# Acronymes

**ANOVA**

ANalysis of VAriance, l’analyse de la variance en français.

**CMIP**

Coupled Model Intercomparaison Project

**CORDEX**

COordinated Regional climate Downscaling EXperiment

**DJF**

hiver d’hémisphère Nord, Décembre-Janvier-Février

**EOF**

Empirical Orthogonal Functions

**GCM**

General Circulation Model (modèle du climat global)

**GIEC**

Groupe d’experts Intergouvernemental sur l’Évolution du Climat

**IC**

Initial Conditions (conditions initiales)

**IPSL**

Institut Pierre Simon Laplace

**IV**

Internal Variability (Variabilité Interne)

**JJA**

été d’hémisphère nord, Juin-Juillet-Août

**LAM**

Limited-Area Models (modèle d’air limité)

**LBC**

Lateral Boundary Condition (conditions de contournement latéral)

**LMDZ**

modèle du climat, développé au « Laboratoire de Météorologie Dynamique », avec une fonction de Zoom

**LMDZ80**

Notre expérience conceptuelle d’une durée de simulation de 80 ans du modèle LMDZ

**LMDZ150**

Notre expérience d’un raffinement de mailles au RCM, les simulations ont une durée de 150 ans du modèle LMDZ

**NAO**

North Atlantic Oscillation (oscillation nord-atlantique)

**OM**

notre simulation de référence, du GCM

**OS**

notre simulation d’one-way nesting du RCM

**OWN**

One-Way Nesting (imbrication du sens unique)

**RCM**

Regional Climate Model (modèle du climat régional)

**RT**

Régime de Temps (Weather regime)

**SIC**

Sea Ice Concentration

**SST**

**S**ea **S**urface **T**emperature

**T2M**

Température à **2** Mètres

**TS**

notre simulation de two-way nesting du RCM

**TWN**

Two-Way Nesting (système d’imbrication à double sens, avec la rétroaction du RCM vers le GCM)

**WMO**

World Meteorological Organization

**Z500**

Géopotentiel à 500 hPa

# Introduction

Sommaire

1.1 Reproduction du climat régional 4

1.1.1 Modélisation numérique du climat 4

1.1.2 Évolution du modèle du climat : du global au régional 5

1.2 Motivations d’étude 7

1.2.1 Deux approches de la modélisation du climat régional : TWN et OWN 7

1.2.2 Forçage externe et variabilité interne 8

1.2.3 Contribution du projet CORDEX 10

1.3 Questions recherchés de la thèse 12

1.3.1 Différence entre TWN et OWN 12

1.3.2 Modification de la variabilité interne par relaxation 13

1.3.3 Influence de raffinement de maille 14

1.4 Originalités de l’étude 15

1.4.1 Choix du domaine 15

1.4.2 Configurations d’expériences 17

1.4.3 Méthodologie d’analyses 18

1.5 Organisation de la thèse 21

Bibliographie 22

Annexes 27

Annexe 1.1: description des domaines CORDEX 27

Annexe 1.2 : informations des tempêtes d’Europe depuis les années 1950 jusqu’au 2014. 28

Table de figures 30

## 1.1 Simulation du climat régional

Le réchauffement climatique en relation avec les émissions anthropiques du carbone dans l’atmosphère constitue d’un enjeu global pour l’homme. De nombreuses études scientifiques rapportées dans les différents rapports du GIEC (Groupe d’experts Intergouvernemental sur l’Évolution du climat, IPCC en anglais) montrent que les impacts du réchauffement climatique sont non seulement environnementaux, mais aussi socio-économiques et géopolitiques. Toutefois, d’importantes incertitudes persistent sur plusieurs aspects du réchauffement climatique. Au niveau global, le GIEC (IPCC, 2013) rapporte que la température moyenne sur l’ensemble du globe a une plage entre 0.3 °C et 4.8 °C comme élévation pour la fin du 21ème siècle. Les causes fondamentales de ces incertitudes sont liées à notre connaissance limitée sur certains processus clefs du climat, notamment en relation avec les végétations, les nuages et les grands courants de la circulation océanique. Les incertitudes sont encore plus grandes au niveau régional, partiellement à cause du manque d’une méthodologie adéquate pour régionaliser le climat et le changement climatique. Il y a donc une grande nécessité de construire une méthodologie permettant la compréhension du climat à toutes ses échelles spatio-temporelles, l’interaction d’échelles étant un problème fondamental du climat. Dans la pratique et pour répondre aux besoins d’adaptation et d’atténuation du changement climatique, il faut développer une hiérarchie de modèles climatiques couvrant les échelles régionales, tout comme l’échelle global. Depuis longtemps, la communauté scientifique du climat s’est déjà mobilisée autour de la régionalisation du climat, l’objectif étant d’augmenter la performance de la modélisation régionale et d’avoir une résolution spatiale fine pour les résultats fournis.

Cependant, la vérification de la méthodologie de la régionalisation est indispensable, qui est aussi la motivation essentielle de cette thèse. Dans notre étude, nous ne cherchons pas une amélioration de performance du modèle, nous nous intéressons néanmoins aux influences des méthodes de régionalisation appliquées, sur la reproduction du climat régional.

### 1.1.1 Modélisation numérique du climat

La modélisation numérique du climat peut être considérée comme la construction d’un outil pour reproduire virtuellement le climat de la terre. Elle consiste à discrétiser, sous un certain maillage couvrant la terre entière, les équations fondamentales régissant les bilans d’énergie, de moment cinétique et d’eau. Un ensemble de paramétrisations physiques sont aussi indispensables pour prendre en compte les processus physiques sous maille, tels que ceux en relation avec le rayonnement, la convection, la condensation, la microphysique des nuages et la turbulence *(Le Treut, 2011).*

Parmi les équations fondamentales du climat, les équations de Navier-Stokes, développés initialement au XIXème siècle, déterminent le mouvement de l’atmosphère. L’interaction entre les différentes composantes du système climatique dans toutes ses échelles spatio-temporelles joue un rôle fondamental dans la compréhension et la simulation du climat.

Une des premières modélisations de l’écoulement atmosphérique a été effectuée par l’anglais *Lewis Fry Richardson* en *1922*. Suite à l’augmentation de la puissance des ordinateurs, à partir des années 1950, une évidente amélioration de capacité de calcule a fait avancer spéctaculairement la modélisation.

Les modèles actuels du climat se complexifie progressivement en associant l’atmosphère, l’océan et la surface continentale *(Le Treut, 2011)*. Ils sont de plus en plus réalistes en prenant en compte les interactions physiques, dynamiques, chimiques, biologiques et anthropiques. Cependant, la caractéristique chaotique de l’atmosphère provoque un effet papillon, qui influence l’ensemble des circulations. Il est donc impossible de prévenir les mouvements atmosphériques d’une façon déterminée au delà de quelques jours à cause des informations développées aux échelles spatiales régionales/locales, ainsi aux échelles temporelles courtes. La présence de la variabilité interne est aussi très importante sur la reproduction du climat.

Il y a divers modèles du climat, répondent les questions climatiques de différents aspects *(WMO : World Meteorological Organization)*. Les modèles couplés sont plus en plus utilisés et évalués avec le projet internationale *CMIP (Coupled Model Intercomparison Project)*. Aucun modèle est meilleur ou moins bon que les autres, selon les choix physiques et mathématiques, chaque modèle a ses avantages et ses inconvénients. L’évolution des modèles du climat, est un défi à plus d’un titre par la complexité et la variabilité du système climatique *(Hourdin, 2011).* En plus, quand il y a plus de processus impliqués dans un modèle numérique, la compréhension des mécanismes d’interactions devient encore plus difficile. Cependant, la société a plus d’exigence et de besoin sur la reproduction du climat aux différentes échelles spatiales et temporelles. La modélisation numérique à nos jours répond malheureusement partiellement nos besoins. Il y a une nécessité d’évoluer non seulement la modélisation numérique, mais en même temps d’évaluer aussi les méthodes de bases de la modélisation.

### 1.1.2 Raffinement de l’échelle spatiale : du global au régional

Le modèle du climat global *(GCM)*, couvre l’ensemble du globe avec un maillage relativement grossier de plusieurs centaines de kilomètres. Un GCM est censé de bien représenter les circulations générales. Pourtant, la simplicité du relief, des côtes et aussi de l’occupation du sol, n’est pas suffisante pour reproduire les informations précises *(Giorgi, 2010 ; Giorgi et al., 1991 ; Jacob et al., 2007 ; Laprise et al., 2008 ; Castel et al., 2010 ; Rummukainen, 2010 ; Richard et al., 2010)*. Il y a donc un faussé avec les besoins de notre société pour une meilleure compréhension du climat aux différentes échelles spatiales, pour l’adaptation et l’atténuation aux changements climatiques.

