Les régimes de temps sont identifiés par l'application de cet algorithme sur les anomalies de hauteurs de géopotentiel 500 hPa journalières issues d'une part des réanalyses NCEP/NCAR et d'autre part du modèle HadCM3 pour la simulation A2, du modèle HadCM3Q0 pour le scénario A1B (série dénommée aenwh) et du modèle HadAM3P pour le scénario B2 (addjd), et ce de décembre à février (saison hivernale, DJF par la suite) sur la

période 1960-1989 pour les séries NCEP/NCAR et sur la période 2070-2099 pour les scénarios B2, A1B et A2, sur la région Nord Atlantique - Europe (20°N - 70°N; 90°W - 30°E). Les systèmes de pressions synoptiques de large échelle sur un domaine englobant l'Atlantique Nord contribuent à la variabilité du temps européen de l'échelle journalière à saisonnière (Cassou et al., 2005). L'utilisation de cette fenêtre géographique permettra également d'offrir la possibilité de comparer nos résultats aux précédentes études ayant travaillé à partir de ce domaine. De plus, la localisation de la borne ouest de ce domaine renseigne l'ensemble de l'Atlantique, il permet de rendre compte de la mise en place des perturbations des moyennes latitudes.

Malgré le pourcentage de variance totale que nous avons retenu lors de la classification des modes de variabilité (chapitre 3, section 3) par les ACP-R, de l'ordre de 80 % (équivaut à une rotation à 6 facteurs), l'indice de classifiabilité est généralement significatif pour une classification du champ de géopotentiel 500 hPa (que cela concerne les réanalyses ou les sorties de modèles) en 4 classes à partir des premières composantes principales (totalisant environ 40 % de la variance). Dans la suite du document, le géopotentiel fera l'objet d'une partition en 4 régimes de temps sur la fenêtre NAE (20°N - 70°N ; 90°W - 30°E).

L'algorithme est appliqué sur les anomalies journalières des hauteurs de géopotentiel en ayant retiré le cycle annuel moyen de chaque variable. Le cycle annuel est enlevé des données journalières par soustraction des moyennes journalières climatologiques à partir des jours individuels (Kingtse, 2000). En obtenant ainsi les anomalies, les différences avec une situation moyenne sont mises en évidence. Nous avons également procédé à la standardisation des données puis à leur pondération par le cosinus carré de la latitude. La standardisation (variable divisée par l'écart-type) permet de donner le même poids à chaque variable indépendamment de leur variance initiale.

1. Structures spatiales

Pour déterminer le nombre de clusters nous nous sommes appuyées sur l'étude de Cassou (2008). Ce dernier a cherché à détecter les régimes de temps sur la région NAE (20° N - 80° N ; 90° W - 30° E), à partir des anomalies journalières hivernales (novembre à mars) de hauteurs géopotentielles à 500 hPa issues des réanalyses NCEP/NCAR sur la période 1974-2007. L'algorithme k-means est appliqué sur les 14 premières composantes principales retenant 90 % de la variance totale. L'auteur obtient 4 régimes de temps que nous obtenons sont identiques (nous utiliserons alors le terme [d'après Cassou, 2008] pour évoquer nos résultats reproduits d'après leur étude) (**figure 3.34**). Nous avons également comparé nos résultats [d'après Cassou, 2008] à ceux de Yiou et Nogaj (2004) qui identifient également 4 régimes de temps d'anomalies journalières hivernales (DJF) de hauteurs géopotentielles à 500 hPa, issues des réanalyses NCEP/NCAR sur la période 1958-2003, au-dessus de la région Nord Atlantique (30° N - 70° N ; 80° W - 40° E). Ils exécutent l'algorithme k-means sur une matrice de données composées des 7 premières composantes principales (80 % de variance totale). La **figure 3.34** reprend nos résultats [d'après Cassou (2008)], ceux de Cassou (2008) et ceux de Yiou et Nogaj (2004).



FIGURE 3.34 – Régimes de temps de la circulation atmosphérique identifiés à partir d'anomalies journalières de hauteur géopotentielle à 500 hPa (mgp) issues des réanalyses NCEP/NCAR de novembre à mars et sur la période 1974-2007 (gauche : Cassou, 2008 et centre : nos résultats [d'après Cassou, 2008]) ; de décembre à février et sur la période 1958-2003 (droite : Yiou et Nogaj, 2004). a) régime de l'ONA+ ; b) régime de l'ONA- ; c) régime de blocage ; d) régime de dorsale Atlantique.

Nous obtenons les mêmes régimes de temps que les autres auteurs. Par ailleurs, ces quatre régimes de temps sont identiques à ceux obtenus à partir du champ d'anomalies du géopotentiel 700 hPa par Michelangeli et al. (1995). Chaque régime de temps correspond à une situation atmosphérique particulière dont voici les caractéristiques majeures :

Régime ONA +

Ce régime est caractérisé par un dipôle d'anomalies nord-sud. On y trouve une intense cellule d'anomalies négatives (-150 mètres au maximum, Cassou, 2008) sur l'Islande et plus généralement sur la partie nord de l'océan Nord Atlantique accompagnée d'une cellule d'anomalies positives plus faible (+50 à +75 mètres, Cassou, 2008) présente sous la forme d'une bande longitudinale, des côtes est américaines jusqu'en Europe. Le gradient méridien de pression est alors renforcé, ce qui implique une circulation d'ouest plus rapide. Cette dernière, alors non déviée par l'anomalie anticyclonique, touche l'Europe de l'ouest en y transportant les masses d'air océanique humide et doux de l'Atlantique. L'Europe occidentale connaît un temps pluvieux mais clément tandis que les régions d'Europe du sud et du bassin Méditerranéen connaissent un temps sec des suites des anomalies anticycloniques fortes.

Régime ONA -

Ce dipôle d'anomalies nord-sud est marqué par la présence d'anomalies positives intenses (+150 mètres au maximum, Cassou, 2008) sur le Groenland accompagnées d'une cellule dépressionnaire (anomalies négatives de -125 mètres au maximum, Cassou, 2008) étirée sur l'ensemble de l'Atlantique nord, des côtes est américaines à l'Europe occidentale. Le renforcement de la cellule anticyclonique au nord dévie le courant jet, lui-même atténué, vers le sud permettant à l'air polaire d'arriver sur le continent européen. L'Europe connait alors un temps froid et pluvieux, l'Afrique du nord et le bassin Méditerranéen un temps chaud et sec.

Régime de Blocage

Associé à un dipôle d'anomalies est-ouest, le régime de blocage est constitué d'une cellule positive forte (+150 mètres au maximum, Cassou, 2008) sur la Scandinavie accompagnée d'une cellule négative plus faible (-75 mètres au maximum, Cassou, 2008) sur la pointe du Groenland. Les anomalies anticycloniques déplacent la circulation d'ouest vers le nord, l'Europe ne bénéficie plus des masses d'air doux et humide transportées par le courant jet mais connaît alors un temps sec et froid induit par les arrivées d'air polaire (Cassou, 2004 ; Walsh et al., 2001).

Régime de Dorsale Atlantique

Une forte cellule d'anomalies positives (amplitude de +125 mètres environ à +200 au maximum, Cassou, 2008) est centrée sur la partie nord de l'océan Nord Atlantique accompagnée par des anomalies dépressionnaires plus faibles (-75 mètres au maximum, Cassou, 2008) situées sur la Péninsule Scandinave. Des masses d'air venant du nord-nord-ouest arrivent sur le continent européen favorisant un temps froid et humide.

2. Evolution des régimes de temps

Rappelons que les variations du temps sont représentées au moyen de l'alternance d'un nombre fini d'états préférentiels de la circulation atmosphérique (Stephenson et al., 2004). Ces états préférentiels se réfèrent aux régimes de temps caractérisés par une certaine récurrence et persistance temporelles. Les régions caractéristiques de régimes de temps sont celles qui sont le plus fréquemment « visitées » par l'atmosphère.

Rappel de la procédure de calcul des régimes de temps.

La méthode de classification pour les déterminer suit la méthode décrite par Michelangeli et al. (1995).

4/ Le critère d'appartenance des observations de la matrice de données (jours) à un cluster repose sur la mesure de la distance euclidienne, chaque jour est ainsi classé parmi l'un des régimes.

La variabilité intrasaisonnière étant représentée par les régimes de temps et vu que les régimes de temps sont caractérisés notamment par les propriétés de persistance et de récurrence, il est ainsi possible de calculer les fréquences d'occurrence et les durées moyennes de persistance de chacun des régimes. Les calculs de fréquences et de persistances sont appliqués aux *épisodes* de régimes de temps uniquement. Nous considérons comme un épisode de régime de temps un épisode d'une durée minimale de 3 jours. Nous nous sommes basées sur la méthode proposée par Sanchez-Gomez et Terray (2005) : suppression des deux premiers et deux derniers jours de chaque saison ; suppression du premier et dernier jour de chaque régime ; et élimination des régimes dont la durée n'est que de un jour. Nous partons également du principe que le nombre de régimes de temps ne change pas sur la période 2070-2099.

2.1. Quelle reproductibilité des structures de régimes de temps pour le modèle HadCM3 ?

Avant de s'intéresser aux éventuelles évolutions temporelles et spatiales des régimes de temps entre période actuelle et période future sous forçage anthropique, nous présentons les structures spatiales des régimes de temps obtenues d'une part à partir des données de réanalyses NCEP et d'autre part à partir de la simulation actuelle 20c3m (**figures 3.35 à 3.38**). L'algorithme *k*-means est ainsi appliqué à ces deux jeux de données de hauteur géopotentielle à 500 hPa.

^{1/} On considère une matrice en deux dimensions des anomalies de Z500 journalières fournies pour la saison hivernale. Les anomalies sont standardisées et pondérées par le cosinus de la latitude. La pondération permet de prendre en compte la différence de résolution des latitudes.

^{2/}L'algorithme est appliqué dans l'espace réduit par les composantes principales du Z500. On retient environ 40 % de la variance du Z500 pour les simulations et les réanalyses, pour les périodes actuelle et future.

^{3/} L'algorithme k-means détermine les clusters (ils caractérisent les états préférentiels de la dynamique atmosphérique nord Atlantique) dans l'espace réduit préalablement par les CP. Son but est de réduire la variance intraclasse en maximisant la variance interclasse. Nous choisissons d'extraire 4 clusters.



FIGURE 3.35 - Régimes de temps correspondant au régime de Blocage identifiés à partir d'anomalies journalières de hauteurs géopotentielles à 500 hPa (m) issues des réanalyses NCEP/NCAR (a) et de la simulation 20c3m (b).

La localisation de l'anomalie cyclonique associée au régime de Blocage (figure 3.35) est correcte entre les réanalyses et la simulation 20c3m malgré un écart d'amplitude de 25 mètres environ dans l'expérience 20c3m. Nous pouvons noter le même biais d'amplitude au niveau des cellules d'anomalies anticycloniques sud-ouest et nord-est : la simulation 20c3m sous-estime les anomalies sud-ouest tandis que les anomalies nord-est présentent une sur-estimation. Néanmoins les cellules anticycloniques entre les deux expériences sont spatialement similaires, centrées sur la Péninsule Danoise.



FIGURE 3.36 – Régimes de temps correspondant au régime de Dorsale Atlantique identifiés à partir d'anomalies journalières de hauteurs géopotentielles à 500 hPa (m) issues des réanalyses NCEP/NCAR (a) et de la simulation 20c3m (b).

Les structures d'anomalies associées au régime de Dorsale Atlantique (**figure 3.36**) ne présentent que peu de décalages spatiaux et d'écarts d'amplitude. La cellule anticyclonique située au sud du Groenland présente un maximum de 150 mètres dans les deux expériences. En revanche les anomalies cycloniques sur la côte est des Etats-Unis sont sur-estimées dans l'expérience 20c3m (75 m), elles montrent d'ailleurs un biais d'extension non représenté dans les données NCEP.



FIGURE 3.37 – Régimes de temps correspondant au régime de ONA– identifiés à partir d'anomalies journalières de hauteurs géopotentielles à 500 hPa (m) issues des réanalyses NCEP/NCAR (a) et de la simulation 20c3m (b).

La localisation de la cellule cyclonique associée au régime ONA- (figure 3.37) de l'expérience 20c3m est d'une bonne similarité par rapport aux données de réanalyses NCEP, tout autant que son amplitude (-150 m). Cependant, même si les localisations des cellules anticycloniques sont correctes entre les deux jeux de données, nous notons des différences d'amplitude. Tout d'abord, les anomalies situées au nord-ouest dans les données 20c3m sont trop faibles de 50 mètres environ tandis que celles situées au sud-est sont trop creusées de 25 mètres environ.





FIGURE 3.38 – Régimes de temps correspondant au régime de ONA + identifiés à partir d'anomalies journalières de hauteurs géopotentielles à 500 hPa (m) issues des réanalyses NCEP/NCAR (a) et de la simulation 20c3m (b).

Les cellules anticycloniques des données 20c3m, associées au régime ONA+ (figure 3.38) et situées aux alentours de l'archipel des Açores sont localisées correctement par rapport aux réanalyses NCEP. De plus, elles présentent un maximum d'amplitude de 125 mètres environ. En revanche, nous notons une large bande d'anomalies positives qui semble s'étendre au-delà de la limite ouest de la fenêtre d'étude dans l'expérience 20c3m. Malgré une amplitude similaire (-125 m), la localisation du centre de la cellule cyclonique d'après les données 20c3m présente un décalage vers l'ouest d'environ 20° de longitude par rapport aux données NCEP.

D'après nos résultats, nous estimons que les données 20c3m du modèle HadCM3 concordent avec celles des réanalyses NCEP/NCAR. Aussi, la suite du travail s'attachera à comparer les régimes de

temps obtenus dans les expériences sous forçage de gaz à effet de serre à ceux obtenus dans la simulation 20c3m.

2.2. Comparaison des structures spatiales des régimes de temps

Les comparaisons de fréquences et de persistances des régimes futurs sont effectuées vis-à-vis des régimes tirés de la simulation 20c3m. Pour identifier les régimes de temps hivernaux futurs nous nous sommes appuyées sur les régimes de temps tirés de la simulation 20c3m (1960-1989). Ce choix sousentend que le nombre de clusters ne varie pas entre l'actuel et le futur (2070-2099). Cette hypothèse est appuyée par les indices de classifiabilité qui ont été calculés pour chaque simulation (**figure 3.39**).



FIGURE 3.39 – Indices de classifiabilité (en noir) calculés pour les jeux de hauteur géopotentielle hivernale (DJF) à 500 hPa, pour a) la simulation 20c3m (1960-1989), b) la simulation B2, c) la simulation A1B et d) pour la simulation A2. b), c) et d) concernent la période 2070-2099. En rouge, les intervalles de confiance des indices en fonction du nombre de classes.

Comme nous pouvons le voir, les indices sont les plus pertinents à 4 classes, bien qu'ils ne dépassent pas l'intervalle de confiance. Les **figures 3.40 à 3.43** présentent les régimes de temps obtenus à partir d'une part des réanalyses 20c3m et d'autre part à partir des simulations A2 (HadCM3), aenwh (A1B, du modèle HadCM3Q) et addjd (B2, du modèle HadAM3P). Nous avons également eu la possibilité d'identifier les régimes de temps de la simulation addja, représentant elle aussi le forçage A2 à partir du modèle HadAM3P. Malgré la différence de modèle, les régimes de temps issus du forçage A2 montrent des résultats similaires par rapport à la simulation 20c3m, aussi bien en termes de structure spatiale que de fréquences d'occurrence.

Blocage



FIGURE 3.40 - Régimes de temps d'anomalies journalières hivernales (DJF) de hauteur géopotentielle à 500 hPa (m) sur la région NAE et correspondants au régime de Blocage. Régimes calculés à partir a) de la simulation 20c3m, b) de la simulation B2 (addjd), c) de la simulation A1B (aenwh), d) de la simulation A2.

Les cellules anticycloniques associées au régime de Blocage (figure 3.40) sont de même amplitude par rapport aux données 20c3m sauf pour le scénario A1B (écart de 25 m) et ont également une bonne localisation. Les cellules cycloniques présentent des anomalies plus faibles d'environ 25 mètres par rapport à 20c3m. La structure associée au scénario A2 est celle jugée la plus similaire aux données 20c3m. Pour ce qui relève de la structure B2, la cellule cyclonique est représentée sous la forme d'une bande d'anomalies allant de Terre-Neuve jusqu'en Méditerranée, ce qui n'est pas le cas sous 20c3m. La cellule anticyclonique du scénario A1B diffère de celle de 20cm en cela qu'elle est représentée par une bande d'anomalies de l'Europe de l'ouest jusqu'aux côtes de Floride.

Dorsale Atlantique



FIGURE 3.41 - Régimes de temps d'anomalies journalières hivernales (DJF) de hauteur géopotentielle à 500 hPa (m) sur la région NAE et correspondants au régime de Dorsale Atlantique. Régimes calculés à partir a) de la simulation 20c3m, b) de la simulation B2 (addjd), c) de la simulation A1B (aenwh), d) de la simulation A2.

Les anomalies associées au régime de Dorsale Atlantique (figure 3.41) des scénarios A1B et A2 sont similaires à celles observées dans les données 20c3m sur le plan de leur localisation, leurs amplitudes en revanche montrent des biais importants. Les cellules cycloniques des scénarios A1B et A2, représentées sous la forme d'une large bande, sont plus faibles à l'ouest (de 25 m à 50 m respectivement) et plus creusées à l'est (de 25 m environ). La structure du régime du scénario B2 est celle qui diffère le plus de 20c3m en cela que, d'une part la cellule d'anomalies positives est décalée vers le sud malgré une amplitude similaire (150 m) et d'autre part, que les anomalies négatives sont restreintes à la zone nord-est malgré une amplitude similaire (100 m).

ONA-



FIGURE 3.42 - Régimes de temps d'anomalies journalières hivernales (DJF) de hauteur géopotentielle à 500 hPa (m) sur la région NAE et correspondants au régime ONA-. Régimes calculés à partir a) de la simulation 20c3m, b) de la simulation B2 (addjd), c) de la simulation A1B (aenwh), d) de la simulation A2.

Concernant les anomalies associées au régime ONA- (figure 3.42), on retrouve la présence d'anomalies négatives à l'ouest de l'Europe avec toutefois des anomalies plus faibles de 25 mètres dans les expériences des scénarios. La bande d'anomalies est présente soit sous la forme d'une bande transversale (20c3m et A2) soit sous la forme de deux cellules reliées entre elles (B2 et A1B). Cela n'empêche pas les côtes sud-est des Etats-Unis d'être sous l'influence d'anomalies cycloniques. La localisation de la cellule anticyclonique présente au niveau de l'ouest Groenland dans les données 20c3m est légèrement décalée vers l'est dans les expériences des scénarios B2 et A1B. L'amplitude est cependant plus faible de 25 mètres environ dans les données B2 et de 50 mètres environ dans les données A1B.

