

Shan LI

# Étude des modes régionaux du climat en réponse au changement climatique globale

Comité de thèse  
21 septembre 2016

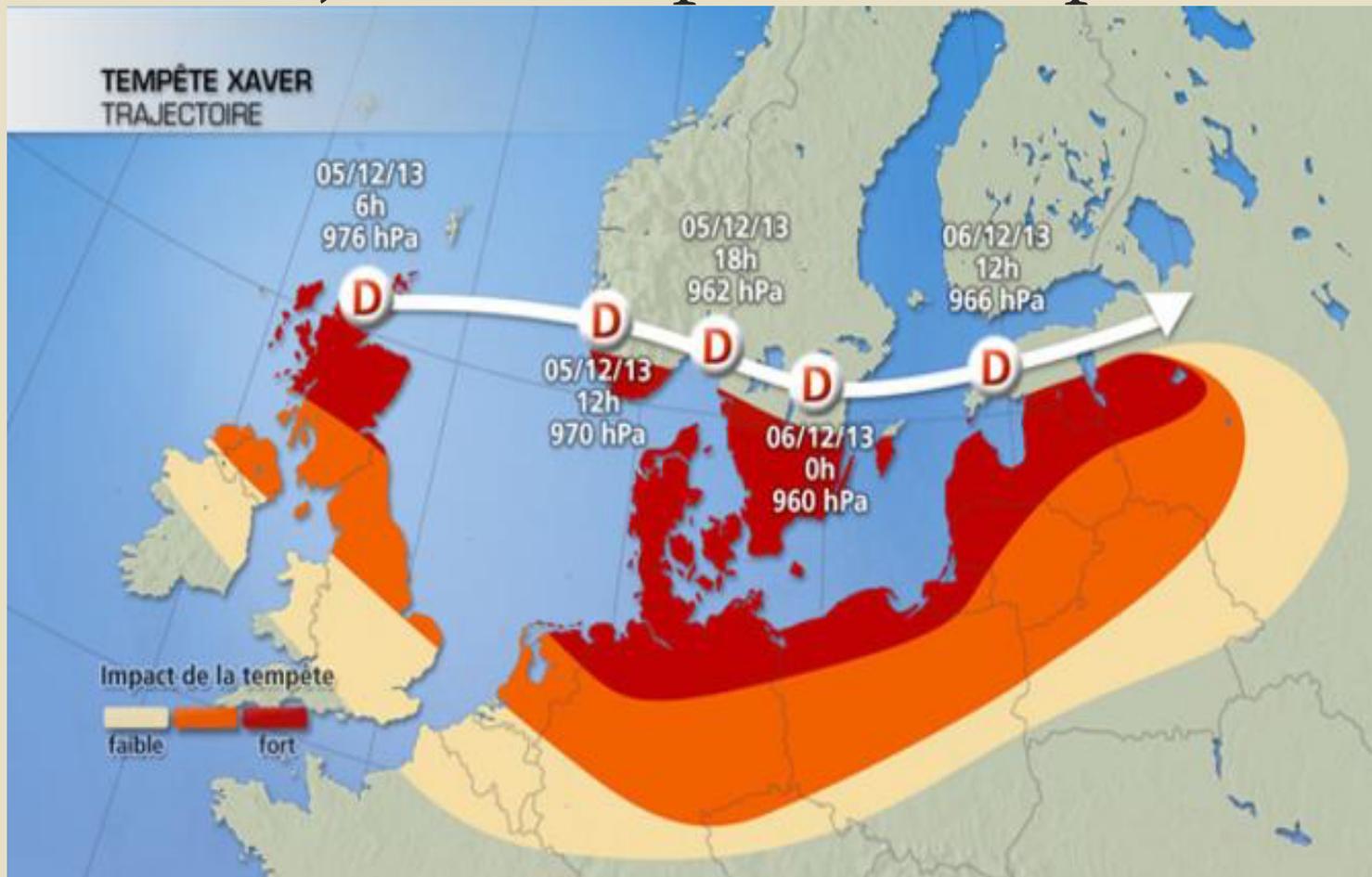
Michel Déqué (CNRM Météo-France, Toulouse)

Hubert Gallée (LGGE/CNRS, Grenoble)

Hervé Le Treut (Co-directeur de thèse, IPSL/CNRS, Paris)

Laurent LI (Directeur de thèse, LMD-Jussieu/CNRS, Paris)

# Augmentation (fréquence et intensité) des tempêtes européennes



Source : bilan de la tempête Xavier en Europe: jusqu'à 228 km/h, <http://actualite.lachainemeteo.com/actualite-meteo/2013-12-08-10h18/bilan-de-la-tempete-xaver-en-europe--jusqu-a-228-km-h---23426.php>

## Années 1950

1953 : tempête du 31 janvier au 1<sup>er</sup> février 1953

## Années 1980

1987 : tempête de 1987

## Années 1990

1990 : tempête Daria, tempête Vivian, tempête Wiebke

1999 : tempête Anatol, tempêtes de fin décembre 1999 en Europe

## Années 2000

2004 : tempête Dagmar

2005 : tempête Erwin

2007 : tempête Kyrill, tempête Per

2008 : tempête Emma

2009 : tempête Klaus, tempête Quinten, tempête de neige de février 2009 sur les îles britanniques

## Années 2010

2010 : tempête à Madère en 2010, tempête Xynthia

2011 : tempête Friedhelm, tempête Gunter, tempête Joachim, tempête Robert

2012 : tempête Ulli, tempête Andrea

2013 : tempête Christian, tempête Cleopatra, tempête Xavier, tempête de Noël

2014 : tempête Petra, tempête Yvette

2015 : tempête Hermann

Source : [https://fr.wikipedia.org/wiki/Liste\\_des\\_tempêtes\\_européennes](https://fr.wikipedia.org/wiki/Liste_des_tempêtes_européennes) 2

# Description de la physique dans la zone d'étude

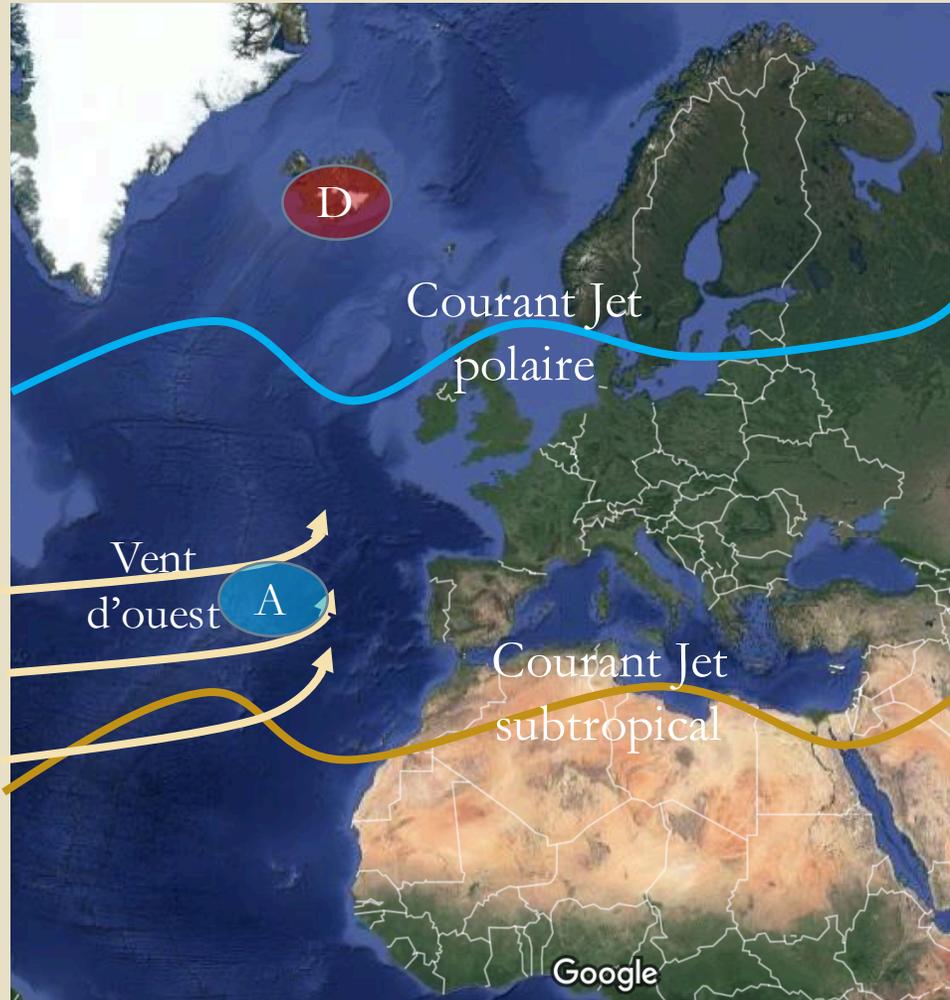
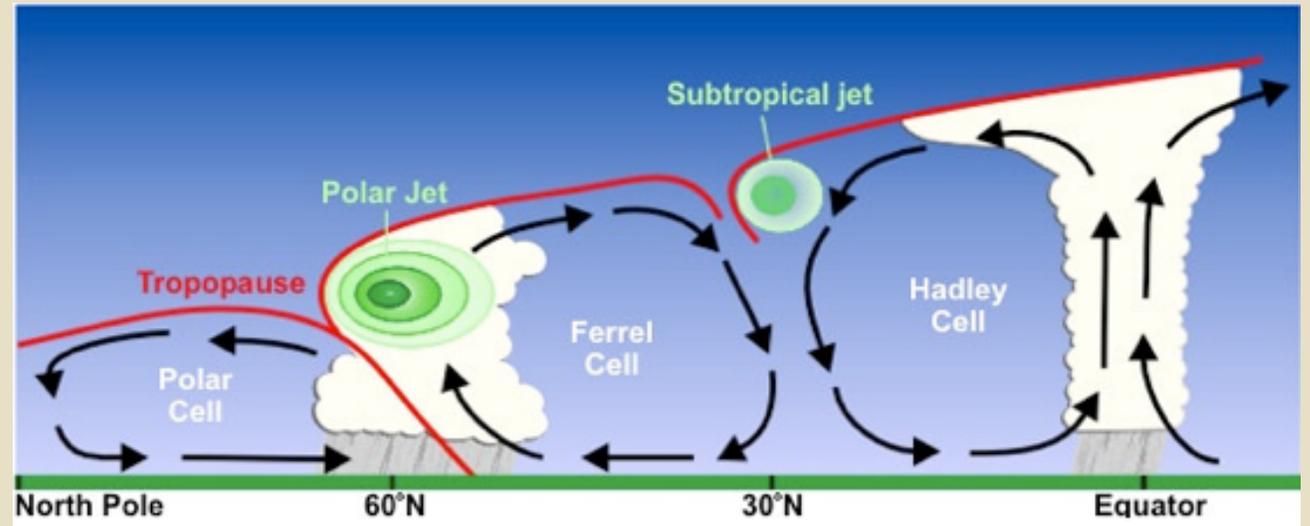
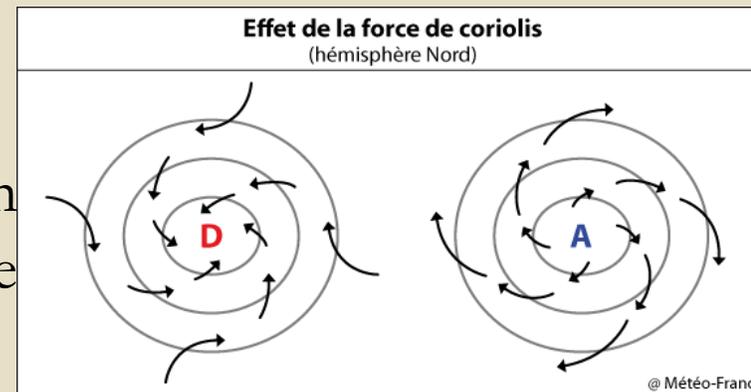


Figure 1 : la zone d'étude couvre l'Atlantique du nord, l'Europe, la Méditerranée, et l'Afrique du nord.  
Source : adaptée à la carte de Google <http://www.google.fr/maps>



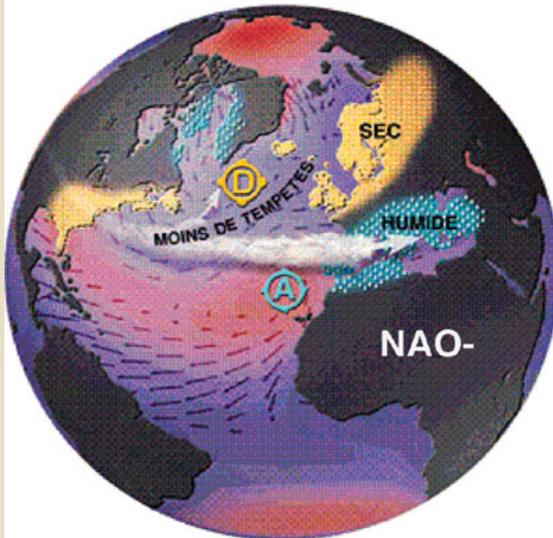
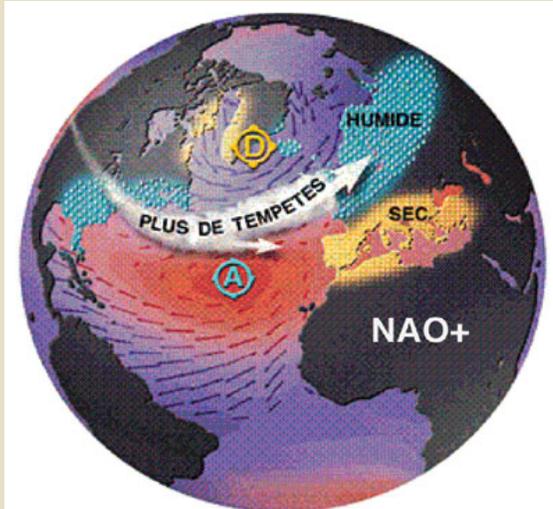
Source : <http://ecosophie.org/circulation-atmosphérique/>

Dépression  
d'Islande



Anticyclone  
des Açores

# Processus dominant du domaine (hiver)



## NAO+ (Zonal) / NAO- (Anticyclone Grolandais)

- grande/petite différence de pression entre anticyclone et dépression
- vent d'ouest fort/faible
- courant-jet plus vers le nord
- fort contraste de température entre le nord et le sud
- plus/moins de tempêtes
- pluies au nord/sud, sécheresse au sud/nord

## Blocage

- division en zones fermées de pression (peu d'échange)
- régime typiques des vagues de froid intenses (sèches)
- continuité

## Dorsale Atlantique

- régime typique des descentes polaires
- bloque l'arrivée des dépressions atlantiques directes

Source : schéma récapitulatif des impacts associés aux deux phases de la NAO (reproduit des pages descriptives internet du Lamont-Doherty Earth Observatory, Martin Visbeck)