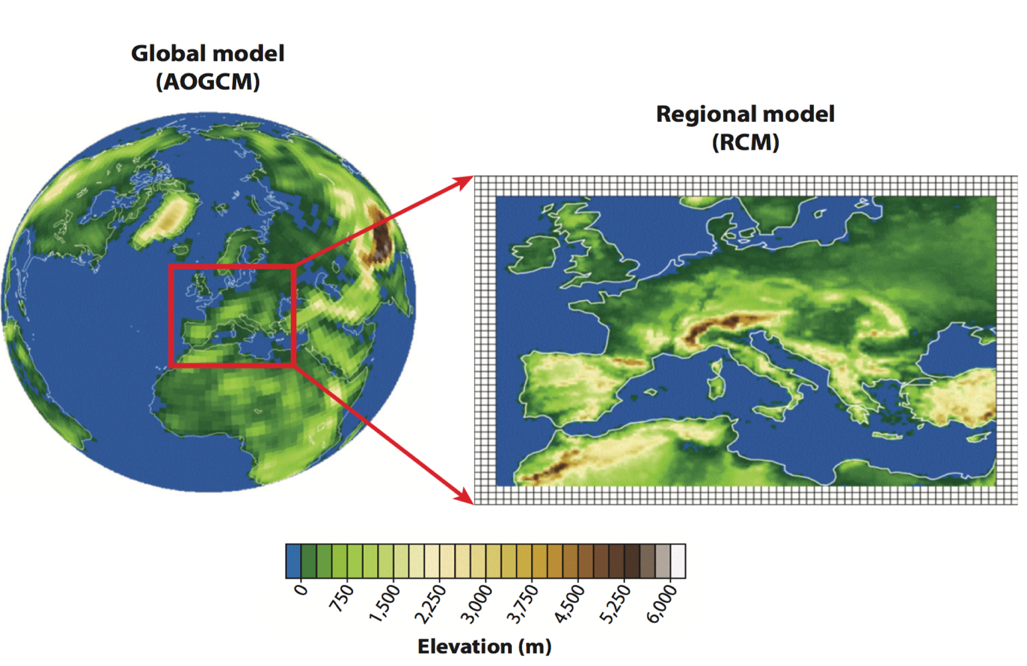


Figure  : raffinement de maille du AOGCM (atmosphere-ocean general circulation model) au RCM (regional climate model). Source : Giorgi et al., 2015.

Le nouveau défi en matière de modélisation du climat est donc la transformation d’échelles, du global au régional *(figure 1)*, avec une résolution spatiale de plus en plus fine, ce qui permet de fournir une description dynamique plus détaillée du climat régional. De surcroit, le modèle du climat régional *(RCM)* est souvent complété par une descente d’échelle statistique empirique pour une meilleure régionalisation. Et les deux approches sont appliquées souvent sur un domaine limité *(Rummukanien, 2010 ; Giorgi, 2015).* Le RCM est un outil essentiel pour détailler les processus afin de mieux comprendre les climats à l’échelle régionale et locale *(Laprise, 2008 ; Rummukanien, 2010 ; Giorgi, 2015)*. Il est utilisé depuis les années 80 *(Giorgi, 2015)* pour générer les données climatiques et étudier le processus physique régional à une haute résolution spatiale. À l’échelle internationale, le projet CORDEX *(Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment),* est un des plus connus sur la modélisation régionale. Les participants travaillent dans un même cadre, d’évaluer les modèles régionaux des différents domaines.

Le RCM est une modélisation contrainte par le guidage *(figure 1)*. Il respecte l’évolution de la circulation atmosphérique imposée par le GCM *(Forget et al., 2004)*. Ce guidage se traduit mathématiquement par l’ajout de « relaxation » dans les équations d’évolution du vent, de la température, de l’humidité, qui est en terme non physique *(Drobinski, 2015)*.

Le modèle RCM, comme le modèle GCM, n’est pas une solution parfaite du climat régional. Mais il est un outil très utile pour étudier le climat régional..

## 1.2 Motivations d’étude

Grâce à une meilleure représentation des processus de surface, et une représentation plus détaillée de l’écoulement atmosphérique, un RCM donne généralement une simulation améliorée du climat, surtout en ce qui concerne les propriétés statistiques des extrêmes climatiques, tels que les cyclones, les précipitations intenses et les vents forts *(Giorgi et Mearns, 1991).* En revanche, comme résumé par Somot en 2012, le RCM est loin d’être une solution parfaite pour nos besoins en matière de régionalisation climatique. De nombreux défis nécessitent toujours nos attentions et efforts, par exemple : le spin-up spatial, l’incohérence frontalière, le manque des informations adéquates aux échelles régionales/locales, et les problèmes sur la bonne représentation de la variabilité interne *(figure 2).*

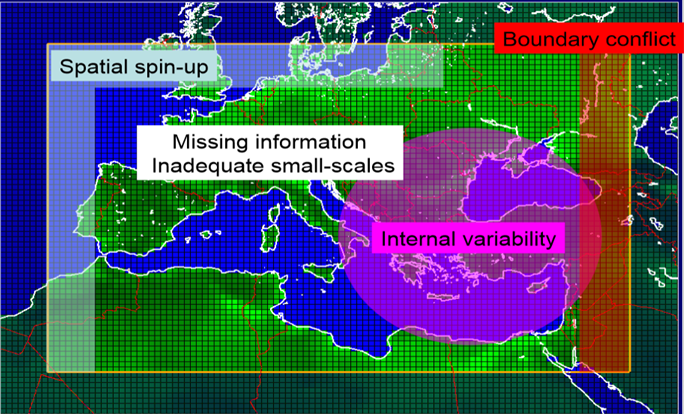


Figure  : problèmes observés de la méthode traditionnelle de descente d’échelle.

Source : Somot (2012).

Dans notre étude, en utilisant l’opération de relaxation, nous voudrons premièrement appliquer l’approche de two-way nesting *(TWN)* pour analyser si l’incohérence frontalière est améliorée. Puis nous nous intéressons à l’étude sur la variabilité interne, en stratifiant les situations en différentes échelles spatiales et temporelles.

### 1.2.1 Deux approches de la modélisation du climat régional : TWN et OWN

L’approche one-way nesting *(OWN)* (imbrication à sens unique) est la méthodologie classique largement utilisée pour faire la régionalisation du climat à l’aide d’un RCM. Elle consiste à prendre les sorties du GCM et les utiliser pour forcer le RCM dans ses conditions aux limites latérales. Mais il n’y a aucun retour venant du RCM pour le GCM. Les échanges d’informations entre le GCM et le RCM suivent donc une stratégie du sens unique. Cette situation est presque le cas à 100% dans la communauté CORDEX pour la régionalisation du climat. Elle est aussi expliquée par le fait que les scientifiques du climat global et ceux du climat régional font souvent partie de deux communautés distinctes. Mais il est clair que OWN n’est pas satisfaisant. Il coupe artificiellement un processus fondamental de l’écoulement atmosphérique sur l’interaction des échelles spatio-temporelles. Ce manque d’échange mutuel pourrait influencer la reproduction du climat régional.

Dans notre étude, nous appliquons premièrement une nouvelle approche de two-way nesting, qui prend en compte l’interaction entre le GCM et le RCM. Ce système d’imbrication est très peu utilisé jusqu’au présent, à cause de la difficulté technique et du coût de calcul *(Lorenz et al., 2005 ; Rummukanien, 2010 ; Giorgi, 2015).* L’étude de *Lorenz (2005),* a montré qu’en raffinant la région équatoriale pacifique occidentale, le TWN système mène une amélioration de la température de l’atmosphère du climat global. L’erreur systématique en comparant les données ré-analyses, est réduite. L’amélioration est représentée même dans des régions éloignées du domaine du RCM *(Lorenz et al., 2005)*. En revanche, la modification des processus physiques, reste toujours difficile à comprendre.

Nous pensons qu’il est nécessaire d’évaluer les deux systèmes d’imbrication en comparant TWN et OWN, pour avoir une connaissance des éventuelles modifications par le TWN. Cette partie sera présenter au *Chapitre 2*, par essentiellement la comparaison de l’état statistique de la moyenne entre les simulations. En même temps, il y a aussi une nécessité de comprendre la dynamique de la circulation interne, afin de mieux expliquer les potentielles modifications de l’état statistique de la moyenne ou/et la variance au RCM. Nous pensons donc de stratifier les situations en décomposant les échelles spatiales et temporelles.

### 1.2.2 Forçage externe et variabilité interne

Les modèles à aire limité imbriqués à sens unique (One-way nesting du LAM : Limited-Area Models), sont utilisés dans la prévision numérique du temps et aussi dans la modélisation climatique régionale *(IPCC, 2013 ; Biner, 2000 ; de Elia et al., 2002 ; Antic et al., 2004 ; Denis et al., 2002 ; Davies, 1976, Davies and Turner, 1977).* Les sorties GCM à une résolution grossière fournissent des conditions aux limites latérales (LBC) qui évoluent dans le temps. Le forçage du modèle régional vient des conditions aux limites latérales, et aussi de la topographie et des hétérogénéités de la surface *(van Tuyl and Errico, 1989).* Les simulations RCM avec une intégration identique à tous égards, à l’exception des conditions initiales légèrement différentes, peuvent avec le temps conduire à des solutions sensiblement différentes *(Giorgi and Bi, 2000 ; Christensen et al., 2001 ; Rinke et al., 2004 ; Laprise et al., 2008 ; Lucas-Picher et al., 2008a ; Crétat et al., 2011 ; Done et al., 2014).*

Si le domaine d’intégration est très petit, il n’est pas suffisant de permettre la dynamique du modèle d’agir, ce qui entraînera un retour erroné sur les perturbations des paramètres *(Seth and Giorgi, 1998).* Il s'agit d'un test nécessaire mais pas suffisant pour la validité générale d'un RCM, qu'il reproduit le flux à grande échelle correspond aux limites latérales et que des caractéristiques réalistes à petite échelle sont ajoutées *(Christensen et al., 2001)*. D’autre part, des zones d’intégrations (domaine d’étude) très grandes présentent une très importante incohérence des erreurs avec les zones de relaxation, qui introduisent le RCM commence à développer sa propre dynamique à grande échelle, autre que le modèle forcé du GCM *(Jacob and Podzun, 1997).* La variabilité d’un RCM, dépend donc de la taille du domine à relaxer, mais nous n’analyserons pas le choix du domaine dans notre étude.

