

DESAGREGATION DYNAMIQUE HAUTE RESOLUTION SPATIALE DU CLIMAT DU CENTRE EST DE LA FRANCE PAR LE MODELE CLIMATIQUE REGIONAL ARW/WRF

CASTEL T.^{1,2}, XU Y.¹, RICHARD Y.¹, POHL B.¹, CRETAT J.¹, THEVENIN D.³, CUCCIA C.¹,
BOIS B.¹, ROUCOU P.¹

¹ Centre de Recherches de Climatologie, UMR 5210 CNRS-Université de Bourgogne, 6 Boulevard Gabriel, 21000 Dijon, 03 80 39 38 23. tcastel@u-bourgogne.fr

² Département Agronomie-Environnement/AgroSup Dijon, 26 Bd. Dr Petitjean, 21000 Dijon

³ Centre Départemental de la Météorologie 21 Météo France, 21000 Dijon

Résumé : Ce travail analyse les capacités du modèle climatique régional ARW/WRF à reproduire les principaux traits du climat (températures de surface et précipitations) du Centre Est de la France à des résolutions spatiales fines, et pour les années 1991 et 2003. La simulation utilise pour la désagrégation du signal une descente d'échelle basée sur trois domaines emboîtés de maille variable de 120 km, 30 km et 7,5 km. Les conditions latérales sont imposées toutes les 6 heures par les ré-analyses ERA-Interim. Les températures et les précipitations observées par le réseau de mesures de Météo-France Bourgogne sont utilisées pour l'évaluation. Les simulations reproduisent bien la température ($R^2 \sim 0,95$ et pente $\sim 0,97$) avec une biais froid moyen de $-0,73^\circ\text{C}$. La corrélation entre les précipitations mensuelles simulées et observées est faible avec de très fort biais humides pour le printemps et l'été 2003. Des expériences numériques montrent la forte sensibilité des précipitations à l'occupation du sol et à la physique et microphysique des nuages et des cumulus.

Mots-clés : Désagrégation dynamique, WRF, température, précipitation

Abstract - Assessment of Dynamic Downscaling of the Continental East French Regional Climate at high-resolution using the ARW/WRF model. This work examines the performance of the ARW/WRF regional climate model in simulating the observed surface temperature and precipitation over the Centre-East part of France for years 1991 and 2003. Three nested domains of 120 km, 30 km and 7.5 km horizontal grid spacing are used for the downscaling of the 6-hours ERA-Interim data. Simulated temperatures in WRF corroborate the observation ($R^2 \sim 0.95$ and slope ~ 0.97) with a mean cold bias of -0.73°C . Correlation between monthly simulated and observed precipitation are low. A large wet bias is noted in WRF during the spring and summer seasons of 2003. Numerical experiments show that largest precipitation biases are strongly Land-Use/Land-Cover as well as microphysic and cumulus schemes dependent.

Keywords : Dynamic downscaling, WRF, temperature, precipitation

Introduction

Le contexte climatique du Centre-Est de la France et en particulier de la Bourgogne évolue depuis 1961 avec une réchauffement global observé de $+1,9^\circ\text{C}$ ($\pm 0,3^\circ\text{C}$) et des régimes de précipitation modifiés (intensité et nombre de jour de pluie), déficit au printemps et excès à l'automne (Cuccia 2008). Cette évolution nécessite de décliner la variabilité climatique à l'échelle des saisons et des territoires. Le passage des signaux climatiques de large échelle résolue par les Modèles Climatiques Globaux (MCG) jusqu'aux échelles fines est un domaine actif et récent de la recherche en climatologie (Laprise 2008). La régionalisation dynamique s'appuie sur un modèle de climat dont la résolution (i.e. taille de la maille horizontale) est plus fine que celles des MCG. Ces modèles peuvent être selon Planton (2003) :

- soit globaux (MCG) avec la capacité de faire varier sa résolution (i.e. Zoom) permettant de mieux décrire une région particulière du globe;
- soit à aire limitée car au lieu de considérer l'ensemble du globe, ils sont limités à un domaine défini par l'utilisateur. On parle dans ce cas de Modèle Climatique Régional (MCR).