[http://www.cnrs.fr/cv/dossiers/dosclim1/biblio/pigb15/06\\_oscillation.htm](http://www.cnrs.fr/cv/dossiers/dosclim1/biblio/pigb15/06_oscillation.htm)

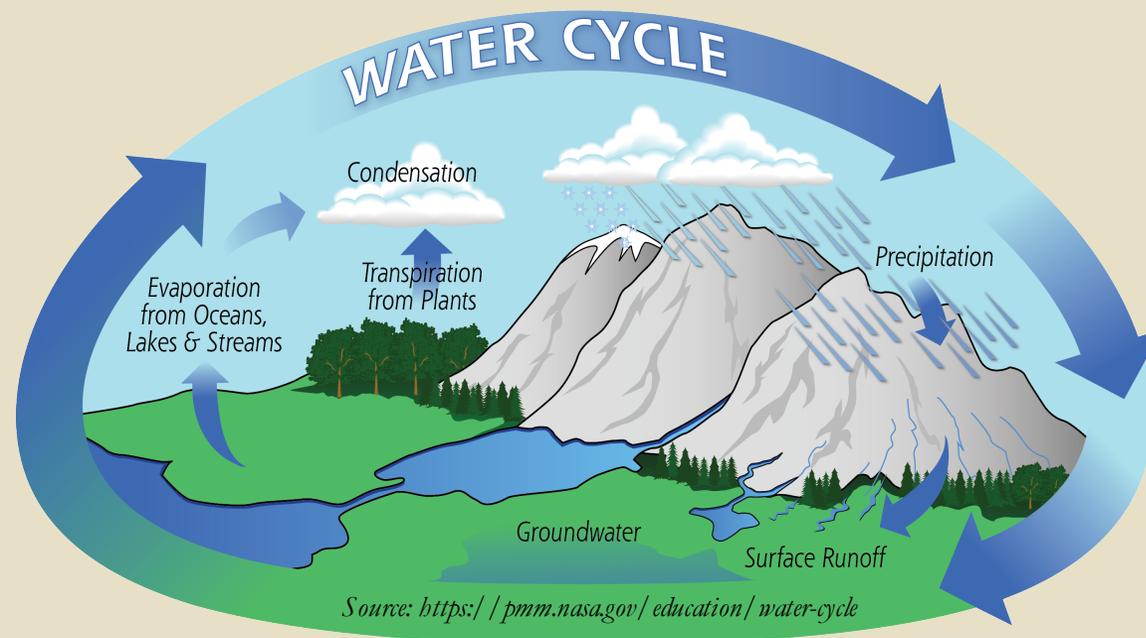
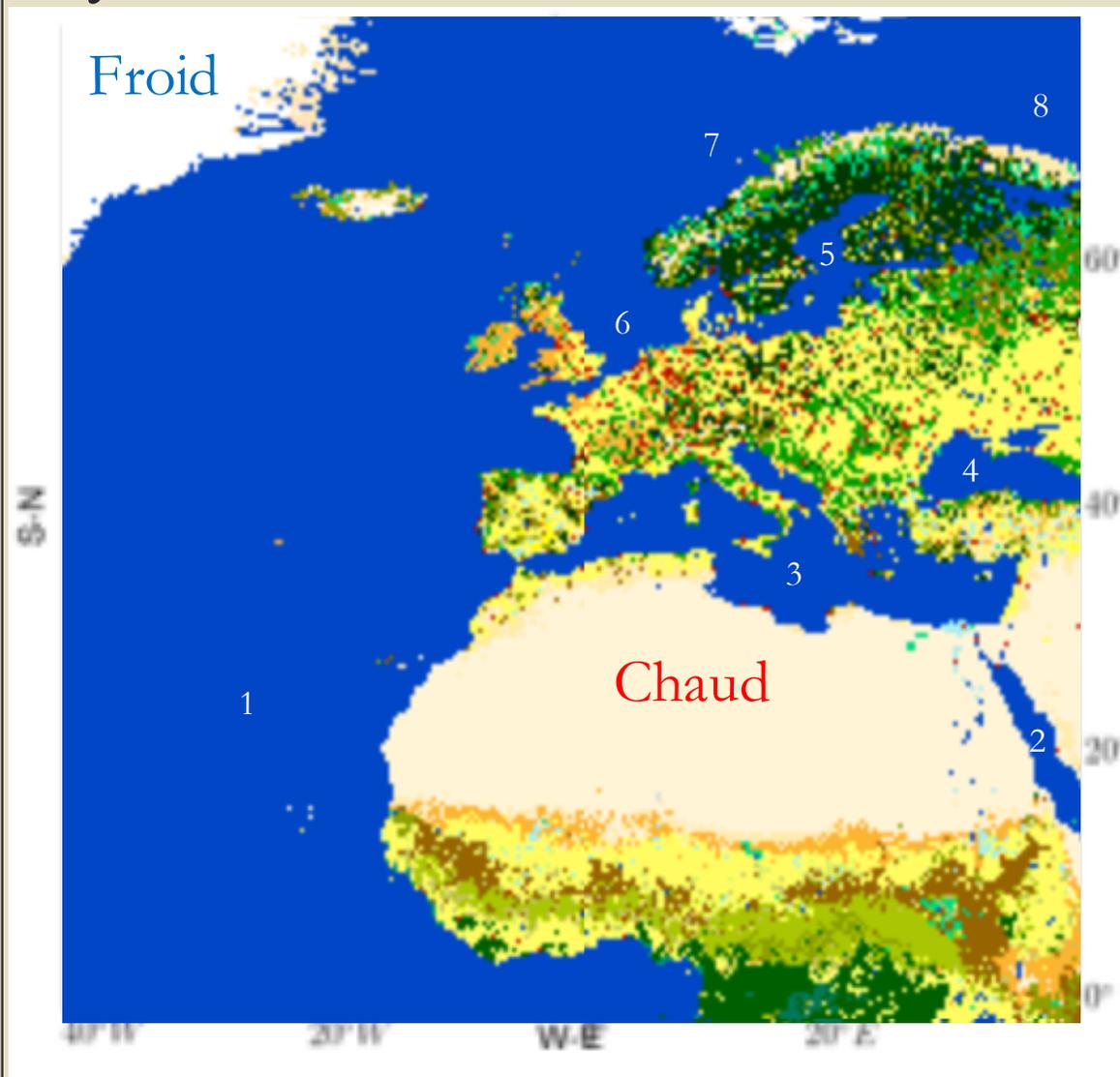
[http://www.cnrs.fr/cv/dossiers/dosclim1/biblio/pigb15/00\\_grandes/06/05.htm](http://www.cnrs.fr/cv/dossiers/dosclim1/biblio/pigb15/00_grandes/06/05.htm)

<http://www.meteobelgique.be/communaute/faq/1423-quels-sont-les-differents-types-de-situations-atmospheriques-generales-en-hiver.html>

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

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

# Cycle d'eau



**végétation – bilan d'eau – climat**  
**ex: hiver** (moins d'évapotranspiration)

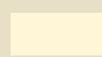
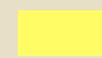
- |   |                |   |         |
|---|----------------|---|---------|
|  | neige/glace    |  | forêt   |
|  | eau            |  | sol nue |
|  | terre cultivée |   |         |

Figure 2 : végétation de la zone d'étude et la présence d'océan et de mer. 1: Atlantique; 2: Mer rouge; 3: Méditerranée; 4: Mer noire; 5: Mer Baltique; 6: Mer du nord; 7: Mer de Norvège; 8: Mer de Barents  
 Adaptée à la carte de la couverture terrestre d'ESA. <http://maps.elie.ucl.ac.be/CCI/viewer/>

# Topographie/ Orographie du domaine

-  plaine
-  plateaux et moyennes montagnes
-  montagnes

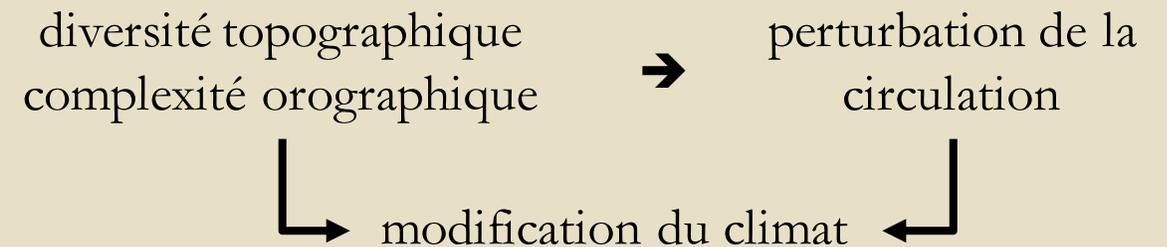


Figure 3 : relief de la zone d'étude

Source : <https://cm2bduras.files.wordpress.com/2013/10/relief-monde.jpg>



# Contrastes dans la région

**Écosystème**  
forêt: Europe du nord, Équateur (humide)  
désert: Sahara (sec)

**Gradient thermique**  
chaud - froid

**Contrastes**

**Topographie/  
Orographie**  
continent – océan  
plaine – plateau -  
montagne

**Type de climat**

latitude ↑  
polaire  
continental  
subtropical  
aride  
tropical

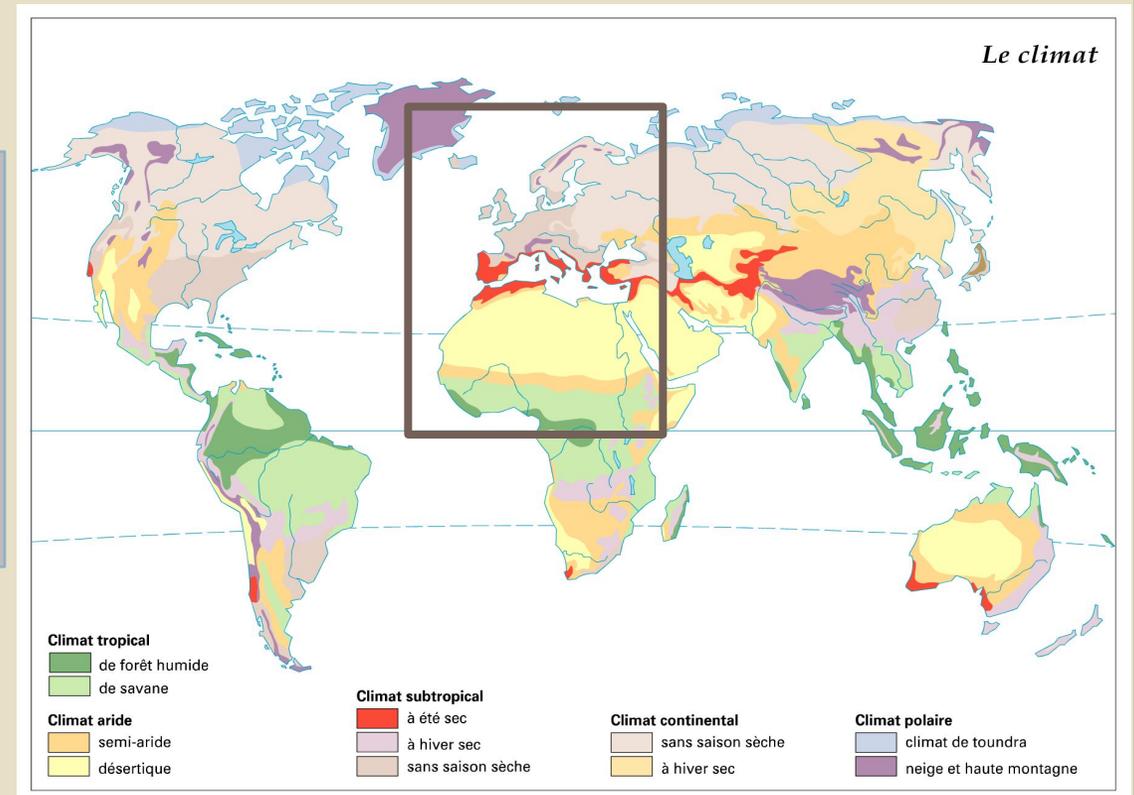
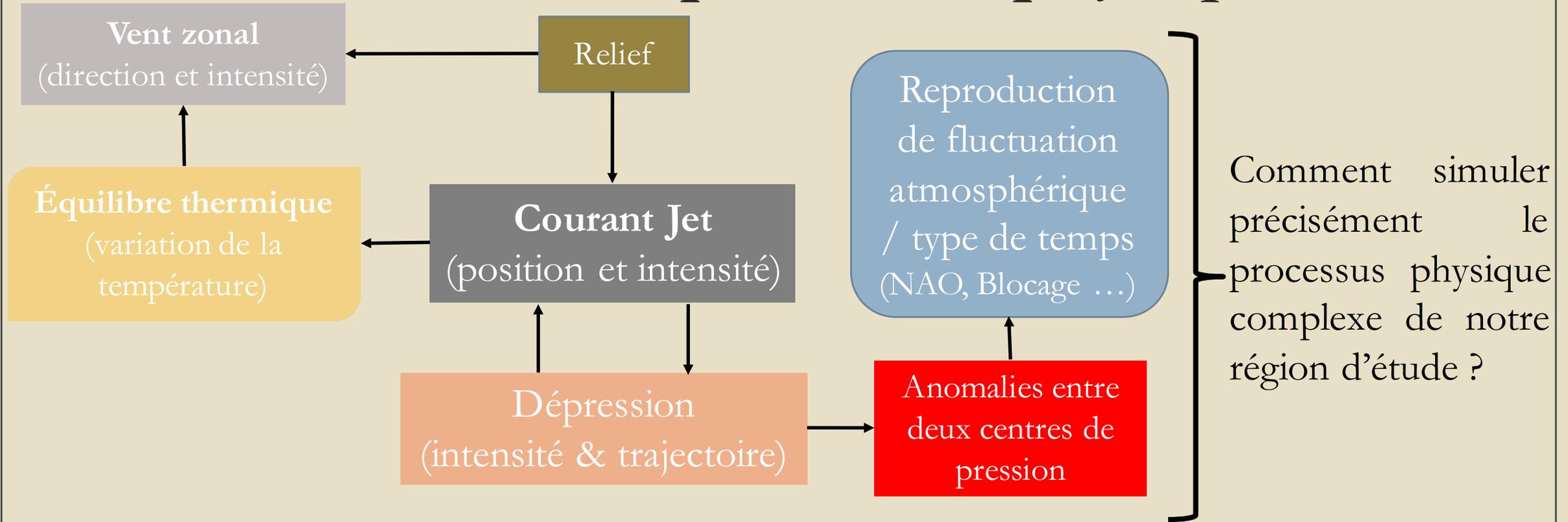


Figure 4 : type du climat du monde, la zone d'étude est dans le cadre.

Source : [http://www.larousse.fr/encyclopedie/divers/climat\\_\\_les\\_climats\\_du\\_monde/185927](http://www.larousse.fr/encyclopedie/divers/climat__les_climats_du_monde/185927)

Variables choisies : température et géopotentiel (500 hPa)

# Intérêt de l'étude du processus physique



Quelles sont les **variables** les plus importantes à étudier pour comprendre le processus physique?