ONA+



FIGURE 3.43 - Régimes de temps d'anomalies journalières hivernales (DJF) de hauteur géopotentielle à 500 hPa (m) sur la région NAE et correspondants au régime ONA+. Régimes calculés à partir a) de la simulation 20c3m, b) de la simulation B2 (addjd), c) de la simulation A1B (aenwh), d) de la simulation A2.

Les anomalies associées au régime ONA+ (figure 3.43) à partir des expériences des scénarios et par rapport aux données 20c3m sont celles qui sont le moins bien reproduites. La structure obtenue des données A2 est néanmoins la plus similaire malgré une sous-représentation des anomalies (biais de 25 m environ). Les anomalies cycloniques des scénarios B2 et A1B présentent une extension vers le sud qui n'est pas présente dans les données 20c3m et A2. De plus, celles-ci sont plus faibles par rapport à 20c3m (-75 m au lieu de -125 m). Enfin les cellules anticycloniques des scénarios B2 et A1B semblent subdivisées en deux cellules, l'Archipel des Açores sous l'influence d'anomalies anticycloniques ne semble alors plus l'être sous les forçages B2 et A1B.

Nos résultats montrent que chacun des quatre régimes de temps déterminés à partir des données 20c3m peuvent être identifiés parmi les régimes de temps futurs détectés d'après les expériences des scénarios de forçage par gaz à effet de serre, B2, A1B et A2. Cela signifie que les régimes de temps hivernaux ne présentent pas de changements structurels importants en comparaison des régimes de temps 20c3m.

2.3. Comparaison des fréquences d'occurrence des régimes de temps

La fréquence d'occurrence d'un régime hivernal est obtenue comme suit : nombre de jours passés dans le régime ramené au nombre total de jours dans la saison. Par construction la somme des fréquences de l'ensemble des régimes vaut 100 %. Nous pouvons voir que les résultats sont hétérogènes (tableau 3.13).

TABLEAU 3.13 – Fréquences d'occurrence (%) de chacun des régimes de temps pour la période 1960-1989 (20c3m) et 2070-2099 (A2, A1B, B2).

	ONA –	ONA +	Blocage	Dorsale Atl.
20C3M	30,93	24,84	$25,\!64$	18,59
A2	27,55	28,65	20,43	23,37
aenwh $(A1B)$	28,79	24,79	26,71	19,71
addj d $(B2)$	$24,\!12$	$29,\!51$	$20,\!52$	$25,\!84$

Par rapport aux fréquences d'occurrence du régime ONA- dans la simulation 20c3m, nous pouvons constater que celles dans les simulations A2, A1B et B2 sont toutes les trois plus faibles, respectivement de 3,4 %, 2,1 % et 6,9 %. Un temps froid et pluvieux apparaîtrait alors moins souvent sur l'Europe et la région Nord-Pas de Calais au cours de la période 2070-2099. Il en va de même pour les fréquences d'occurrence du régime de Dorsale Atlantique, toutes trois plus élevées sur la période 2070-2099. En revanche, cela significati l'apparition plus fréquente de situations météorologiques propices à un temps froid et humide sur l'Europe. Les fréquences d'occurrence du régime de Blocage obtenues à partir des simulations sous forçage montrent une tendance à la baisse dans les scénarios A2 et B2, respectivement de 5,2 % et 5,1 %. Dans ce cas, si les scénarios A2 et B2 venaient à se vérifier, les situations atmosphériques appartenant au régime dit de blocage seraient moins fréquentes : un temps sec et froid moins fréquent. L'évolution pour le scénario A1B montre une augmentation d'un peu plus d'un point (1,07 %). Enfin, les fréquences d'occurrence du régime ONA+ dans les simulations A2 et B2 sont plus élevées que dans 20c3m (respectivement 3,8 % et 4,7 %) tandis que celle de la simulation A1B est légèrement plus faible de 0,05 %. Nous considérons qu'elle n'évolue pas. Pour les scénarios A2 et B2, la hausse de fréquence d'occurrence du régime ONA+ signifierait alors davantage de situations météorologiques propices au transport de masses d'air océaniques sur l'Europe occidentale. L'air doux et humide apporte un temps pluvieux mais clément.

Ces résultats sont semblables à ceux obtenus par Boé (2007), lequel prédit pour plusieurs modèles une augmentation des fréquences d'occurrence des régimes ONA+ et de Dorsale et une forte baisse des

régimes ONA- sur le domaine NAE en hiver. Gardons néanmoins à l'esprit que plusieurs paramètres sont différents entre son étude et la nôtre. Tout d'abord l'auteur ne traite pas des régimes de temps hivernaux calculés à partir du modèle HadCM3. Ensuite ses régimes sont détectés sur la base des pressions au niveau de la mer et sur la période 2081-2100 au lieu de 2070-2099 dans notre cas. Enfin la méthode d'obtention des régimes diffère en cela que les données de pression des modèles sont projetées dans l'espace des 10 premières composantes principales des réanalyses.

Notons également que ces résultats sont cohérents avec les travaux de Terray et al. (2004) et Cattiaux (2010).

2.4. Comparaison des persistances moyennes des régimes de temps

Dans notre cas, nous définissons la persistance moyenne d'un régime de temps comme le nombre de jours consécutifs d'apparition de ce régime au cours de la saison hivernale. Le **tableau 3.14** donne les persistances moyennes des quatre régimes de temps associés d'une part à la simulation 20c3m et d'autre part aux simulations futures.

TABLEAU 3.14 – Persistances moyennes (en jours) de chacun des régimes de temps pour la période 1960-1989 (20c3m) et 2070-2099 (A2, A1B, B2).

	ONA –	ONA +	Blocage	Dorsale Atl.
20C3M	7,88	7,05	$5,\!93$	6,44
A2	8,47	8,65	7,40	8,86
aenwh $(A1B)$	9,60	$5,\!88$	6,34	6,90
addjd (B2)	$7,\!49$	$6,\!16$	$5,\!59$	$5,\!85$

Malgré une baisse de fréquence d'occurrence pour A2 et A1B par rapport à 20c3m (tableau 3.13), nous remarquons que, dans le futur, même si son apparition est moins fréquente, les épisodes de régimes de temps ONA- seraient plus longs, respectivement de 0,59 et 1,72 jours. Le régime ONA+ qui présente une hausse de fréquence d'occurrence dans les simulations futures (tableau 3.13) serait néanmoins caractérisé par une diminution de son temps moyen de résidence, notamment au cours des expériences A1B et B2 (écarts respectifs de 1,17 et 0,89 jours). Le régime ONA+ apparaitrait plus souvent mais persisterait moins longtemps. Enfin, les régimes Blocage et Dorsale Atlantique montrent le même schéma d'évolution de leurs persistances moyennes. Les simulations A2 et A1B indiquent une persistance plus élevée par rapport à 20c3m tandis que la simulation B2 indique une persistance plus faible. Notons tout de même un écart de persistance de 2,42 jours entre la simulation A2 et 20c3m.

Le **tableau 3.14** permet également d'évaluer l'évolution des persistances moyennes au regard des scénarios anthropiques. Le forçage B2, le plus « optimiste » des scénarios dont nous disposions et qui rappelons-le estime la concentration de CO_2 en 2100 à 600 ppm environ, présente systématiquement une baisse des persistances, quel que soit le régime de temps considéré. Inversement, le scénario A2, le plus « pessimiste » estimant à environ 850 ppm la concentration en CO_2 d'ici 2100, privilégie systématiquement une hausse des persistances des régimes de temps.

Conclusion chapitre 3

L'objectif étant de percevoir d'éventuelles modifications des structures spatiales de variabilité atmosphérique suite à des forçages anthropiques, nous avons commencé par évaluer la reproductibilité du modèle Hadley Centre. Ce modèle nous fournit le champ géopotentiel 500 hPa qui nous sert à identifier les configurations de variabilité large échelle. La comparaison spatiale des modes communs entre la série des réanalyses et celle de la simulation 20c3m indiquent qu'ils sont reconnaissables et fortement similaires. Les modes de variabilité sont correctement reproduits par le modèle du Hadley Centre (HadCM3) sur la fenêtre Nord Atlantique - Europe avec des coefficients de corrélation supérieurs à 0,74 en ce qui concerne les configurations communes. En ce qui concerne les régimes de temps, nous jugeons par comparaison aux réanalyses NCEP/NCAR que la simulation 20c3m du modèle HadCM3 (période 1960-1989) reproduit correctement les 4 régimes de temps suivants : ONA+, ONA-, blocage et dorsale atlantique. « En résumé, les régimes et modes simulés sont assez « réalistes » pour évaluer la façon dont ils changeraient au titre de conditions climatiques forcées ». En revanche, certains mois de la période future (2070-99) affichent des configurations particulières : l'ONA semble dissociée en deux configurations distinctes. D'une part une configuration intitulée Centre Atlantique à 1 pôle et d'autre part une configuration que nous avons dénommée Europe Centrale et Groenland.

Après avoir évalué la reproductibilité du modèle Hadley Centre, nous avons étudié les tendances des scores factoriels associés à chaque mode de variabilité. Ceci nous a permis de constater une dominance des tendances positives futures essentiellement représentée par les scénarios d'émissions A1B et A2. Aussi, l'évolution des pressions 500 hPa vers des tendances positives indiquent l'intensification des systèmes de hautes et basses pressions. L'application du test de Kendall sur ces mêmes tendances montre que presque la totalité des tendances positives sont significatives. De plus, le nombre de tendances significatives augmente en fonction du caractère « pessimiste » des scénarios d'émissions. Enfin, les modes *Est Atlantique - Méditerranée Méridionale* et *Est Atlantique - Ouest Russie* sont les principaux modes concernés par ces tendances significatives positives : sur les 9 tendances qu'ils détiennent, 6 correspondent au mode EA-MM dont la moitié lorsque le scénario A2 est utilisé.

Enfin, l'analyse des fréquences d'occurrence des principaux types de circulation du géopotentiel 500 hPa, lesquels sont identifiés à partir des pics d'intensité extrême de chaque chronique temporelle des modes de variabilité, fait ressortir les principales évolutions suivantes : une hausse généralisée des circulations méridiennes de sud-ouest et zonales ; une baisse des circulations méridiennes de nord et

nord-ouest ainsi qu'une baisse des situations de marais barométriques et des phénomènes de diffluence.

La variabilité de la circulation atmosphérique au niveau du géopotentiel 500 hPa étant également caractérisée par les régimes de temps, nous avons choisi de nous y intéresser. Aussi pour les régimes de temps, les mêmes configurations sont identifiées quelle que soit la période concernée et par extension, que les variables météorologiques et notamment le géopotentiel 500 hPa ait été soumises à des forçages anthropiques ou non.

Les centres d'action des modes de variabilité et des régimes de temps représentés par des zones anticycloniques ou dépressionnaires de grande taille ont une incidence sur la circulation des vents et les trajectoires des perturbations des moyennes latitudes (Delmas et al., 2007). Aussi une question légitime peut alors être formulée lorsque l'on y associe l'influence du changement climatique et la qualité de l'air : si les propriétés spatiales et temporelles des modes de variabilité et/ou des régimes de temps venaient à être modifiées par le changement climatique, les zones de diffusion et les concentrations de polluants atmosphériques subiraient-elles des conséquences ?

Cette question a orienté l'étude présentée au cours du chapitre 4, laquelle s'intéresse aux modes de variabilité.

$\left(\begin{array}{c} \text{Chapitre 4} \end{array} \right)$

Dispersion des polluants atmosphériques sur la région Nord-Pas de Calais

Objectif du chapitre.

Le premier chapitre de ce manuscrit a indiqué que les différences d'énergie solaire reçues à la surface de la Terre impliquent des transferts de chaleur réalisés en partie par la circulation atmosphérique. En effet, l'existence de zones plus ou moins « chaudes » entraine des différences de température, d'humidité mais aussi de pression entre les masses d'air, il se crée par conséquent des zones de hautes et basses pressions, engendrant un déséquilibre entre la zone intertropicale et les pôles. Ces variations déterminent ainsi le mouvement des masses d'air. Pour contrebalancer cette inégalité, l'atmosphère circule globalement des hautes vers les basses pressions et intervient ainsi de façon déterminante dans les échanges de chaleur. Le système de circulation générale ainsi mis en place est en quelques sortes « organisé » en sous-systèmes. Il s'agit entre autres des modes de variabilité et des régimes de temps que nous avons détecté précédemment. Soumis à forçage anthropique nous avons vu que ces sous-systèmes de variabilité peuvent être modifiés du point de vue des types de circulation extrêmes. Pour certains d'entre eux, l'occurrence des circulations méridiennes de nord-ouest est renforcée, apportant les masses d'air en provenance du Royaume-Uni sur le nord de la France. Cette conclusion nous amène donc à connecter *circulations* et *pollution*.

Fin 2005 l'incendie d'un dépôt de carburant situé à 40 km au nord de Londres a engendré un panache de particules dans l'atmosphère. En dépit des quantités de polluants faibles estimées par les autorités sanitaires, les vents ont poussé le panache de pollution en direction de la France. Ce dernier a traversé le Nord-Pas de Calais, la Bretagne, la Normandie pour ensuite se diriger vers l'Espagne¹. Cet épisode 'anecdotique' rappelle que la distribution spatiale des polluants dans l'atmosphère dépend des mouvements des masses d'air, et plus généralement de la circulation atmosphérique. McKendry (1994) conclut d'ailleurs que les concentrations maximales d'ozone journalières en été à Vancouver sont fortement modulées/pilotées par la circulation atmosphérique à échelle synoptique. Si le forçage anthropique estimé pour la fin du 21^{ème} siècle vient à modifier les types de circulation dominants qui touchent la région Nord - Pas de Calais, il est important d'étudier les impacts que cela pourrait avoir en termes de diffusion spatio-temporelle de polluants. C'est pourquoi la thèse s'est attachée à coupler circulations de l'atmosphère et pollution sur la région.

Chapitre 4 Dispersion des polluants atmosphériques sur la région

Vord	l-Pas de Calais	169
1.	Présentation technique du modèle WRF-Chem	173
2.	Traitement des données météorologiques pour WRF	175
3.	Méthodologie de traitement des données d'émissions pour WRF-Chem	.178
4.	Nos simulations avec WRF et WRF-Chem	190

 $^{^1}$ Article publié le 13 décembre 2005 par www.actu-environnement.com/ae/news/1427.php4

Notre optique étant d'évaluer l'influence de modifications de la variabilité de la circulation atmosphérique sur la répartition spatio-temporelle de polluants sur la région Nord-Pas de Calais, nous avons utilisé les résultats précédemment obtenus pour mener cette analyse. Comme nous l'avons vu, les situations atmosphériques extrêmes propres à un mode de variabilité donné et distinguées par phase positive et négative constituent dans cette partie la base de travail de l'étude chimique. Le lien entre circulations et pollution est donc fondé sur les situations extrêmes (années) des modes de variabilité. Pour étudier d'éventuelles modifications des zones de diffusion de polluants, nous comparons les résultats des simulations WRF/WRF-Chem lancées avec des données météorologiques actuelles (1960-1989) aux résultats des simulations lancées avec des données météorologiques futures (2070-2099) issues de simulations sous forçage anthropique par gaz à effet de serre (modèle CNRM-CM3 et scénario A1B).

1. Présentation technique du modèle WRF-Chem

WRF-Chem simule les champs de concentrations de polluants en prenant en compte simultanément les variations des émissions, les conditions météorologiques, les phénomènes de transport et les processus de physico-chimie qui aboutissent à la production ou la perte des substances chimiques, l'ensemble étant soumis aux conditions aux limites du domaine de simulation (météo, émissions). Un tel modèle détermine les champs de concentrations d'espèces particulaires et gazeuses dans les basses couches de l'atmosphère. Les conditions météorologiques et chimiques d'une région et d'une période précises constituent les données d'entrée du modèle.

Les processus impliqués dans les transformations chimiques d'espèces font intervenir les mécanismes de la chimie homogène et hétérogène. Pour modéliser de telles concentrations, le modèle est composé de deux outils majeurs que nous présentons dans cette partie : les mécanismes chimiques et le mécanisme des aérosols.

1.1. Les outils de calculs

1.1.1. Les mécanismes chimiques

Afin de décrire les processus atmosphériques responsables de la composition de l'air, les développeurs de modèles numériques ont eu recours à des paramétrisations. Elles permettent dans notre cas de faire appel à des mécanismes chimiques capables de représenter l'évolution chimique de nombreuses espèces abondantes à l'état de trace qu'il est possible de trouver dans les masses d'air (Williams et van Noije, 2008). Il existe trois mécanismes chimiques optionnels dans WRF-Chem : RADM2, RACM et le CBM. Les mécanismes répondent au principe de la réactivité des agrégats moléculaires, ceci consiste en l'assemblage de molécules formant une entité identifiable.

Dans ce travail, nous avons choisi d'utiliser le mécanisme RADM2 (Stockwell et al., 1990). En effet, le principe de RADM2 est un compromis entre le nombre de polluants chimiques pris en compte, la

précision des prévisions chimiques et les temps de calculs qui croissent de façon exponentielle avec la demande de précision et le nombre d'espèces considérées.

RADM2 – Regional Acid Deposition Model, version 2

Ce mécanisme de chimie atmosphérique en phase gazeuse, développé par Stockwell et al. (1990), s'appuient sur 63 espèces chimiques réactives au sein de 136 réactions chimiques, dont 21 concernent les processus de photolyse. Pour les 15 mécanismes de chimie organique représentant les espèces primaires, 5 concernent le méthane, l'éthane, l'éthylène, l'isoprène et le formaldéhyde, tandis que les 10 autres mécanismes s'appliquent à des groupes d'espèces répartis selon leur masse moléculaire et selon leur réactivité vis-à-vis du radical hydroxyle HO'. La réactivité des espèces au sein d'un même groupe est spécifiée par un facteur de réactivité.

RACM – Regional Atmospheric Chemistry Mechanism

Egalement développé par Stockwell et al. (1997), RACM est fondé sur les mécanismes de RADM2. Sa différence est qu'il est plus détaillé en ce qui concerne la chimie atmosphérique des précurseurs d'ozone d'origine biotique. RACM s'appuie sur 77 espèces chimiques réactives au sein de 214 réactions chimiques, dont 23 concernent les processus de photolyse. RACM comprend lui aussi une part de mécanismes propres à des espèces particulières et une part propre aux groupes d'espèces.