D'après Giorgi (2006), les MCR ont actuellement atteint un degré de fiabilité et de résolution utile qui apporte une valeur ajoutée aux études de régionalisation climatique. Toutefois, s'ils réduisent dans une certaine mesure les biais observés dans les MCG, les MCR

souffrent des mêmes incertitudes que les modèles de grandes échelles (Jacob et al. 2007).

Nous utilisons ici le modèle ARW/WRF pour désagréger sur le Centre-Est de la France les données climatiques issues des réanalyses des deux années 1991 et 2003. Ces deux années présentent un régime de précipitations comparable, mais se distinguent fortement quant à leurs températures. Ce contraste climatique préfigure d'une certaine façon le type d'évolution attendu dans le cadre du changement climatique. Les ré-analyses sont particulièrement adaptées pour piloter et évaluer les MCR. Ce travail présente des résultats de validation basés sur les données d'observation du réseau Météo France Bourgogne. Notre objectif est 1) d'examiner la performance du modèle à reproduire à la maille ré-échantillonnée de 5 km les principaux traits du climat sur la Bourgogne et 2) d'identifier et d'analyser la combinaison des schémas physiques permettant de reproduire le plus fidèlement possible le climat observé. La section 2 présente brièvement le modèle WRF. L'approche expérimentale est décrite à la section 3. La section 4 présente la comparaison entre les données observées et simulées. La discussion et les principales conclusions de ce travail sont présentées à la section 5.

1. Présentation du modèle climatique régional

Le modèle ARW/WRF appartient à la dernière génération des modèles climatiques régionaux qui servent aussi bien à la prévision météorologique qu'aux recherches sur le climat. Le noyau du modèle est non-hydrostatique et présente l'état de l'art de la modélisation de la dynamique de l'atmosphère à fine échelle. Les principaux schémas physiques implémentés sont : la microphysique des nuages, les cumulus, la couche limite planétaire (PBL), l'interaction surface continentale-atmosphère (LSM) et le rayonnement courtes et grandes longueurs d'ondes (Skamarok et al. 2008). La désagrégation du signal climatique se fait par descente d'échelle. Le modèle utilise l'emboîtement successif de domaines dont l'emprise géographique diminue parallèlement à l'augmentation de la résolution (grain de la maille) horizontale. Les domaines parents fournissent les conditions aux bornes des domaines enfants (on parle dans ce cas de *one way nesting*). A l'opposé les résultats des simulations des domaines enfants peuvent être transmis aux domaines parents (on parle ici de *two-way nesting*). Un guidage (i.e. *nudging*) peut être appliqué au premier domaine pour prévenir les éventuelles dérives du modèle régional en particulier pour les simulations longues. Le guidage ne s'applique pas aux domaines enfants afin qu'il puissent librement développer les traits du climat à fine échelle. Enfin le couplage entre le LSM et les basses couches de l'atmosphère nécessite une description précise du sol, de la végétation, de l'urbain, des plans d'eau et de la topographie en adéquation avec la maille du domaine.