**Hiver:**  
forte circulation atmosphérique (Courant-Jet fort), fluctuation vers le Nord, moins de « feuilles » (végétation)

# Contexte général

Une incertitude sur les potentielles influences futures de la dynamique sur le climat atlantique-européen

- variété des influences (de l'océan jusqu'à la stratosphère)
- variabilité naturelle
- difficile de simuler et prédire le climat européen (relatif à la circulation atmosphérique et océanique aux grandes échelles)
- une des plus importantes régions du régime blocage
- certains phénomènes extrêmes sont liés à la propagation sud-ouest – nord-est et à la séparation de 2 courants-jets

Une région socio-économique importante, d'où un besoin fort des études sur l'impact du climat régional

# Simulation du GCM (General Circulation Model)

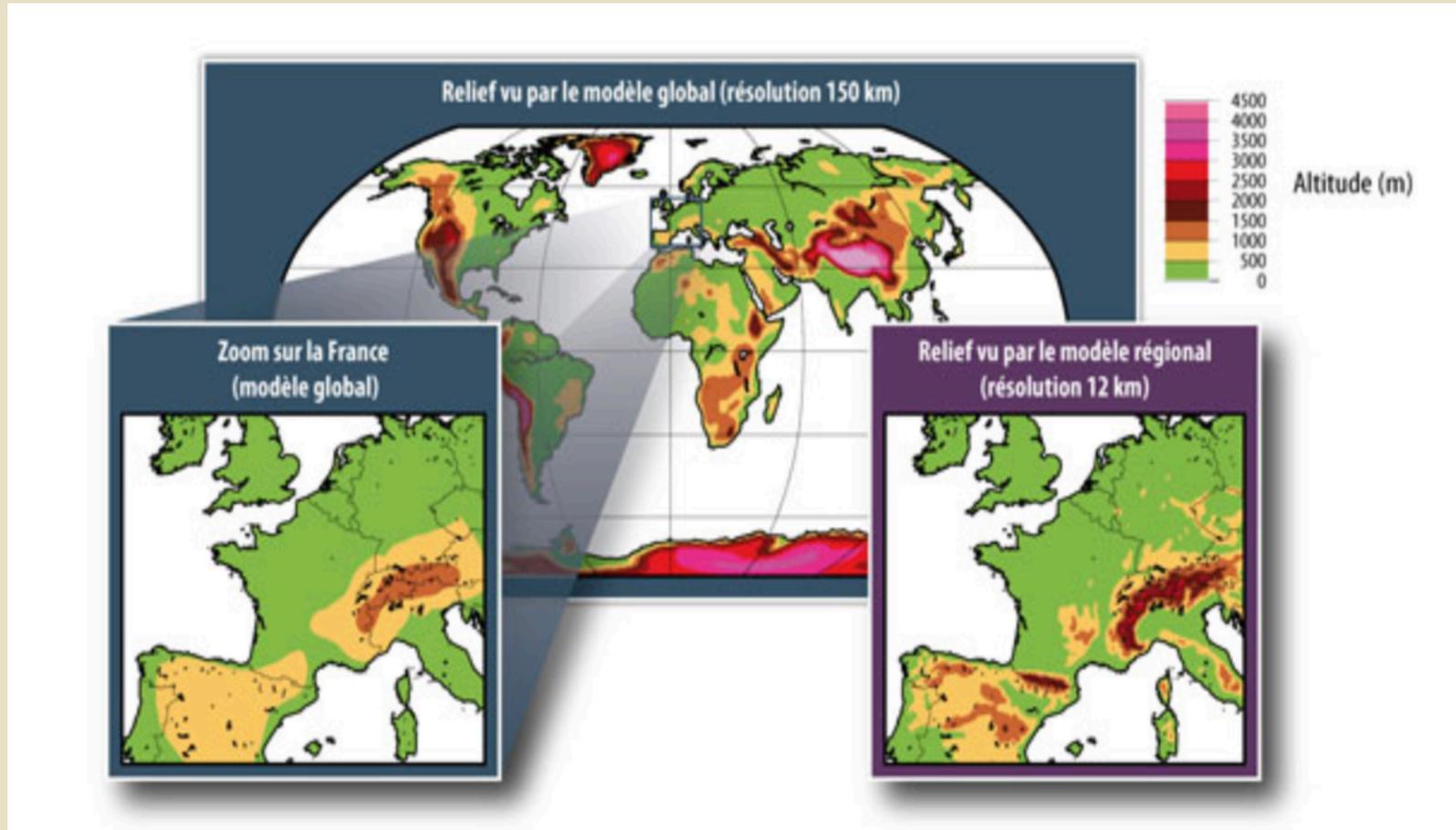


Figure 5 : les modèles globaux donnent des indications fiables sur le climat planétaire et ses variabilités. Une « descente d'échelle » apporte cependant des informations plus précises, région par région.

Source : Météo-France / Hakim Mamor. <http://www.meteofrance.fr/climat-passe-et-futur/projections-climatiques>

GCM (grandes échelles) :  
manque de précision aux  
petites échelles  
↓ raffinement  
de maille  
meilleure description  
régionale/locale

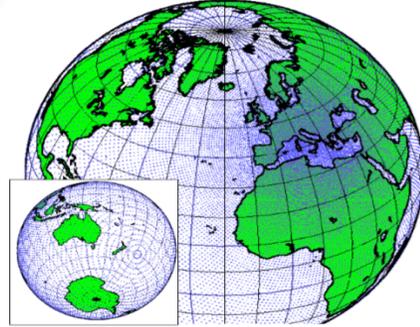
RCM : plus de précision au  
processus de circulation

**Évolution du GCM  
(CMIP/AMIP) et  
développement du RCM  
(projet CORDEX)**

# Une histoire du RCM (Regional Climate Model) ...

Modèle global avec  
une grille de  
résolution variable

Stretched-grid GCM



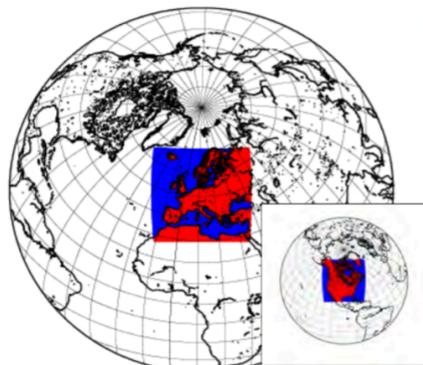
ARPEGE-Climate

aussi  
LMDZ

Régionalisation:

descente d'échelle avec plus de détail  
(résolution fine)

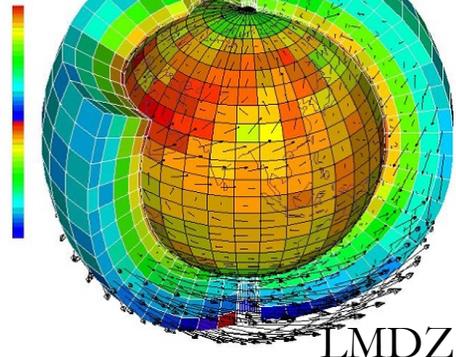
Limited-Area Model



ALADIN-Climate

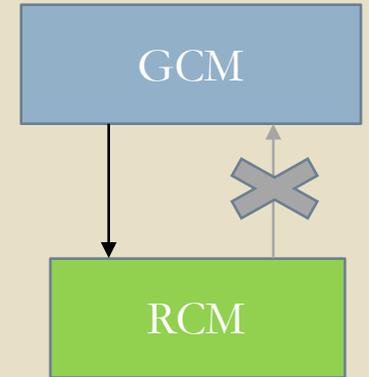
Raffinement de  
maille à une région  
limitée

AOGCM

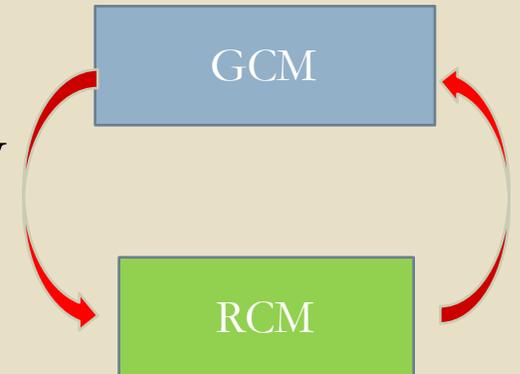


LMDZ

One-way  
nesting :

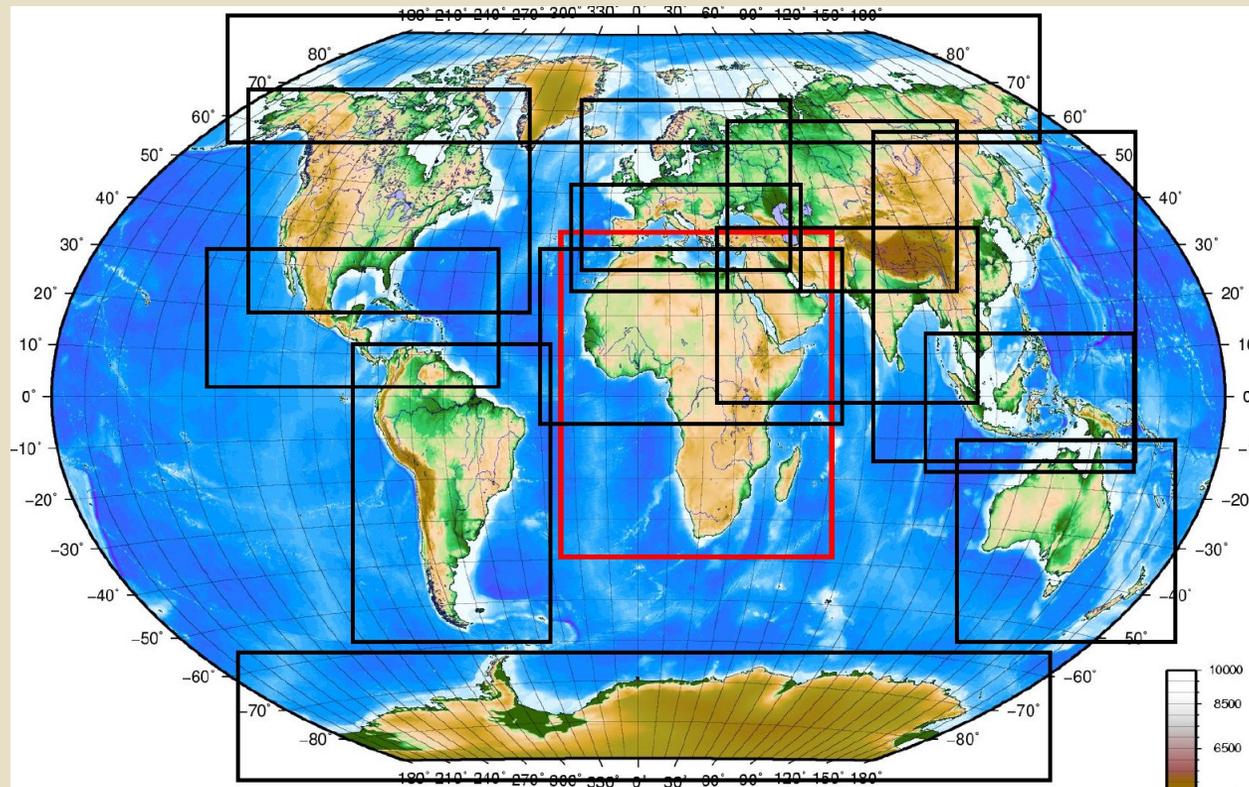


Two-way  
nesting :



# L'application du RCM

Projet CORDEX sur 14 régions  
protocole fixé : one-way neting (OWN)



Source : [www.cordex.org](http://www.cordex.org)

Peu d'application du système de  
two-way neting (TWN)

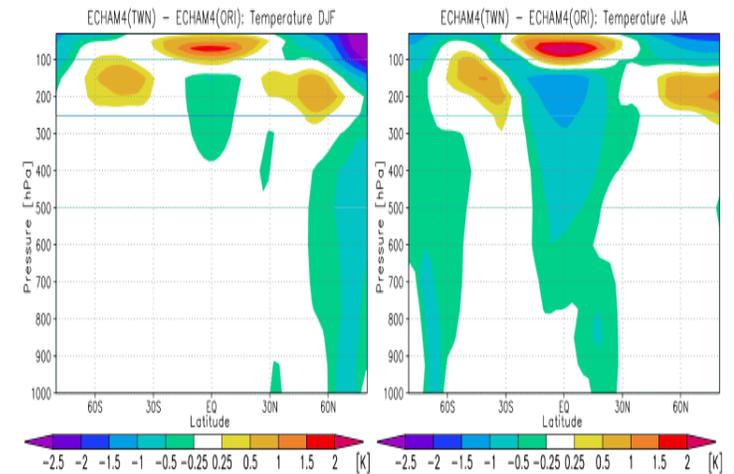
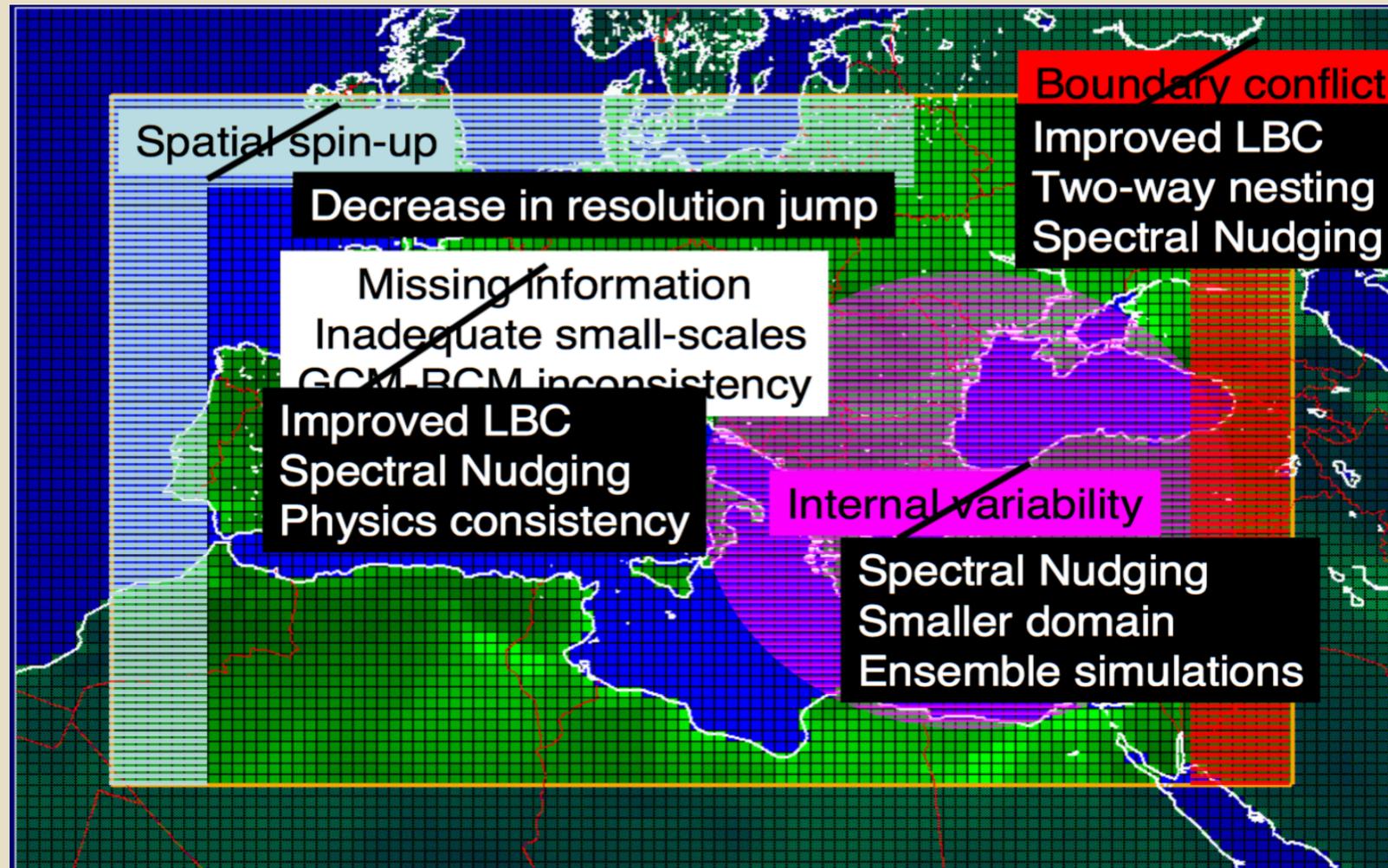


Figure 6. Latitude-height (pressure in hPa) cross sections of 10 year seasonal zonal mean temperature difference [K] of ECHAM4-TWN minus ECHAM4-ORI for boreal winter (DJF; left panel) and boreal summer (JJA; right panel).