CBM – Carbon Bond Mechanism

Ce mécanisme s'intéresse tout particulièrement aux liaisons carbones des espèces chimiques. Il compte 33 espèces chimiques réactives au sein de 82 réactions chimiques. CBM a été développé principalement pour des études de modélisation de la pollution du smog urbain et de la pollution atmosphérique régionale. Comme les deux précédents mécanismes chimiques, CBM est une combinaison de mécanismes chimiques individuels et de mécanismes appliqués aux groupes d'espèces chimiques.

1.1.2. Le mécanisme de chimie hétérogène

Pour représenter la chimie hétérogène dans l'atmosphère, le modèle WRF-Chem a besoin d'un mécanisme spécifique.

MADE-SORGAM

Dans cette thèse le mécanisme utilisé par le modèle est composé de deux modules d'aérosols : MADE (Modal Aerosol Dynamics for Europe) et SORGAM (Secondary Organic Aerosol Model). Il fonctionne avec l'ensemble des mécanismes dérivant de RADM2. Ces modules permettent d'avoir accès à la masse et à la taille des composés suivants : sulfatés, nitrates, composés azotés, sels marins, carbones

organiques, *black carbon* et les poussières. Il permet également de prendre en compte les aérosols organiques secondaires (AOS).

Le modèle WRF-Chem dispose de deux autres modèles optionnels de simulations des aérosols.

GOCART – Goddard Chemistry Aerosols Radiation and Transport

Le modèle GOCART utilise le mécanisme chimique en phase gazeuse RACM couplé avec le préprocesseur cinétique KPP afin de modifier ou d'ajouter des réactions chimiques. Il ne donne pas d'information sur la taille des aérosols et ne prend pas en compte les AOS.

MOSAIC – MOdel for Simulating Aerosol Interaction and Chemistry

Celui-ci fonctionne uniquement avec l'ensemble des mécanismes de type Carbon Bond (CBM).

1.1.3. Options choisies dans la namelist.input

WRF-Chem dispose d'une liste dénommée *namelist.input* qui récapitule l'ensemble des paramètres chimiques utiles à la modélisation des espèces chimiques. Nous avons la possibilité de spécifier les options de divers mécanismes de WRF-Chem. Les options que nous avons sélectionnées pour ce travail sont indiquées en annexe 2.

1.2. Les données d'émissions

Afin d'intégrer les données d'émissions issues des activités anthropiques dans WRF-Chem nous faisons appel dans cette thèse aux bases de données issues du cadastre européen EMEP (European Monitoring and Evaluation Programme) et du cadastre régional ATMO Nord-Pas de Calais. La méthodologie de calcul des émissions est présentée section 3.

Ces données sont fournies au modèle WRF comme données d'entrée.

2. Traitement des données météorologiques pour WRF

Dans WRF, nous avons recours à l'emboitement des échelles par les conditions aux limites fournies par un modèle de climat global (CNRM-CM3) car le climat régional est influencé par le climat de plus grande échelle et par ses dynamiques atmosphériques, comme les modes de variabilité ou les régimes de temps. En effet, notre but étant d'apercevoir les éventuels impacts de changements des caractéristiques temporelles des types de circulation associés aux modes de variabilité sur la diffusion de polluants atmosphériques en région Nord-Pas de Calais, nous avons besoin « d'injecter » dans le modèle météo régional les variables climatiques agissant à l'échelle des modes de variabilité en tant que conditions aux limites. De cette façon, on régionalise l'étude.

Rappelons que la modélisation de chimie intègre les conditions météorologiques, d'où l'utilisation de WRF. Deux types de données météorologiques et deux périodes de temps sont utilisés dans cette thèse. Tout d'abord les réanalyses NCEP (que l'on assimile à des observations) vont servir de série de référence, elles recouvrent la période 1960-1989. Puis les données CNRM-CM3 (simulations) recouvrent la période 2070-2099.

2.1. NCEP (actuel 1960-1989) : ds090.0

Les données météorologiques utilisées par WRF pour représenter la période actuelle sont issues des réanalyses globales NCEP/NCAR¹. Ces données ont une résolution de 2,5° en longitude et latitude, sont définies sur 17 niveaux de pression verticaux et comprennent 80 variables. Le jeu de données utilisé est l'ensemble ds090.0, disponible au pas de temps de 6 heures.

La série de commandes à effectuer pour lancer une simulation météorologique et/ou chimique est composée des commandes classiques de WRF. Un outil de pré-processing permet de fournir des données météorologiques au modèle WRF avec le module WPS (WRF Preprocessing System). Cela permet de récupérer un fichier interpolé sur le domaine d'étude. Ce module est composé de trois programmes : *geogrid.exe*, *ungrib.exe* et *metgrid.exe*. Le premier, geogrid, prépare les fichiers relatifs à l'utilisation des sols et définit le domaine de simulation pour l'interpolation finale. Le deuxième, ungrib, permet d'extraire les données météorologiques des fichiers de réanalyses pour la période de temps choisie. Enfin, la troisième commande, metgrid, crée un lien entre les informations du terrain géographique et la météorologie en interpolant les données sur le ou les domaines choisis pour une échelle spatiale et temporelle donnée.

2.2. CNRM-CM3 (futur 2070-2099) : scénario A1B

Choix du modèle couplé CNRM-CM3

Le programme ENSEMBLES² géré par le Met Office Hadley Centre regroupe sept AOGCM européens dont le HadCM3 et le CNRM-CM3. Les simulations de climat générées par ces modèles ont contribué au quatrième rapport d'évaluation de l'IPCC. En se basant sur les constatations suivantes, lesquelles précisent que les différentes simulations du climat du $20^{\text{ème}}$ siècle sont similaires entre elles d'une part et avec les observations d'autre part, et que les schémas de changement de température et de précipitations sont similaires à tous les modèles (Cubasch et Huebener, 2007), nous avons utilisé les données météorologiques du modèle CNRM-CM3 pour réaliser l'ensemble de nos simulations de chimie-transport.

 $^{^1}$ http://dss.ucar.edu/datasets/ds090.0/

² http://www.ensembles-eu.org/

Données et adaptation pour WRF

Les données destinées au modèle WRF et représentant les conditions météorologiques sous forçage anthropique par gaz à effet de serre ont pour origine le modèle CNRM-CM3 du Centre National de Recherches Météorologiques de Toulouse. Nous disposons des données issues du scénario A1B définies sur 10 niveaux verticaux au pas de temps de 6 heures. Les variables météorologiques contenues dans ces données sont les suivantes (**tableau 4.1**).

TABLEAU 4.1 – Variables météorologiques du scénario A1B fournies par le CNRM-CM3.

Humidité relative (hur)	Humidité spécifique (hus)
Température de l'air (ta)	Hauteur géopotentielle (zg)
Composante méridionale du vent (v)	Composante zonale du vent (u)
Pression de l'air en surface (ps)	Pression de l'air au niveau de la mer (psl)
Quantité de neige en surface (snw)	

Pour que les données soient utilisables par WRF, nous avons procédé à une série de traitements dont nous présentons succinctement ici les différentes étapes.

Etape 1 – Conversion du format : NetCDF en GRIB

La conversion se fait à l'aide de l'outil CDO^1 (Climate Data Operators), outil destiné à offrir une multitude d'« opérations » afin de manipuler et analyser les données des modèles climatiques. Nous avons utilisé l'une d'entres elles et obtenons un fichier au format grib :

cdo -f grb copy file.nc file.grb

Etape 2 – Conversion du format : GRIB en GRADS

La conversion est réalisée à l'aide du logiciel Xconv, qui est un utilitaire Xwindow². Il permet de lire des données, afficher des cartes et convertir des fichiers de données météorologiques en divers formats. Cette étape nous permet d'obtenir un fichier au format Grib Regular, format compatible pour nos modélisations WRF, et non Grib Gaussien avant de le convertir au format Grads.

Etape 3 – Conversion du format : GRADS en GRIB

La conversion se fait à l'aide du script *lats4d.sh* du logiciel opengrads. A ce stade, cette étape permet d'attribuer un code grib aux variables météorologiques. Ces codes (**tableau 4.2**) sont disponibles dans une Vtable directement utilisée par le modèle WRF, dénommée Vtable CNRM.

 $^{^{1}\} https://code.zmaw.de/projects/cdo/wiki/Tutorial$

² http://badc.nerc.ac.uk/help/software/xconv/

Variable	Code Grib
Humidité relative (hur)	52
Humidité spécifique (hus)	51
Pression de l'air en surface (ps)	1
Pression de l'air au niveau de la mer (psl)	2
Quantité de neige en surface (snw)	65
Composante zonale du vent (u)	33
Composante méridionale du vent (v)	34
Température de l'air (ta)	11
Hauteur géopotentielle (zg)	7

TABLEAU 4.2 – Codes grib des variables météorologiques spécifiés dans la Vtable. CNRM WRF.

Les codes grib contenus dans la Vtable permettent au modèle d'identifier la variable lors du calcul. Ces fichiers grib sont ensuite traités à l'aide du préprocesseur WPS afin de disposer de fichiers de données météorologiques utilisables par WRF.

3. Méthodologie de traitement des données d'émissions pour WRF-Chem

Pour modéliser les processus physicochimiques qui vont se développer dans l'atmosphère il faut disposer de données d'entrée (météorologiques, émissions) les plus représentatives possible de la réalité. En ce qui concerne les émissions anthropiques, ces données sont issues du traitement de données socio-économiques provenant de sources diverses (INSEE, ministères de l'agriculture, des transports, de l'industrie,...).

Cet inventaire d'émissions est réalisé pour une période de temps et une zone géographique choisies, puis il est géoréférencé à l'aide d'un SIG (Système d'Information Géographique), interpolé aux échelles de temps et d'espace de la modélisation et est spécifié chimiquement.

3.1. Base de données d'émissions

Les émissions anthropiques utilisées dans ce travail proviennent d'une part de la base de données EMEP¹ ainsi que du cadastre régional Nord-Pas de Calais, ATMO². Le premier cadastre permet de couvrir les régions extérieures à la région Nord-Pas de Calais. Le second est également employé car la résolution géographique des émissions est plus fine tout comme la description chimique des émissions.

 $^{^{1}\} http://www.ceip.at/webdab-emission-database/emissions-as-used-in-emep-models/$

² http://www.atmo-npdc.fr/home.htm

3.1.1. Les données EMEP

L'inventaire spatialisé d'émissions de polluants EMEP a été crée des suites de la convention sur la pollution transfrontière LRTAP (Long-Range Transboundary Air Pollution) à Genève en 1979 dont le but était la mise en place d'un protocole commun de mesure des polluants atmosphériques en Europe. La **figure 4.1** présente la surface géographique couverte par le cadastre EMEP et son maillage. Le maillage EMEP est basé sur une projection stéréographique polaire (**figure 4.1**) dans lequel la surface réelle est respectée à la latitude 60°N. Il est recommandé d'utiliser les domaines situés aux alentours de cette latitude et jusqu'au pôle nord mais d'éviter ceux proches de l'Equateur en raison de distorsions trop importantes. Les données sont à la résolution 50x50 km.



FIGURE 4.1 – Maillage du cadastre EMEP et surface géographique couverte par celui-ci // Calculation and Mapping of Critical Thresholds in Europe : status report 1999, Coordination Center for Effects, RIVM Report No. 259101009 (http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/figures/eea-reprojectedemep-grid).

Nous avons sélectionné les données de l'année 2010, date de la dernière mise à jour, pour les oxydes d'azotes (NOx), le monoxyde de carbone (CO), le méthane (CH₄), les oxydes de soufre (SOx), l'ammoniac (NH₃), les composés organiques volatils non méthaniques (COVNM) et les particules ($PM_{2,5}$ et coarse PM –c'est-à-dire les particules de diamètre inférieur à 2,5 micromètres et les particules inférieures à 10 micromètres).

3.1.2. Les données ATMO Nord-Pas de Calais

Le cadastre régional Nord-Pas de Calais a été réalisé par le PC2A et l'école des Mines de Douai en 2004 (Martinet, 2004), il est disponible et actualisé sur le site du réseau ATMO Nord-Pas de Calais. Ce cadastre a été, quant à lui, réalisé sous une projection Lambert conforme. Il comprend 19 espèces, dont les familles chimiques de l'inventaire EMEP, qu'il est possible de différencier en quatre groupes pour plus de lisibilité : les gaz à effet de serre (CH₄, CO₂, N₂O) ; les métaux (Cd, Hg, Ni, Pb, Zinc Zn) ; familles EMEP (SO₂, ammoniac NH₃, CO, COV, TSP, NOx) ; et les autres (Benzène C₆H₆, les dioxines, HAP, Chlorure d'hydrogène HCl, Fluorure d'hydrogène HF).

A l'instar du maillage EMEP, ces données sont détaillées à l'échelle de la commune et permettent dès lors d'obtenir une spatialisation plus fine des émissions. La **figure 4.2** est un exemple de spatialisation issue du cadastre régional représentant les émissions horaires de PM_{10} (en $\mu g.m^2.s^{-1}$) du 1^{er} décembre 2010 à 20h UTC maillées pour une résolution de 5x5 km.



FIGURE 4.2 – Spatialisation des émissions horaires de PM_{10} (en $\mu g.m^2.s^{-1}$) issues du cadastre régional Nord-Pas de Calais du 1^{er} décembre 2010 à 20h UTC.

La précision de la résolution spatiale du cadastre est assez fine pour que nous puissions aisément remarquer les zones fortement urbanisées dessinées par d'importantes émissions de PM_{10} en rouge. La dernière mise à jour (2011-2012) n'est pas encore disponible sur le serveur ATMO Nord-Pas de Calais.

3.2. Problème de compatibilité entre les données d'émissions et WRF-Chem

Les cadastres d'émissions EMEP et ATMO sont basés sur la méthodologie EMEP/CORINAIR Atmospheric Emission Inventory Guidebook (CORe INventory of AIR emissions) développée en 1995. Ils sont constitués de données d'émissions annuelles géoréférencées, pour diverses espèces chimiques distribuées sur 11 types de sources identifiés par leurs codes SNAP (Selected Nomenclature for Atmospheric Pollution, **tableau 4.3**). La méthodologie CORINAIR a instauré la nomenclature européenne SNAP afin d'avoir un code de lecture unifié au sein de l'Union Européenne. Le code SNAP est organisé en trois niveaux de hiérarchie permettant une classification précise des émissions en fonction des catégories émettrices. En détaillant les émissions par groupes d'activités et de sousactivités SNAP, la méthodologie CORINAIR dispose de méthodes qui permettent d'attribuer par défaut des profils temporels et de spéciation chimiques spécifiques.

TABLEAU 4.3 – Codes SNAP, niveau 1.

SNAP niveau 1	Activité émettrice
Groupe 1	Combustion dans les industries de l'énergie et de la transformation de l'énergie
Groupe 2	Combustion hors industrie
Groupe 3	Combustion dans l'industrie manufacturière
Groupe 4	Procédés de production
Groupe 5	Extraction et distribution de combustibles fossiles/énergie Géothermique
Groupe 6	Utilisation de solvants et autres produits
Groupe 7	Transport routier
Groupe 8	Autres sources mobiles et machines
Groupe 9	Traitement et élimination des déchets
Groupe 10	Agriculture et sylviculture
Groupe 11	Autres sources et puits

Le modèle choisi pour cette étude, WRF-Chem est un modèle américain développé par le NCAR (National Center for Atmospheric Research). Les différents modules de préparation des émissions anthropiques sont prévus pour l'inventaire d'émissions américain NEI-05 et sont directement fournis par l'agence américaine de protection de l'environnement (US-EPA : United States – Environmental Protection Agency). Cet inventaire est décliné selon une classification SCC (Source Classification Code) qui est très différente de la nomenclature SNAP européenne. Elle s'appuie sur une structure hiérarchique à 4 niveaux ce qui permet une description croissante des types d'activités émetteurs de polluants.

Ces différences de classification rendent difficile l'adaptation et la transposition complète entre les codes européens SNAP et américains SCC (Bieser et al., 2011). Néanmoins il est nécessaire d'implémenter dans un modèle de chimie-transport des données d'émissions qui répondent à des résolutions temporelles et spatiales spécifiques. Elles doivent être compatibles avec WRF-Chem. Une nouvelle interface nommée *EASYWRF-Chem* (Emission Adaptation System for WRF-Chem) a donc été développée dans le cadre de la thèse d'un doctorant de notre équipe de recherche, Maxence Mendez (Mendez, 2012), afin de construire des fichiers d'émissions compatibles avec le format d'entrée

du modèle WRF-Chem et le mécanisme chimique choisit RADM2. Par la suite, les étapes successives de cette interface sont expliquées sommairement.

Les données d'émissions ne pouvant être introduites directement dans le modèle, elles nécessitent un prétraitement (préprocessing) afin de les mettre à l'échelle de temps (interpolation temporelle) et d'espace (interpolation spatiale) choisies par l'utilisateur mais également de les spécifier chimiquement afin de les rendre compatibles avec le mécanisme chimique du modèle.

Dans notre travail, nous procédons donc en trois étapes schématisées sur le diagramme de la figure 4.3 :

- répartition temporelle des données d'émissions sur la période déterminée,
- conversion des familles chimiques des inventaires d'émissions en espèces chimiques,
- spatialisation des émissions sur le maillage du modèle.



FIGURE 4.3 – Diagramme schématisé des 3 modules de préparation des émissions anthropiques du cadastre EMEP pour le modèle WRF-Chem par EASYWRF-Chem.

3.3. Méthodologie de EASYWRF-Chem

3.3.1. Traitements temporels des données d'émission

Comme nous l'avons vu précédemment, les données d'inventaire d'émissions EMEP et ATMO sont annuelles. Il est nécessaire d'appliquer des profils temporels mensuels puis horaires (issus de CORINAIR) pour le modèle de chimie-transport qui nécessite une donnée d'émission sur une base horaire dans notre cas.

Le premier traitement consiste à appliquer des coefficients temporels mensuels, c'est la première répartition temporelle : elle permet d'obtenir un profil mensuel d'émissions. En fonction du premier niveau SNAP et du pays émetteur, le manuel Emissions Inventory Guidebook CORINAIR distingue des profils représentatifs.

A ces profils mensuels s'appliquent ensuite des profils horaires. Ceux-ci sont distincts de la SNAP et du type de jour. De cette façon, 3 types de jours sont différenciés :

- les jours ouvrés (lundi au vendredi inclus),
- les samedis,
- les dimanches et les jours fériés.

Après l'obtention d'une valeur d'émission horaire par polluant et par SNAP, nous appliquons la spéciation chimique afin d'obtenir des fichiers d'émissions pour les espèces apparaissant dans le mécanisme choisi sous WRF-Chem.