2. L'approche expérimentale

La figure 1 présente les trois domaines emboîtés de maille horizontale 120, 30 et 7,5 km utilisés dans cette étude. Le Domaine 1 couvre une aire géographique relativement étendue qui comprend au sud la Méditerranée ainsi qu'une partie de l'Afrique et au nord une partie des pays scandinaves. La largeur du domaine est importante afin d'intégrer une grande partie de l'Atlantique Nord. Ce large domaine assure une bonne représentation des systèmes météorologiques synoptiques qui balaient la France d'Ouest en Est. Le deuxième domaine, moins étendu, couvre la France et une partie de l'Europe de l'Ouest. Une grande distance entre le domaine 1 et 2 est nécessaire avant que la dynamique de l'échelle large développe des traits du climat d'échelle plus fine (Leduc and Laprise 2009). Le domaine 3 couvre la partie Centre-Est de la France et est centré sur la Bourgogne délimitée par le domaine d04 qui n'est pas utilisé dans l'étude. 29 niveaux verticaux sont utilisés dans le modèle avec la plus fine résolution (20m à 100m) dans la couche limite. Les simulations débutent à 00h00 le 1^{er} juin 1990 (2002) et se terminent le 30 avril 1992 (2004) à 18h00. Les premiers mois de simulation

servent de période d'équilibrage (*spin-up*) temporel.

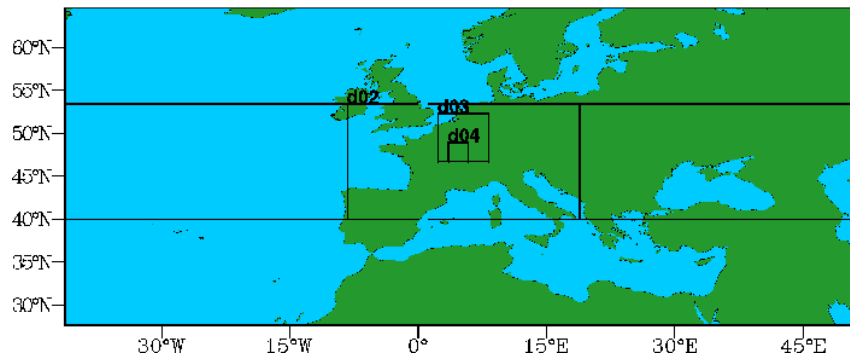


Figure 1: Domaines utilisés pour les simulation avec ARW/WRF. La résolution pour chaque domaine est : domaine 1 = 120 km; domaine 2 = 30 km et domaine 3 = 7.5 km. Le domaine 4 indique le position de la région Bourgogne.

Les conditions latérales sont imposées toutes les 6 heures par les données ERA-Interim de résolution 1,5° (Simmons et al. 2007; Mooney et al. 2010). Nous avons travaillé en deux temps. Une première configuration standard a été utilisée comme base pour évaluer la performance du modèle. Les combinaisons suivantes ont ensuite été construites comme des variantes de la combinaison standard. Le tableau 1 présente les combinaisons de paramétrisation utilisées dans nos simulations.

Tableau 1 : Configurations de WRF/ARW utilisées pour la désagrégation climatique sur le Centre-Est de la France. Nous renvoyons le lecteur à Skamarock et al. 2008 pour plus de détails sur les données et schémas physiques utilisés.

Configurations	Occupation du sol	Microphysique	Cumulus	PBL
1 (standard)	USGS	Kessler	Kain-Fritch	YSU
2	Modis	Kessler	Kain-Fritch	YSU
3	Modis	WSM6	Kain-Fritch	YSU
4	Modis	Morrison	Kain-Fritch	YSU
5	Modis	WSM6	Grell-Devenv	YSU
6	Modis	WSM6	Grell-Devenv	ACM2

Le choix des combinaisons découle d'un processus itératif. Ce processus est basé sur la performance (écart entre observation et simulation) du modèle à reproduire les températures minimales, maximales et les cumuls mensuels de précipitation. Pour les températures la comparaison est conduite à la maille de 5 km. L'interpolation des températures (i.e. *up-scaling*) est basée sur l'altitude fournie par le Modèle Numérique de Terrain (MNT) de l'IGN ré-échantillonné à 5 km. La méthode comprend les 3 étapes suivantes (Xu et al. 2010) :

1. Une régression linéaire pour chaque jour de 1991 et 2003 entre la température observée aux 89 stations météo-France et l'altitude;
2. Une sélection des jours affichant une $R^2 > 0,3$ et une pente $\sim 0,6 \pm 0,1^\circ\text{C}/100\text{m}$;
3. Un calcul de la carte des températures pour chaque jour sélectionné et pour chaque maille.