Source : Lorenz, 2005

# Y-a-t-il des imperfections du RCM ?



Source : Somot, 2014

Reproduction  
imparfaite du  
processus physique

Incohérence aux  
bords

Informations  
ajoutées sur la  
variabilité interne

# Objectif : évaluer la méthode de descente d'échelle utilisée dans le RCM avec les différentes configurations

Climat actuel

## 1. Processus de relaxation

(One-way nesting)

Reproduction du GCM

Incohérence aux bords

Variabilité interne

## 2. Two-way nesting

Interaction - Performance

Amélioration

Modification

## 3. Raffinement de taille

Description fine

Accentuation/**Sans**  
**influence** d'effet de nesting

## 4. Réchauffement climatique

Changements

# Configuration d'expérimentation

Modèle utilisé: LMDZ4 (scénario A1B)

- Même paramétrisation physique, et dynamique identique
- SST (climatologie)
- $\tau = 90$  minutes
- Temps d'échange (U, V, Q, T) dans le TWN: 2 heures entre la zone de relaxation et le reste

2. Systèmes d'imbrication

Simulations	Modèle	Version	Description	
OM (Référence)	GCM	LMDZ_global (Atmosphère – Continent)	80 ans	150 ans
TM (TWN)	Couplage GCM-RCM, sortie GCM	LMDZ_global et LMDZ_régional	80 ans	150 ans
OS (OWN)	RCM	LMDZ_régional	80 ans	150 ans
TS (TWN)	Couplage GCM-RCM, sortie RCM	LMDZ_global et LMDZ_régional	80 ans	150 ans

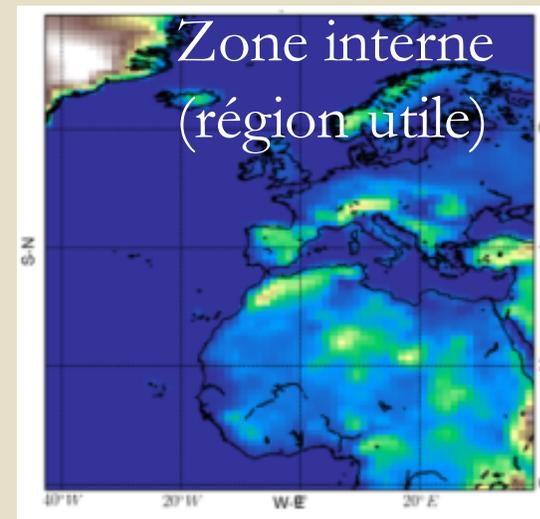
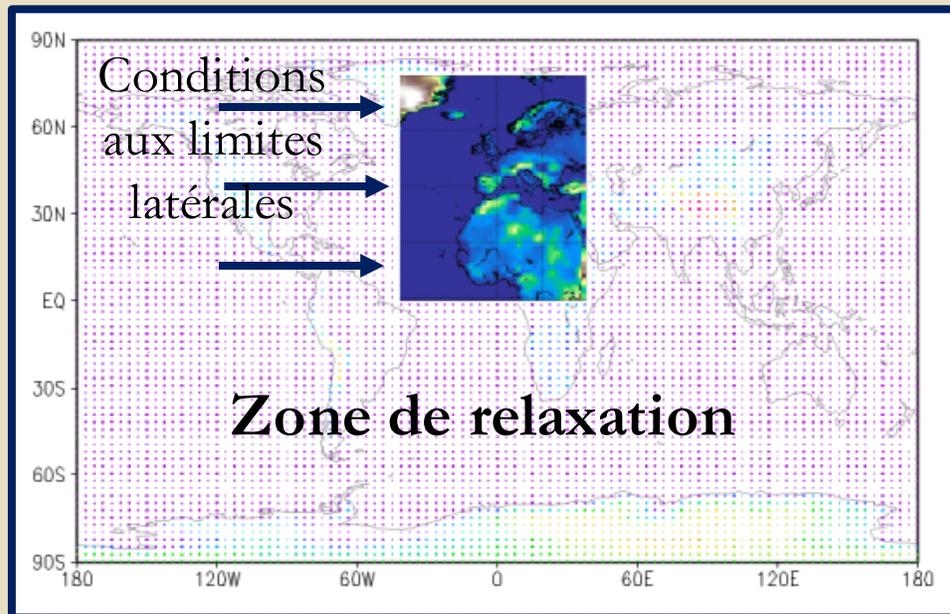
1. Relaxation (OWN)

3. Résolution

# 1. Évaluation du processus de relaxation

L'échange incomplet du GCM au RCM impacte la **reproduction** de circulation atmosphérique et de mécanisme dynamique régionale. Peut-on vraiment ignorer les imperfections du RCM ? L'incohérence aux bords et le changement de la variabilité interne sont-ils importants pour la physique ou ils sont négligeables ?

$$\frac{dT}{dx} = \text{dynamique} + \text{physique} + \text{relaxation} \left( \frac{T - T_{GCM}}{\tau} \right)$$



Choix de domaine :  
taille  
orographie/topographie  
végétation

# 1.1. Sensibilité saisonnière

## 1.1.1. Questions scientifiques

- Le RCM est-t-il capable de reproduire le climat simulé par le GCM à l'échelle de toutes les saisons ?
- Y-a-t-il un effet similaire de la relaxation sur le climat simulé pour chaque saison ?

# 1.1.2. Traitement des données

## 1.1.2.1. Analyses statistiques

Intérêt d'étude : évaluer le changement de la circulation atmosphérique

Données traitées : T2M et géopotentiels surtout Z500 de 4 saisons séparées sur 80 ans

**Comparaison sur la moyenne entre OS (OWN du RCM) et OM (GCM)**

vérifier si le RCM est capable de reproduire le climat du GCM

**Analyse de coefficient de corrélation et du RMSE**

voir la ressemblance de reproduction et le décrochement

$$\text{Coefficient}(r) = \frac{\sum_1^N (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_1^N (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_1^N (y_i - \bar{y})^2}}$$

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - x_i)^2}$$

**Test de Student et valeur p**

teste la confiance de significativité

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

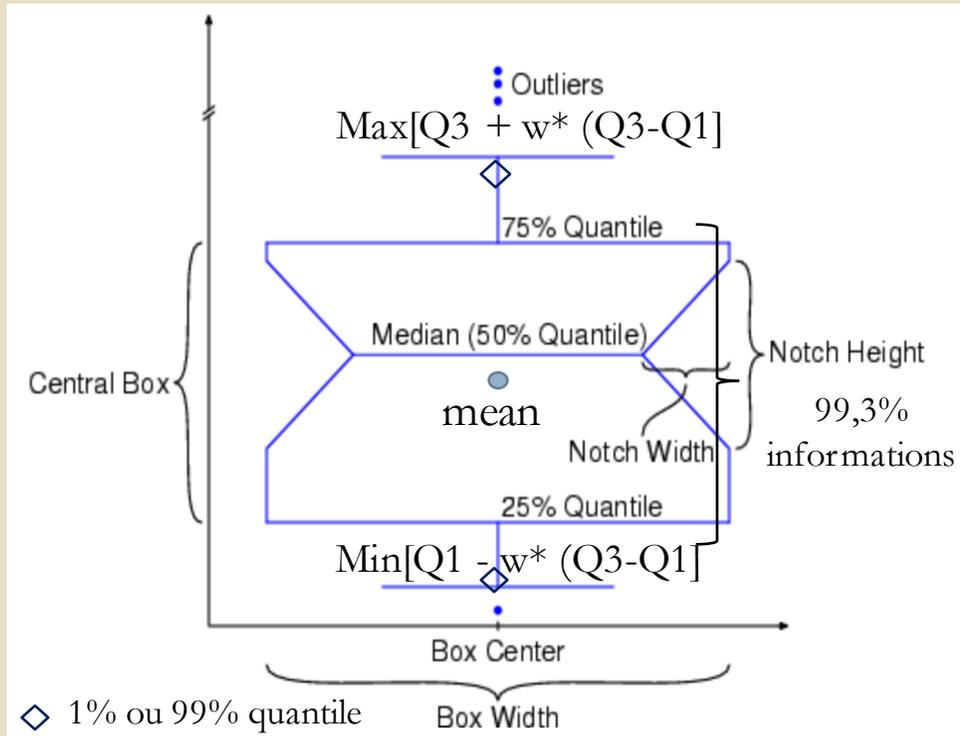
$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

**Analyse des phénomènes extrêmes** (phénomène de corrélation entre OM et OS < 0.1)

comprendre la dynamique de décrochement

## 1.1.2.2. Description des graphiques

### Description de box-plot



### Utilisation de Box-Plot

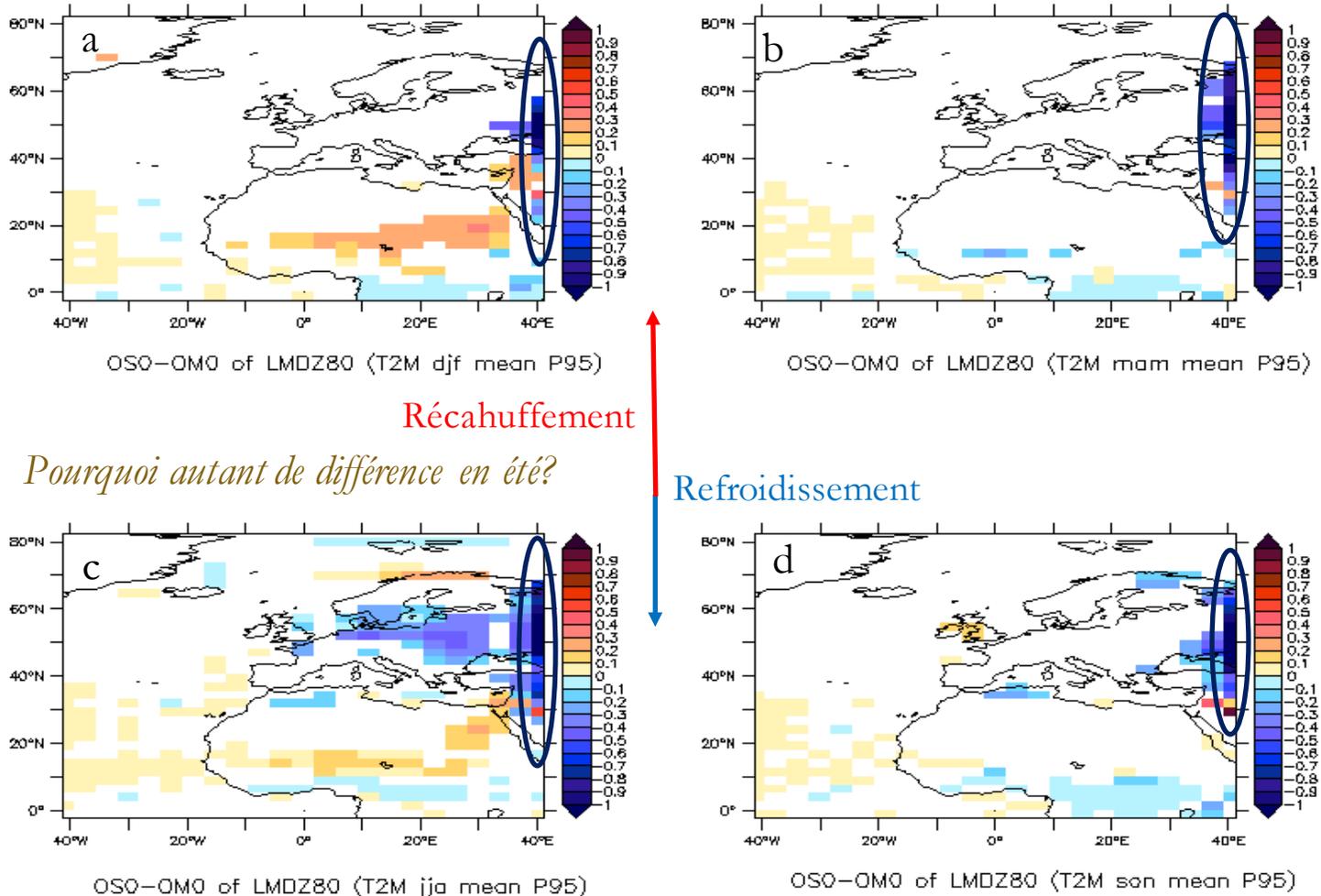
- Moyen rapide de figurer le profil essentiel d'une série statistique quantitative
- Comparer les caractéristiques (moyenne, quantiles, min, max) des différents échantillons

Adapté au graphique d'exemplaire de Matlab

Source : [http://fr.mathworks.com/help/symbolic/mupad\\_ref/plot-boxplot.html](http://fr.mathworks.com/help/symbolic/mupad_ref/plot-boxplot.html)

# 1.1.3. Imperfections aux bords sur 4 saisons

## Problème aux bords



Imperfections de la façon générale dans toutes les saisons

- T2M : refroidissement significatif au bord Est
- Été : incohérence importante

Figure 5 : la différence de la moyenne entre la simulation d'one-way nesting (OS) et la simulation de référence (OM) d'expérimentation LMDZ80 (même résolution pour le RCM et le GCM) sur la température à 2 mètres. Le processus de relaxation effectué à l'extérieur de la région est configuré de 90 minutes. a) hiver; b) printemps; c) été; d) automne