3.3.2. Traitement chimique des données d'émission : spéciation et agrégation

La spéciation

La répartition des composés chimiques dans un inventaire d'émissions se fait généralement non pas composé par composé mais plutôt pour une famille de composés. La spéciation, comme son nom l'indique, consiste à répartir les émissions des familles chimiques en émissions d'espèces individuelles. Pour ce faire, on applique des coefficients de spéciation qui permettent de distribuer la masse totale des émissions de la famille chimique pour chacun des composés formant la famille.

En ce qui nous concerne, le cadastre EMEP fournit des données d'émissions anthropiques pour 7 familles chimiques : SOx, NOx, CO, CH₄, COVNM, TSP, NH₃. En se basant sur la méthodologie PORG3 – UK (Passant, 2002), il est possible d'appliquer des coefficients de spéciation différents selon le code SNAP. Nous répartissons ainsi les 6 familles d'espèces gazeuses en plus de 270 espèces réelles appelées « espèces chimiques spécifiques ». Les TSP, étant des aérosols, ils seront convertis en PM_{10} et $PM_{2,5}$. La méthode est similaire pour le cadastre régional.

L'agrégation

Le manque de données mécanistiques ainsi que les limitations de l'outil informatique font que les mécanismes chimiques utilisés par les modèles sont généralement constitués d'un mélange de mécanismes chimiques d'espèces individuelles, d'approximations et d'espèces de substitutions que nous appellerons « espèces chimiques simulées».

Il est nécessaire à ce niveau d'agréger les « espèces chimiques spécifiques » en « espèces chimiques simulées». Les espèces simulées représentent les espèces utilisées par le modèle de chimie-transport WRF-Chem. Cette agrégation chimique a été réalisée à l'aide de la méthodologie SAPRC (Carter, 2010). Elle permet d'associer les différentes espèces chimiques au sein d'une seule famille.

Grâce à la méthodologie SAPRC, les 270 « espèces chimiques spécifiques » sont converties en 40 « espèces chimiques simulées» sur lesquelles un facteur de réactivité doit être appliqué. La même méthodologie est également appliquée au cadastre régional.

3.3.3. Interpolation spatiale des données d'émission

Il faut maintenant calculer les émissions pour le domaine choisi pour la modélisation.

Méthodologie

Pour se faire, nous avons développé un algorithme qui calcule tout d'abord les coordonnées et les surfaces de chacune des mailles de l'inventaire d'émissions obtenu. Ensuite, le programme va calculer pour chacune des mailles du domaine choisi pour la modélisation, la surface commune entre les mailles du domaine couvert par le cadastre et celle du domaine à modéliser.

Finalement, à une maille du domaine modélisé, on attribue une émission équivalente à la somme des émissions des mailles du cadastre pondérées par leur fraction surfacique commune à l'aide de la formule :

$$E_{WRF} = \sum \frac{E_{EMEP} \times S_{COMMUN}}{S_{EMEP}}$$
 Eq. (4)

où

 $E_{\rm WRF}$ est l'émission attribuée à la maille du modèle WRF $E_{\rm EMEP}$ est l'émission calculée pour la maille du cadastre EMEP $S_{\rm COMMUN}$ est la surface commune aux 2 mailles $S_{\rm EMEP}$ est la surface d'une maille EMEP

Imbrication des données européennes et régionales

Afin d'avoir la résolution spatiale la plus fine, la dernière étape du programme de génération des émissions pour WRF-Chem est de sélectionner prioritairement les données d'émissions provenant du cadastre à haute résolution spatiale (cadastre régional) et d'ensuite ajouter autour de celui-ci les émissions provenant du cadastre européen EMEP (Terrenoire and Fèvre-Nollet, 2008).

Choix de la séquence d'émissions

Précisons que nous utilisons la même plage d'émissions entre les simulations actuelles et les simulations futures. Ceci permet d'appréhender l'effet du forçage anthropique sur la diffusion des polluants à travers les variables météorologiques, et non à travers l'effet de modification des émissions. Aussi, afin de ne prendre en compte que l'effet climatique, nous avons sélectionné une plage d'émissions d'une durée de 10 jours qui servira de données d'entrée unique pour l'ensemble des calculs WRF-Chem. La période choisie est celle du 10 au 20 février 2010. A titre d'exemple, les **figures 4.4 à 4.7** illustrent les émissions de NO₂ et de $PM_{2,5}$ sur 2 jours pour une maille du cadastre ATMO (Lille) et EMEP (Londres). Nous remarquons que les profils de décembre et janvier sont confondus en **figure 4.7**.



FIGURE 4.4 – Variation mensuelle des émissions de NO_2 calculées pour une maille de la ville de Lille (cadastre ATMO).



FIGURE 4.5 – Variation mensuelle des émissions de NO_2 calculées pour une maille de la ville de Londres (cadastre EMEP).



FIGURE 4.6 – Variation mensuelle des émissions de $PM_{2,5}$ calculées pour une maille de la ville de Lille (cadastre ATMO).



FIGURE 4.7 – Variation mensuelle des émissions de $PM_{2,5}$ calculées pour une maille de la ville de Londres (cadastre EMEP).

Le choix des émissions les plus élevées des mois d'hiver (c'est-à-dire février) se justifie par le fait que le profil temporel est plus marqué et périodique, ce qui permet d'avoir des concentrations dans l'atmosphère assez significatives.

Intéressons-nous maintenant aux profils des émissions au cours d'une semaine. Les **figures 4.8 à 4.11** présentent les profils d'émissions hebdomadaires de NO_2 et $PM_{2,5}$ pour une maille du cadastre ATMO (Lille) et EMEP (Londres).



FIGURE 4.8 – Variation hebdomadaire des émissions de NO_2 calculées pour une maille de la ville de Lille (cadastre ATMO).



FIGURE 4.9 – Variation hebdomadaire des émissions de NO_2 calculées pour une maille de la ville de Londres (cadastre EMEP).


FIGURE 4.10 – Variation hebdomadaire des émissions de $PM_{2,5}$ calculées pour une maille de la ville de Lille (cadastre ATMO).



FIGURE 4.11 – Variation hebdomadaire des émissions de $PM_{2,5}$ calculées pour une maille de la ville de Londres (cadastre EMEP).

On peut remarquer que la répartition hebdomadaire sur 3 types de jours (les jours ouvrés, le samedi, le dimanche) n'est pas effective pour toutes les espèces du mécanisme. En effet, sur les **figures 4.8 et 4.9** on distingue bien la différence entre les jours ouvrés, le samedi et le dimanche pour le NO_2 alors que le profil hebdomadaire est parfaitement périodique pour les $PM_{2,5}$ (**figures 4.10 et 4.11**). Cela s'explique par le manque de données sur les $PM_{2,5}$, en effet, un seul type de profil est disponible dans la base de donnée.

4. Nos simulations avec WRF et WRF-Chem

4.1. Séquences temporelles à modéliser

Les dates des périodes que nous allons modéliser sont variables (voir **tableau 4.4**). Ces périodes comprennent les jours « clef » à modéliser (résultats du chapitre 2) et quelques jours (3 à 5) les précédant afin d'initier le système de modélisation.

TABLEAU 4.4 - Séquences de jours à modéliser pour les périodes actuelle et future, selon les mois, les modes de variabilité et leurs phases (+ ou -).

	DEC		JAN		FEV	
	+	_	+	_	+	_
ACTUEL - 1960-	-1989		L		L	
ONA	20-29 déc. 1974	7-16 déc. 1978	10-19 jan. 1984	5-14 jan. 1963	16-25 fév. 1989	1-10 fév. 1965
EA	14-23 déc. 1989	11-20 déc. 1969			11-20 fév. 1977	2-11 fév. 1969
NCP	6-15 déc. 1981	8-17 déc. 1971				
EA-MM			1-10 jan. 1987	9-18 jan. 1969		
			1		1	
	DEC		JAN		FEV	
	+	_	+	_	+	_
FUTUR – 2070-2099						
ONA	12-21 déc. 2099	6-15 déc. 2094	21-30 jan. 2092	17-26 jan. 2087	9-18 fév. 2095	1-10 fév. 2088
EA	19-28 déc. 2097	3-12 déc. 2070			6-15 fév. 2079	7-16 fév. 2070
NCP	1-10 déc. 2092	5-14 déc. 2090				
EA-MM			6-15 jan. 2095	5-14 jan. 2081		

Pour la période actuelle les réanalyses NCEP (jeu de données ds083.2) ont été utilisées en tant que données d'entrée de variables météorologiques afin d'étudier la capacité du modèle WRF-Chem à reproduire une série de mesures. Une comparaison statistique mesures/modèle sur deux périodes reflétant chacune une saison différente est présentée **tableau 4.5**, elle est directement basée sur les résultats obtenus par Maxence Mendez dans le cadre d'une thèse de doctorat (Mendez, 2012) réalisée en parallèle de mon travail de thèse. Plus exactement les paramètres météorologiques de température (T en Kelvin), d'humidité relative (RH en %), de vitesse de vent (WS en m.s⁻¹), de direction de vent (WD en °) et de précipitation (RF en mm) ont été comparés statistiquement. Les mesures reflètent les mesures effectuées par 16 stations météorologiques de Météo France (annexe 3) et les données simulées correspondent aux valeurs estimées par le modèle WRF. Les simulations ont été réalisées pour les données d'un domaine de résolution 5x5 km, englobant le nord de la France, le sud ouest du Royaume-Uni et les pays du Benelux. Une période traduit la saison estivale (30 mai 2011 au 22 juin 2011 et du 4 juillet 2011 au 5 août 2011) et une autre reflète la saison hivernale (15 novembre 2010 au 13 décembre 2010 et du 4 janvier 2012 au 16 février 2012).

	Т	RH	WS	WD	RF
Moyenne Observations	288,69	77,13	3,93	198,19	0,09
Moyenne Simulations	286,72	85,73	4,90	220,68	0,09
r	0,83	0,67	0,75	0,56	$0,\!17$
	Т	RH	WS	WD	RF
Moyenne Observations	275,35	84,94	4,15	180,61	0,04
Moyenne Simulations	275,01	88,98	5,47	176,61	0,07
r	0,90	0,63	0,72	$0,\!57$	0,25

TABLEAU 4.5 – Comparaison des valeurs simulées par WRF-Chem à celles mesurées par 16 stations météorologiques Météo France lors de la période estivale (en haut) et hivernale (en bas).

Nous pouvons voir que le modèle WRF semble reproduire les paramètres météorologiques correctement sur les périodes sélectionnées. La température hivernale a un coefficient de corrélation (r) élevé (0,9), plus bas en été (0,83). L'humidité relative est sur-estimée par le modèle en été avec toutefois un coefficient de 0,65 en moyenne. La vitesse du vent est davantage mieux reproduite par le modèle (r de 0,75 en été, r de 0,72 en hiver). Malgré un coefficient de corrélation de 0,57 en moyenne, WRF reproduit bien la direction du vent lors de la période hivernale. Enfin, le modèle semble avoir des difficultés à reproduire le début des épisodes de pluie, ce qui explique les corrélations faibles (0,17)

et 0,25). Néanmoins de façon générale et mise à part les précipitations, WRF reproduit de façon satisfaisante les paramètres météorologiques sur l'ensemble de ces périodes.

4.2. Différences entre les simulations actuelles et futures

Nous nous intéressons tout particulièrement à la région Nord-Pas de Calais, aussi dans ce chapitre nous avons privilégié le domaine n°3, celui dont les mailles sont les plus petites (7,5x7,5 km), les résultats sur les domaines 1 et 2 servant principalement à la prise en compte des conditions limitrophes. A noter que nous nous limitons aux calculs des modes ONA et EA qui sont des modes récurrents influant le climat Atlantico-Européen, soit 20 périodes à modéliser et à cartographier. Nous avons procédé de la sorte : pour chaque phase + et - des modes ONA et EA, nous avons généré des « cartes de différences » entre la période future et la période actuelle. Les constituants chimiques qui nous intéressent concernent essentiellement les $PM_{2,5}$ et PM_{10} . Toutefois nous avons également cartographié les variables chimiques SO_2 , NO_2 et O_3 .

Rappelons que les séquences à modéliser sont de 10 jours, 5 premiers jours pour initialiser le système, les 5 derniers jours étant ceux ayant été sélectionnés comme les plus représentatifs de la circulation moyenne des modes. Les cartes de différences (écarts) sont basées sur la moyenne de ces 5 derniers jours, futurs d'une part et actuels d'autre part.

Le **tableau 4.6** présente l'ensemble des tendances des taux de polluants différenciées en fonction des modes de variabilité et plus particulièrement en fonction de leur phase d'intensité. Voyons en trois sous-parties les principales lignes que s'en dégagent à travers l'étude de cas choisis.

4.2.1. Hausse généralisée des taux de particules

Quel que soit le mode de variabilité les taux de PM_{10} augmenteraient au cours des périodes hivernales futures sélectionnées, de façon plus ou moins accentuée. L'EA+ de février est sujet à une faible augmentation (de 0 à +5 µg.m⁻³) sur l'ensemble du domaine mêlée à une diminution légère (-2,5 µg.m⁻³) localisée sur la métropole Lilloise. Le reste des situations fait le constat d'augmentations plus marquées allant jusqu'à une différence positive de 20 µg.m⁻³ dans le cas de l'EA- de février ou encore supérieure à 17,5 µg.m⁻³ dans le cas de l'EA- de décembre.

La tendance à la hausse des taux de PM_{10} est toutefois contrariée par l'apparition de deux situations contraires pour lesquelles nous pouvons noter une baisse des taux, baisse considérée malgré tout comme faible (-5 µg.m⁻³). Ces deux cas sont illustrés **figures 4.13** (ONA+ décembre) et **4.14** (EA+ décembre).

La situation ONA+ de décembre (**figure 4.13**) montre une baisse maximale de 10 μ g.m⁻³ sur la région Lilloise (3°W ; 50,5°N) entre 1974 et 2099, traduite par un passage de 35/40 μ g.m⁻³ à 25/30 μ g.m⁻³. La même remarque peut être formulée pour EA+ de décembre (**figure 4.14**) malgré une baisse moins franche.

TABLEAU 4.6 – Tendances des taux de polluants sur la région Nord - Pas de Calais selon la phase d'intensité des modes de variabilité ONA et EA. + signifie une évolution à la hausse ; – signifie une évolution à la baisse ; = signifie stable. Entre parenthèses : écart maximal (en $\mu g.m^3$ pour les $PM_{2,5}$ et PM_{10} , en ppb pour NO_2 , O_3 et SO_2).

	$\mathrm{PM}_{2,5}$	PM_{10}	NO_2	O_3	SO_2
ONA +					
Jan 2092/1984	+ (6)	+(12,5)	-(12)	+ (4)	-(6)
Fév $2095/1989$	+(10)	+(12,5)	+ (6)	-(14)	=
Déc $2099/1974$	+	-(5)	+ (5)	+ (4)	=
ONA –					
Jan 2087/1963	+	+ (7,5)	+ (7)	-(8)	-(6)
Fév $2088/1965$	+(12)	+(15)	+ - (12, -9)	+ (4)	-(6)
Déc $2094/1978$	+(14)	+(12,5)	+ (30)	-(14)	+ (6)
ONA total	+	+	+	=	
EA +					
Fév $2079/1977$	-(6)	+ (5)	-(12)	+ (8)	-(5)
Déc $2097/1989$	+ (6)	-(5)	+ (6)	-(8)	=
EA -					
Fév $2070/1969$	+(18)	+ (20)	+ (30)	-(16)	+ (6)
Déc $2070/1969$	+(14)	+(17,5)	+ (21)	=	+ (5)
EA total	+	+	+	_	

Les taux de $PM_{2,5}$ suivent la même tendance, à savoir une augmentation des taux de $PM_{2,5}$ sur la région Nord - Pas de Calais. Nous illustrons cette augmentation générale pour deux cas fortement marqués : EA– de février (**figure 4.15**) et ONA– de décembre (**figure 4.16**). Le premier fait état d'une hausse de 15 à 21 µg.m⁻³ sur l'ensemble de la région, en effet en 1969 les taux étaient situaient entre 4 et 13 µg.m⁻³ avec un maximum sur Lille (20 µg.m⁻³) alors qu'en 2070 ils seraient entre 24 et 45 µg.m⁻³, le maximum étant alors réservé à Dunkerque et la métropole Lilloise. Le deuxième cas est similaire vis-à-vis des écarts, traduits par une augmentation de +14 à +26 µg.m⁻³. La **figure 4.12** tirée du rapport de l'EEA (European Environment Agency) de 2007 illustre la diminution moyenne de l'espérance de vie suite à l'exposition de $PM_{2,5}$ anthropogéniques de 9 mois. Des élévations comme nous en avons simulées pourraient si elles persistaient spatialement et temporellement influencer l'état de santé à terme des habitants de notre région.



Source: IIASA.

FIGURE 4.12 – Impact sanitaire des concentrations de PM ($\mu g/m^3$). La perte de l'espérance de vie (en mois) peut être attribuée aux contributions anthropogéniques de $PM_{2,5}$ pour l'année 2000 (à gauche) et pour 2020 (à droite) // EEA, 2007.

Seuls deux cas sur la totalité des 10 présentent une baisse des taux de $PM_{2,5}$, taux modérés avec un maximum à -6 µg.m⁻³, localisé sur Lille dans le cas de l'ONA+ de janvier et entre 0 et -6 µg.m⁻³ dans le cas de l'EA+ de février.

Notons que les hausses de particules peuvent être le fruit du transport longue-distance, inter continents. Par exemple (Monks et al., 2009), les poussières du désert du Sahara peuvent être transportées vers l'ouest sur le nord Atlantique principalement sous l'effet des vents et ce sur 5 000 km et plus et ainsi perturber la qualité de l'air en Europe. Les poussières du désert d'Asie peuvent elles aussi contribuer à la dégradation de la qualité de l'air en Amérique du Nord. Autre exemple encore, celui des grands feux d'Alaska ou de Russie, lesquels peuvent avoir un impact atmosphérique en Europe.



FIGURE 4.13 – Taux de PM_{10} moyennés sur les 5 jours représentatifs de décembre 1974 (en haut à gauche) et 2099 (en haut à droite) (ONA+), et écarts de PM_{10} entre ces 2 périodes (bas).



FIGURE 4.14 – Taux de PM_{10} moyennés sur les 5 jours représentatifs de décembre 1989 (en haut à gauche) et 2097 (en haut à droite) (EA+), et écarts de PM_{10} entre ces 2 périodes (bas).