La comparaison spatiale se fait maille-à-maille et pour la température moyennée à partir des jours sélectionnés. Cette approche permet de minimiser les biais liés à l'échelle de comparaison et d'avoir une bonne estimation quant à la qualité spatiale des simulations. La confrontation a également été réalisée au pas de temps mensuel. Dans ce cas, la moyenne mensuelle des Tmax et des Tmin est calculée à partir des 89 stations et de l'ensemble des mailles du modèle situées sur la Bourgogne. Pour les précipitations, plus de 170 stations ont été utilisées pour le calcul du cumul moyen mensuel. Excepté pour la comparaison spatiale le

travail s'appuie sur les résultats obtenus à partir de l'ensemble des journées de 1991 et 2003.

3. Résultats de désagrégation des températures et des précipitations

La figure 2 présente les résultats de comparaison entre les températures (A) et les précipitations (B) observées et simulées à partir de la configuration standard et pour le domaine 3.

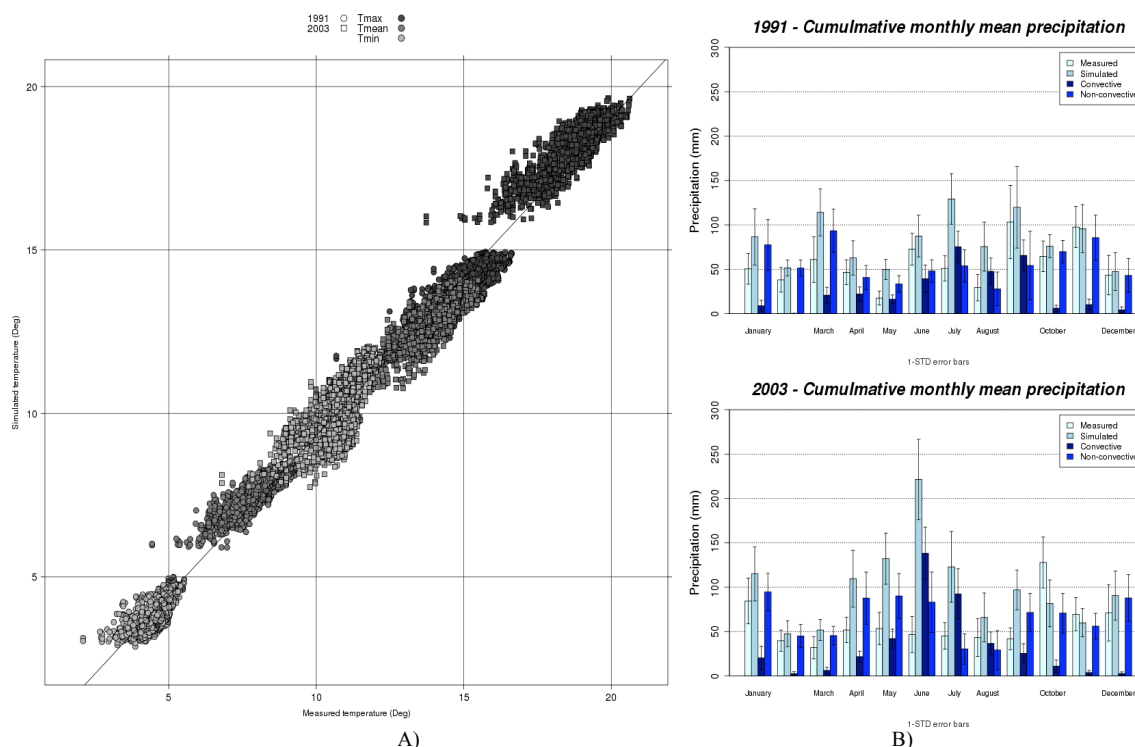


Figure 2: A) Comparaison observation-simulation des A) Tmax, Tmean et Tmin et B) des cumuls mensuels précipités. Les précipitations simulées sont décomposées en pluie d'origine convective et non-convective.