# 1.1.4. Variabilité saisonnière

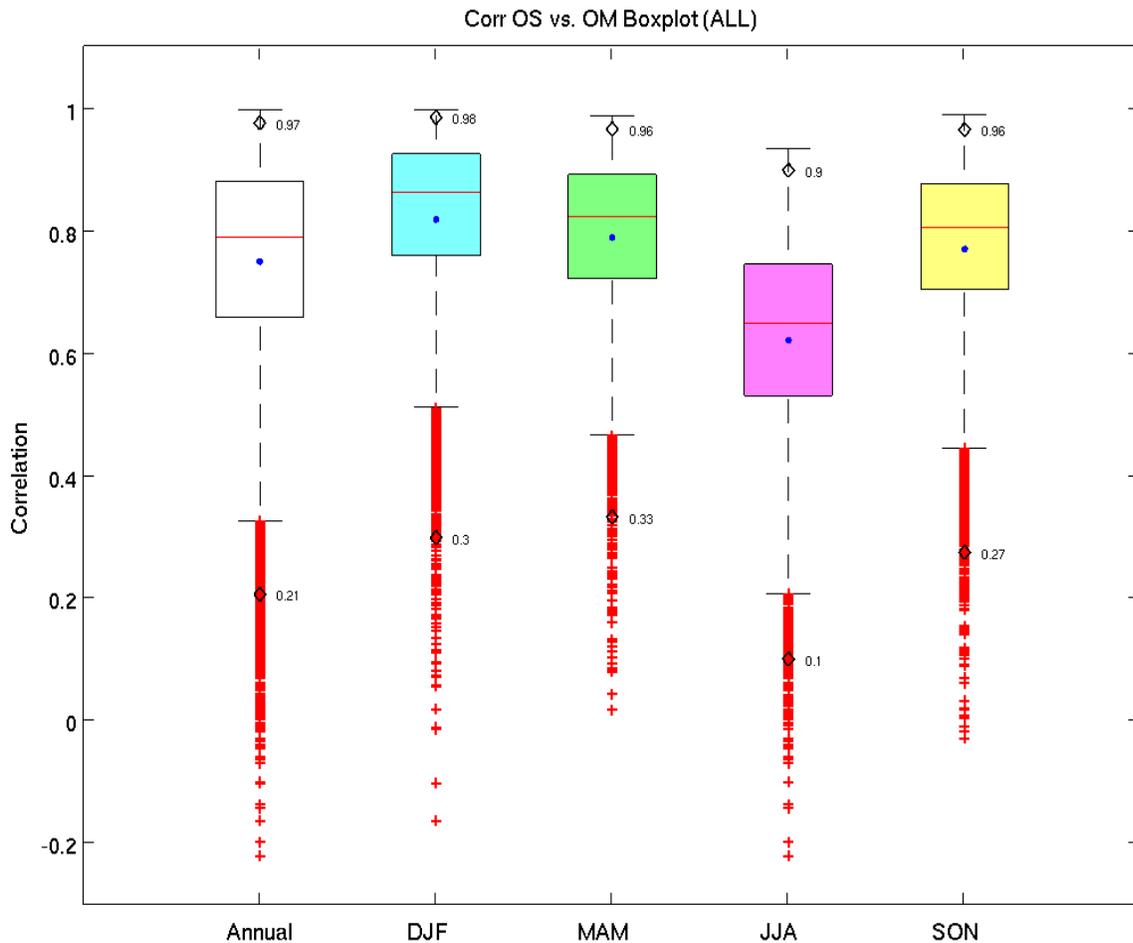


Figure 6 : box-plot graphique de la corrélation entre la simulation OS (OWN du RCM) et la simulation de référence sur la température à 2 mètres à l'échelle annuelle et aussi sur les 4 saisons;

- Toutes les saisons :  
Distribution non équilibrée (biais vers la faible ressemblance)
- Hiver : forte corrélation
- Été : faible corrélation, forte dispersion
- Printemps et Automne : saisons transitoires

Année	Jour	Durée	Saison
0010	10-19	10	Hiver
0014	164-173	10	Été
0015_1	304-316	13	Automne
0015_2	345-354	10	Hiver
0026	260-269	10	Automne
0029	330-344	15	Hiver
0031	205-219	15	Été
0042	181-198	18	Été
0047	218-227	10	Été
0048	166-182	17	Été
0049	208-226	19	Été
0052	256-279	24	Automne
0056	214-237	24	Été
0061	187-218	22	Été
0075_1	279-290	12	Automne
0075_2	309-327	19	Automne
0076	183-199	17	Été
0080	139-148	10	Printemps

## 1.1.5. Phénomènes extrêmes repartis dans 4 saisons

Fort décrochement de ressemblance de 2 modèles

Été (9/18) :

- forte fréquence d'occurrence de décrochement de ressemblance
- longue durée

Hiver (3/18) :

- forte circulation, forte corrélation

Automne (5/18) ; Printemps (1/18)

**L'intensité d'impact due de la force de circulation ?**

## 1.1.6. Réponse sur la sensibilité saisonnière

- ✓ L'analyse de la climatologie nous montre que les imperfections sont significatives aux bords surtout au bord Est, avec également la différence à l'intérieur de la région
- ✓ Ces imperfections manifestent de façon générale dans toutes les saisons
- ✓ Il y a un effet temporelle, c'est-à-dire une relation entre l'intensité de circulation atmosphérique et le degré de reproduction. Cette relation est représentée par l'indice de coefficient de corrélation entre deux modèles

# 1.2. Décomposition des échelles spatiales

## 1.2.1. Questions scientifiques

Le RCM a pour l'objectif de mieux détailler le processus physique et dynamique à l'échelle régionale. Est-ce que le processus de relaxation favorise le développement de dynamique aux petites échelles en gardant les informations aux grandes échelles ?

EOFs	Sigma_GCM	Sigma_RCM (OWN)	
EOF1	27.97%	28.01%	Grandes échelles
EOF2	19.76%	19.33%	
EOF3	15.96%	16.95%	
EOF4	7.97%	7.86%	
EOF5	7.25%	6.86%	
EOF6	4.25%	4.25%	Petites échelles
EOF7	2.75%	2.66%	
EOF8	2.37%	2.38%	
EOF9	2.05%	2.08%	
EOF10	1.87%	1.81%	

## 1.2.2. Traitement des données

Intérêt d'étude : vérifier le changement sur la circulation atmosphérique

Données traitées : T2M et géopotentiels de 80 ans surtout Z500 de 4 saisons séparées

**Analyse de coefficient  
de corrélation et du  
RMSE**

### **Analyse EOF**

- décomposition orthogonale aux valeurs propres (covariabilité)
  - Synthétiser l'information
- EOF 1: plus forte amplitude en calculant une corrélation

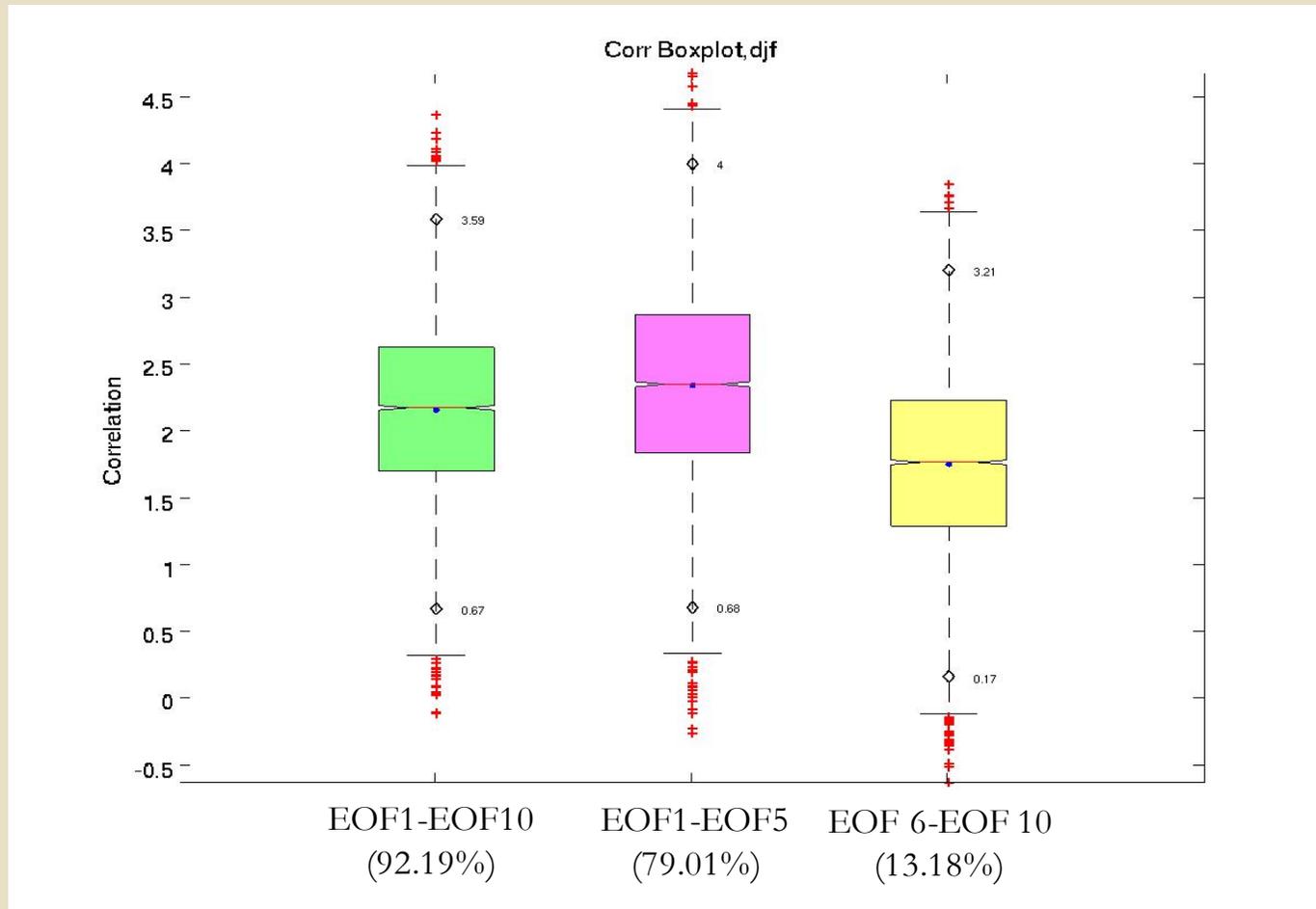
### **Transformation Fisher**

transformer les données qui respectent une distribution normale

$$y = 0.5 * \ln\left(\frac{1+x}{1-x}\right)$$

Source : <http://courses.education.illinois.edu/EdPsy580/lectures/correlation-ha.pdf>  
<http://www.cnrm-game-meteo.fr/spip.php?rubrique201>

# 1.2.3. Différentes réactions selon les échelles spatiales



Grandes échelles  
(entre EOF1 et EOF5) :  
bonne reproduction

Petites échelles  
(entre EOF6 et EOF10) :  
moins de ressemblance

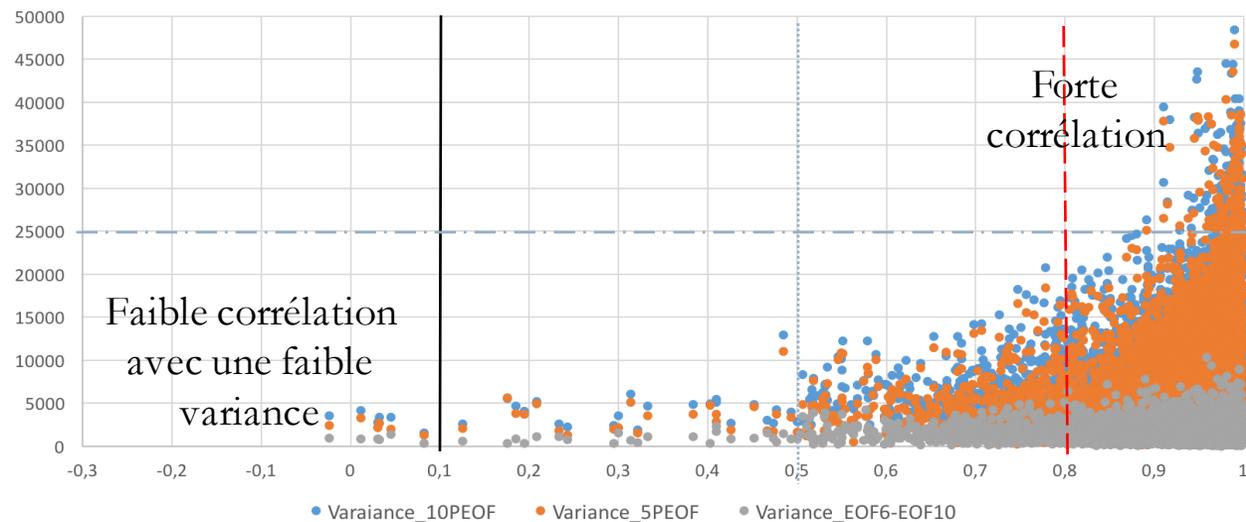
Figure 7 : le box-plot de la corrélation entre la simulation OS (One-way nesting) et la simulation OM (référence) sur le géopotentiel à 500 hPa d'après la reconstitution de différentes échelles. Le boîte verte représente 92,19% d'informations de l'ensemble des 10 premiers EOF ; la boîte rose est de 5 premiers EOFs de 79,01% d'information, c'est-à-dire des informations aux grandes échelles ; la boîte jaune est pour les petites échelles entre EOF6 et EOF10.