FIGURE 4.15 – Taux de $PM_{2,5}$ moyennés sur les 5 jours représentatifs de février 1969 (en haut à gauche) et 2070 (en haut à droite) (EA–), et écarts de $PM_{2,5}$ entre ces 2 périodes (bas).



FIGURE 4.16 – Taux de $PM_{2,5}$ moyennés sur les 5 jours représentatifs de décembre 1978 (en haut à gauche) et 2094 (en haut à droite) (ONA–), et écarts de $PM_{2,5}$ entre ces 2 périodes (bas).

4.2.2. Hausse marquée des taux de NO_2

Le **tableau 4.6** nous informe que parmi les 9 cas aux tendances nettes, 7 affichent une tendance à la hausse des concentrations de dioxyde d'azote. La **figure 4.17** permet de l'illustrer par un exemple, il s'agit des concentrations associées au mode ONA– de janvier. Cet exemple montre toutefois des écarts positifs très localisés faisant écho aux trois « zones phares » visibles sur la carte de janvier 2087 (Dunkerque et Saint-Omer : fortes sources d'émissions industrielles et Lille : forte urbanisation). Les configurations d'EA– en décembre (**figure 4.18**) et février et d'ONA– en décembre (**figure 4.19**) sont plus accentuées par rapport aux écarts de NO₂, respectivement allant de 18 à 30 ppb minimum, de 12 à 30 ppb minimum et de 6 à 21 ppb.

Pour le cas particulier de EA– de décembre (**figure 4.18**), nous pouvons spécifier qu'entre 1969 et 2070, les zones de diffusion de NO₂ des « zones phares » restent identiques en terme d'emplacement spatial mais elles seraient plus étendues, expliquant de ce fait les écarts importants.

Pour le second cas particulier d'ONA– de décembre (**figure 4.19**), entre 1978 et 2094 les zones initiales de présence de NO₂ visibles en décembre 1978 seraient largement plus diffusées vers l'ouest et avec des concentrations plus grandes. Aussi une part importante de la région se retrouverait sous des concentrations de NO₂ allant au-delà de 45 ppb.

Parmi les 9 cas aux tendances nettes, 2 cas évoluent à la baisse jusque -12 ppb de NO₂. Parmi ceuxci, la **figure 4.20** représente l'exemple de la configuration EA+ de février. Par rapport à celles de 1977, les zones spatiales de diffusion du NO₂ en 2079 sont plus retreintes. Nous retrouvons aisément les « zones phares », celles-ci seraient davantage limitées dans l'espace et propageraient des concentrations plus faibles (maximum diminué par rapport à 1977 pour la grande périphérie de Lille). Il en va de même en dehors de la région, avec par exemple les régions du Havre (0,5°E ; 49,5°N), de Paris (2°E ; 49°N), de Nantes Saint-Nazaire (1,5°W ; 47,5°N), d'Utrecht Amsterdam (4,5°E ; 52°N) ou encore d'Essen Münster (7°E ; 51,5°N).

Enfin, un cas d'évolution du NO_2 n'est pas net, en effet la tendance des concentrations de NO_2 sur la région Nord - Pas de Calais est partagée entre une part à la hausse et une part à la baisse (**figure 4.21**). La diminution va au-delà de 9 ppb principalement au sud-est de la région incluant la métropole Lilloise, l'augmentation pour sa part concerne la moitié nord de la région (touchant principalement la région de Dunkerque).



FIGURE 4.17 – Taux de NO_2 moyennés sur les 5 jours représentatifs de janvier 1963 (en haut à gauche) et 2087 (en haut à droite) (ONA–), et écarts de NO_2 entre ces 2 périodes (bas).



FIGURE 4.18 – Taux de NO_2 moyennés sur les 5 jours représentatifs de décembre 1969 (en haut à gauche) et 2070 (en haut à droite) (EA–), et écarts de NO_2 entre ces 2 périodes (bas).



FIGURE 4.19 – Taux de NO_2 moyennés sur les 5 jours représentatifs de décembre 1978 (en haut à gauche) et 2094 (en haut à droite) (ONA–), et écarts de NO_2 entre ces 2 périodes (bas).



FIGURE 4.20 – Taux de NO_2 moyennés sur les 5 jours représentatifs de février 1977 (en haut à gauche) et 2079 (en haut à droite) (EA+), et écarts de NO_2 entre ces 2 périodes (bas).



FIGURE 4.21 – Taux de NO_2 moyennés sur les 5 jours représentatifs de février 1965 (en haut à gauche) et 2088 (en haut à droite) (ONA–), et écarts de NO_2 entre ces 2 périodes (bas).

4.2.3. Evolution mitigée des taux d'ozone

Nous pouvons voir sur le tableau 4.6 que 4 cas atmosphériques favoriseraient à l'avenir l'augmentation des concentrations d'ozone sur la région Nord - Pas de Calais, mais ces augmentations sont relativement faibles, jusque 4 ppb avec un maximum à 8 ppb. Cette hausse concerne la configuration EA+ de février et se localise plus précisément sur l'agglomération de Lille. En revanche les figures 4.22 et 4.23 font référence à deux exemples de situations atmosphériques propices à la diminution des taux d'O₃. L'un a une baisse de -4 à -16 ppb, l'autre de -6 à -12, les zones les plus déficitaires étant situées à proximité de la façade maritime. L'ozone est une espèce photochimique, sa production est très dépendante de l'ensoleillement et des conditions météorologiques (vents calmes, haute température entres autres). Si l'on compare les tendances pour la température et l'ozone on voit généralement qu'il existe une corrélation entre augmentation des températures et augmentation des concentrations d'ozone. Néanmoins, sur la totalité des situations du tableau 4.6, excepté EA- de décembre, deux d'entres elles n'ont pas leurs écarts de température et d'ozone corrélés. Parmi ces dernières, la situation de ONA- en janvier est particulière, les écarts étant à mettre en parallèle avec une période de grand froid en janvier 1963 pendant laquelle les températures moyennes pour le mois furent sous la barre des -12,8 degrés Celsius dans le sud de l'Angleterre et à travers l'Europe jusqu'à l'Oural (O'Connor, 1963).

Nous notons plutôt une baisse des taux d'ozone mais d'autres publications sur l'impact régional du changement climatique comme Forkel et Knoche (2006), Meleux et al. (2007) ou de Mickley et al. (2004) trouvent une hausse générale des concentrations d'ozone en raison des hausses des émissions biogéniques et de la radiation en courte longueur d'onde, augmentation du maximum journalier moyen de l'ordre de 2 à 6 ppb selon les régions dans le cas de Forkel et Knoche (2006). Cette contradiction de tendance n'est pas forcément un non-sens car même si les niveaux de fond planétaires d'ozone sont en hausse (Parrish et al., 2009), d'après les conclusions des études citées précédemment, l'échelle considérée est différente tout comme la saison (estivale). La variabilité spatiale des concentrations peut expliquer qu'en fonction de l'espace géographique étudié, les tendances observées puissent différer.

4.2.4. Types de circulation

Les périodes sélectionnées correspondent aux journées dont la circulation moyenne à 500 hPa est la plus représentative de la circulation moyenne mensuelle. Ces dernières se rapportent à différents types de circulation exposés chapitre 3, section 4.2 (page 149). Nous souhaitons voir si à un type de circulation est associé une tendance spécifique en termes de niveaux de pollution. Aussi le **tableau 4.7** reprend les tendances des taux de particules, de dioxyde d'azote et d'ozone. Nous ne constatons pas de tendance spécifique selon le type de circulation. En effet, les taux de particules fines et grossières ont tendance à augmenter quelle que soit la circulation recensée, de même que pour NO_2 . On retrouve la tendance à la baisse précédemment évoquée pour les taux d'ozone.

TABLEAU 4.7 – Tendances à la hausse (+), à la baisse (-) ou stable (=) des taux de particules $PM_{2,5}$ et PM_{10} , du dioxyde d'azote et d'ozone en fonction des types de circulation représentatifs des séquences temporelles sélectionnées.

	$\mathrm{PM}_{2,5}$	PM_{10}	NO_2	O_3
M. de nord-ouest	+ + +	+ + +	+ + +	=
M. de sud-ouest	+ + +	+ + -	+ + =	+
Zonale	+ + + -	+ + + -	+ +	+ + + -

Comme le précise l'UNECE (United Nations Economic Commission for Europe, UNECE, 2010) le dépôt et les concentrations de particules et d'ozone sont influencés par le transport atmosphérique entre les continents. Gardons à l'esprit que le déplacement des masses d'air est conditionné par les vents dominants. Aussi, même si les types de circulation ne semblent pas influencer ou initier une orientation particulière des concentrations des espèces chimiques étudiées, nous mettons toutefois en relation l'ozone et le dioxyde d'azote à travers le cycle de Clayton (chapitre 1, partie 2, figure 1.16, page 42). Si les particules en suspension sont plus nombreuses alors la part du rayonnement solaire troposphérique propice à la génération d'ozone peut être réduite ; de ce fait le NO₂ n'est pas consommé pour la production d'ozone. Inversement, un rayonnement solaire plus « accessible » suite à un taux de particules en suspension moindre engendrera la production d'ozone, le dioxyde d'azote étant alors consommé.

La dispersion et la génération de ces espèces chimiques seraient donc modifiées en fonction des conditions météorologiques, en effet ce sont les seules variables que nous avons modifié, les émissions quant à elles sont identiques entre les simulations actuelles et futures. Puisque la réactivité n'est pas prise en compte dans le modèle, comment expliquer les hausses de particules en suspension ou de dioxyde d'azote ? Ces tendances peuvent être expliquées par les vitesses et direction de vent différentes entre périodes actuelles et périodes futures ou par différentes hauteurs de mélange, auxquels cas les masses d'air polluées peuvent s'accumuler.



FIGURE 4.22 – Taux de O_3 moyennés sur les 5 jours représentatifs de février 1969 (en haut à gauche) et 2070 (en haut à droite) (EA–), température moyenne à 2 mètres de février 1969 (centre à gauche) et de février 2070 (centre à droite), et écarts de O_3 entre ces 2 périodes (bas).



FIGURE 4.23 – Taux de O_3 moyennés sur les 5 jours représentatifs de février 1989 (en haut à gauche) et 2095 (en haut à droite) (ONA+), température moyenne à 2 mètres en février 1989 (centre à gauche) et en février 2070 (centre à droite), et écarts de O_3 entre ces 2 périodes.



Les objectifs du projet de recherche effectué au cours de ce doctorat étaient d'étudier si, à travers l'augmentation des émissions de dioxyde de carbone, les activités anthropiques pouvaient influencer la variabilité de la circulation atmosphérique de la fin du 21^{ème} siècle et si cela pouvait consécutivement modifier la diffusion et les concentrations de polluants sur la région Nord – Pas-de-Calais.

Pour cela nous avons choisi de mener l'étude en comparant la *variabilité atmosphérique* de la période future 2070-2099 à celle de la période dite actuelle 1960-1989. La période future reflète alors l'influence anthropique par forçage d'émissions tandis que la période actuelle n'intègre aucun scénario de forçage anthropique. Le chapitre 3 est dédié à cette démarche.

Une **première étape** a été de définir le cadre spatial, les besoins et les objets d'étude. Aussi après avoir choisi le paramètre météorologique permettant d'appréhender la circulation atmosphérique qu'est le géopotentiel 500 hectopascals, nous avons caractérisé la variabilité du champ de pressions à travers les structures dénommées modes de variabilité. A cela fut ajoutée l'étude des régimes de temps, une variabilité différente de la circulation atmosphérique à 500 hPa. Ce travail devant être réalisé pour la période actuelle et future, il a fallu avoir recours aux simulations climatiques générées par un modèle de circulation générale couplé océan-atmosphère, le modèle HadCM3, du Hadley Centre. A partir de diverses simulations nous avons pu obtenir les champs du géopotentiel 500 hPa et ce, d'une part pour la période actuelle et d'autre part pour la période future, laquelle est représentée par différents scénarios d'émissions anthropiques : B1, B2, A1B et A2 différenciés selon la concentration de dioxyde de carbone estimée d'ici 2100. L'ensemble de ces données fut adapté à l'espace Atlantico-Européen (20°N, 70°N; 60°W, 60°E) assez vaste pour représenter la variabilité atmosphérique.

Une **seconde étape** majeure a été d'appliquer les *techniques de classification* sur les cinq jeux de données de géopotentiel afin de révéler les principales structures de la variabilité de la circulation atmosphérique. Deux techniques de classification différentes ont été utilisées à partir de données de géopotentiel : les données moyennes mensuelles pour la détection des modes de variabilité par la technique de l'*analyse en composantes principales* et les données moyennes journalières pour les régimes de temps par un *algorithme mathématique de partitionnement*.

Une **troisième étape** préliminaire aux lancements des calculs concerne la *reproductibilité* du champ géopotentiel par le modèle HadCM3. Par comparaison des observations (réanalyses) à la simulation actuelle, le modèle s'est avéré capable de reproduire les structures des modes de variabilité et des régimes de temps.

Concernant l'étude de l'influence de forçages anthropiques d'émissions sur les modes de variabilité, notre méthodologie a permis de constater que seul un ensemble de structures dont le rôle sur la variabilité est prédominant et agissant en période actuelle montrait une *persistance d'apparition* au cours de la période future indépendamment du scénario employé. En décembre, les structures Oscillation Nord Atlantique, Est Atlantique - Ouest Russie et Est Atlantique restent acteurs de la variabilité atmosphérique quel que soit le scénario. En janvier, deux structures persistent à l'avenir représentées par l'Est Atlantique et l'Est Atlantique - Ouest Russie. Enfin la structure Est Atlantique persiste au cours des mois de février lors des 4 scénarios avec des taux de variance élevés. Ces configurations seraient donc toujours présentes en 2070-2099. Néanmoins nous avons noté l'apparition à plusieurs reprises d'une *dissociation* de l'Oscillation Nord Atlantique pour les scénarios les plus sévères en termes de concentration de

dioxyde de carbone, A1B et A2. En effet, en février du scénario A1B et en janvier et février du scénario A2, les centres d'action de cette structure sont dissociés en 2 schémas que nous avons dénommés *Europe Centrale - Groenland* et *Centre Atlantique à 1 pôle* d'après leur emplacement géographique. Ce dernier se rapporte initialement au mode Est Atlantique.

Concernant les caractéristiques temporelles des modes de variabilité nous avons noté une évolution de l'*intensité des pressions* des centres d'action en dressant les tendances linéaires à partir des variations des modes. Les pressions évoluent positivement, c'est-à-dire que pour 35 modes sur le total de 71 disponibles, les systèmes de hautes et basses pressions seraient intensifiés. Le test de Kendall détermine à son tour que 15 tendances sur les 71 concernent quasi exclusivement des tendances positives (au nombre de 14). Autre fait important, sur les 14 tendances positives détectées significatives, la moitié appartient au scénario A2, soit le plus « pessimiste ». Enfin, ajoutons qu'aucune tendance ne s'est révélée positive, ni significative pour l'Oscillation Nord Atlantique, en revanche le mode non référencé à notre connaissance dans la littérature mais que nous avons intitulé Est Atlantique - Méditerranée Méridionale, détient à lui seul, sur 9 tendances positives détectées lors des scénarios, 6 tendances significatives. Une prédominance partagée avec le mode Est Atlantique - Ouest Russie lequel a 3 tendances positives significatives sur un total de 4 tendances positives.

Lors de l'étude d'éventuelles modifications des caractéristiques temporelles des modes de variabilité, nous nous sommes intéressées aux fréquences d'apparition des *types de circulation* visibles au niveau de la région Nord – Pas-de-Calais. Les types de circulation sélectionnés, au nombre de quatre, ont été identifiés d'après les variations temporelles des modes, et plus précisément d'après l'intensité et l'amplitude des variations des modes (1 variation associée à 1 année). L'étude de leurs fréquences d'occurrence laisse apparaître trois conclusions majeures sur la saison hivernale. D'abord, l'influence plus marquée du bassin Atlantique par l'augmentation des fréquences du flux d'air zonal. Ensuite, la diminution d'arrivées de masses d'air en provenance de Grande-Bretagne sur la région, associée à la baisse des circulations méridiennes de nord et nord-ouest. Enfin, l'arrivée plus fréquente d'air ayant traversé la Bretagne et/ou l'Espagne laquelle est traduite par la hausse du nombre d'apparitions des circulations méridiennes de sud-ouest.

Malgré les cas particuliers cités précédemment, nous n'avons pas noté d'autres situations laissant présager du rôle des forçages anthropiques sur les caractéristiques spatiales et temporelles des modes de variabilité du domaine Atlantico-Européen. Aussi j'ai souhaité étendre le projet de recherche aux régimes de temps puisque ceux-ci sont directement liés au temps qu'il fait, aux conditions météorologiques régionales par la localisation de leurs systèmes de pression. En partant de l'hypothèse que le nombre de régimes agissant sur la région Nord Atlantique Europe (plus étendue que celle des modes de variabilité, 20°N, 80°N; 90°W, 30°E) reste identique, leurs structures spatiales, leurs persistances d'occurrence et leurs fréquences d'occurrence ont été examinées. Contrairement aux modes de variabilité, les quatre régimes de temps identifiés lors de la période actuelle, certes moins nombreux, sont également détectés au sein des expériences de scénarios d'émissions sans modifications structurelles apparentes. Les régimes d'Oscillation Nord Atlantique positif et négatif, le régime de Dorsale Atlantique et le régime de Blocage resteraient donc des structures influant la variabilité du temps qu'il fait. Si leurs empreintes spatiales et l'amplitude de leurs centres d'action restent stables, leurs fréquences d'occurrence montrent quelques différences entre l'actuel et le futur. De façon générale les trois expériences de scénarios d'émissions intégrés dans l'étude des régimes font état d'une hausse de Dorsale Atlantique et de l'Oscillation Nord Atlantique +. Respectivement cela est à mettre en relation avec, d'une part l'apparition plus fréquente de situations atmosphériques humides et froides sur l'Europe et d'autre part avec des situations météorologiques apportant un temps doux mais humide en raison du transport des masses d'air océaniques sur l'Europe occidentale. En revanche Oscillation Nord Atlantique - et Blocage ont des fréquences à la baisse, dans le premier cas, l'Europe et aussi la région Nord-Pas de Calais subiraient moins souvent un temps froid et pluvieux, dans le second cas il s'agit d'un temps froid mais sec. L'évolution des persistances moyennes des régimes de temps n'est pas marquée lorsqu'il s'agit de Blocage et Dorsale Atlantique. Mais l'Oscillation Nord Atlantique positive et négative montre un comportement différent. Même si sa fréquence d'apparition baisse, l'ONA– persiste plus longtemps, inversement pour l'ONA+ qui, malgré une fréquence d'apparition plus grande, persiste moins longtemps.