Les températures de surface sont correctement simulées par le modèle. Outre une très forte corrélation ($R^2 > 0,95$), les points s'alignent sur une droite dont la pente est égale à 0,97. Ce résultat montre que le modèle reproduit finement la structure spatiale des températures pour les jours de 1991 et de 2003 où un gradient vertical de températures se met en place. Un biais froid moyen de $-0,76^{\circ}\text{C}$ est observé. Ce biais n'est pas homogène et il augmente avec la température. Le cycle annuel (résultats non présentés) des Tmin est bien reproduit ($R^2 \approx 0,9$) et montre un faible biais moyen froid respectivement de $-0,3^{\circ}\text{C}$ et de $-0,02^{\circ}\text{C}$ pour 1991 et 2003. Ce biais n'est pas homogène sur l'année avec des biais froids pour le printemps et l'été, et des biais chauds pour l'automne et l'hiver. Ces biais chauds n'excèdent pas $+2^{\circ}\text{C}$. Pour les Tmax les résultats sont plus contrastés. Si le cycle annuel est également bien reproduit il apparaît de fort biais froids mensuels en particulier pour les mois les plus chauds Juin, Juillet et Août. Ces biais sont de -5°C au mois d'Août. Pour les deux années, les biais suivent des profils similaires.

La figure 2B présente la confrontation des cumuls de pluie mensuels moyens pour 1991 et 2003. Notons que le modèle permet d'identifier la pluie d'origine convective. Comme attendu, cette dernière augmente au printemps et en été. Les résultats font apparaître un biais humide quasi systématique avec des résultats très contrastés et médiocres en particulier pour 2003. Le biais humide cumulé est de $+340\text{ mm}$ pour 1991 et de $+600\text{ mm}$ pour 2003. Ce biais est très élevé pour les mois de mai, juin et juillet 2003 pour lesquels de fortes anomalies de température en lien avec la vague de chaleur sont observées. Le modèle sur-estime les

précipitations convectives. La répartition spatiale des précipitations montre que ces biais sont très dépendent de l'orographie de la Bourgogne (résultats non présentés). En particulier, ils sont importants sur les zones orientées sud-ouest des massifs montagneux (Morvan et Jura). Plusieurs pistes peuvent être avancées pour expliquer cela : des erreurs dans la dynamique et dans la physique du modèle, des données d'entrée biaisées, une mauvaise paramétrisation. Nous nous sommes principalement concentrés sur les deux dernières pistes. Conformément aux configurations du tableau 1, nous avons évalué pour l'année 2003 l'impact de l'occupation du sol et de la paramétrisation sur le cumul mensuel des précipitations. Les résultats sont présentés à la figure 3.