Order of importance of correlation (djf) between OWN and Reference after the reconstruction with EOFs	Days/Total days (7200)
5 first EOFs -10 first EOFs - 6 to 10 EOFs	5106 / 7200 (70.92%)
5 first EOFs – 6 to 10 EOFs – 10 first EOFs	266 /7200 (3.69%)
10 first EOFs – 5 first EOFs – 6 to 10 EOFs	406 /7200 (5.64%)
10 first EOFs – 6 to 10 EOFs – 5 first EOFs	80 / 7200 (1.11%)
6 to 10 EOFs – 10 first EOFs – 5 first EOFs	881 /7200 (12.24%)
6 to 10 EOFs – 5 first EOFs – 10 first EOFs	461 / 7200 (6.40%)

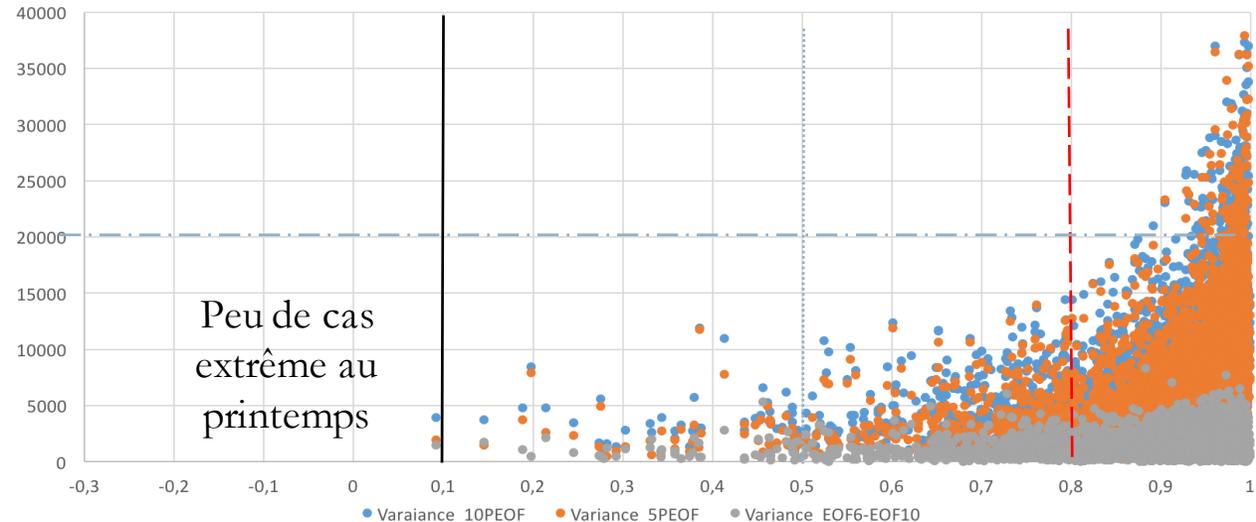
- Bonne reproduction aux grandes échelles : > 70%
- Petites échelles: des épisodes inverses de très forte ressemblance contre le cas aux grandes échelles
- En général, une très bonne reproduction aux grandes échelles, moins de ressemblance aux petites échelles due du développement dynamique

Tableau : ordre d'importance de corrélation de la saison d'hiver entre la simulation d'one-way nesting et la simulation de référence après la reconstitution d'EOFs.

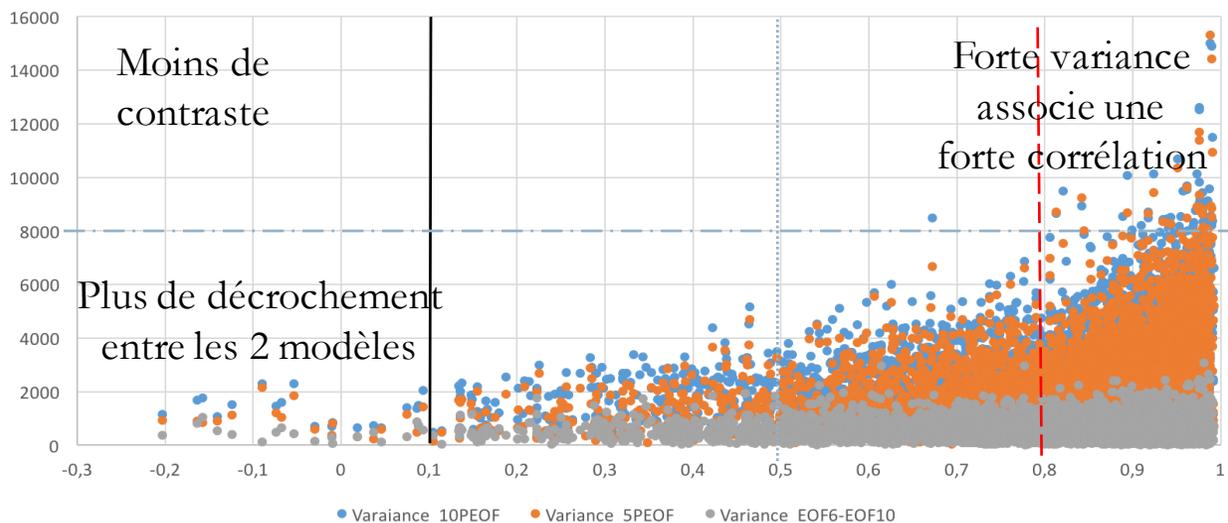
Scatter plot for the correlation between RCM (ONW) and GCM against the variance at different scales (winter)



Scatter plot for the correlation between RCM (ONW) and GCM against the variance at different scales (spring)



Scatter plot for the correlation between RCM (ONW) and GCM against the variance at different scales (summer)



Scatter plot for the correlation between RCM (ONW) and GCM against the variance at different scales (autumn)

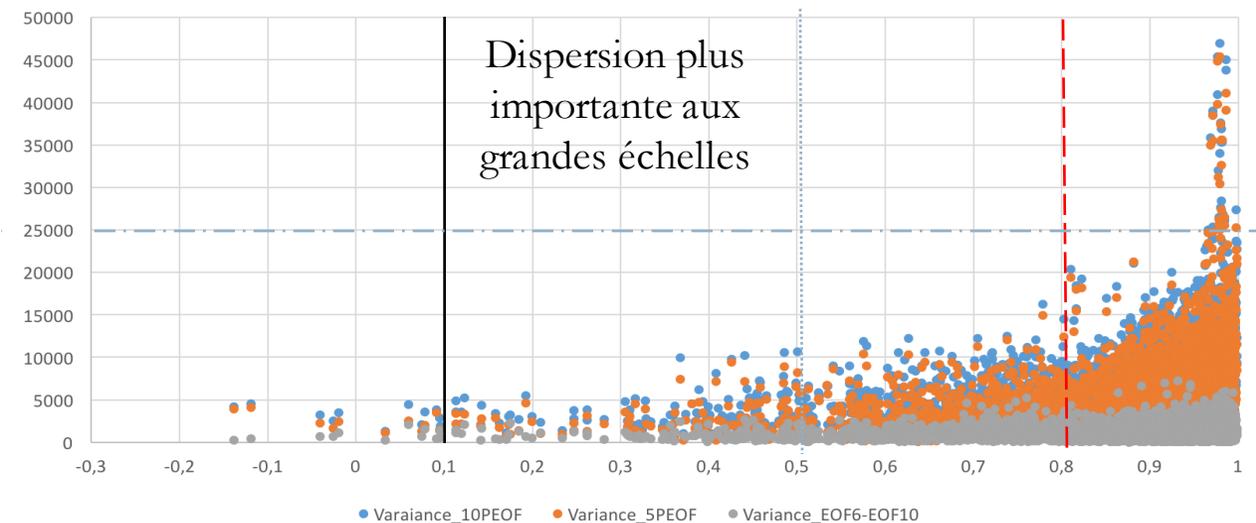


Figure 8 : les nuages de points représentent la relation entre la variance du champ physique aux différentes échelles sur l'axe Y et le coefficient de corrélation entre la simulation RCM et la simulation GCM des 4 saisons. En haut à gauche est de la saison d'hiver (djf), le printemps est en haut à droite (mam), en bas sont l'été (jja, à gauche) et l'automne (son, à droite). Concernant des points, les points bleus sont pour les 10 premiers EOFs, les points orange sont pour les 5 premiers EOFs (grandes échelles) et les gris sont pour les informations entre l'EOF6 et l'EOF10 (petites échelles).

## 1.2.4. Réponse sur la décomposition des échelles spatiales

Les informations aux grandes échelles jouent un rôle fondamental sur la circulation générale. Le RCM garde essentiellement les informations transportées du GCM, mais il développe sa propre dynamique régionale avec un changement sur la variabilité interne.

Aux différents échelles spatiales, les réactions au processus de relaxation sont différents.

# 1.3. Continuité de circulation (type de temps)

## 1.3.1. Questions scientifiques

Le forçage artificiel utilisé dans le RCM apporte une circulation contrainte. La grande différence aux bords entre le GCM et le RCM (OWN) est-elle une simple incohérence aux bords ou correspond-elle à une modification importante de la nature de variabilité via les modes climatiques (dans l'hémisphère Nord : NAO, blocage etc.) ? Et comment les modes de variabilité principaux sont-ils affectés ?

## 1.3.2. Traitement des données

Intérêt d'étude : vérifier le changement sur la circulation atmosphérique

Données traitées : T2M et géopotentiels surtout Z500 de 4 saisons séparées de 80 ans

**Analyse de coefficient de  
corrélation et du RMSE**

**Transformation Fisher**

**Analyse EOF**

### **Analyse de régime de temps**

- comprendre la circulation atmosphérique
- fluctuations des courants-jets entre différents états quasi-stationnaire
  - 4 régimes (NAO+, NAO-, Blocage, Dorsale Atlantique)

Méthode de classification d'après Robert Vautard (K-mean après l'analyse EOF)

# 1.3.3. Structures spatiales de 4 régimes de temps de la simulation de référence (OM)

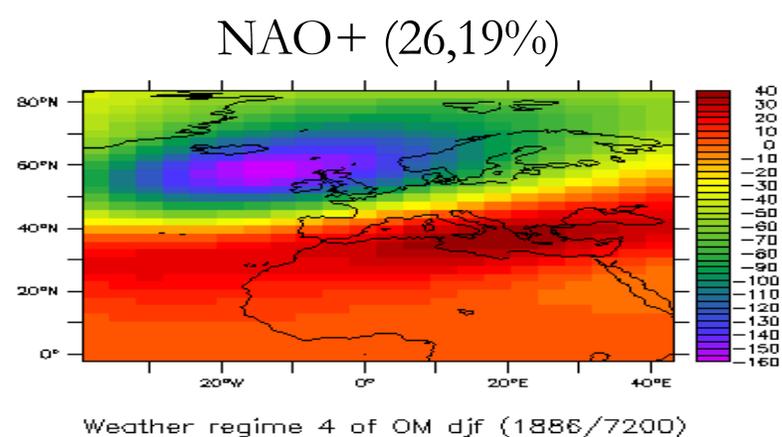
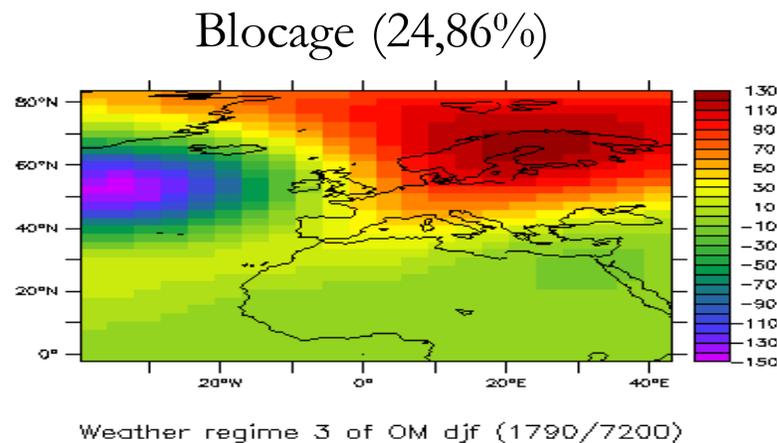
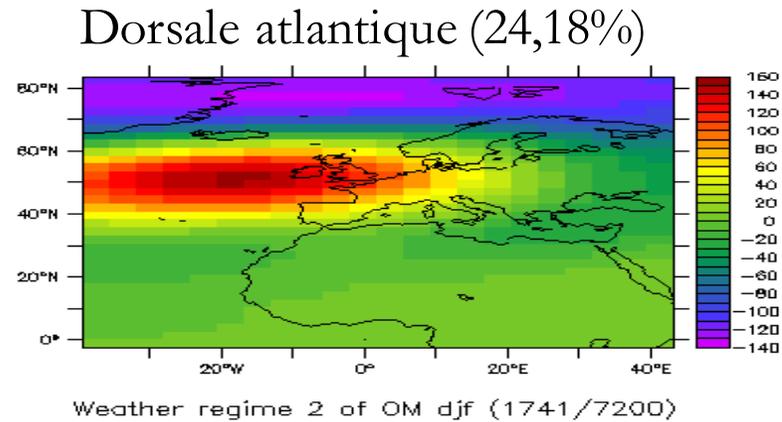
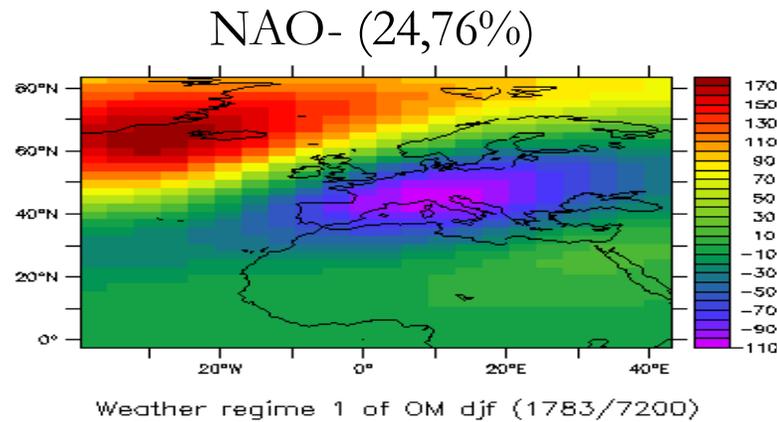
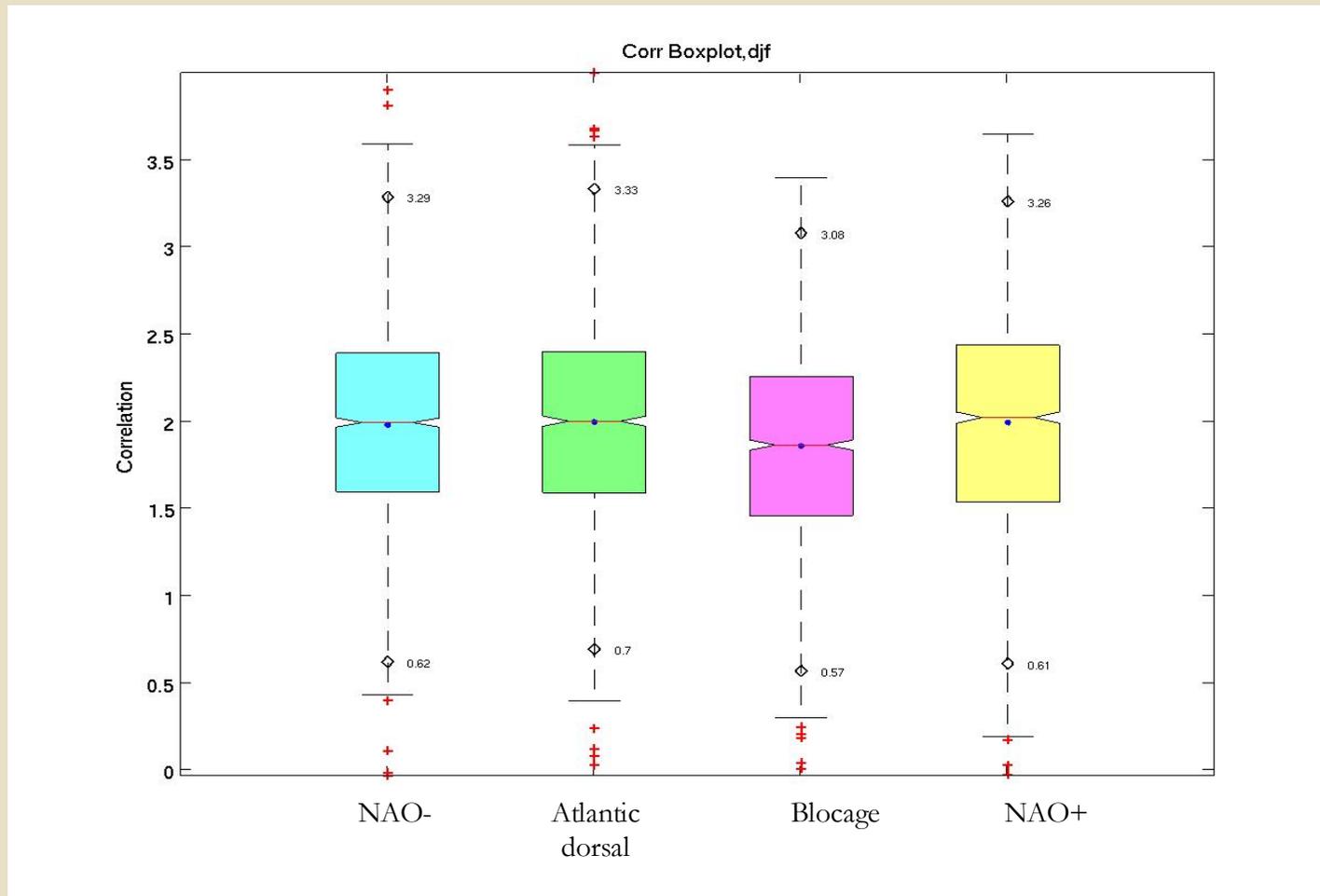


Figure 9 : 4 régimes de temps sur le géopotiel de 500 hPa de la simulation de référence d'après les données synoptiques sur la saison d'hiver. La carte en haut à gauche est de la situation NAO- qui représente 1783 jours sur 7200 jours ; celle en haut à droite est du temps d'Atlantic dorsal de 1741 jours sur 7200 ; La carte en bas à gauche est du type de temps de blocking qui a une représentation de 1790 jours sur 7200 ; NAO+ est retrouvé en bas à droite de 1886 jours sur 7200 jours.