Afin d'apporter des éléments de réponse quant à l'influence de modifications de la circulation atmosphérique sur la répartition spatiale de polluants sur la région Nord-Pas de Calais, nous avons été amenées à utiliser un modèle de chimie-transport. Cela a initié une série d'étapes préliminaires à son utilisation effective. Le chapitre 4 contient l'ensemble de ces étapes ainsi que les principales observations.

Une première étape a été d'y intégrer les données météorologiques reflétant le forçage anthropique A1B. Le domaine d'étude a été défini au cours d'une **deuxième étape**; celui-ci est d'ailleurs composé de trois domaines imbriqués (nesting). L'objectif de recherche initial étant d'analyser les champs de particules en suspension sur la région Nord-Pas de Calais, le dernier domaine imbriqué est centré sur la région et dispose de la résolution la plus fine des trois domaines, 7,5 km². Une troisième étape a été, comme au cours de l'étude de la variabilité atmosphérique, de procéder à l'étude de la reproductibilité du modèle de chimie-transport WRF-Chem quant aux paramètres météorologiques. Nous estimons, après que les résultats simulés eurent été comparés aux observations de Météo France, que le modèle reproduit correctement les paramètres de la température, de l'humidité relative, des vitesses et directions du vent et des précipitations lors de conditions hivernales. Enfin, le choix des périodes à modéliser a constitué une quatrième étape. Nous avons choisi d'utiliser une partie des résultats présentés au cours du chapitre 3 à travers les situations extrêmes, celles les plus intenses des modes de variabilité caractérisées par des années spécifiques. De cette façon 10 périodes clefs ont été définies sachant que nous avons limité l'étude aux modes Oscillation Nord Atlantique et Est Atlantique. Les émissions sont strictement identiques entre les périodes actuelles et les périodes futures. Ainsi seuls les paramètres météorologiques obtenus d'après le scénario d'émissions A1B peuvent expliquer les évolutions des concentrations de polluants que nous avons trouvées.

En procédant au calcul de la différence entre les champs de polluants simulés lors d'années actuelles et ceux simulés lors d'années futures et malgré les incertitudes inhérentes à l'utilisation des modèles numériques, des tendances sont apparues. Aussi nous mettons en évidence une apparition largement majoritaire d'écarts positifs de PM_{10} et $PM_{2,5}$. Quelles que soient les situations extrêmes les taux de PM_{10} augmentent, allant jusqu'à une augmentation de 20 µg.m⁻³. Les particules fines aussi font état d'écarts importants, de l'ordre de +26 µg.m⁻³ ponctuellement. Concernant les taux de NO_2 , de façon générale la tendance est similaire, à savoir que la majorité

des périodes modélisées présente une augmentation des concentrations de dioxyde d'azote sur la région Nord – Pas-de-Calais. Les taux d'ozone, eux sont plutôt à la baisse. Nous constatons que dans la majorité des cas les taux de NO_2 et d' O_3 semblent liés. En effet, de par la consommation du NO_2 notamment, l'ozone est produit. On constate également que dans 4 cas, la relation particule, dioxyde d'azote et ozone est présente : des particules plus nombreuses diminuent la part du rayonnement solaire disponible à la génération d'ozone, le dioxyde d'azote n'est alors pas consommé et inversement. En revanche nous n'avons pas remarqué de tendances spécifiques des taux de polluants en fonction des types de circulation représentatifs des années extrêmes. Globalement les zones de diffusion des polluants sont reconnaissables entre périodes actuelles et périodes futures, en dépit de l'élévation ou de la diminution des concentrations car elles sont fortement liées aux sources d'émissions. Nous remarquons néanmoins une extension spatiale des zones de forte diffusion, ce qui est logique si les écarts sont positifs et grands.

Globalement, la méthodologie mise en place afin de répondre aux questions initiales de la recherche a permis de révéler que les divers forçages anthropiques seraient à l'origine de modifications des caractéristiques temporelles voire spatiales de certains modes de variabilité et des régimes de temps du géopotentiel 500 hPa. Toutefois nous n'avons à ce jour pas trouvé d'études ayant les mêmes objectifs que nous, ce qui ne permet pas de procéder à une comparaison des résultats, ni de bénéficier d'un certain recul vis-à-vis des méthodes employées et des résultats. J'émets ici une orientation de recherche ultérieure permettant éventuellement de trouver un début de solution à ce problème. Cela concerne le nombre de modèles de climat utilisé. Il s'agit de réaliser la même étude (méthodes, techniques et traitements des données identiques) mais à partir de données issues de différents modèles de circulation générale couplés océan-atmosphère. L'ajout de sources différentes permettrait alors, par la disponibilité de données de géopotentiel variées, de représenter la variabilité inter-modèles. De ce fait nous pourrions constater ou non les mêmes évolutions et/ou l'apparition d'autres modifications et ainsi accorder une pertinence plus élevée aux résultats obtenus. Il serait d'ailleurs intéressant d'utiliser à cette fin les nouveaux scénarios RCPs (Representative Concentration Pathways) élaborés dans le cadre des simulations climatiques du 5^{ème} rapport du GIEC. Il est également envisageable d'allonger la période de temps étudiée, que ce soit le nombre de décennies (ici 3 décennies) ou le nombre de mois pris en compte. Celui-ci peut être étendu à 5 avec novembre et mars. De plus un problème d'objectivité lors de l'identification des structures des modes de variabilité est à prendre en compte. Là aussi il serait bienvenu de compléter l'étude des régimes de temps par le traitement de données de géopotentiel issues d'autres modèles de circulation générale.

Nos résultats témoignent d'une hausse des taux de particules et de dioxyde d'azote au-dessus de la région Nord – Pas-de-Calais au cours de certaines périodes des décennies 2070-2099. Toutefois les liens entre forçages d'émissions, structures de variabilité et polluants sont difficiles à détecter et à affirmer. D'après nos résultats aucune influence directe des modifications des modes de variabilité sur l'évolution des quantités de particules et de NO_2 ainsi que sur leur diffusion n'a été mise à jour. Les tendances d'évolution des concentrations d'espèces chimiques obtenues sont directement liées à des variables météorologiques puisque les émissions, rappelons-le restent identiques lors des comparaisons. Aussi il conviendrait de chercher à attribuer ces tendances en identifiant les paramètres météo influant. Pour ce faire il serait intéressant d'étudier par exemple les éventuelles modifications des vitesses et directions des vents ou de la hauteur de la couche limite atmosphérique. Procéder à l'analyse sur le cumul des deux niveaux les plus proches du sol ou calculer la différence du niveau le plus bas avec le niveau supérieur constitue une autre piste de travail.

L'étude de l'influence du forçage anthropique sur les modes de variabilité et sur les concentrations et diffusions de polluants, notamment de particules en suspension sur la région pourrait être complétée par l'utilisation d'un domaine de modélisation plus petit avec une résolution plus fine, en procédant toujours à l'imbrication des domaines. Cela permettrait d'avoir une meilleure visibilité des zones majeures de pollution sur la région. La simulation non plus de 5 jours clefs (complétés par 5 jours d'initialisation du modèle) mais du mois entier est une autre piste d'étude que je propose. Celle-ci sous-entend des temps de calculs plus grands et la manipulation de fichiers nettement plus volumineux. Néanmoins cela permet de s'affranchir du choix plus ou moins subjectif des 5 jours considérés comme les plus représentatifs de la circulation moyenne. Sélectionner ces 5 jours de manière à ce qu'ils soient consécutifs apporte une difficulté supplémentaire, laquelle serait alors supprimée.

Cette remarque rejoint une autre piste de réflexion que je propose. Elle est d'ailleurs à considérer comme perspective de travail ultérieur en lien avec ce qui a été réalisé. En effet les périodes à modéliser seraient alors en relation avec les régimes de temps et non plus avec les modes de variabilité. Les jours appartenant aux divers régimes seraient simulés. Cette analyse serait donc axée cette fois-ci non plus d'après les années les plus intenses des modes de variabilité mais selon les régimes de temps.

De plus l'étude des quantités d'ozone et leurs évolutions entre une période sans forçage d'émission anthropique et une période avec forçage mérite d'être réalisée lors de la saison estivale, saison plus adéquate pour son étude.

$\left(\begin{array}{c} \text{Bibliographie} \end{array} \right)$

Airparif, 2011. http://www.airparif.asso.fr/

André et al., 2008. André J-C., Royer J-F., Chauvin F., 2008. Les cyclones tropicaux et le changement climatique. *Comptes Rendus Géoscience*, 340 : 575-583.

APPA, 2008.

http://www.appanpc.fr/_adminsite/Repertoire/7/Fichier/23-090304111156.pdf

Athanassiadou et al., 2010. Athanassiadou M., Baker J., Carruthers D., Collins W., Girnary S., Hassell D., Hort M., Johnson C., Johnson K., Jones R., Thomson D., Trought N., Witham C., 2010. An assessment of the impact of climate change on air quality at two UK sites, *Atmospheric Environment*, 1-10.

ATMO-NPdC, 2006. Cadastre des émissions de polluants atmosphériques dans le Nord – Pas de Calais, mai 2006.

ATMO-NPdC, 2007a. Bilan de l'épisode de pollution atmosphérique. Communiqué de presse, avril 2007.

ATMO-NPdC, 2007b. Bilan de l'épisode de pollution atmosphérique. Communiqué de presse, mars 2007.

ATMO-NPdC, 2011a. Bilan annuel 2010 : synthèse.

ATMO-NPdC, 2011b. Rapport annuel 2010 : rapport intégral, juillet 2011.

Barnston et Livezey, 1987. Barnston A.G., Livezey R.E., 1987. Classification, seasonality and persistence of low-frequency atmospheric circulation patterns. *Monthly Weather Review*, 115 : 1083-1126.

Bell et al., 2004. Bell M.L, Davis D.L, Fletcher T., 2004. A retrospective assessment of mortality from the London smog episode of 1952, the role of influenza and pollution. *Environmental Health Perspectives*, 112(1) : 6-8.

Bieser et al., 2011. Bieser J., Aulinger A., 2011. SMOKE for Europe : adaptation, modification and evaluation of a comprehensive emission model for Europe. *Geoscientific Model Development Discussions*, 4(1) : 47-68.

Boé J., 2007. Boé Julien, Changement global et cycle hydrologique : une étude de régionalisation sur la France. Thèse – Université Toulouse III, 2007. 256 pages + annexes.

Boé et al., 2009. Boé J., Terray L., Cassou C., Najac J., 2009. Uncertainties in European summer precipitation changes : role of large scale circulation. *Climate Dynamics*, 33 : 265-276.

Brandefelt, 2006. Brandefelt J., 2006. Atmospheric modes of variability in a changing climate. *Journal of Climate*, 19 : 5934-5943.

Brochet, 1977. Brochet P., 1977. La sécheresse 1976 en France : aspects climatologiques et conséquences. *Bulletin des Sciences Hydrologiques*, XXII, 3 : 393-411.

Cariolle et al., 1990. Cariolle D., Lasserre-Bigory A., Royer J.F., Geleyn J.F., 1990. A general circulation model simulation of the springtime Antarctic ozone decrease and its impact on midlatitudes. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 95 : 1883-1898.

Carter, 2010. Carter W.P.L, 2010. Development of the SAPRC-07 chemical mechanism. *Atmospheric Environment*, 44(40) : 5324-5335.

Cassou, 2004. Cassou C., 2004. Du changement climatique aux régimes de temps : l'oscillation nord-atlantique. *La Météorologie*, 45 : 21-32.

Cassou et al., 2005. Cassou C., Terray L., Phillips A.S., 2005. Tropical Atlantic influence on European heat waves. *Journal of Climate*, 18 : 2805-2811.

Cassou et Guilyardi, 2007. Cassou C., Guilyardi E., 2007. Modes de variabilité et changement climatique. *La Météorologie*, 59 : 22-30.

Cassou, 2008. Cassou C., 2008. Intraseasonal interaction between the Madden-Julian Oscillation and the North Atlantic Oscillation. *Nature*, 455 : 523-527.

Cattiaux J., 2010. Cattiaux Julien, Extrêmes de température en Europe : mécanismes et réponses au changement climatique. Thèse – Université Pierre et Marie Curie, 2010. 212 pages + annexes.

CCNUCC, 1992. Convention-Cadre des Nations Unies sur les changements climatiques, 1992. Nations Unies, 25p.

Chadule, 1997. Initiation aux pratiques statistiques en géographie. Armand Colin, Masson, Paris, 203p.

Chapelon et al., 2002. Chapelon N., Douville H., Kosuth P., Oki T., 2002. Off-line simulation of the Amazon water balance : a sensitivity study with implications for the global soil wetness project. *Climate Dynamics*, 19 : 141-154.

Charabi Y., 2001. Charabi Yacine, L'ilot de chaleur urbain de la métropole lilloise : mesures et spatialisation. Thèse – Université Lille 1 Sciences et Technologies, 2001. 207 pages + annexes.

Chen et Hellström, 1999. Chen D., Hellström C., 1999. The influence of the Nord Atlantic Oscillation on the regional temperature variability in Sweden : spatial and temporal variations. *Tellus*, 51A : 505-516.

Christensen et al., 2007. Christensen, J.H., Hewitson B., Busuioc A., Chen A., Gao X., Held I., Jones R., Kolli R.K., Kwon W-T., Laprise R., Magaña Rueda V., Mearns L., Menéndez C.G., Räisänen J., Rinke A., Sarr A., Whetton P., 2007. Regional Climate Projections. In: *Climate Change 2007 : The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

CITEPA, 2001. Inventaire des émissions de particules primaires, décembre 2001.

CITEPA, 2011. Inventaire des émissions de polluants atmosphériques en France, format Secten, avril 2011. (http://www.citepa.org).

CNES, 2004. Parasol – Effet parasol et effet de serre, novembre 2004. http://smsc.cnes.fr/PARASOL/Fr/dossier_presse_parasol.pdf **Collins et al., 2001.** Collins M., Tett S.F.B., Cooper C., 2001. The internal climate variability of HadCM3, a version of the Hadley Centre coupled model without flux adjustments. *Climate Dynamics*, 17 : 61-81.

Conté et al., 1989. Conté M, Giuffrida A., Tedesco S., 1989. *The Mediterranean oscillation – Impact on precipitation and hydrology in Italy.* Conference on : Climate Water. Publications of the Academy of Finland, Helsinki. 11-15 Septembre 1989, 121-137.

Corte-Real et al., 1998. Corte-Real J., Qian B., Xu H., 1998. Regional climate change in Portugal : precipitation variability associated with large-scale atmospheric circulation. *International Journal of Climatology*, 18 : 619-635.

Craddock et Flood, 1969. Craddock J-M., Flood C-R., 1969. Eigenvectors for representing the 500 mb geopotential surface over the Northern Hemisphere. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 95 : 576-593.

Cubasch et Huebener, 2007. Cubasch U., Huebener H., 2007. 21st century climate change as simulated by European climate models. 29 ICCC, Hong Kong, Chine, 31 Mai.

Dalmedico et Armatte, 2004. Dalmedico A.D., Armatte M., 2004. Modèles et modélisations, 1950-200 : nouvelles pratiques, nouveaux enjeux. *Revue d'histoire des sciences*, 57, n°2 : 243-303.

Dalmedico et Guillemot, 2006. Dalmedico A.D., Guillemot H., 2006. Changement climatique : dynamiques scientifiques, expertise, enjeux géopolitiques. *Sociologie du travail*, 48 : 412-432.

Dawson et al., 2008. Dawson J.P., Racherla P.N., Lynn B.H., Adams P.J., Pandis S.N., 2008. Simulating present-day and future air quality as climate changes : model evaluation. *Atmospheric Environment*, 42 : 4551-4566.

Delmas et al., 2005. Delmas R., Mégie G., Peuch V-H., 2005. *Physique et chimie de l'atmosphère*, 2005. Belin, 639 p.

Delmas et al., 2007. Delmas R., Chauzy S., Verstraete J-M., Ferré H., 2007. Atmosphère, océan et climat. Belin, 2007. 287 p.

Déqué et al., 1999. Déqué, M., Braun A., Piedelievre J.P., Marquet P., Dandin P., Guérémy J.F., Geleyn J.F., Bazile E., Piriou J.M., Yessad K., Courtier P., Rochas M., 1999. ARPEGE version 3, documentation algorithmique et mode d'emploi (disponible par CNRM/GMGEC, Météo-France, 42 avenue Gaspard coriolis, 31057 Toulouse Cedex, France).

Dominguez et al., 2009. Dominguez F., Canon J., Valdes J., 2009. IPCC-AR4 climate simulations for the Southwestern US : the importance of future ENSO projections. *Climatic Change*, DOI 10.1007.

Dong et al., 2011. Dong B., Sutton R.T., Woolings T., 2011. Changes of interannual NAO variability in response to greenhouse gases forcing. *Climate Dynamics*, 37 : 1621-1641.

Douguédroit A., 1998. L'oscillation Méditerranéenne : le cas du printemps. *Publication de l'Association Internationale de Climatologie*, 11 : 383-390.

Douguédroit A., 2004. Quelle 'exception française' en matière de 'types de temps' ?, *Norois* 191, 2004.

Douguédroit A., 2005. Le réchauffement climatique – Scénarios pour le XXI^{ème} siècle. Journées de Climatologie, 2005, Dijon 17-19 mars 2005.

Ducroux, 2004. Ducroux R., 2004. L'effet de serre – réalité, conséquences et solutions. CNRS Editions, Paris, 95 pages.

EEA, 2007. Air pollution in Europe 1990-2004. EEA Report No2/2007. European Environment Agency, Copenhagen.

Esteban et al., 2006. Esteban P., Martin-Vide J., Mases M., 2006. Daily atmospheric circulation catalogue for western Europe using multivariate techniques. *International Journal of Climatology*, 26 : 1501-1515.

Estienne et Godard, 1990. Estienne P., Godard A., 1990. Climatologie. Armand Colin, 367p.

Fellous et Gautier, 2007. Fellous J-L., Gautier C., 2007. Comprendre le changement climatique. Editions Odile Jacob, 2007, 297 pages.

Forkel et Knoche, 2006. Forkel R., Knoche R., 2006. Regional climate change and its impact on photooxidant concentrations in southern Germany : simulations with a coupled regional climatechemistry model. *Journal of Geophysical Research*, 111, D12302.

Forkel et Knoche, 2007. Forkel R., Knoche R., 2007. Nested regional climate-chemistry simulations for central Europe. *Comptes Rendus Géoscience*, 339 : 734-746.