Pour simplifier la compréhension du climat régional, nous utilisons un cadre conceptuel pour décomposer sa variation en deux sources de nature différente : une première partie considérée comme composantes reproductibles et dépendante du forçage frontalier (externe) ; et une autre partie non reproductible engendrée par la variabilité interne (IV). La variabilité interne se comporte souvent comme un phénomène stochastique *(Separovic et al., 2008)*. Mais il est également possible qu’elle soit modulée par les conditions de forçage externe. Le signal de la force externe est, par définition, indépendant des perturbations dans les conditions initiales (IC) *(Separovic et al., 2008)*, ce qui fournit un moyen d’accès au signal externe à travers l’approche de simulation d’ensemble. Avec un grand nombre de réalisations dont chacune possède un état initial différent, le signal finit toujours capturé même il est très faible. Avec ce cadre conceptuel de séparation de la variabilité du climat régional, nous pouvons facilement comprendre qu’un RCM n’est pas un simple interpolateur des variables climatiques vers une grille plus fine. Il devrait être capable de simuler les mécanismes locaux de rétroaction atmosphérique et en fabriquer une richesse supplémentaire de variabilité interne, indépendante ou dépendante des conditions aux limites. Nous avons donc besoin que le RCM décrive correctement les interactions entre le forçage des circulations générales et les processus locaux, et à toutes les échelles temporelles. Ceci est une exigence pour tous les RCMs en OWN, leur mode classique de fonctionnement. Dans un cadre TWN, le retour du RCM vers le GCM est aussi pris en compte, ce qui rend bien évidemment le système climatique plus complet.

Il est important que le RCM aie certaine liberté de prendre en compte les mécanismes de rétroactions. La variabilité interne simulée provient des processus physiques non linéaires, qui sont décrits par les équations RCM et se développent dans des conditions à grande échelle spatiale *(Christensten et al., 2001*). Ainsi, ces régions et champs peuvent être identifiés comme ceux où le modèle développe ses propres processus désinhibés par le processus de relaxation.

La variabilité interne est généralement quantifiée en termes d'écart-type intermédiaire entre les simulations relatives aux différentes conditions initiales. Dans les intégrations de LAM étendues menées sur des mois à des années, la IV varie en fonction de plusieurs facteurs qui incluent la situation synoptique, la saison d'année, la taille et la position du domaine de calcul et les échelles spatiales et temporelles considérées. Dans notre étude, nous analyserons la situation synoptique en séparant les saisons météorologiques, car ce sont les critères très importants de représenter la variabilité interne *(Separovic et al., 2008, 2015, Alexandru et al., 2007, Christensen et al., 2001, Jones et al., 1995)*.

Pour les zones en moyennes latitudes, une forte variabilité interne est présente en été *(JJA en hémisphère Nord)* (*Caya and Biner, 2004)*, et elle augmente avec la taille du domaine (*Alexandru et al, 2007 ; Rapaic et al., 2011)* et la diminution des conditions aux limites latérales qui forcent l’intérieur du domaine. Une caractéristique importante de IV dans les simulations LAM, est sélectif en fonction de l’échelle. La séparation des échelles est décomposée par les variances du champ régional (ANOVA) *(Separovic et al., 2008, 2015, Alexandru et al., 2007, Christensen et al., 2001*). En revanche, l’étude sur la taille et la position du domaine, sera dans les perspectives de notre étude, qu’il ne sera pas présenté dans cette thèse.

Les analyses de la variabilité interne, sont souvent sur l’été car cette saison représente une IV plus importante que l’hiver *(DJF en hémisphère Nord)* *(Giorgi and Bi, 2000 ; Lucas-Picher et al., 2008a).* Autrement dit, les circulations générales horizontales sont fortes en hiver, et la convection et la condensation sont plus fortes en été, qui impacte plus la reproduction du climat régional dans cette saison. Dans notre étude, nous nous intéressons particulièrement à l’hiver car nous voudrions comprendre la modification de la variabilité interne sur cette saison qui est moins sensible aux changements. Nous étudions en même temps aussi l’été.

Le papier de *Separovic et al. (2015)* montre qu’une tendance de propagation augmente avec la distance aux zones frontalières. Il y a une relation entre la topographie, les processus près de la surface, la géographie et la IV. Une forte IV est retrouvée à l’est de leur région d’étude au Canada. La reproductivité dépend des échelles spatiales. Une chute de reproductivité est représentée aux petites échelles spatiales. Dans un autre article de *Separovic*, ils ont observé qu’au-dessous d’une échelle à 250 km, il y a plus d’informations stochastiques irréproductibles, qui ne sont pas autant influencées par la résolution horizontale car le modèle est évolué plus librement à l’intérieur du domaine *(Separovic et al., 2008).*

En même temps, il faut aussi penser que le GCM a aussi les flux naturel et chaotique aux grandes échelles, qui ne sont pas au RCM *(Christensen et al., 2001)*. Dans ce cas, une plus faible variabilité interne est manifestée au RCM car GCM entraîne une variabilité de la circulation générale, et le RCM développe les processus aux petites échelles qui introduisent les perturbations. Nous supposons que la représentation de variabilité interne par le GCM et le RCM n’est pas la même que nous voudrons affirmer dans notre étude. Cela veut aussi dire que la ressemblance entre les deux modèles, n’est probablement pas identique. Nous cherchons de plus, la relation entre le forçage externe et la variabilité interne sur les différentes échelles spatiales et temporelles. Donc, quand nous interpellons nos résultats de comparaison entre les différentes simulations et différents modèles, il faut être vigilant que la méthodologie appliquée pourra impacter la reproduction de la variabilité interne du climat régional, avec aussi l’influence du raffinement de maille.

### 1.2.3 Contribution du projet CORDEX

En effet, l’application d’une résolution spatiale très fine est une façon classique aux études du climat régional. Dans le cadre du projet CORDEX, pleins d’études ont appliqué un raffinement de maille pour simuler le climat régional, sur les différentes régions *(Jacob et al., 2014 ; Vautard et al., 2013 ; Wong et al., 2017 ; Kotlarski et al., 2014 ; Nikulin et al., 2012 ; Ruti et al., 2016 ; Giorgi et al., 2015)*.

Le projet CORDEX a une grande contribution à la communauté de modélisation régionale, qui est un des plus connus projet à l’échelle internationale, sur la modélisation régionale. Il est aussi le premier projet international sur la modélisation régionale. Il y a actuellement quatorze domaines *(annexe 1)* découpés par l’application *(figure 3)*, qui couverent l’ensemble du globe. Les participants au projet CORDEX, travaillent tous dans le même cadre d’évaluation des modèles régionaux, en mettant en commun les références d’étudier le climat régional *(Giorgi et al., 2015 ; site CORDEX).* Une résolution approximée de 50 km est utilisée, les mailles régulières sont de 0.44° en latitude et 0.44° en longitude.

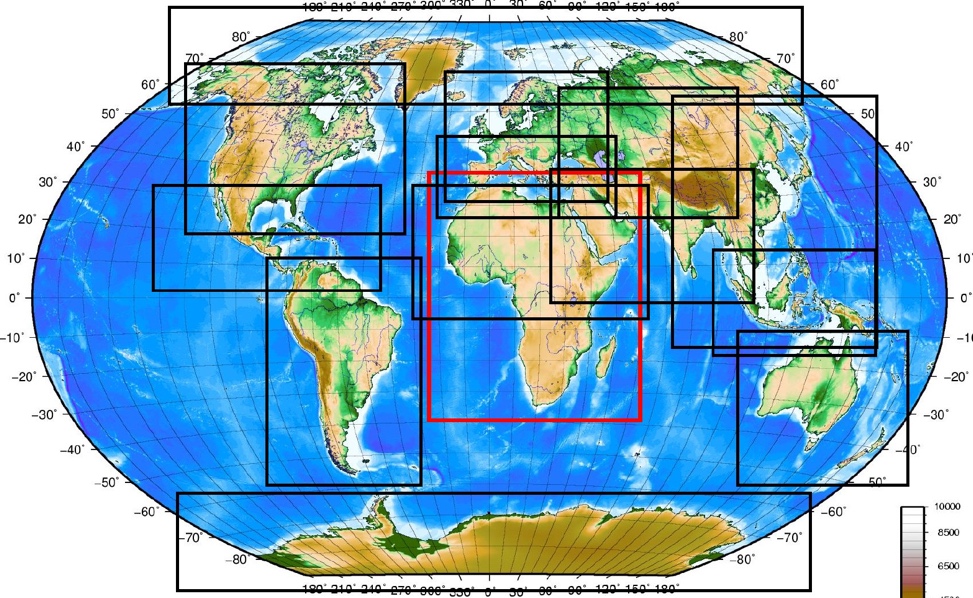


Figure  : quatorze régions du CORDEX (COordinated Regional climate Downscaling Experiment).

Source : [www.cordex.org](http://www.cordex.org), consulté le 31 mars 2015.

Dans un contexte du raffinement de maille, les chercheurs dans le projet CORDEX, cherchent premièrement de mieux comprendre les phénomènes régionaux et locaux, ainsi leur variabilité. Puis, certaines travaillaient sur l’évaluation et la validation des RCMs et des techniques de descente d’échelle. Ensuite, ils s’intéressent aussi de mettre en place les coordinations des projections régionales au monde d’entier. Un autre objectif du CORDEX, est de favoriser la communication et l’échange de connaissances avec les utilisateurs de RCMs *(site CORDEX)*.

La descente d’échelle d’une résolution spatiale fine, est largement utilisée au CORDEX. Pourtant, il manque souvent de la vérification de la méthodologie utilisée. Il est donc, nécessaire de revenir la recherche de base sur l’analyse du processus de relaxation pour mieux interpréter les résultats obtenus d’après le raffinement de maille. Nous étudions l’effet du processus de relaxation et cherchons aussi le rôle du raffinement de maille dans un grand domaine *(1.4.1)* couvert trois CORDEX régions.

L’objectif de notre étude, n’est pas basé sur l’amélioration du RCM, notre but est d’avertir aux utilisateurs du RCM surtout ce qui sont dans le projet CORDEX, qu’il devrait faire attention à la variabilité interne modifiée par la méthodologie choisie. Nous nous intéressons à une méthode, dont l’opération de relaxation. Il est important de vérifier l’influence de la méthodologie appliquée, avant de traiter les résultats d’une résolution raffinée.