# 1.3.4. Reproduction différente des 4 types de temps



Blocage : moins de reproduction dans le RCM, c'est-à-dire la continuité dynamique est plus impactée au processus de relaxation

NAO+ : plus de dispersion de distribution de données

NAO- et dorsale atlantique : ressemblance de distribution de ces 2 types

Figure 10 : la corrélation entre la simulation d'OWN du RCM et la simulation de référence de la saison d'hiver sur le géopotential de 500 hPa d'après le regroupement de 4 régimes de temps.

## 1.3.5. Réponse sur la reproduction de fluctuation atmosphérique

- Modification de la nature de variabilité via les modes climatique avec un changement sur la reproduction de fluctuation atmosphérique
- Le processus de relaxation donne un effet sur la continuité de circulation qui est manifesté par une réaction plus importante sur le régime Blocage

Discrimination pas importante :  
effet du vent zonal et l'importance de variance ?

# Synthèse de partie 1 : reproduction et développement dynamique

- Imperfections observées : problèmes aux bords, changement de la variabilité à l'intérieur de la région (manifestées sur les 4 saisons)
  - Variabilité saisonnière : lien entre l'intensité de circulation et la reproduction du phénomène
  - Décomposition des échelles spatiales : RCM garde les informations essentielles aux grandes échelles avec un développement de dynamique aux petites échelles
  - Modification sur le processus physique, effet sur la continuité de circulation (blocage) et la dispersion du phénomène (NAO+)

## 1.4. Incohérence aux bords due de la force de relaxation ?

Est-ce que la reproduction imparfaite dépend de la configuration d'expérimentation, c'est-à-dire du choix de la force de relaxation ( $\tau$ ) ?

Dans notre expérimentation, cette force de relaxation est assez forte de 90 minutes. Pour comprendre ce phénomène, les simulations avec les différentes configurations de  $\tau$  sont à faire.

Hypothèse : L'intensité de problème aux bords aurait un lien avec l'intensité de relaxation. Une forte relaxation accentuerait l'incohérence aux bords car le forçage artificiel donne une modification brutale.

## 2. Test du système de TWN

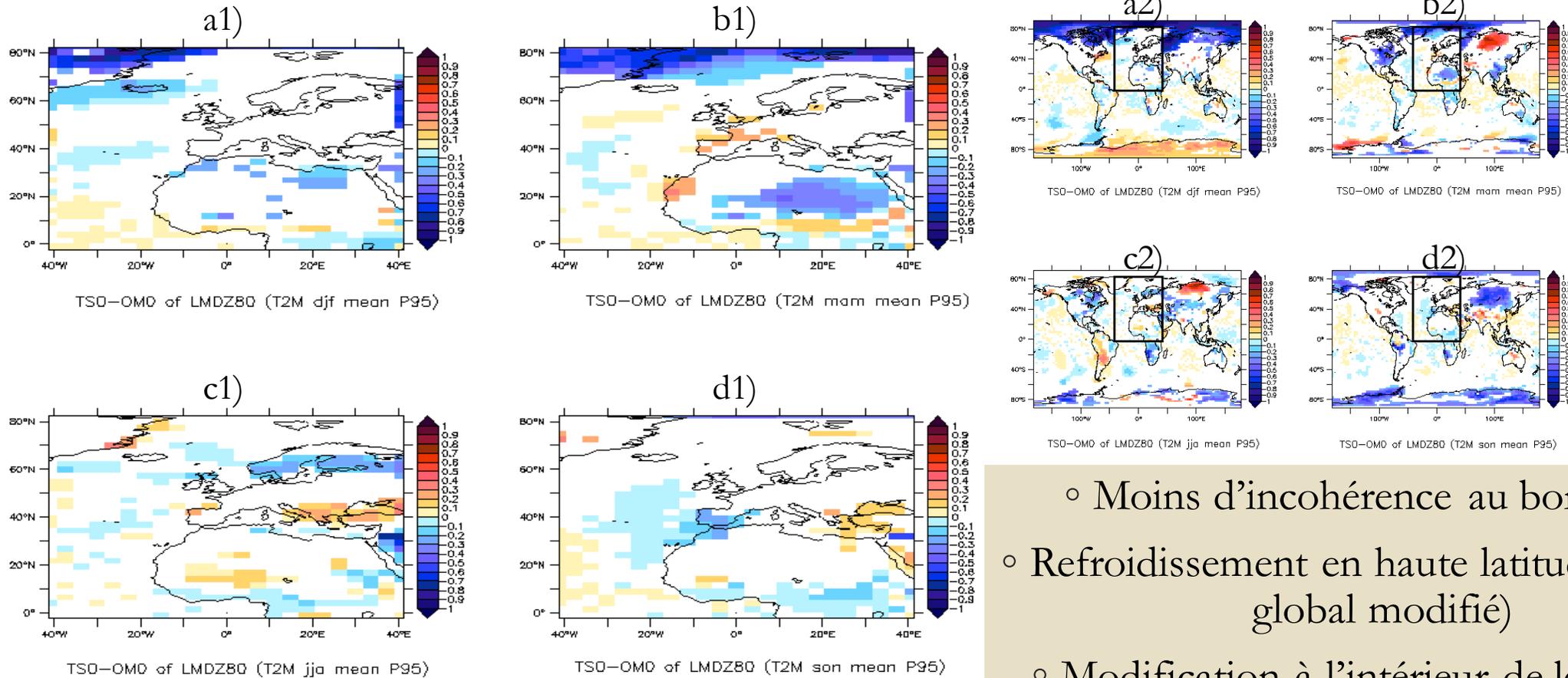
La méthode classique d'OWN a une reproduction incomplète des informations du GCM avec une incohérence importante aux bords et une modification interne sur les différentes échelles et les différents modes de climat car c'est un système contraint. Théoriquement, le système de two-way nesting favorise un échange plus libre entre les deux modèles car l'interaction est prise en compte.

### 2.1. Évaluer le TWN système avec la référence

#### 2.1.1. Questions scientifiques

Dans la méthode classique de nesting, dont one-way approche, une incohérence aux bords est très remarquable avec également de modifications internes de la région, ces modifications associent une reproduction différente sur les différentes échelles (spatiales et temporelles). Est-ce que l'application de two-way nesting système améliore partiellement la performance du RCM avec une meilleure reproduction aux bords ?

## 2.1.2. Différence entre TWN et la référence



- Moins d'incohérence au bord Est
- Refroidissement en haute latitude (climat global modifié)
- Modification à l'intérieur de la région

Figure 11 : la différence de la moyenne entre la simulation d'two-way nesting (TS) et la simulation de référence (OM) d'expérimentation LMDZ80 (même résolution pour le RCM et le GCM) sur la température à 2 mètres. Le processus de relaxation effectué à l'extérieur de la région est configuré de 90 minutes. a1) hiver dans la région; a2) hiver en global; b1) printemps régional b2) printemps global; c1)été régional; c2) été global; d1) automne régional; d2) automne global

## 2.1.3. Réponse sur les modifications apportées du two-way nesting système

- Amélioration partielle de performance du RCM avec une incohérence moins importante dans le TWN
- Modifications internes surtout un refroidissement en hautes latitudes
- Climat global est modifié (l'effet de rétroaction du RCM) qui influence le climat régional

## 2.2. Comparaison de deux systèmes de nesting

### 2.2.1. Question scientifique

L'application d'interaction entre le GCM et RCM apporte le changement à l'ensemble du globe. Mais quelles sont les modifications concrètes à l'intérieur de la région compare le système du sens unique d'imbrication (OWN) ?

## 2.2.2. Traitement des données

- Reconnaissance sur la reproduction du climat de chaque saison (différence statistique entre deux simulations)
- Voir le changement sur la variabilité naturelle
  - Analyse EOF
  - Fixer la structure spatiale comme celle de la référence pour les 2 simulations de RCM
  - Calculer l'écart type de 10 premiers composants principaux (PC)
  - Différence entre l'écart type de PC de la simulation et celui de la simulation de référence (OM : GCM)

## 2.2.3. Analyse climatologique

- Réchauffement au bord Est contre le refroidissement manifesté dans OWN

- Refroidissement en hautes latitudes (modification du climat global)

- Plus de changement à l'intérieur de la région

Changement de la variabilité naturelle ?

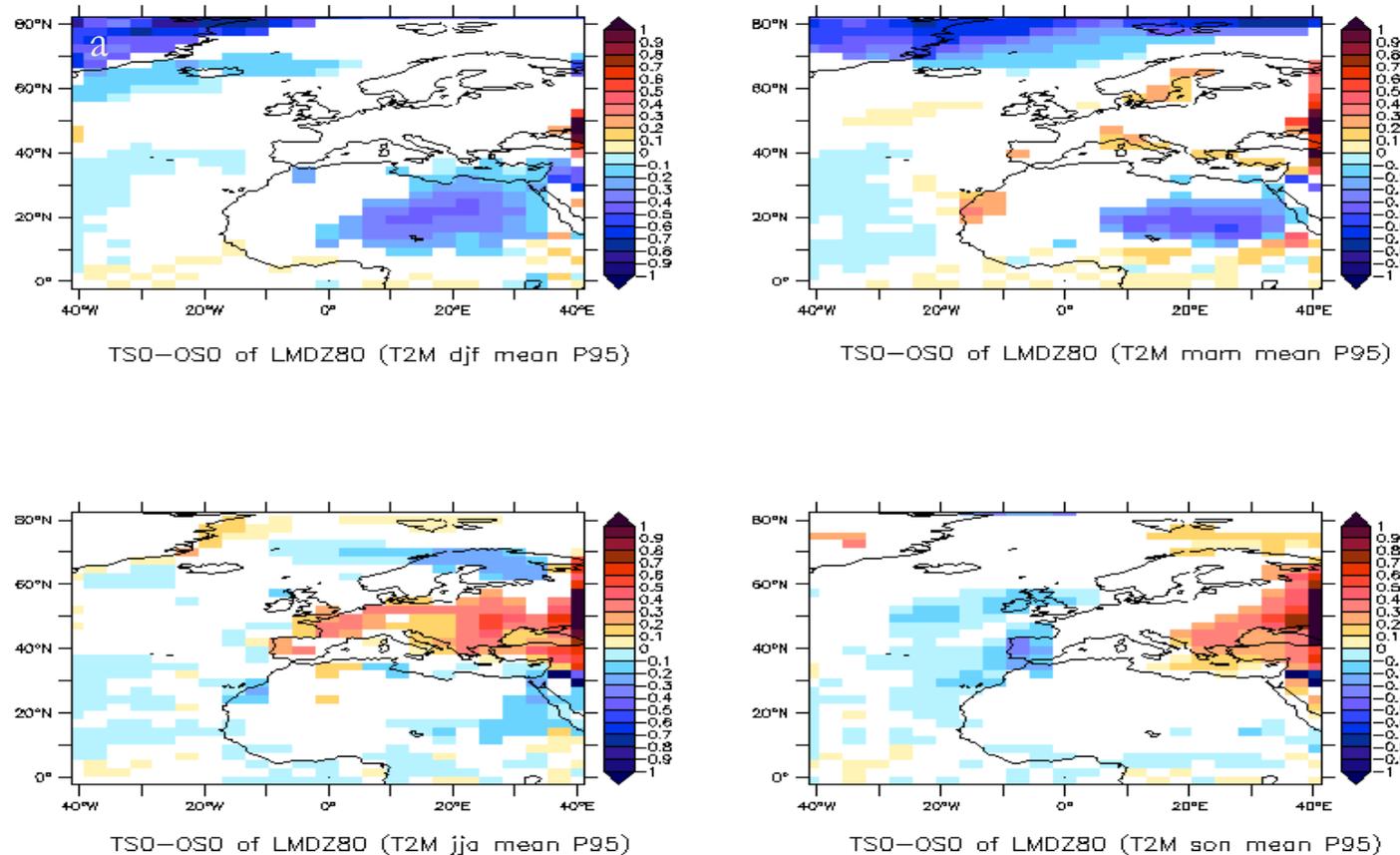


Figure 12 : la différence de la moyenne entre la simulation d'two-way nesting (TS) et la simulation d'one-way nesting (OS) d'expérimentation LMDZ80 (même résolution pour le RCM et le GCM) sur la température à 2 mètres. a) hiver; b) printemps; c) été; d) automne