Ghasemi et Khalili, 2008. Ghasemi A.R., Khalili D., 2008. The effect of the Nord Sea-Caspian pattern (NCP) on winter temperatures in Iran. *Theoretical and Applied Climatology*, 92 : 59-74.

Gibelin et Déqué, 2003. Gibelin A.L., Déqué M., 2003. Anthropogenic climate change over the Mediterranean region simulated by a global variable resolution model. *Climate Dynamics*, 20 : 327-339.

GIEC, 2007. GIEC, 2007 : Bilan 2007 des changements climatiques. Contribution des Groupes de travail I, II et III au quatrième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat. GIEC, Genève, Suisse, 103 pages.

Giorgi et Meleux, 2007. Giorgi F., Meleux F., 2007. Modelling the regional effects of climate change on air quality. *Comptes Rendus Géoscience*, 339 : 721-733.

Gordon et al., 2000. Gordon, C., Cooper C., Senior C.A., Banks H., Gregory J.M., Johns T.C., Mitchell J.F.B., Wood R.A., 2000. The simulation of SST, sea ice extents and ocean heat transports in a version of the Hadley Centre coupled model without flux adjustments. *Climate Dynamics*, 16 : 147-168.

Guemas V., 2009. Guemas Virginie, Rôle de la surface marine sur la variabilité intrasaisonnière estivale de l'atmosphère dans la région Nord Atlantique Europe. Thèse - Université Toulouse III, 2009. 308 pages + annexes.

Hatzaki et al., 2006. Hatzaki M., Flocas H-A., Maheras P., Asimakopoulos D-N., Giannakopouls C., 2006. Study of future climatic variations of a teleconnection pattern affecting Eastern Mediterranean. *Global NEST Journal*, 8 : 195-206.

Hess et Brezowsky, 1952. Hess P., Brezowsky H., 1952. Katalog der Grosswetterlagen Europas, Bibliothek des Deutschen Wetterdienstes in der US-Zone : 33-39.
Hess et Brezowsky, 1977. Hess P., Brezowsky H., 1977. Katalog der Grosswetterlagen Europas, Berichte des Deutschen Wetterdienstes, 113, Offenbach.

Hogrefe et al., 2004. Hogrefe C., Lynn B., Civerolo K., Ku J-Y., Rosenthal J., Rosenzweig C., Goldberg R., Gaffin S., Knowlton K., Kinney P.L., 2004. Simulating changes in regional air pollution over the eastern United States due to changes in global and regional climate and emissions. *Journal of Geophysical Research*, 109, D22301.

Holzer et Boer, 2001. Holzer M., Boer G.J., 2001. Simulated changes in atmospheric transport climate. *Journal of Climate*, 14 : 4398-4420.

Hurrell, 1995. Hurrell J.W., 1995. Decadal trends in the Nord Atlantic Oscillation : regional temperatures and precipitation. *Science*, 269 : 676-679.

Hurrell et van Loon, 1997. Hurrell J.W., van Loon H., 1997. Decadal variations on climate associated with the North Atlantic Oscillation. *Climate Change*, 36 : 301-326.

Hurrell et al., 2003. Hurrell J.W., Kushnir Y., Ottersen G., Visbeck M., 2003. The North Atlantic Oscillation : climatic significance and environmental impact. *Geophysical Monograph Series*. Washington, DC : American Geophysical Union.

Hurrell et Deser, 2009. Hurrell J.W., Deser C., 2009. North Atlantic climate variability : the role of the North Atlantic Oscillation. *Journal of Marine Systems*, 78 : 28-41.

Huth, 1996. Huth R., 1996. An intercomparison of computer-assisted circulation classification methods. *International Journal of Climatology*, 16 : 893-922.

Hsu et Zwiers, 2001. Hsu C.J., Zwiers F., 2001. Climate change in recurrent regimes and modes of Northern Hemisphere atmospheric variability. *Journal of Geophysical Research*, 106 : 20,145-20,159.

IPCC, 2007. IPCC, 2007: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 996 pp.

IPCC_A1, 2007. Annexe I, Glossary, IPCC, 2007 : Climate Change 2007 : The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 996 pp.

Jacob et Winner, 2009. Jacob D.J., Winner D.A., 2009. Effect of climate change on air quality. *Atmospheric Environment*, 43 : 51-63.

Jacques et Le Treut, 2004. Jacques G., Le Treut H., 2004. Le changement climatique. Editions Unesco, 2004, 160 pages.

Kageyama et al., 1999. Kageyama M., D'Andrea F., Ramstein G., Valdes P.J., 1999. Weather regimes in past climate atmospheric general circulation model simulations. *Climate Dynamics*, 15 : 773-793.

Kalnay et al., 1996. Kalnay E., Kanamitsu M., Kistler R., Collins W., Deaven D., Gandin L., Iredell M., Saha S., White G., Woollen J., Zhu Y., Chelliah M., Ebisuzaki W., Higgins W., Janowiak J., Mo K.C., Ropelewski C., Wang J., Leetmaa A., Reynolds B., Jenne R., Joseph D., 1996. The NCEP-NCAR 40-year reanalysis project. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 77 : 437-472.

Kimoto et Ghil, 1993. Kimoto M., Ghil M., 1993. Multiple flow regimes in the Northern Hemisphere winter. Part I : Methodology and hemispheric regimes. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 50, n°16 : 2625-2643.

Kingtse, **2002.** Kingtse C.M., 2000. Relationships between low-frequency variability in the Southern hemisphere and sea surface temperature anomalies. *Journal of Climate*, 13 : 3599-3610.

Kinney, 2008. Kinney P.L., 2008. Climate change, air quality, and human health. *American Journal of Preventive Medicine*, 35(5): 459-467.

Kondrashov et al., 2007. Kondrashov D., Shen J., Berk R., D'Andrea F., 2007. Predicting weather regime transitions in Northern Hemisphere datasets. *Climate Dynamics*, 29 : 535-551.

Krol et al., 2005. Krol M., Houweling S., Bregman B., van den Broek M., Segers A., van Velthoven P., Peters W., Dentener F., Bergamaschi P., 2005. The two-way nested global chemistry-transport zoom model TM5 : algorithm and applications. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 5 : 417-432.

Kutiel et Benaroch, 2002a. Kutiel H, Benaroch Y., 2002. North Sea-Caspian Pattern (NCP) – an upper level atmospheric teleconnection affecting the Eastern Mediterranean : identification and definition. *Theoretical and Applied Climatology*, 71 : 17-28.

Kutiel et al, 2002b. Kutiel H., Maheras P., Türkes M., Paz S., 2002. North Sea-Caspian Pattern (NCP) – an upper level atmospheric teleconnection affecting the Eastern Mediterranean : implications on the regional climate. *Theoretical and Applied Climatology*, 72 : 173-192.

Kysely et Huth, 2006. Kysely J., Huth R., 2006. Changes in atmospheric circulation over Europe detected by objective and subjective methods. *Theoretical and Applied Climatology*, 85: 19-36.

Lamb, 1950. Lamb H.H., 1950. Types and spells of weather around the year in the British Isles : annual trends, seasonal structure of the year, singularities. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 73, 393-438.

Langner et al., 2005. Langner J., Bergström R., Foltescu V., 2005. Impact of climate change on surface ozone and deposition of sulphur and nitrogen in Europe. *Atmospheric Environment*, 39 : 1129-1141.

Lasry F., 2006. Lasry Fanny, Analyse par modélisation tridimensionnelle des processus physicochimiques déterminant la production d'ozone. Evaluation de l'impact de scénarios d'émissions prospectifs. Application au site ESCOMPTE. Thèse – Université Paris XII, 2006. 253 pages + annexes.

Lawrence et al., 2005. Lawrence M.G., Hov O., Beekmann M., Brandt J., Elbern H., Eskes H., Feichter H., Takigawa M., 2005. The Chemical Weather. *Environmental Chemistry*, 2 : 6-8.

Le Treut et al., 2007. Le Treut, H., Somerville R., Cubasch U., Ding Y., Mauritzen C., Mokssit A., Peterson T., Prather M., 2007: Historical Overview of Climate Change. In: *Climate Change*

2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Leung et Gustafson, 2005. Leung L.R., Gustafon Jr W.I., 2005. Potential regional climate change and implications to U.S. air quality. *Geophysical Research Letters*, 32, L16711.

Liao et al., 2006. Liao H., Chen W-T., Seinfeld J.H., 2006. Role of climate change in global predictions of future tropospheric ozone and aerosols. *Journal of Geophysical Research*, 111, D12304.

Lorenz, 1963. Lorenz E., 1963. Deterministic nonperiodic flow. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 20: 130-141.

Lucio, 2004. Lucio P.S., 2004. Assessing HadCM3 simulations from NCEP reanalyses over Europe : diagnostics of block-seasonal extreme temperature's regimes. *Global and Planetary Change*, 44 : 39-57.

Madec et al., 1998. Madec G., Delecluse P., Imbard M., Lévy C., 1998. OPA 8.1 Ocean General Circulation Model reference manual. Note du Pôle Modélisation, Institut Pierre-Simon Laplace, Décembre 1998, No. 11, 91pp.

Magi, 1997. Magi Laurent, Chimie hétérogène atmosphérique : étude expérimentale des cinétiques de transfert gaz-liquide. Thèse – Université Strasbourg I, 1997. 190 pages.

Maheras et al., 1998. Maheras P., Kutiel H., Vafiadis M., 1998. Tendances spatiales et temporelles de la pression atmosphérique de surface et des géopotentiels de 500 hPa en Europe méridionale et en Méditerranée durant la période 1950-1994. *Publication de l'Association Internationale de Climatologie*, 11 : 345-351.

Marshall et al., 2001. Marshall J., Kushnir Y., Battisti D., Chang P., Czaja A., Dickson R., Hurrell J., McCartney M., Saravanan R., Visbeck M., 2001. North Atlantic climate variability; phenomena, impacts and mechanisms. *International Journal of Climatology*, 21 : 1863-1898. Martin et al., 2004. Martin G., Dearden C., Greeves C., Hinton T., Inness P., James P., Pope V., Ringer M., Slingo J., Stratton R.A., Yang G-Y., 2004. *Evaluation of the atmospheric performance of HadGAM/GEM1*. Hadley Centre Technical Note 54.

Martinet Y., 2004. Martinet Yann, Conception, validation et exploitation d'un cadastre des emissions de polluants atmosphériques sur la région Nord-Pas de Calais. Thèse – Université Lille 1 Sciences et Technologies, 2004. 216 pages.

McKendry, 1994. McKendry I.G., 1994. Synoptic circulation and summertime ground-level ozone concentrations at Vancouver, British Columbia. *Journal of Applied Meteorology*, 33 : 627-641.

Meehl et al., 2007. Meehl, G.A., Stocker T.F., Collins W.D., Friedlingstein P., Gaye A.T., Gregory J.M., Kitoh A., Knutti R., Murphy J.M., Noda A., Raper S.C.B., Watterson I.G., Weaver A.J., Zhao Z-C., 2007. Global Climate Projections. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis.Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Meleux et al., 2007. Meleux F., Solmon F., Giorgi F., 2007. Increase in summer European ozone amounts due to climate change. *Atmospheric Environment*, 41 : 7577-7587.

Mendez M., 2012. Mendez Maxence, Etude expérimentale de la réactivité hétérogène de particules ultrafines d'acides gras et modélisation de la composition chimique des aérosols à l'échelle régionale. Thèse – Université Lille 1 Sciences et Technologies, 2012. 252 pages.

Météo France, 2011.

http://france.meteofrance.com/france/actu/actu?portlet id=74935&document id=25307

Michelangeli et al., 1995. Michelangeli P-A., Vautard R., Legras B., 1995. Weather regimes : recurrence and quasi stationarity. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 52 : 1237-1256.

Michelangeli P-A., 1996. Michelangeli Paul-Antoine, Variabilité atmosphérique basse-fréquence observée et simulée aux latitudes tempérées. Thèse – Université Pierre et Marie Curie, 1996. 196 pages.

Mickley et al., 2004. Mickley L.J., Jacob D.J., Field B.D., Rind D., 2004. Effects of future climate on regional air pollution episodes in the United States. *Geophysical Research Letters*, 31, L24103.

Monks et al., 2009. Monks P.S., Granier C., Fuzzi S., Stohl A., Williams M.L., Akimoto H., Amann M., Baklanov A., Baltensperger U., Bey I., Blake N., Blake R.S., Carslaw K., Cooper O.R., Dentener F., Fowler D., Fragkou E., Frost G.J., Generoso S., Ginoux P., Grewe V., Guenther A., Hansson H.C., Henne S., Hjorth J., Hofzumahaus A., Huntrieser H., Isaksen I.S.A., Jenkin M.E., Kaiser J., Kanakidou M., Klimont Z., Kulmala M., Laj P., Lawrence M.G., Lee, J.D., Liousse C., Maione M., McFiggans G., Metzger A., Mieville A., Moussiopoulos N., Orlando J.J., O'Dowd C.D., Palmer P.I., Parrish D.D., Petzold A., Platt U., Pöschl U., Prévôt A.S.H., Reeves C.E., Reimann S., Rudich Y., Sellegri K., Steinbrecher R., Simpson D., ten Brink H., Theloke J., van der Werf G.R., Vautard R., Vestreng V., Vlachokostas Ch., von Glasow R., 2009. Atmospheric composition change – global and regional air quality. *Atmospheric Environement*, 43 : 5268-5350.

Moron et Plaut, 2003. Moron V., Plaut G., 2003. The impact of El Nino-Southern Oscillation upon weather regimes over Europe and the North Atlantic during boreal winter. *International Journal of Climatology*, 23 : 363-379.

Nakicenovic et al., 2000. Nakicenovic, N., Alcamo J., Davis G., de Vries B., Fenhann J., Gaffin S., Gregory K., Grübler A., Jung T.A., Kram T., Lebre La Rovere E., Michaelis L., Mori S., Morita T., Pepper W., Pitcher H., Price L., Riahi K., Roehrl A., Rogner H-H., Sankovski A., Schlesinger M., Shukla P., Smith S., Swart R., van Rooijen S., Victor N., Dadi Z., 2000. Special Report on Emissions Scenarios: A Special Report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge, U.K., 599 pp.

NOAA, 2011. http://www.cpc.ncep.noaa.gov/

Norrant C., 2004. Norrant Caroline, Tendances pluviométriques indicatrices d'un changement climatique dans le basin Méditerranéen de 1950 à 2000. Etude diagnostique. Thèse – Université Aix-Marseille I, 2004. 261 pages + annexes.

O'Connor, 1963. O'Connor J.F., 1963. The weather and circulation of January 1963 – One of the most severe months on record in the United States and Europe. *Monthly Weather Review*, vol. 91, No., 4, avril 1963 : 209-218.

Oki et Sud, 1998. Oki T., Sud Y.C., 1998. Design of Total Runoff Integrating Pathways (TRIP) : a global river channel network. *Earth Interactions*, vol. 2, paper 1.

OMM, 2011. http://www.wmo.int/pages/mediacentre/press_releases/pr_934_fr.html

ORAMIP, 2011. http://www.oramip.org/oramip/index.php

Osborn, 2004. Osborn T.J., 2004. Simulating the winter North Atlantic Oscillation : the roles of internal variability and greenhouse gas forcing. *Climate Dynamics*, 22 : 605-623.

Pal et al., 2004. Pal J.S., Giorgi F., Bi X., 2004. Consistency of recent European summer precipitation trends and extremes with future regional climate projections. *Geophysical Research Letters*, 31, L13202.

Palmer, 1993. Palmer T.N., 1993. A nonlinear dynamical perspective on climate change. Weather, 48: 313-326.

Palmer, 1998. Palmer T.N., 1998. Nonlinear dynamics and climate change; Rossby's legacy. Bulletin of the American Meteorological Society, 79: 1411-1423.

Palmer, 1999. Palmer T.N., 1999. A nonlinear dynamical perspective on climate prediction. Journal of Climate, 12: 575-591.

Parrish et al., 2009. Parrish D.D., Millet D.B., Golstein A.H., Increasing ozone in marine boundary layer inflow at the west coasts of North America and Europe. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 9 : 1303-1323.

Passant, 2002. Passant N.R., 2002. Speciation of UK emissions of non-methane volatile organic compounds. DETR Air and Environmental Quality Division, AEAT/ENV/R/0545.

Planton et al., 2008. Planton S., Déqué M., Chauvin F., Terray L., 2008. Expected impacts of climate change on extreme climate events. *Comptes Rendus Géoscience*, 340 : 564-574.

Planchon et al., 2009. Planchon O., Quénol H., Dupont N., Corgne S., 2009. Application of the Hess-Brezowsky classification to the identification of weather patterns causing heavy winter rainfall in Brittany. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 9 : 1161-1173.

Plaut et Simonnet, 2001. Plaut G., Simonnet E., 2001. Large-scale circulation classification, weather regimes, and local climate over France, the Alps and Western Europe. *Climate Research*, 17: 303-324.

Pokorna, **2005**. Pokorna L., 2005. Correlations of circulation variability modes with climate elements in the Czech Republic. WDS'05 Proceedings of Contributed Papers, Part III, 480-484.

Pope et al., 2000. Pope V.D., Gallani M.L., Rowntree P.R., Stratton R.A., 2000. The impact of new physical parametrizations in the Hadley Centre climate model HadAM3. *Climate Dynamics*, 16 : 123-146.

Racherla et Adams, 2006. Racherla P.N., Adams P.J., 2006. Sensitivity of global tropospheric ozone and fine particulate matter concentrations to climate change. *Journal of Geophysical Research*, 111, D24103.

Randall et al., 2007. Randall, D.A., Wood R.A., Bony S., Colman R., Fichefet T., Fyfe J., Kattsov V., Pitman A., Shukla J., Srinivasan J., Stouffer R.J., Sumi A., Taylor K.E., 2007. Climate Models and Their Evaluation. In: Climate Change 2007: *The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M.Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Richman, 1986. Richman M.B, 1986. Rotation of principal component. *Journal of Climatology*, 6:293-335.

Rind et al., 2001. Rind D., Lerner J., McLinden C., 2001. Changes of tracer distributions in the doubled CO_2 climate. *Journal of Geophysical Research*, 106(D22).

Rogers, 1984. Rogers J.C., 1984. The association between the North Atlantic Oscillation and the Southern Oscillation in the Northern Hemisphere. *Monthly Weather Review*, 112 : 1999-2015.

Rogers, 1985. Rogers J.C., 1985. Atmospheric circulation changes associated with the warming over the Northern North Atlantic in the 1920s. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 24: 1303-1310.

Rogers, 1990. Rogers J.C., 1990. Pattern of low-frequency monthly sea level pressure variability (1899-1986) and associated wave cyclone frequencies. *Journal of Climate*, 3 : 1364-1379.