## 1.3 Questions recherchés de la thèse

L’objectif principal de cette thèse est d’évaluer, dans un cadre idéalisé, la méthodologi de régionalisation du climat avec un RCM imbriqué dans un GCM par une opération de relaxation dans les conditions aux limites latérales. Deux schémas d’imbrication (one-way nesting versus two-way nesting) seront réalisés et mis en production. Nous mettons en place deux protocoles de simulation pour séparer les deux effets de la régionalisation : l’un est lié à la procédure d’imbrication (par une relaxation) elle-même, et l’autre au raffinement de mailles dans le RCM.

Notre étude est effectuée sur trois grands axes :

* Documenter les différences du climat avec les deux systèmes d’imbrications (OWN versus TWN).
* Comprendre la variabilité interne du RCM et l’effet de régionalisation effectuée par une opération de relaxation.
* Estimer l’effet du raffinement de maille au RCM et le séparer de celui avec la procédure de régionalisation.

### 1.3.1 Différence entre TWN et OWN

L’approche OWN est largement utilisée à la communauté RCM pour faire la régionalisation du climat, et pour raffiner les prévisions météorologiques. Elle est aussi la méthode de référence du projet CORDEX comme présenté dans la partie *1.2.3*. Cependant, la relation entre le GCM et le RCM dans l’approche OWN est du sens unique, c’est-à-dire, le GCM fournit les conditions aux limites au RCM, sans recevoir de retour du RCM. Ce manque d’interaction pourrait générer des incohérences entre la zone de relaxation du forçage externe et la région d’étude forcée.

La première question que nous nous posons est de savoir si ces incohérences frontalières peuvent entraîner des différences structurelles à l’intérieur du domaine et à l’échelle globale. La comparaison sur l’état statistique de la moyenne du climat entre ces deux systèmes de nesting, est avant tout pour vérifier leur reproductivité du climat. C’est-à-dire que nous analysons s’il y a une différente reproduction du climat global et régional en prenant compte le retour du RCM au GCM. Nous pouvons anticiper que le climat global doit être impacté et changé avec TWN (partielement confirmé par les quesques rares études rapportées dans la littérature scientifique), ce qui engendre des conditions aux limites différentes pour le RCM. Nous pouvons aussi imaginer que les différentes saisons peuvent avoir de différents comportements.

Nous supposons la variabilité interne est modifiée par les différences des circulations générales. En revanche, comment mettre en évident le rôle de la variabilité interne ? Nous effectuons ensuite un retour à la l’expérience simple d’après la comparaison entre TWN et OWN.

### 1.3.2 Modification de la variabilité interne par relaxation

Le retour à une expérience simple et conceptuelle dans notre étude n’est pas pour améliorer la performance du modèle. Nous avons pu identifier que l’application d’une procédure de relaxation aux bords du domaine est une pratique généralisée par la communauté RCM. Mais en revanche, l’effet de cette pratique n’a jamais été proprement évalué. Nous proposons un cadre idéalisé avec le RCM identique au GCM, mêmes configurations physiques et dynamiques, même résolution spatiale. Notre but est de vérifier la méthodologie de relaxation.

Nous nous intéressons à la région Euro-Atlantique *(1.4.1)*, où se trouve les fortes circulations atmosphériques aux moyennes latitudes. Autrement dit, il pourrait avoir une variabilité interne plus importante dans cette région. À travers une expérience simple et idéalisée, nous voudrons comparer et évaluer les situations aux moyennes latitudes selon les différentes saisons. Nous nous intéressons non seulement aux propriétés statistiques du climat, mais aussi à la reproductivité synoptique. La question évidente à formuler est donc la suivante. La séquence météorologique qu’impose le GCM est-elle bien reproductible dans le RCM ? Cette reproductivité est-elle variable en fonction des différentes situations synoptiques ? Pour avoir une meilleure compréhension de cette reproductivité synoptique, nous formulons l’idée conceptuelle à partir du ratio entre le forçage externe et la variabilité interne.

* À l’intérieur du RCM, il y a des informations reproductibles venant des circulations générales, et aussi une partie irreproductible à cause du développement de la dynamique interne qui est en général à l’échelle régionale et locale *(Separovic et al., 2008, 2015).* L’opération de relaxation pourrait probablement assurer une bonne reproduction des informations reproductibles car le RCM devrait suivre le chemin du GCM. Par contre, les informations irreproductibles sont plus chaotiques et moins prévisibles, qui causent la déviation du RCM. Il pourrait aussi avoir une interaction entre les informations reproductibles et irreproductibles. Autrement dit, il peut y avoir une modulation de la variabilité interne. De plus, il pourrait avoir une interaction entre les circulations de différentes échelles (globales et régionales).
* La relation entre le RCM et le GCM, pourrait être résumée par le lien entre le forçage externe et la dynamique interne. Dans cette thèse, nous évaluons cette relation pour non seulement représenter la modification de variabilité interne au RCM, par l’opération de relaxation, mais aussi de chercher une relation d’impact entre les causes (forçage externe et la dynamique interne) et les conséquences (ressemblance entre le RCM et le GCM).

### 1.3.3 Influence de raffinement de maille

La configuration précédemment décrite, avec un RCM identique à son forceur – le GCM, permet d’isoler l’effet de la procédure de régionalisation réalisée par une relaxation newtonnienne. Elle aussi permet de mieux comprendre une configuration plus réaliste de régionalisation du climat, avec un RCM possédant une meilleure résolution spatiale, et éventuellement un jeu différent de paramétrisations physiques. Notre deuxième protocole de simulations est justement identique à la configuration précédente, mais la résolution spatiale du RCM est de 100 km, au lieu de 300 km. Notre objectif scientifique est d’isoler l’effet de la résolution spatiale du RCM.

* Identifier s’il y a les mêmes structures de modifications entre le RCM et le GCM, entre l’expérience du raffinement de maille et l’expérience conceptuelle. Le but de cette recherche, est pour retrouver les modifications systématiques par le modèle lui-même ou la méthode de relaxation. Autrement dit, malgré de la variabilité interne modifiée, nous spéculons le climat régional au RCM respecte la trajectoire des circulations générales. Il y ait donc certaine ressemblance entre le RCM et le GCM. En même temps, les informations irréproductibles sont stochastiques, qui devraient manifester plus ou moins fortement sur certaines régions car ils sont liées à la variabilité interne.
* Vérifier la magnitude du changement au RCM par rapport au GCM, entre les deux expériences, afin d’affirmer si le raffinement de maille augmente la variabilité interne. Nous spéculons une meilleure description de la région à simuler, favorise d’avoir un plus important degré de liberté de la dynamique interne.

Notre étude suit donc le file de connaître la différence entre deux approches de nesting, puis d’analyser la méthode de l’opération de relaxation, et d’évaluer l’influence du raffinement de maille sur la reproduction du RCM. Il s’agit une stratégie, de l’expérience compliquée de l’approche de TWN, à l’expérience simple d’étudier le concept du RCM, et nous retournons à l’expérience du raffinement de maille pour comprendre les informations ajoutées par la méthode cascade.

## 1.4 Originalités de l’étude

### 1.4.1 Choix du domaine

La régionalisation du climat est étroitement liée aux différentes régions du globe. Par conséquence, le choix du domaine d’étude n’est pas une opération innocente. Les résultats obtenus peuvent aussi manquer de l’universalité et rester fortement dépendants du choix du domaine. Le projet CORDEX, un effort scientifique coordonné au niveau international a fait son choix de domaines recommandés sur 14 régions du globe. Ce choix est souvent un mélange de considérations géographiques et politiques, pas toujours climatiques. Parmi les quatorze régions CORDEX *(annexe 1)*, le CORDEX-Europe, le CORDEX-Méditerranée, et le CORDEX-Afrique du nord nous intéressent particulièrement. Mais aucun des trois ne nous conviennent, car leur découpage ne prend pas complètement en compte les systèmes dynamiques atmosphériques et océaniques gouvernant la région.

Europe est une des régions souvent frappées par les tempêtes des moyennes latitudes. Dans le contexte du réchauffement climatique, et depuis le début du 21ème siècle, une augmentation de la fréquence et de l’intensité des cyclones semble évidente dans l’observation. Entre 2010 et 2014, quatorze grandes tempêtes ont été enregistrées contre huit tempêtes des dix premières années du XXI siècle et huit tempêtes de la deuxième moitié du XX siècle *(Annexe 1.2)*. Ce phénomène, puissant et destructeur, touche différents pays européens avec d’ importants impacts à la société. Comprendre le processus physique et surtout les modes de variabilité du climat à l’échelle régionale est donc une des motivations de cette thèse.

L’article de *Woolings* *(2010)* montre qu’une incertitude sur les potentielles influences futures de la dynamique sur le climat atlantique-européen est observée, cette région socio-économique importante besoin des études sur l’impact du climat régional. Il y a une variété des influences non simplement horizontale de l’océan à la terre, mais aussi verticale de la surface à la stratosphère. Une variabilité naturelle donne la difficulté de simuler et prédire le climat européen.

Pour assurer un système climatique complet qui associe une cohérence physique et dynamique, nous décidons de choisir un grand domaine qui représente une grande variabilité interne. En même temps, le domaine d’étude nécessiterait de garder le fort gradient de température et de pression, en prenant compte aussi le contraste terre-océan, les différents types du climat, et les diverses occupations du sol. Nous nous intéressons en hémisphère du nord où se présente une forte circulation horizontale en général. Nous ciblons plus précisément aux circulations atmosphériques aux moyennes latitudes, dont l’Europe. En combinant les différentes régions CORDEX et le domaine du projet ENSEMBLE, notre région d’étude couvert l’Atlantique du nord, l’Europe, la Méditerranée, et l’Afrique du nord *(figure 4)*. Ce choix est pour assurer la complexité de la dynamique et la physique, en gardant également les interactions des différents mécanismes.