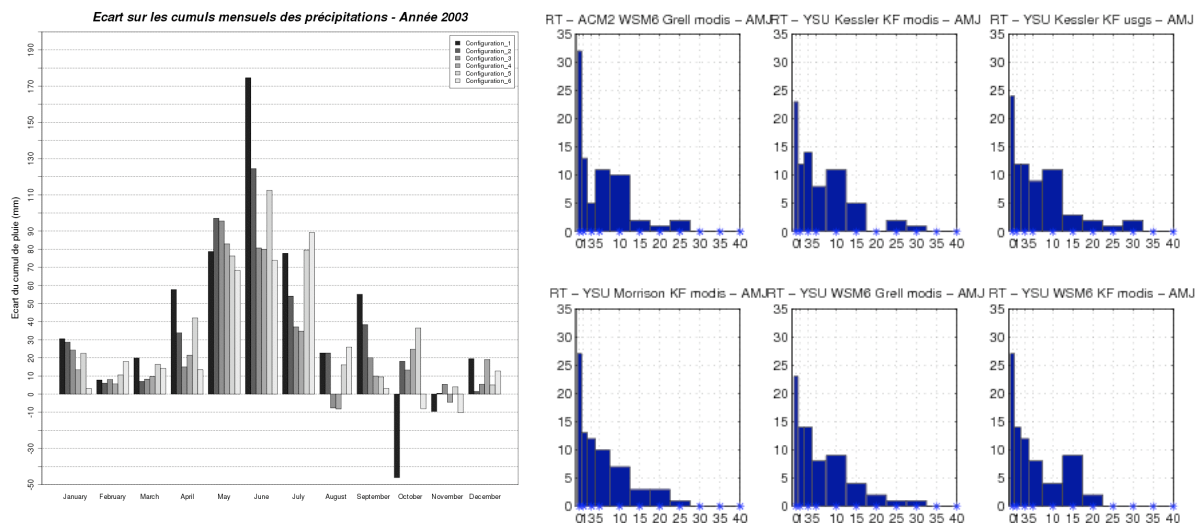


Figure 3 : Ecart entre le cumul de pluie mensuel simulé – observé et la distribution des jours de pluie issus des 6 configurations de simulation présentées au tableau 1.

Nous observons tout d'abord une amélioration significative (R^2 passe de 0.04 à 0.43) lorsque une occupation du sol plus récente est utilisée. En effet les données Modis ont été obtenues à partir d'image de télédétection haute résolution au cours des années 2000 à 2003 alors que les données issues de l'USGS proviennent d'une base constituée au début des années 1990. Les données issues de Modis prennent également mieux en compte la phénologie de la végétation (Lawrence and Chase 2007). Ces résultats sont améliorés par l'utilisation de schémas de microphysique plus précis sur les phases de l'eau atmosphérique. Ainsi la configuration 4 permet de réduire le biais de moitié avec un $R^2 \sim 0,65$. Les configurations 5 et 6 ne montrent pas une grande amélioration et même une légère détérioration pour le configuration 5 qui semble indiquer un antagonisme entre certains schémas de microphysique et de PBL. La distribution générale des pluies pour l'ensemble des configurations est classique. On observe que la configuration 4 affiche un distribution plus lissée. Alors que pour les autres configurations les classes de 10 mm ou 15 mm sont plus fortement représentées. Cela indique la sur-estimation des pluies convectives par les schémas de microphysique et de PBL retenus dans ces configurations.

4. Discussion et conclusion

Ces résultats montrent clairement l'impact de la précision des données statiques d'occupation du sol et de la paramétrisation physique sur la simulation régionale du climat. Concernant la température, l'ensemble des simulations montrent des résultats assez similaires. De forts biais froids sont observés sur les Tmax des données des réanalyses au printemps et en été. Le biais froid des Tmax simulées par WRF est principalement dû à la large échelle. Notons que les simulations haute résolution réduisent néanmoins le biais froid des Tmax sans le gommer. Pour les Tmin les légers biais froids mais surtout les biais chauds sont

principalement imputables aux limites du modèle régional (Zhang et al. 2009). La sur-estimation des précipitations est significativement réduite par des données d'occupation du sol actualisées et une paramétrisation physique fine. Les données Modis permettent de mieux appréhender l'albédo et les flux de chaleur latente de la surface qui jouent un rôle déterminant dans la simulation des précipitations (Lawrence and Chase 2007). D'autre part, Jiao and Caya (2006) ont montré qu'une mauvaise prise en compte du mélange dans les bases couches tendait à sur-estimer l'humidité spécifique dans la PBL en entraînant des pluies d'été plus importantes sous les moyennes latitudes. Une analyse des profils verticaux d'humidité spécifique est en cours pour évaluer l'impact de ces mécanismes sur les biais humides observés au printemps et en été en fonction notamment de l'occupation du sol. Nous supposons en effet un couplage fort entre ces éléments dans la simulation du climat à fines échelles.