Salas-Mélia, 2002. Salas-Mélia D., 2002. A global coupled sea ice-ocean model. Ocean Modelling, 4 : 137-172.

Salas-Mélia et al., 2005. Salas-Mélia D., Chauvin F., Déqué M., Douville H., Gueremy J.F., Marquet P., Planton S., Royer J.F., Tyteca S., 2005. Description and validation of the CNRM-CM3 global coupled model, CNRM working note 103.

Sanchez-Gomez et Terray, 2005. Sanchez-Gomez E., Terray L., 2005. Large-scale dynamics and local intense precipitation episodes. *Geophysical Research Letters*, 32, L24711.

Sanderson et al., 2003. Sanderson M.G., Jones C.D., Collins W.J., Johnson C.E., Derwent R.G., 2003. Effect of climate change on isoprene emissions and surface ozone levels. *Geophysical Research Letters*, 30(18).

Schär et al., 2002. Schär C., Vidale P.L., Lüthi D., Frei C., Häberli C., Liniger M.A., Appenzeller C., 2002. The role of increasing temperature variability in European summer heatwaves. *Nature*, 427 : 332-336.

Seinfeld et Pandis, 2006. Seinfeld J.H., Pandis S.N., 2006. Atmospheric Chemistry and Physics, from Air Pollution to Climate Change, John Wiley, New York, 2006, 1326 pp.

Slonosky et Yiou, 2001. Slonosky V.C., Yiou P., 2001. The North Atlantic Oscillation and its relationship with near surface temperature. *Geophysical Research Letters*, 28(5): 807-810.

Sneyers, 1990. Sneyers R., 1990. On the statistical analysis of series of observation. WMO, Technical Note n°143, Geneve.

Solman et Le Treut, 2006. Solman S.A., Le Treut H., 2006. Climate change in terms of modes of atmospheric variability and circulation regimes over southern South America. *Climate Dynamics*, 26 : 835-854.

Solman et Menéndez, 2003. Solman S.A., Menéndez C.G., 2003. Weather regimes in the South American sector and neighbouring oceans during winter. *Climate Dynamics*, 21 : 91-104.

Solman et Pessacg, 2006. Solman S.A., Pessacg N., 2006. Analysis of low frequency variability patterns and circulation regimes over Southern South America and their response to global warming as depicted by IPCC-AR4 AOGCMS. Proceedings of 8 ICSHMO, Foz do Iguaçu, Brazil, 24-28 Avril, 441-449.

Stephenson et al., 2004. Stephenson D.B., Hannachi A., O'Neill A., 2004. On the existence of multiple climate regimes. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 130, No. 597 : 583-605.

Stephenson et al., 2006. Stephenson D.B., Pavan V., Collins M., Junge M.M., Quadrelli R., 2006. North Atlantic Oscillation response to transient greenhouse gas forcing and the impact on Europe winter climate : a CMIP2 multi-model assessment. *Climate Dynamics*, 27 : 401-420.

Stockwell et al., 1990. Stockwell W.R., Middleton P., Chang J.S., Tang X., 1990 The second generation regional acid deposition model chemical mechanism for regional air quality modelling. *Journal of Geophysical Research*, 95(D10) : 16343-16368.

Stockwell et al., 1997. Stockwell W.R., Kirchner F., Kuhn M., Seefeld S., 1997. A new mechanism for regional atmospheric chemistry modeling. *Journal of Geophysical Research*, 102: 847-879.

Stone et al., 2001. Stone D.A., Weaver A.J., Stouffer R.J., 2001. Projection of climate change onto modes of atmospheric variability. *Journal of Climate*, 14 : 3551-3565.

Talbot et al., 2007. Talbot C., Augustin P., Leroy C., Willart V., Delbarre H., Khomenko G., 2007. Impact of a sea breeze on the boundary-layer dynamics and the atmospheric stratification in a coastal area of the North Sea. *Boundary-Layer Meteorology*, 125 : 133-154.

Terray et al., 2004. Terray L., Demory M.E., Déqué M., De Coetlogon G., Maisonnave E., 2004. Simulation of late-twenty-first-century changes in wintertime atmospheric circulation over Europe due to anthropogenic causes. *Journal of Climate*, 17 : 4630-4635.

Terrenoire et Fèvre-Nollet, 2008. Terrenoire E., Fèvre-Nollet V., 2008. Application of a regional atmospheric emission inventory to ozone and PM modelling over the French North region : the summer 2006 heat wave case study. *Air Pollution Modeling and Its Application XIX.* C. Borrego and A.I. Miranda, Springer Netherlands : 404-411.

Terrenoire E., 2009. Terrenoire Etienne, Application des systèmes de MM5-CHIMERE et MM5-FLEXPART à la modélisation de l'ozone et des PM_{10} sur la région Nord – Pas de Calais. Thèse – Université Lille 1 Sciences et Technologies, 2009. 271 pages + annexes.

Tveito et Ustrnul, 2003. Tveito O.E., Ustrnul Z., 2003. A review of the use of large-scale atmospheric circulation classification in spatial climatology. *Norwegian Meteorological Institute*.

Ulbrich et Christoph, 1999. Ulbrich U., Christoph M., 1999. A shift of the NAO and increasing storm track activity over Europe due to anthropogenic greenhouse gas forcing. *Climate Dynamics*, 15 : 551-559.

Ullmann et Moron, 2007. Ullmann A., Moron V., 2007. Configurations atmosphériques de vastes échelles spatiales et variabilité des surcotes dans le Golfe du Lion. *Cybergeo : European Journal of Geography*, 406.

UNECE, 2010. Hemispheric transport of air pollution 2010, Part D: Answers to policy-relevant science questions. Air Pollution Studies, No. 20. ECE/EB/AIR/103, United Nations Economic Commission for Europe, Geneva.

UNEP-GRID, 2002. http://www.grida.no/

Van Loon et Rogers, 1978. Van Loon H., Rogers J.C., 1978. The seesaw in winter temperatures between Greenland and Northern Europe. Part I : general description. *Monthly Weather Review*, 106 : 296-310.

Vautard, **1990**. Vautard R., 1990. Multiple weather regimes over the North Atlantic : analysis of precursors and successors. *Monthly Weather Review*, 118 : 2056-2081.

Vautard et Hauglustaine, 2007. Vautard R., Hauglustaine D., 2007. Impact of global climate change on regional air quality : introduction to the thematic issue. *Comptes Rendus Géoscience*, 339 : 703-708.

Von Storch et Zwiers, 1998. Von Storch H., Zwiers F.W., 1998. *Statistical analysis in climate research*, Cambridge University Press, United Kingdom.

Wallace et Gutzler, 1981. Wallace J.M., Gutzler D.S., 1981. Teleconnections in the geopotential height field during the Northern Hemisphere winter. *Monthly Weather Review*, 109 : 784-812.

Walsh et al., 2001. Walsh J.E., Phillips A.S., Portis D.H., Chapman W.L., 2001. Extreme cold outbreaks in the United States and Europe, 1948-99. *Journal of Climate*, 14 : 2642-2658.

Wibig, **1999**. Wibig J., 1999. Precipitation in Europe in relation to circulation patterns at the 500 hPa level. *International Journal of Climatology*, 19 : 253-269.

William et van Noije, 2008. William Jason E., van Noije Twan P.C. On the upgrading of the modified Carbon Bond Mechanism IV for use in global Chemistry Transport Models. Scientific report, mai 2008. http://www.knmi.nl/~williams/Williams_v_Noije_WR2008.pdf

Xoplaki et al., 2000. Xoplaki E., Luterbacher J., Burkard R., Patrikas I., Maheras P., 2000. Connection between the large-scale 500 hPa geopotential height fields and precipitation over Greece during wintertime. *Climate Research*, 14 : 129-146.

Yiou et Nogaj, 2004. Yiou P., Nogaj M., 2004. Extreme climatic events and weather regimes over the North Atlantic : when and where ? *Geophysical Research Letters*, 31, L07202.

Annexes

ANNEXE 1 – Principe de l'Analyse en Composantes Principales

L'Analyse en Composantes Principales peut être résumée par le théorème suivant (Von Storch et Zwiers, 1998 ; Norrant, 2004) :

soit \vec{X} un vecteur de dimension m ayant pour moyenne $\vec{\mu}$ et sa matrice de covariance \sum . Soit $\lambda_1 \geq \lambda_2 \dots \geq \lambda_m$ les valeurs propres de \sum et $\vec{e}^1, \dots, \vec{e}^m$ les vecteurs propres correspondants. Les valeurs propres sont non-négatives et les vecteurs propres sont orthogonaux.

Les k vecteurs propres qui correspondent à $\lambda_1,...,\lambda_k$ minimisent :

$$\begin{split} & \Rightarrow k = \mathcal{E}(\left\| (\vec{X} - \vec{\mu}) - \sum_{i=1}^{k} \left\langle \vec{X} - \vec{\mu}, \vec{e}^{i} \right\rangle \vec{e}^{i} \right\|^{2}). \\ & \Rightarrow k = Var(\vec{X}) - \sum_{i=1}^{k} \lambda_{i}. \\ & Var(\vec{X}) = \sum_{i=1}^{m} \lambda_{i}. \end{split}$$

La variance totale de \vec{X} est partagée entre *m* composantes. Chacune de ces composantes est obtenue par la projection de \vec{X} sur un des vecteurs \vec{e}^i .

La contribution de variance de la $k^{\text{éme}}$ composante à la variance totale $\sum_{j} \lambda_{j}$ est juste λ_{k} .

En termes relatifs, la proportion de la variance totale représentée par le vecteur k est $\lambda_k / \sum_j \lambda_j$.

Cette proportion peut être donnée en pourcentage.

Si les composantes sont ordonnées selon leurs valeurs propres alors la première composante est la plus importante en part de variance expliquée, la seconde est la seconde plus importante et ainsi de suite.

<pre>&time_control run_days run_hours run_minutes run_seconds start_year start_month start_day start_hour start_minute start_second end_year end_month end_day end_hour end_minute end_second interval_seconds input_from_file history_interval frames_per_outfile restart restart_interval io_form_history io_form_restart io_form_loundary frames_per_auxinput5 auxinput5_inname debug_level /</pre>		<pre>= 10, = 0, = 0, = 0, = 2070, 2 = 12, 1 = 03, 6 = 00, 6 = 00, 6 = 2070, 2 = 12, 1 = 13, 1 = 00, 6 = 00, 6 = 00, 6 = 3600, 1 = .true., = 60, 6 = 1000, 2 = .false. = 2, = 2, = 2, = 2, = 2, = 2, = 2, = 2,</pre>	2070, 12, 33, 30, 30, 2070, 12, 13, 30, 30, ., true 50, 1000, .,	<pre>2070, 12, 03, 00, 00, 00, 2070, 12, 13, 00, 00, 00, 00, 00, 00, 00, 00, 00, 0</pre>
<pre>&domains time_step time_step_fract_num time_step_fract_den max_dom e_we e_sn e_vert p_top_requested num_metgrid_levels num_metgrid_soil_levels dx dy grid_id parent_id i_parent_start j_parent_start parent_grid_ratio parent_time_step_ratio feedback smooth_option /</pre>	<pre>= 720, = 0, = 1, = 3, = 80, = 45, = 28, = 5000, = 17, = 0, = 120000, = 1, = 1, = 1, = 1, = 1, = 1, = 1, = 1</pre>	125, 113, 28, 30000, 30000, 2, 1, 20, 5, 4, 4,	141, 121, 28, 7500 7500 3, 2, 50, 60, 4, 4,	,),),

<pre>&physics mp_physics ra_lw_physics ra_sw_physics radt sf_sfclay_physics sf_surface_physics bl_pbl_physics bldt cu_physics cudt cu_diag isfflx ifsnow icloud surface_input_source pum_coil_layops</pre>		3, 1, 2, 45, 2, 1, 2, 0, 5, 5, 1, 1, 0, 1,	3, 1, 2, 45, 2, 1, 2, 0, 5, 5, 1,	3, 1, 2, 45, 2, 1, 2, 0, 5, 5, 1,	
sf_urban_physics	=	5, 0, 1	0,	0,	
maxens	=	1, 3,			
maxens2	=	3,			
maxens3	=	16,			
/	=	144,			
, &fdda /					
&dynamics rk ord	=	3,			
w_damping diff_opt	= =	0, 1,			
km_opt	=	4,			
diff_6th_factor	=	0, 0,12,	0, 0,12,	0, 0.12.	
base_temp	=	290.	,	••==,	
damp_opt	=	0,			
zdamp	=	5000.,	5000.	, 5000., 0.2	
khdif	=	0.2, 0,	0.2, 0,	0.2	
kvdif	=	0,	0,	0,	
non_hydrostatic	=	.true.,	, .true	., .true.,	
moist adv opt	=	2,	2,	2,	
scalar_adv_opt	=	2,	2,	2,	
/					
&bdy_control spec_bdy_width	=	5,			
spec_zone	=	1,			
relax_zone	=	4, true	false	e false	
nested	=	.false.	, .true	e., .true.	, ,
/					
&grib2 /					
&chem					
kemit	=	1,			

chem_opt	=	2,	2,	2,
bioemdt	=	0,	0,	0,
photdt	=	30,	30,	30,
chemdt	=	0,	0,	0,
io_style_emissions	=	2,		
emi_inname	=	"wrfchemi_	_d <domair< td=""><td><pre>n>_<date>",</date></pre></td></domair<>	<pre>n>_<date>",</date></pre>
emiss_opt	=	3,		
emiss_inpt_opt	=	1,	1,	1,
chem_in_opt	=	0,	0,	0,
phot_opt	=	1,	1,	1,
gas_drydep_opt	=	1,	1,	1,
aer_drydep_opt	=	1,	1,	1,
bio_emiss_opt	=	1,	1,	1,
dust_opt	=	2,		
dmsemis_opt	=	0,		
seas_opt	=	0,		
gas_bc_opt	=	1,	1,	1,
gas_ic_opt	=	1,	1,	1,
aer_bc_opt	=	1,	1,	1,
aer_ic_opt	=	1,	1,	1,
gaschem_onoff	=	1,	1,	1,
aerchem_onoff	=	1,	1,	1,
wetscav_onoff	=	0,	0,	0,
cldchem_onoff	=	0,	0,	0,
vertmix_onoff	=	1,	1,	1,
chem_conv_tr	=	1,	1,	1,
biomass_burn_opt	=	0,	0,	0,
aer_ra_feedback	=	0,	0,	0,
have_bcs_chem	=	.false., .	false.,.	false.,
/				

&namelist_quilt nio_tasks_per_group = 0, nio_groups = 1, /

Station	Latitude	Longitude	Altitude
Dunkerque	51,05	2,33	11
Lesquin	50,57	$3,\!1$	47
Saint-Hilaire-sur-Help	$50,\!15$	3,92	185
Steenvoorde	50,83	$2,\!57$	42
Valenciennes	50,33	3,45	52
Bainghen	50,75	1,9	117
Boulogne-sur-Mer	50,73	1,6	73
Epinoy	50,22	$3,\!15$	77
Humieres	50,38	2,22	127
Lillers	50,58	2,5	19
Marck	50,97	1,95	2
Nielles-les-Blequin	50,67	2,07	148
Radinghem	50,55	2,12	115
Saulty	50,22	2,53	160
Le-Touquet-Paris-Plage	50,52	1,62	5
Wancourt	50,27	2,87	100

ANNEXE 3 - Noms, coordonnées (°N et °E) et altitudes (en mètres) des stations météorologiques Météo France.

Résumé

Le développement des activités humaines a engendré et engendre encore d'importants rejets d'espèces gazeuses et particulaires dans l'atmosphère. Parmi ces rejets, des gaz à effet de serre contribuent à augmenter la température moyenne du globe, on parle de forçage anthropique. Cette élévation impacte les différentes composantes du système climatique. Dans cette thèse, nous nous intéressons à l'atmosphère.

La thèse, pluridisciplinaire, cherche à répondre à deux questions : le forçage anthropique peut-il influencer la circulation atmosphérique et plus précisément, sa variabilité, et peut-il avoir des conséquences sur la diffusion d'espèces polluantes ? Le travail est basé sur la comparaison de deux périodes, l'une de 1960 à 1989 représente le climat sans forçage, tandis que l'autre, de 2070 à 2099 prend en compte les différents scénarios de forçage anthropique.

La première étape consiste à caractériser la variabilité de la circulation de l'atmosphère pour les mois hivernaux à partir des hauteurs du géopotentiel à 500 hPa sur une fenêtre Atlantico-Européenne. Les structures de variabilité étudiées concernent les modes de variabilité et les régimes de temps. D'après notre étude, les forçages ne modifient pas leurs structures dans l'espace mais davantage leurs fréquences d'apparition et leurs temps de persistance moyens.

La deuxième étape concerne la modélisation de la qualité de l'air sur la région Nord-Pas de Calais. L'analyse des simulations actuelle et future révèle qu'aucune corrélation directe entre modes de variabilité sous forçage et diffusion n'est détectée. En revanche, les concentrations de particules en suspension et du dioxyde d'azote augmentent.

Mots-clefs : Changement climatique ; Scénarios d'émissions ; Géopotentiel 500 hPa ; Modélisation ; Variabilité de la circulation atmosphérique ; Qualité de l'air ; Région Nord -Pas de Calais

Abstract

The growth of human activities causes significant emissions of gaseous and particulate species in the atmosphere. Greenhouse gases contribute to increase the average global temperature, it's called anthropogenic forcing. This temperature increase modifies the various components of the Earth's climate system. In this thesis, the atmosphere is our topic of interest.

The objective of this thesis is to answer two questions on a multidisciplinary basis: (1) can anthropogenic radiative forcing influences atmospheric circulation and more specifically, its variability? (2) And can it affects the spatial distribution of pollutants? This work is based on the comparison of two periods: one from 1960 to 1989 representing the climate without emission scenarios; the other from 2070 to 2099 considering different scenarios of anthropogenic forcing.

The first step is to characterize the atmospheric circulation variability, in wintertime, from the 500 hPa geopotential height at North Atlantic and European scale. The main structures of variability we studied are the so-called modes of variability and weather regimes. In our study, the scenarios do not change their structures in space but rather their frequency of occurrence and mean residence time.

The second step concerns modeling of air quality over the French Northern region. Analysis of actual and future simulations reveals that no direct correlation between changes of variability modes and spatial distribution of pollutants is detected but concentrations of particulate matter and nitrogen dioxide increase.

Keywords: Climate change; Emissions scenarios; 500 hPa Geopotential height; Modeling; Atmospheric circulation variability; Air Quality; French Northern region