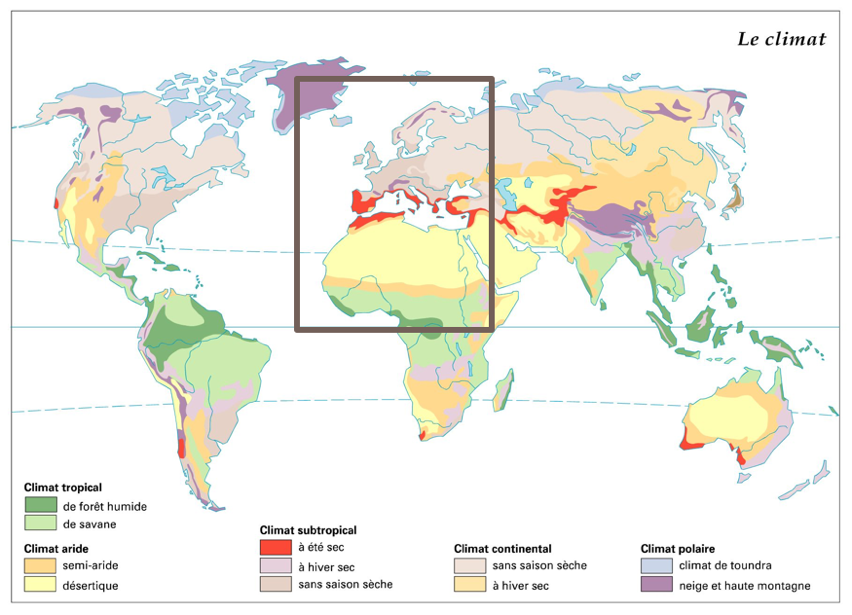


Figure  : type du climat, la zone d’étude est dans le cadre marron.

Source : http://www.larousse.fr/encyclopedie/divers/climat\_\_les\_climats\_du\_monde/185927

Notre région d’étude *(figure 5*) représente une forte circulation horizontale surtout aux moyennes latitudes, avec le dominant vent d’ouest, la présence d’anticyclone des Açores autour de 30°N sur l’Atlantique du Nord, et la dépression islandaise se trouve entre 50°N et 70°N. De plus, nous retrouvons aussi un courant jet polaire vers 60°N et un courant jet subtropical alentour de 30°N. Il y a donc une forte variabilité des circulations atmosphériques dans ce domaine.

La région Euro-Atlantique est aussi dominé par le phénomène de l’oscillation nord-atlantique spécialement en hiver. De plus, dans cette région, il y a en général quatre régimes de temps (RT) *(Kimoto et al., 1993 ; Michelangeli et al., 1995 ; Corti et al., 1999 ; Smyth et al., 1999)* caractérisent la dynamique : NAO+ (zonal), NAO-, blocage et atlantique dorsale).

En même temps, notre domaine d’étude, couvert des différentes régions des différents types de climat *(Hufty, 2001)*. D’après la classification Koppen, nous retrouvons sur la *figure 4* à l’ordre décroissant de latitude, du climat polaire en hautes latitudes, le climat continental pour le plupart d’Europe, le climat subtropical en méditerranéen, le climat aride en Afrique du nord, au climat tropical vers l’équateur. Donc, ce grand domaine a un caractéristique compliqué et complet de divers types de climat, qui est aussi lié au contraste important sur la végétation, de la forêt en Europe du nord et l’équateur, au sol nu en Sahara.

Il y a aussi un contraste topographique et géographique dans notre zone d’étude, avec la présence de plaine, de plateaux et de montagnes. Les divers contrastes du domaine, favorisent d’avoir les perturbations aux circulations atmosphériques surtout à l’échelle régionale et locale. Autrement dit, il devrait avoir des importantes variabilités internes aux différentes échelles spatiales, surtout à l’échelle régionale et locale. Notre choix du domaine, est pour assurer de bien garder un système dynamique et physique complet et compliqué, car l’étude sur la variabilité interne est un des défis des études RCM. Donc, nous n’avons pas simplement respecté le découpage CORDEX.

### 1.4.2 Configurations d’expériences

Le même modèle *LMDZ4*, la composante atmosphérique du modèle couplé IPSL-CM (Institut Pierre-Simon Laplace), est utilisé pour l’ensemble des simulations dans ce manuscrit. Dans notre étude, un RCM est une version régionale de LMDZ4, avec une zone de transition couvrant l’ensemble de la terre à l’exception du domaine d’étude. Dans la zone de transition, les variables du modèle sont relaxées vers les sorties du GCM avec le processus de relaxation. RCM et GCM sont fondamentalement du même modèle, structure dynamique, contenu physique et paramètres du modèle, tous identiques. L’avantage de ce choix du RCM identique au GCM réside dans la facilité offerte pour interpréter les résultats et cibler les valeurs ajoutées du RCM.

Nous avons deux approches d’imbrication différentes, l’une two-way nesting (TS pour les simulations d’TWN du RCM) et l’autre one-way nesting (OS pour les simulations d’OWN du RCM, et OM pour le GCM). L’objectif premier de réaliser deux systèmes d’imbrication est pour avoir une comparaison entre les deux approches, sachant que le OWN système manque de retour du RCM vers le GCM. Les configurations du sont strictement identiques, sur toutes nos simulations étudiées. La valeur moyenne climatologique mensuelle sur la période 1971 à 2000 (référence du climat actuel, par GIEC), des températures de surface des océans *(SST : Sea Surface Temperature),* et de la concentration en glace en mer *(SIC : Sea Ice Concentration),* est configurée pour éliminer l’influence de la variabilité des SST et SIC sur la variabilité interne.

Dans notre étude, un facteur 3 du raffinement de maille est appliqué au RCM. En général, le facteur du raffinement de maille au RCM est entre 2 et 5, et quelques fois jusqu’au 10 *(Laprise and Caya, 2002)*, pour avoir une résolution horizontale très fine à quelques dizaines de km. Nous choisissons une résolution de 100 km au RCM, pour le comparer au GCM à 300 km. Et en même temps nous prévoyons d’étudier la modification sur la variabilité interne d’après une résolution spatiale plus fine.

Cette thèse va commencer par la présentation du TWN et une comparaison avec OWN, afin de montrer les valeurs ajoutées de l’interaction entre le RCM et le GCM. Pour mieux apprécier les différences entre les deux approches d’imbrication, nous revenons vers les processus de base qui sont fondamentalement la procédure de relaxation et l’augmentation de résolution spatiale dans le RCM.

Rappelons-nous, que nous avons déjà une expérience avec le raffinement de maille au RCM, qui peut mieux prescrire les processus et les conditions près de la surface. Le RCM conceptuel est une autre expérience, développé dans le but de vérifier les modifications apportées par la méthodologie de relaxation. Nous voudrions connaître les différences de la variabilité interne entre le RCM et le GCM, sans l’influence de raffinement de maille, par l’expérience conceptuelle. C’est-à-dire dans l’ensemble de notre étude, nous avons deux expériences du même modèle LMDZ4 : une expérience plus réaliste avec une résolution horizontale plus fine au RCM, et une expérience conceptuelle et simple sans le raffinement de maille.

Les deux expériences de cette thèse, ont toutes une durée de simulation très longue, par rapport aux autres études sur la variabilité interne *(1.2.2)*. Les simulations de l’expérience d’un raffinement de maille au RCM, ont toutes tournés pour une durée de 150 ans. Nous nommons donc cette expérience LMDZ150. L’autre expérience conceptuelle garde aussi une durée longue de 80 ans pour l’ensemble des simulations. Nous l’appelons LMDZ80. L’intérêt d’avoir une durée longue de toutes nos simulations, est pour garantir une bonne significativité statistique. Autrement dit, nous voudrions aussi prendre en compte de la faible influence de l’instabilité du modèle sur l’ensemble d’analyses.

En résumé, il y a trois points originaux qui associent les différentes approches :

* Notre recherche, au départ, est une expérience classique de régionalisation du climat avec un RCM à résolution spatiale augmentée. Nous aussi souhaitons que le RCM soit imbriqué dans le GCM d’une manière interactive, c’est-à-dire, en mode TWN*.* Le système TWN est ensuite évalué contre l’approche classique OWN. Au-delà d’une simple comparaison, il est aussi pertinent d’étudier l’effet de la relaxation dans le comportement du modèle. Cela relève d’une importance capitale, car elle est non seulement utilisée dans le pilotage du RCM par le GCM, mais aussi dans la remontée des informations du RCM vers le GCM. Pour faire cela, nous imaginons un protocole idéalisé, avec le RCM identique à GCM. constitue d’un cadre idéal pour séparer l’effet du raffinement de maille de celui en relation avec la résolution spatiale.
* La comparaison entre TWN et OWN est, toutefois, aussi une originalité de notre étude. Nous nous intéressons essentiellement à l’état moyen du climat dans les deux situations.
* Dans l’étude du climat, nous nous intéressons sur la reproduction de l’état moyen du climat. Il est important d’avoir une longue durée de simulation. En revanche, l’analyse météorologique a besoin d’une compréhension sur la variabilité synoptique. Les simulations sur l’étude de variabilité interne par l’analyse de variabilité synoptique, ont en général une courte durée de simulations de quelques mois ou d’un an *(1.2.2)*. Nous gardons en revanche, une longue durée de simulations d’au moins de 80 ans, pour l’expérience conceptuelle et aussi l’expérience réaliste sur toutes analyses. Il y a en faite, une combinaison de l’approche du climat et de l’approche météorologique dans cette thèse, qui sera expliquée à la section suivante.

### 1.4.3 Méthodologie d’analyses

Puisque les conditions synoptiques sont un indicateur essentiel pour représenter la variabilité interne *(Christensen et al., 2001 ; Filippo and Bi, 2000 ; Alexandru et al., 2006 ; Separovic et al., 2008, 2015)*. Nous utilisons donc les données journalières filtrées pour étudier la variabilité interne.