## 2.2.4. Analyse EOF

### Differences of standard deviation with the reference in Autumn for different components (PC)

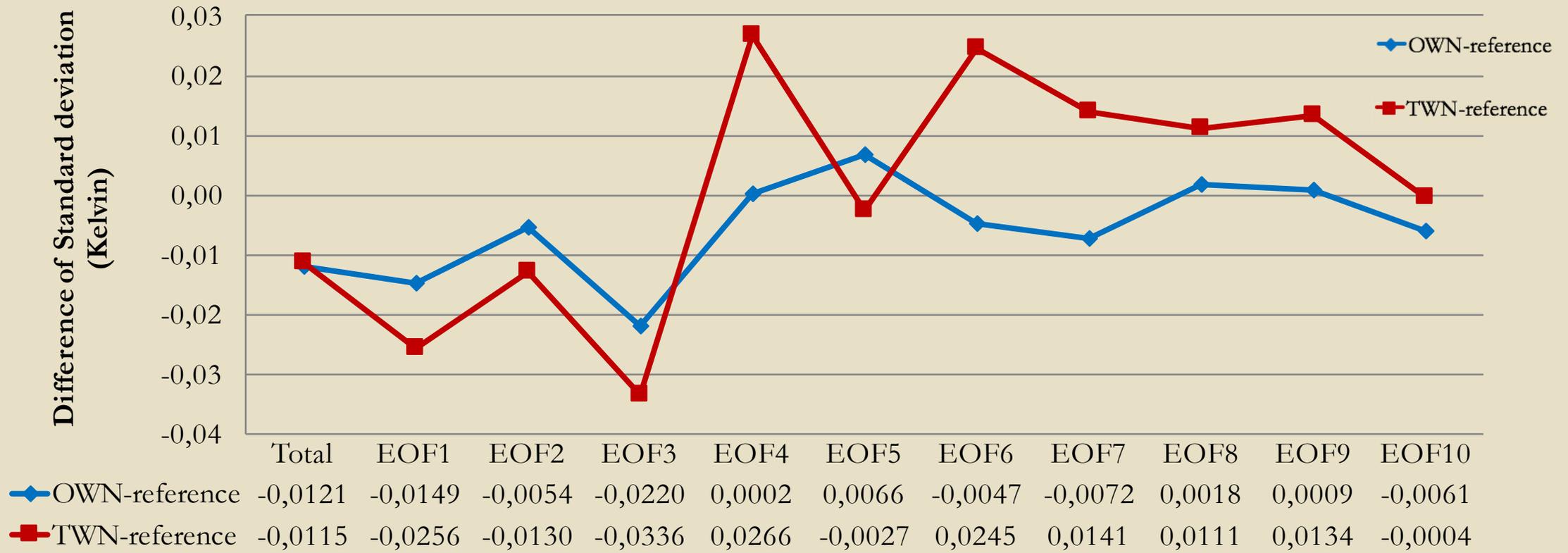


Figure 13 : différence d'écart type entre une simulation du RCM et la simulation de référence sur les composants principaux d'automne. La structure spatiale est fixée à celle de la simulation de référence. La ligne bleue est la différence entre OS (OWN) et la référence, celle en rouge est la différence entre TWN et la référence. Toutes ces simulations sont de l'expérimentation LMDZ80 d'une résolution identique pour toutes les simulations.

## 2.2.5. Réponse sur les informations apportées du TWN système

- ✓ Correction de l'incohérence aux bords (surtout bord Est)
- ✓ Refroidissement en hautes latitudes par l'effet du climat global modifié
- ✓ Modification de la variabilité naturelle de la région avec plus de changement à l'intérieur de la région

# Bilan de partie 2 : évaluation de l'approche de T'W'N

- Amélioration partielle de la performance du RCM
- Modification sur la variabilité naturelle de la région
- Changement du climat global

# 3. Analyse d'effet de résolution fine

Le RCM est utilisé avec un raffinement de maille pour mieux décrire les processus physiques et dynamiques aux petites échelles afin de mieux adapter aux études d'impact à l'échelle régionale et locale. Il est donc indispensable d'évaluer l'effet de raffinement de maille et comprendre l'accentuation sur les 2 approches de nesting

## 3.1. Effet de TWN

### 3.1.1. Questions scientifiques

Dans un contexte des grandes mailles (300 km) identiques de GCM et RCM, le système de two-way nesting porte des modifications par rapport au système d'one-way nesting. Un raffinement de maille d'une résolution plus fine de 100 km dans le RCM joue-t-il un rôle sur la différence de deux systèmes de nesting avec un effet prononcé ?

## 3.1.2. Différences statistiques entre deux approches de nesting

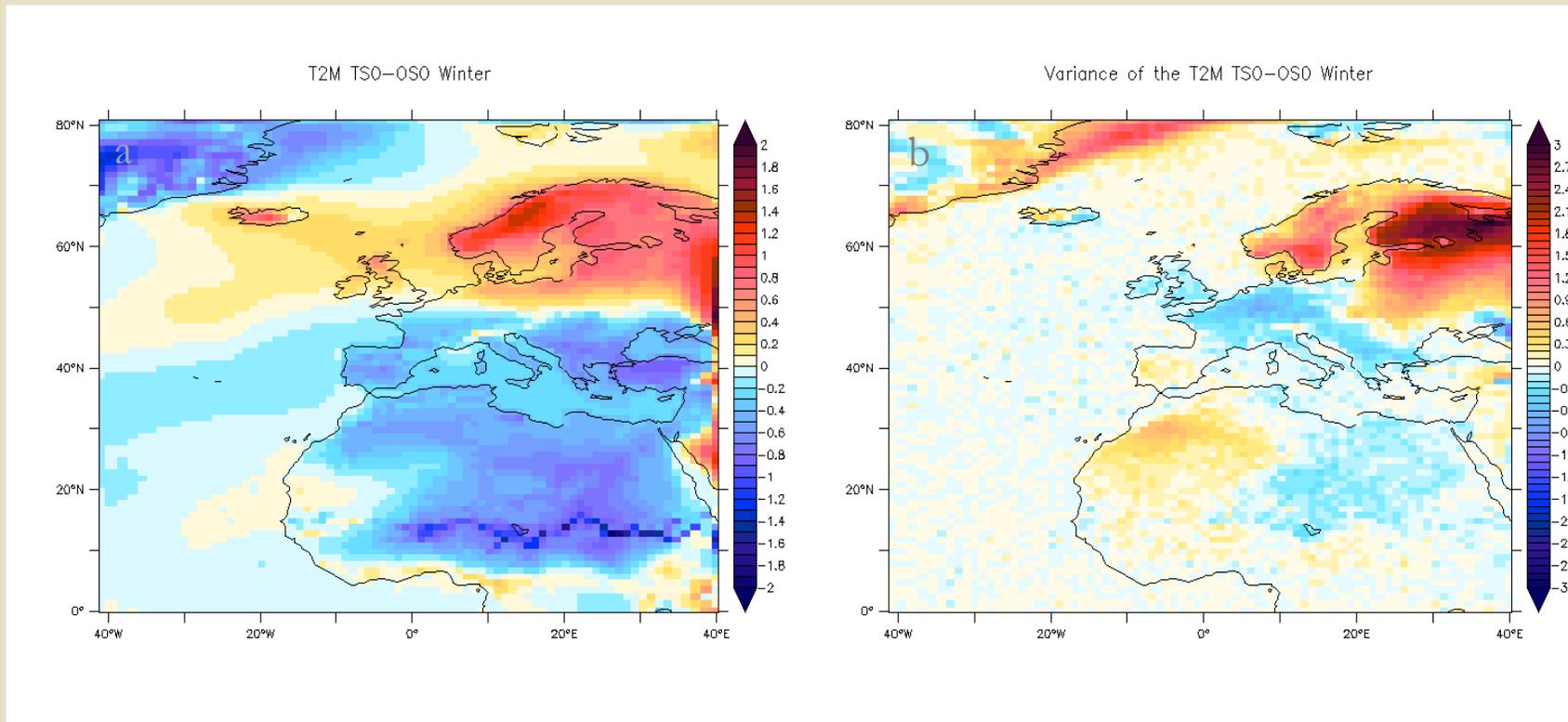


Figure 14 : l'analyse statistique sur la différence de la moyenne (a) et la variance (b) de la température à 2 mètres de la saison d'hiver entre la simulation TS (two-way nesting système) et la simulation OS (one-way nesting) du RCM de l'expérimentation sans changer la résolution qui ont tourné pour une durée de 80 ans.

Accentuation de modification thermique (-2,01K : 1,98K)

- Réchauffement: 42°N – 65°N, bordure Est (20°N – 80°N)
- Refroidissement: reste

Contraste Nord-Sud évident

Contraste Terre-Océan

Moyennes latitudes :  
fort changement sur la variance

### 3.1.3. Réponse sur l'effet de TWN d'après le raffinement de maille

Contraste évident et plus structurée :

Un réchauffement aux moyennes latitudes contre un refroidissement du reste

Intensification des modifications apportées du two-way nesting système

- Description plus détaillée
- Intensité de différence plus importante

## 3.2. Test des modes de climat

### 3.2.1. Question scientifique

Les modifications des modes de climat provoquent le changement du climat. D'après une reconnaissance sur les changements apportés du two-way nesting système, est-ce que les modes sont mieux représentés avec le raffinement de maille? Y-a-t-il une modification de la variabilité interne manifestée par la différence des modes de climat ? Comment ce changement spatial est manifesté ?

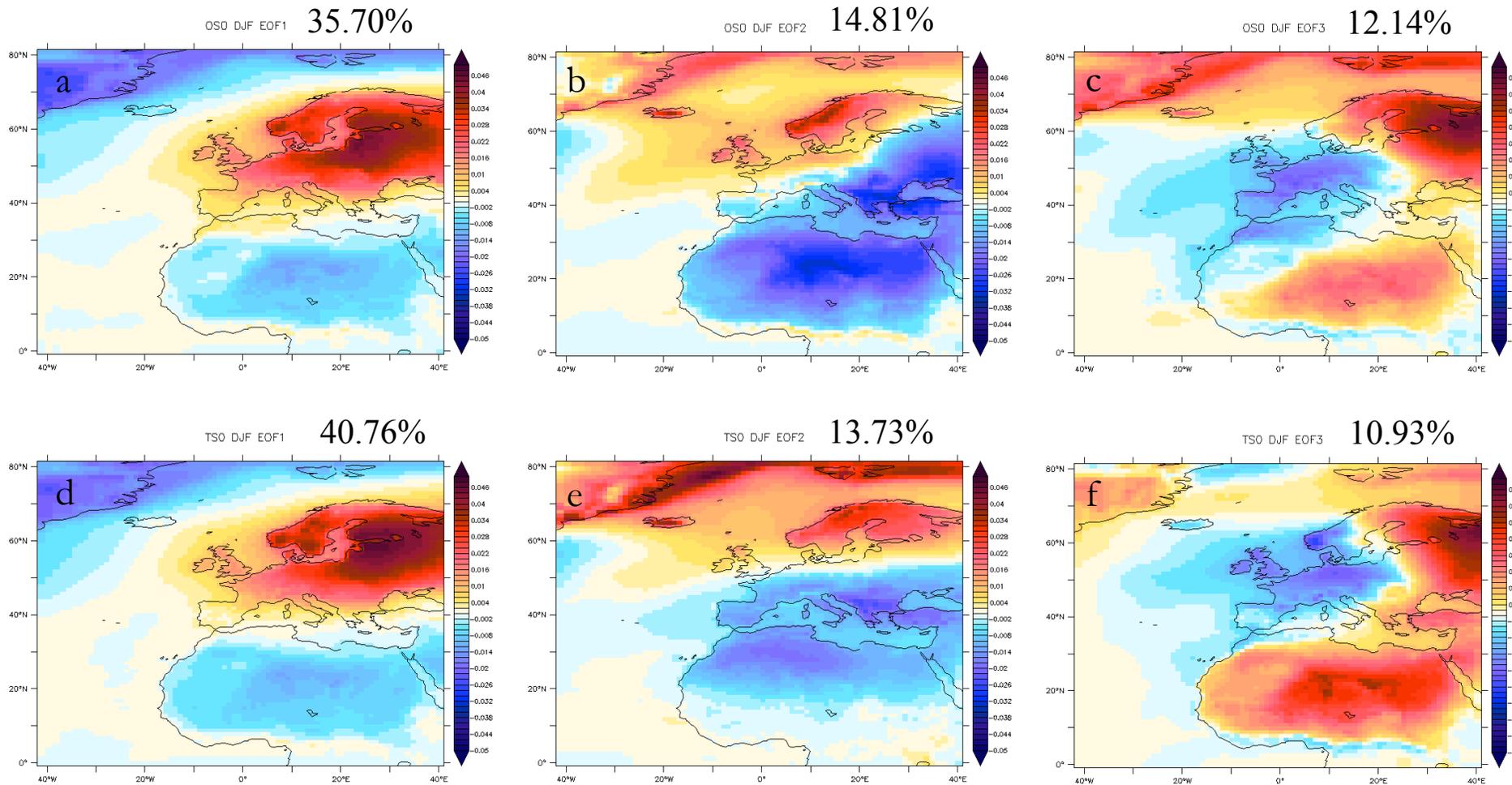
### 3.2.2. Analyse des données

Comparer les structures spatiales dans les deux approches de nesting

#### Analyse EOF

- Évaluation des contrastes des grandes échelles
- Compréhension des changements aux petites échelles

# 3.2.3. Modification des modes de climat



One-way nesting :  
62,65% (EOF1 : EOF3)

Contraste  
Nord-Sud aux  
grandes échelles

Two-way nesting :  
65,42% ( EOF1 : EOF3)

Inclinaison  
Propagation vers  
le Nord et l'Est

Figure 15 : les trois premiers EOFs sur la température de 2 mètres d'hiver. a) EOF1 de la simulation OS (OWN du RCM) présente 35,70% d'information; b) EOF2 d'OS (14,81%); c) EOF3 d'OS (12,14%); d) EOF1 de la simulation TS (TWN du RCM), de 40,76% d'information; e) EOF2 du TS (13,73%); f) EOF3 du TS (10,93%)

## 3.2.4. Réponse au test des modes de climat

- Les informations de trois premiers EOFs ont une grande importance, les structures spatiales sont dominées par l'effet des grandes échelles
- Représentation plus détaillée
- Modification des modes de climat avec une inclinaison et une propagation vers le Nord et l'Est

# Synthèse de la troisième parties : accentuation d'effet de nesting (raffinement de maille)

- ❖ Accentuation des modifications (description détaillée, intensité de changement plus forte)
- ❖ Contraste évident et plus structuré
- ❖ Modification de modes de climat avec une inclinaison / propagation vers le Nord et l'Est

# Conclusion

## Production du processus de relaxation :

- une reproduction imparfaite avec les problèmes aux bords et le changement de la variabilité régionale
- forte intensité de circulation atmosphérique (hiver) a une bonne reproduction du phénomène aux grandes échelles
- développement dynamique aux petites échelles
- modification sur le processus physique, par exemple de la continuité du mouvement

## Influence du système de TWN :

- amélioration partielle avec moins d'incohérence aux bords
- modification sur la variabilité interne
- changement du climat global

## Effet de raffinement de maille

- accentuation des réactions
- contraste plus évidente et structurée
- modification de modes de climat (inclinaison / propagation)

# Perspectives

- ❖ Approfondir les études sur la compréhension du TWN et l'effet de raffinement de maille
- ❖ Comprendre l'effet du changement climatique
- ❖ Sensibilité de configuration de la force de relaxation
- ❖ Comparaison avec les simulations de WRF