Ce travail montre clairement que WRF/ARW est un outil pertinent pour simuler et analyser la variabilité climatique régionale sur le Centre-Est de la France. Outre sa capacité à prédire au biais près les températures et les précipitations, le modèle est performant pour reproduire leur structure spatiale. Il ouvre d'importantes perspectives pour mieux documenter les déterminants de la variabilité climatique et pour analyser l'impact des changements climatiques aux échelles régionales et locales (Bonnefoy et al. 2009). Nous montrons néanmoins qu'une phase préalable de réglage est nécessaire afin de réduire les biais pour évaluer l'impact de la variabilité climatique dans le cadre notamment des changements climatiques actuels et projetés. Enfin nos résultats nécessitent d'être complétés en particulier pour évaluer la stationnarité des biais sur les températures et les précipitations.

Remerciements :

Les simulations ont été réalisées à partir des ressources des Centres de Calcul de l'Université de Bourgogne (CCUB) et de la région Haute Normandie (CRIHAN).

Bibliographie

- Bonnefoy C., Castel T. and Madelin M., 2009: Evaluation du modèle climatique régional WRF appliqué à la Bourgogne viticole, neuvième rencontre de Théo Quant, Besançon 4-6 Mars, 8p.
- Cuccia C., 2008: Spatialisation des évolutions climatiques observées en Bourgogne depuis 1945, Mémoire de Master Recherche, Université de Bourgogne, 50p.
- Giorgi F., 2006: Regional climate modeling: status and perspectives. *J. Phys.*, 139:101-118.
- Jacob, D. et al., 2007: An intercomparison of regional climate models for Europe: model performance in present-day climate, *Climatic Changes*, 53-70, 2007.
- Jiao and Caya, 2006: An Investigation of Summer Precipitation Simulated by the Canadian Regional Climate Model, *Monthly Weather Review*, 134, 919-932.
- Laprise R., 2008: Regional climate modelling, *Journal of Computational Physics*, 227, 3641-3666.
- Leduc M. and Laprise R., 2009: Regional climate model sensitivity to domain size, *Clim. Dyn.*, 32, 833-854, DOI 10.1007/s00382-008-0400-z.
- Lawrence P. J. and Chase T. N., 2007: Representing a new MODIS consistent land surface in the Community Land Model (CLM 3.0), *Journal of Geophysical Research*, 112, G01023, doi:1029/2006JG000168.
- Mooney P. A., Mulligan F. J. and Fealy R., 2010: Comparison of ERA-40, ERA-Interim and NCEP/NCAR reanalysis data with observed surface air temperatures over Ireland, *Int. J. Climatol.* DOI : 10.1002/joc.2098.
- Planton S., 2003: A l'échelle des continents : le regard des modèles, *C. R. Geoscience* 335, 535-543.
- Simmons A., Uppala S., Dee D. and Kobayashi S., 2006: ERA-Interim : New ECMWF reanalysis products from 1989 onwards. *ECMWF Newsletter* 110, 26-35.
- Skamarock, W. C., J. B. Klemp, J. Dudhia, D. O. Gill, D. M. Barker, M. Duda, X.-Y. Huang, W. Wang and J. G. Powers, 2008: A Description of the Advanced Research WRF Version 3 NCAR Technical Note, 125p.
- Xu Y., Castel T. and Richard Y., 2010: Dynamic Downscaling of GCM ARAPEGE Projections by WRF model : A Study of Burgundy Regional Climate in the Past and Future, in preparation.
- Zhang Y., Dulière V., Mote P. W., Salathé Jr. E. P., 2009: Evaluation of WRF and HadRM Mesoscale Climate Simulations over the U.S. Pacific Northwest, *Journal of Climate*, 22, 5511-5526.