Pour l’ensemble de notre étude, nous nous intéressons non seulement à l’état moyen du climat, mais aussi à la variabilité interne et à la séquence météorologique. Cette combinaison d’analyses climatiques et synoptiques permet d’avoir une connaissance plus complète sur la capacité et la performance du RCM. Ceci est important pour que le modèle puisse simuler correctement les phénomènes extrêmes.

La comparaison de l’état moyen du climat entre le RCM et le GCM, est la première partie de nos analyses pour avoir une compréhension sur la reproduction du climat. En même temps, l’analyse de la décomposition orthogonale aux valeurs propres *(EOF : empirical orthogonal functions)* et l’analyse des régimes de temps, sont aussi appliqués de décomposer la dynamique en différentes situations. De plus, une classification en 4 régimes de temps par les géopotentiels à 500 hPa *(Yiou et al, 2012 ; Corti et al. 1999)*, est aussi utilisée pour connaître la dynamique interne en faisant le lien avec le phénomène NAO. L’interprétation de la reproduction des quatre régimes de temps au GCM et au RCM en hiver, est aussi une analyse importante dans notre étude de comprendre les circulations générales.

Nous pensons les différentes situations au RCM, devraient avoir une manifestation différente sur la dynamique interne. Autrement dit, la caractéristique saisonnière et aussi les différentes échelles de circulations, peuvent jouer un rôle sur la variabilité interne. Cela veut aussi dire que les influences du processus de relaxation et du raffinement de maille sont probablement variables aux différentes situations. La stratification des saisons ainsi des échelles de circulations, est appliquée dans cette thèse.

Comme mentionné au-dessous, nous étudions aussi la variabilité interne par l’analyse de la variabilité synoptique. Le but est aussi de chercher le lien entre le précurseur et le réacteur, car nous supposons qu’il devrait avoir un lien entre les circulations régionales/locales et les circulations générales. Nous pensons surtout cette interaction est différente selon les situations. Pour expliquer le rôle de la variabilité interne, nous traitons premièrement la ressemblance spatiale entre le RCM et le GCM par l’analyse de coefficient de corrélation sur les données journalières filtrées. C’est-à-dire que nous faisons d’abord un filtrage des données en gardant que la variabilité synoptique que nous présenterons la méthode en détail au *Chapitre 3*.

Puis, nous analysons aussi la relation entre le forçage externe et la ressemblance interne entre le RCM et le GCM (*Chapitre 3*). Nous cherchons si le RCM est capable de reproduire la variabilité simulée par le GCM et s’il y a une plus grande variabilité interne au RCM. Nous attendons que le RCM suive la trajectoire du GCM car il est piloté par le GCM. Pourtant, avec l’effet de la dynamique interne à l’échelle régionale et locale, il devrait y avoir la différence entre les deux modèles. Nous espérons que le RCM a certain degré de liberté sur le développement de la dynamique interne, pour être capable de simuler les phénomènes régionaux et locaux issue d’une autre configuration physique plus détaillée par le raffinement de maille.

Les analyses menées dans cette étude distingue générale l’hiver et l’été. Le printemps et l’automne sont deux saisons de transition *(Giorgi and Bi, 2000)*. L’été est la saison dans laquelle les processus locaux sont les plus forts. Les plus fortes convections se trouvent généralement en été, ce qui cause une plus forte variabilité interne *(Giorgi and Bi, 2000 ; Alexandru et al., 2007, Caya and Biner, 2004 ; Christensen et al., 2001).* L’hiver représente en revanche, la plus faible variabilité interne avec le vent dominant d’ouest *(Giorgi and Bi, 2000 ; Alexandru et al., 2007 ; Christensen et al., 2001)*. Le choix de l’hiver et de l’été, est par rapport à leur degré de liberté de développement de la dynamique interne. Autrement dit, ces deux saisons représentent les deux situations qui sont la plus / moins dépendante des circulations générales du GCM. Nous ciblons encore plus spécifiquement sur les circulations atmosphériques en hiver, par les analyses sur le géopotentiel à 500 hPa (Z500) et sur la température à 2 mètres (T2M). Dans la plus part des cas, nous analysons plus soigneusement la situation en hiver, car cela devrait être la saison avec une variabilité interne proportionnellement la plus faible. Les résultats hivernaux sont souvent les plus révélateurs.

## 1.5 Organisation de la thèse

Ce manuscrit est organisé en cinq chapitres, avec les différentes analyses sur le géopotentiel particulièrement au niveau de 500 hPa, et la température surtout de la température à 2 mètres. Comme présenté en avant, le *Chapitre d’introduction* est pour mettre en contexte de l’étude, montrer les motivations de recherche, et représenter les questions scientifiques à analyser. Il y a ensuite trois chapitres d’analyses.

Dans le *Chapitre 2*, nous décrivons et comparons les deux approches d’imbrication du RCM, dont one-way nesting (OWN) et two-way nesting (TWN) système. Le but de ce chapitre est d’évaluer l’état moyen du climat régional simulé par ces deux approches. Nous cherchons premièrement, la cohérence de la trajectoire du climat simulé en TWN qu’en OWN, par la comparaison sur l’état moyen du climat simulé à l’intérieur du domaine d’étude. De même temps, nous pensons les différences entre les deux approches, résument aussi la dynamique interne modifiée dû l’effet de rétroaction du RCM au GCM.

Au cours du *Chapitre 3*, nous utilisons une expérience conceptuelle d’étudier l’effet de l’opération de relaxation. Nous nous intéressons à la vérification de la méthodologie du processus de relaxation utilisé au RCM, par une expérience simple d’une résolution grossière du GCM, sans le raffinement de maille au RCM. La variabilité interne, est montrée par les situations synoptiques, avec donc une décomposition des échelles temporaires en gardant que les données journalières filtrées. La fidélité du RCM au GCM, est représentée par la comparaison des situations synoptiques simulées aux deux modèles. Nous allons d’abord, analyser la fidélité de reproduction de la circulation atmosphérique à l’intérieur du domaine d’étude, en traitant la ressemblance spatiale entre le RCM et le GCM. L’analyse EOF et les régimes de temps, sont ensuite pour montrer les modes principaux de la région d’étude et analyser la variabilité temporaire. Ce chapitre termine par la description de la relation entre le forçage externe et la ressemblance interne.

Le *Chapitre 4* s’appuie sur la comparaison entre l’expérience théorique du *Chapitre 3* et une autre expérience raffinée d’une résolution spatiale fine au RCM. Nous analysons l’état moyen du climat dans les deux expériences pour avoir d’abord une compréhension de l’effet de raffinement de maille sur la reproduction du climat régional. La ressemblance spatiale entre le RCM et le GCM de l’expérience raffinée, montre la distribution et la dispersion des situations synoptiques. Nous tentons de comprendre le renforcement de la modification de la variabilité interne à cause du raffinement de maille, par l’analyse de bi-histogramme entre le forçage externe et la ressemblance interne, des deux expériences.

Dans le *Chapitre 5*, ainsi le *Chapitre de conclusion*, nous résumerons l’ensemble de cette étude, avec des pistes éventuelles de recherche approfondie.

## Bibliographie

A. ALEXANDRU, R. De Elia, R. Laprise, 2007, *Internal Variability in Regional Climate Downscaling at the Seasonal Scale*, American Meteorological Society, September 2007, DOI : 10.1175/MWR3456.1.

S. ANTIC, R. Laprise, B. Denis, and R. De Elia, 2004, *Testing the downscaling ability of a one-way nested regional climate model in regions of complex topography,* Climate Dynamics, October 2004, Volume 23, Issue 5, pp 473-493.

S. BINER, D. Caya, R. Laprise, and L. Spacek, 2000, *Nesting of RCMs by imposing large scales, Resarch activities in Atmospheric and Oceanic Modelling*, edited by H. Ritchie, WMO/TD, N°987, Report N°30 :7.3-7.4.

T. CASTEL, Y. Xu, Y. Richard, B. Pohl, J. Cretat, D. Thevenin, C. Cuccia, B. Bois, et P. Roucou, 2010, *Désagrégation dynamique haute résolution spatiale du climat du centre-est de la France par le modèle climatique régional ARW/WRF*, 23ème colloque de l’association internationale de climatologie, Rennes, P107-112.

D. CAYA, and S. Biner, 2004, *Internal variability of RCM simulations over an annual cycle*, Clim.Dyn., 22, 33-46.

O.B. CHRISTENSEN, M. A. Gaertner, J. A. Prego, and J. Polcher, 2001, *Internal variability of regional climate models*, Climate Dynamics (2001) 17 : 875-887.

CORDEX project, [*http://www.cordex.org*](http://www.cordex.org), consulté le 13 juin 2015.

S. CORTI, F. Molteni, and T. N. Palmer, 1999, *Signature of recent climate change in frequencies of natural atmospheric circulation regimes*, Nature 398, 799-802, 29 April 1999, DOI : 10.1038/19745.

J. CRÉTAT, C. Macron, B. Pohl, and Y. Richard, 2011, *Quantifying internal variability in a regional climate model : A case study for Southern Africa*, Clim. Dyn., 37(7-8), 1335-1356.

H. C. DAVIES, and R. E. Turner, 1977, Updating prediction models by dynamical relaxation : An examination of the technique, Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 103, 225-245.

H. C. DAVIES, 1976, *A lateral boundary formulation for multi-level prediction models*, Quart. J. R. Met. Soc. (1976), 102, pp405-418.

B. DENIS, R. Laprise, D. Caya, and J. Côté, 2002, *Downscaling ability of one-way nested regional climate models : the Big-Brother Experiment, Climate Dynamics* (2002) 18 : 627-646, DOI : 10.1007/s00382-001-0201-0.

R. DE ELIA, R. Laprise, and B. Denis, 2002, *Forcasting Skill Limits of Nested, Limited-Area Models : A Perfect-Model Approach*, Monthly Weather Review, volume 130, August 2002, 2006-2023.

P. DROBINSKI, 2015, *Modèles globaux ou régionaux : comment zoomer le climat ?,* <https://interstices.info/jcms/p_83964/modeles-globaux-ou-regionaux-comment-zoomer-le-climat,publié> le 22 octobre 2015, consulté le 13 novembre 2016.

J. M. DONE, C. L. Bruyère, M. Ge, and A. Jaye, 2014, *Internal variability of North Atlantic tropical cyclones*, J. Geophy. Res. Atmos., 119, 6506-6519, DOI : 10.1002/2014JD021542.

F. FORGET, M. Millour, K. Dassas, C. Hourdin, F. Hourdin, and Y. Wanherdrick, 2007, *User Manual for the LMD Martian Atmospheric General Circulation Model*, [www.lmd.jussieu.fr/~lmdz/planets/mars/user\_manual.pdf](http://www.lmd.jussieu.fr/~lmdz/planets/mars/user_manual.pdf), consulté le 26 janvier 2014.

F. GIORGI, and W. J. Gutowski, 2015, *Regional Dynamical Downscaling and the CORDEX Initiative*, Annual Review of Environment and Resources, Vol.40 :467-490, November 2015, <http://doi.org/10.1146/annurev-environ-102014-021217>

F. GIORGI, 2010, *Regional Climate Modeling : Status and Perspectives*, ICTP, <http://indico.ictp.it/event/7613/session/0/contribution/1/material/slides/0.pdf>, consulté le 06 Avril 2015.

F. GIORGI, and X. Q. Bi, 2000, *A study of internal variability of a regional climate model*, Journal of Geophysical Research, vol. 195, No. D24, Pages 29,503-29,521, December 27, 2000.

F. GIORGI, and L. O. Mearns, 1991, *Approaches to the simulation of regional climate change : A review*, Review of Geophysics, Volume 29, Issue 2, May 1991, Pages 191-216, DOI : 10.1029/90RG02636.

F. HOURDIN, 2011, *Stratégies d’évaluation des modèles*, page 175 – 177, Livre « Le climat à découvert, Outils et méthodes en recherche climatique », C. Jeandel, R. Mosseri, et al., CNRS Éditions, Paris, 978-2-271-07198-9.

A. HUFTY, 2001, *Introduction à la climatologie : le rayonnement et la température, l’atmosphère, l’eau, le climat et l’activité humaine*, Presses Université Laval.

IPCC, Climate Change, 2013, *The physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovemental Panel on Climate Change*, T. F. Stocker, D. Qin, G.K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J.Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P. M. Midgley (eds.), Cambridge University Press, Cambridge, United kingdom and New Yorkn NY, USA, 1535 pp.

D. JACOB, J. Petersen, B. Eggert, A. Alias, O. B. Christensen, L. M. Bouwer, A. Braun, A. Colette, M. Déqué, G. Georgievski, E. Georgopoulou, A. Gobiet, L. Menut, G. Nikulin, A. Haensler, N. Hempelmann, C. Jones, K. Keuler, S. Kovats, N. Kroner, S. Kotlarski, A. Kriegsmann, E. Martin, E. van Meijgaard, C. Moseley, S. Pfeifer, S. Preuschmann, C. Radermacher, K. Radtke, D. Rechid, M. Rounsevell, P. Samuelsson, S. Somot, J-F. Soussana, C. Teichmann, R. Valentini, R. Vautard, B. Weber, P. Yiou, 2014, *EURO-CORDEX : new high-resolution climate change projections for European impact research*, Reg Environ Change (2014) 14 :563-578, DOI : 10.1007/s10113-013-0499-2.

D. JACOB, L. Barring, O. B. Christensen, J. H. Christensen, M. De Castro, M. Déqué, F. Giorgi, S. Hagemann, M. Hirschi, R. Jones, E. Kjellstrom, G. Lenderink, B. Rockel, E. Sanchez, C. Schar, S. I. Seneviratne, S. Somot, A. Van Ulden, B. Van den Hurk, 2007, *A inter-comparaison of regional climate models for Europe : model performance in present-day climate*, Climate Change(2007) 81 :31-52, DOI : 10.1007/s10584-006-9213-4.

D. JACOB, and R. Podzun, 1997, *Sensitivity studies with the regional climate model REMO*, Meteorol Atmos Phys 63 : 119-129.

R. G. JONES, J. M. Murphy, and M. Noguer, 1995, *Simulation of climate change over Europe using a nested regional-climate model. I : Assessment of control climate, includng sensitivity to location of lateral boundaries*, Q. J. R. Meteorol. Soc. (1995), 121, pp1413-1449.

M. KIMOTO, and M. Ghil, 1993, *Multiple flow regimes in the Northern Hemisphere winter, Part II : Sectorial regimes and preferred transitions*. J. Atmos. Sci., 50, 2645-2673.

S. Kotlarski, K. Keuler, O. B. Christensen, A. Colette, M. Déqué, A. Gobiet, K. Goergen, D. Jacob, D. Luthi, E. van Meijgaard, G. Nikulin, C. Schar, C. Teichmann, R. Vautard, K. Warrach-Sagi, and V. Wulfmeyer, 2014, *Regional climate modeling on European scales : a joint standard evaluation of the EURO-CORDEX RCM ensemble*, Geosci. Model Dev., 7, 1297-1333, DOI : 10.5194/gmd-7-1297-2014.

R. LAPRISE, R. De Elia, D. Caya, S. Biner, P. Lucas-Picher, E. Diaconescu, M. Leduc, A. Alexandru, L. Separovis, 2008, Challenging some tenets of Regional Climate Modelling, Meteorology and Atmospheric Physics, 100, 3-22 (2008), DOI : 10.1007/s00703-008-0292-9.

R. LAPRISE, and D. Caya, 2002, *Downscaling ability of one-way nested regional climate models : The Big-Brother Experiment*, Climate Dynamics, April 2002, DOI : 10.1007/s00382-001-0201-0.

H. LE TREUT, 2011, *Les grandes équilibre naturels dans la modélisation du climat*, page 43 – 46, Livre « Le climat à découvert, Outils et méthodes en recherche climatique », C. Jeandel, R. Mosseri, et al., CNRS Éditions, Paris, 978-2-271-07198-9.

P. LORENZ and D. Jacob, 2005, *Influence of regional scale information on the global circulation : A two-way nesting climate simulation*, Geophysical Research Letters, Vol.32, L18706, DOI : 10.1029/2005GL023351.

P. LUCAS-PICHER, D. Caya, R. De Elia, and R. Laprise, 2008a, *Investigation of regional climate models’ internal variability with a ten-member ensemble of 10-year simulations over a large domain*, Clim. Dyn., 31, 927-940.

P. MICHELANGELI, R. Vautard, and B. Legras, 1995, *Weather regimes : Recurrence and quasi-stationarity*. J. Atmos. Sci., 52, 1237-1256.

G. NIKULIN, C. Jones, F. Giorgi, G. Asrar, M. Buchner, R. Cerezo-Mota, O. B. Christensen, M. Déqué, J. Fernandez, A. Hansler, E. van Meijgaard, P. Samuelsson, M. B. Sylla, and L. Sushama, 2012, *Precipitation Climatology in an Ensemble of CORDEX-Africa Regional Climate Simulations*, Journal of Climate, volume 25, 6057-6078, DOI : 10.1175/JCLI-D-11-00375.1.

M. RAPAIC, M. Leduc, and R. Laprise, 2011, *Evaluation of the internal variability and estimation of the downscaling ability of the Canadien Regional Climate Model for different domain sizes over the North Atlantic region using the Big-Brother experimental approach*, Clim. Dyn., 36(9-10), 1979-2001.

Y. RICHARD, P. Roucou, J. Cretat, T. Castel, et B. Pohl, 2012, *Modèles de climats régionaux : potentiels et limites*, 25ème colloque de l’association internationale de climatologie, Grenoble, P667-672.

L. F. RICHARDON, 1922, *Weather prediction by numerical precess*, The University Press, Cambridge.

A. RINKE, and K. Dethloff, 2000, *On the sensitivity of a regional Arctic climate model to initial and boundary cnditions*, Climate Research, 14, 101-113.

M. RUMMUKAINEN, 2010, *State-of-the-art with regional climate models*. John Wiley & Sons, Ltd, WIREs Clim Change, Volume 1, January/February.

P. M. RUTI, S. Somot, F. Giorgi, C. Dubois, E. Flaounas, A. Obermann, A. Dell’Aquila, G. Pisacane, A. Harzallah, E. Lombardi, B. Ahrens, N. Akhtar, A. Alias, T. Arsouze, R. Aznar, S. Bastin, J. Bartholy, K. Beranger, J. Beuvier, S. Bouffies-Cloché, J. Brauch, W. Cabos, S. Calmanti, J. C. Calvet, A. Carillo, D. Conte, E. Coppola, V. Djurdjevic, P. Drobinski, A. Elizalde-Arellano, M. Gaertner, P. Galan, C. Gallardo, S. Gualdi, M. Goncalves, O. Jorba, G. Jorda, B. L’Heverder, C. Lebeaupin-Brossier, L. Li, G. Liguori, P. Lionello, D. Macias, P. Nabat, B. Onol, B. Raikovic, K. Ramage, F. Sevault, G. Sannino, M. V. Struglia, A. Sanna, C. Torma, and V. Vervatis, 2015, *MED-CORDEX Initiative for Mediterranean Climate Studies*, 2016, BAMS, July, 1187-1208, DOI : 10.1175/BAMS-D-14-00176.1.

L. SEPAROVIC, S. Z. Husain, and W. Y, 2015, *Internal variability of fine-scale components of meteorological fields in extended-range limited-area model simulations with atmospheric and surface nudging*, Journal of geophysical Research : Atmospheres, 120, 8621-8641, DOI : 10.1002/2015JD023350.

L. SEPAROVIC, R. De Elia, and R. Laprise, 2008, *Reproducible and Irreproducible Components in Ensemble Simulations with a Regional Climate Model*, American Meteorological Society : Monthly Weather Review, volume 136, 4941-4961, December 2008, DOI : 10.1175/2008MWR2339.1.

A. SETH, and F. Giorgi, 1998, *The effects of domain choice on summer precipitation simulation and sensitivity in a regional climate model*, J. Clim, 11 : 2698-2712.

P. SMYTH, K. Ide, and M. Ghil, 1999, *Multiple Regimes in Northern Hemisphere Height Fields via MixtureModel Clustering*, American Meteorological Society, <https://doi.org/10.1175/1520-0469(1999)056%3C3704:MRINHH%3E2.0.CO;2>

S. SOMOT, 2012*, Regional Climate Modelling : motivations, techniques, illustrations, climate change scenario and uncertainties*, CLIMRUN summer School, Trieste, Octobre 2012. <http://www.climrun.eu/elfinder_vfs/202/somot_climrun_summerschool_lecture_oct2012.ppt.pdf>, consulté le 18 octobre 2015.

A. H. VAN TUYL, and R. M. Errico, 1989, *Scale interaction and predictability in mesoscale mode*l, Monthly Weather Review, American Meteorological Society, March 1989, 117, 495-517.

R. VAUTARD, A. Gobiet, D. Jacob, M. Belda, A. Colette, M. Déqué, J. Fernandez, M. Garcia-Diez, K. Goergen, I. Guttler, T. Halenka, T. Karacostas, E. Katragkou, K. Keuler, S. Kotlarski, S. Mayer, E. van Meijgaard, G. Nikulin, M. Patarcic, J. Sinocca, S. Sobolowski, M. Suklitsch, C. Teichmann, K. Warrach-Sagi, V. Wulfmeyer, P. Yiou, 2013, *The simulation of European heat waves from an ensemble of regional climate models within the EURO-CORDEX project*, Clim Dyn (2013) 41 : 2555-2575, DOI : 10.1007/s00382-013-1714-z.

WMO : World Meteorological Organization, <https://www.wmo.int/pages/themes/climate/climate_models.php>, consulté le 20 août 2016.

J. S. WONG, S. Razavi, B. R. Bonsal, H. S. Wheater, and Z. E. Asong, 2017, *Inter-comparison of daily precipitation products for large-scale hydro-climatic applications over Canada*, Hydrol. Earth Syst. Sci., 21, 2163-2185, DOI : 10.5194/hess-21-2163-2017.

T. WOOLLINGS, 2010, *Dynamical influences on European climete : An uncertain future*, Royal Society, published 5 July 2010, DOI : 10.1098/rsta.2010.0040.

P. YIOU, J. Servonnat, M. Yoshimori, D. Swingedouw, M. Khodri, and A. Abe-Ouchi, *Stability of weather regimes during the last millennium from climate simulations*, Geophysical Research Letters, volume 39, Issue 8, April 2012, DOI : 10.1029/2012GL051310.

## Annexes

### Annexe 1.1: description des domaines CORDEX

Tableau  : quatorze domaines CORDEX.

Source : <http://www.cordex.org>, accédé le 08 août 2015.

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| **CORDEX Domain** | **YEAR** | **Number of grid point in the East-West direction (Nx)** | **Number of point in the North-South direction (Ny)** |
| **Region 1 :**  **South America** | 2009 | 146 | 167 |
| **Region 2 :**  **Central America** | 2009 | 210 | 113 |
| **Region 3 :**  **North America** | 2009 | 150 | 130 |
| **Region 4 :**  **Europe (EURO)** | 2009 | 106 | 103 |
| **Region 5 :**  **Africa** | 2009 | 194 | 201 |
| **Region 6 :**  **South Asia** | 2009 | 193 | 130 |
| **Region 7 :**  **East Asia** | 2009 | 203 | 167 |
| **Region 8 :**  **Central Asia** | 2009 | 153 | 100 |
| **Region 9 :**  **Australasia** | 2009 | 200 | 129 |
| **Region 10 :**  **Antarctica** | 2009 | 125 | 97 |
| **Region 11 :**  **Arctic** | 2009 | 116 | 133 |
| **Region 12 :**  **Mediterranean (MED)** | 2009 | 98 | 63 |
| **Region 13 :**  **Middle East North Africa (MENA)** | 2012 | 232 | 118 |
| **Region 14 :**  **South East Asia (SEA)** | 2014 | 264 | 194 |

### Annexe 1.2 : informations des tempêtes d’Europe depuis les années 1950 jusqu’au 2014.

Tableau  : tempêtes d’Europe entre 1950 et 2014, d’après les collectes des informations sur Internet.

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| **Année** | **Nbr** | **Période de tempête** | **Localisation** | **Dégâts** |
| **1953** | 1 | 31/01 – 01/02 | Pays-Bas, Belgique, Royaume-Uni | 2551 morts, 9% des fermes des Pays-Bas inondées |
| **1987** | 1 | 15 – 16/10 | France, Royaume-Uni | 34 morts, une perte de 1,2 milliard de livres sterling (de 1987) |
| **1990** | 3 | 23 – 26/01 | Allemagne, Belgique, Pays-Bas, Luxembourg, Danemark, Royaume-Uni, Nord de la France | 95 morts, 6 milliards $US (2005) |
| 25 – 27/02 | Allemagne, Benelux, France, Royaume-Uni, Suisse | 64 morts, 4 milliards $US (2002) |
| 28/02 – 01/03 | Allemagne, Autriche, Benelux, Danemark, France, Royaume-Uni, Suisse | 35 morts, 1,180 milliard d’Euros assurés (1990) |
| **1999** | 3 | 2 – 4/12 | Danemark et le sud-ouest de la Suède | 20 morts, 2 milliards d’Euros (1999) |
| 25 – 27/12 | France (nord), Allemagne, Suisse, Liechtenstein, Autriche | 110 morts, 5,9 milliards d’Euros (1999) |
| 26 – 28/12 | France, Espagne, Andorre, Suisse, Italie | 30 morts, 4 milliards d’euros |
| **2004** | 1 | 17/12 | Nord de la France | 6 victimes |
| **2005** | 1 | 7 – 9/01 | Irlande, Royaume – Uni, Norvège, Danemark, Suède, Allemagne, Pays baltes | 17 morts, £ 1,1 bn |
| **2007** | 2 | 15/01 | Nord de la France, Allemagne, Suisse, Royaume – Uni, Belgique, Pays – Bas, République tchèque, Pologne | 45 morts, entre 2,5 et 5 milliards d’Euros |
| 14 – 16/01 | Norvège, Suède, Danemark | 6 morts |
| **2008** | 1 | 28/02 | Allemagne, Pays-Bas, Belgique, Autriche, Suisse, Pologne, République tchèque, Liechtenstein, France (Alsace) | 14 morts, 1,5 milliard de dollars |
| **2009** | 3 | 23 – 25/01 | Andorre, Espagne, France, Italie, Portugal | 31 morts, 1,2 milliard d’Euros |
| 8 – 11/02 | France, Belgique, Suisse | 1 mort |
| 1 – 10/02 | Irlande, Royaume - Uni | 3 morts |
| **2010** | 2 | 20/02 | Portugal | 217 millions d’Euros |
| 26/02 – 01/03 | Portugal, Espagne, France, Belgique, Luxembourg, Allemagne, Royaume – Uni, Pays – Bas, Suisse, Danemark, Suède, Pologne | 59 morts, 1,2 à 3 milliards d’Euros |
| **2011** | 4 | 7 – 13/12 | Irlande, Royaume – Uni, Danemark, Suède | Coupures d’électricité, annulations dans les transports |
| 12 – 13/12 | France | 1 mort |
| 15 – 18/12 | Espagne, France, Luxembourg, Suisse, Allemagne, Pologne | Quelques dégâts |
| 26/12 | Royaume - Uni |  |
| **2012** | 2 | 31/12/2011 – 6/01/2012 | Irlande, Royaume – Uni, France, Belgique, Pays - Bas | 2 morts |
| 3 – 9/01 | Islande, Irlande, Royaume – Uni, Pays – Bas, Belgique, France, Allemagne, Danemark, Autriche, Suisse | 1 mort, 350 millions dollars (2012) |
| **2013** | 4 | 25 – 29/10 | Irlande, Royaume – Uni, France, Belgique, Pays –Bas, Allemagne, Danemark, Suède, Norvège, Lettonie, Estonie, Finlande, Russe | 16 morts |
| 18 – 21/11 | Sardaigne, Corse | 18 morts |
| 4 – 7/12 | Royaume – Uni, Pays – Bas, Allemagne, Danemark, Suède, Norvège, Pologne, île de Man, Belgique, France | 10 morts |
| 21 – 27/12 | Irlande, Royaume – Uni, France, Belgique, Pays – Bas, Allemagne, îles Féroé, Norvège, Danemark, Espagne, Islande, Portugal | 6 morts |
| **2014** | 2 | 4 – 5/02 | France, Royaume - Uni | Destruction négligeable |
| 13/05 | Serbie, Bosnie – Herzégovine, Croatie, Roumanie, Hongrie, Slovaquie, Autriche, République tchèque, Pologne, Macédoine | 62 morts |

## Table des illustrations

### Table des figures

Figure 1 : raffinement de maille du AOGCM (atmosphere-ocean general circulation model) au RCM (regional climate model). Source : Giorgi et al., 2015. 5

Figure 2 : problèmes observés de la méthode traditionnelle de descente d’échelle. 7

Figure 3 : quatorze régions du CORDEX (COordinated Regional climate Downscaling Experiment). 10

Figure 4 : type du climat, la zone d’étude est dans le cadre marron. 16

### Table des tableaux

Tableau 1 : quatorze domaines CORDEX. 27

Tableau 2 : tempêtes d’Europe entre 1950 et 2014, d’après les collectes des informations sur Internet. 28