

CIRCULATION ATMOSPHÉRIQUE SIMULÉE PAR LES MODÈLES DE CIRCULATION GÉNÉRALE EN EUROPE DE L'OUEST : ÉVALUATION ET PROJECTIONS FUTURES.

BELLEFLAMME A., FETTWEIS X. et ERPICUM M.

Laboratoire de Climatologie et Topoclimatologie, Université de Liège, Allée du 6-août, 2, 4000 Liège, Belgique, A.Belleflamme@ulg.ac.be, Xavier.Fettweis@ulg.ac.be, Michel.Erpicum@ulg.ac.be

Résumé : La circulation atmosphérique simulée par les modèles de circulation générale est utilisée à la fois pour forcer les méthodes de mise à l'échelle et pour faire des projections du climat futur. Il est donc essentiel de l'évaluer. Pour cela, une classification automatique de types de circulations est appliquée à la hauteur géopotentielle journalière à 500 hPa. Cette classification est réalisée pour les réanalyses NCEP-NCAR 1 puis les types de circulations individualisés sont imposés aux simulations de six modèles de circulation générale. Pour le climat récent (scénario 20C3M), il apparaît que des biais dans la hauteur géopotentielle moyenne et une sous-estimation de la variabilité des circulations ne permettent pas à la plupart des modèles de simuler correctement la circulation atmosphérique en Europe de l'ouest. Pour le climat futur (scénario A1B), une hausse généralisée de la hauteur géopotentielle est projetée, entraînant l'apparition de nouveaux types de circulations.

Mots-clés : Circulation atmosphérique, Classification de types de circulations, Modèles de circulation générale, Europe de l'ouest

Abstract : *Atmospheric circulation simulated by general circulation models over western Europe : evaluation and future projections.* Atmospheric circulation simulations from general circulation models are used as forcing for downscaling methods and for future projections. Thus, it is essential to evaluate them. An automatic circulation type classification is applied to daily 500 hPa geopotential height data. Firstly, the classification is done for the NCEP-NCAR 1 reanalysis, and then the main circulation types are imposed to the simulations of six general circulation models. For recent climate (20C3M scenario), it appears that most models are not able to simulate well the circulation over western Europe, due to biases in the mean geopotential height and an underestimation of the circulation variability. For future climate (A1B scenario), a general increase of the geopotential height is projected, leading to the emergence of new circulation types.

Keywords : Atmospheric circulation, Circulation type classification, General circulation models, Western Europe

Introduction

Les projections du climat futur sont basées sur les simulations des modèles de circulation générale (GCM). Ces mêmes simulations servent également comme données de forçage pour les méthodes de mise à l'échelle (downscaling) comme les modèles climatiques régionaux. La qualité des simulations des GCM est donc essentielle vu que celles-ci sont à la base de toutes les projections futures (Wilby et Wigley, 2000). De plus, la circulation atmosphérique simulée par les GCM influence fortement les variables de surface comme la température et les précipitations. Enfin, vu qu'elle est pratiquement indépendante de la surface, de la topographie, de l'affectation du sol ..., on peut supposer qu'elle est mieux simulée que la température et les précipitations vu la faible résolution spatiale des GCM (Yarnal *et al.*, 2001).

1. Données

L'analyse présentée ici est faite sur base de la hauteur géopotentielle journalière à 500 hPa pour les mois de juin, de juillet et d'août sur un territoire de 1700 km de côté centré sur la Belgique et recouvrant la majeure partie de l'Europe de l'ouest. Les données de six modèles de circulation générale (BCCR-BCM2.0, CCCma-CGCM3.1/T47, CCCma-CGCM3.1/T63, IPSL-CM4_v1, UKMO-HadCM3 et UKMO-HadGEM1) proposés par le GIEC dans son dernier rapport (AR4) (Randall *et al.*, 2007) ont pu être obtenues pour le scénario 20C3M (20th century climate in coupled models) qui simule le climat actuel avec les conditions de forçage radiatif de ces dernières décennies sur la période 1961-1990 et pour le scénario socio-économique d'émissions de gaz à effet de serre A1B (scénario moyen) sur les périodes 2046-2065 et 2081-2100. Ces données sont comparées aux réanalyses NCEP-NCAR 1 (National Centers for Environmental Prediction – National Center for Atmospheric Research) et ERA-

40 du ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) sur la période 1961-1990. Afin de pouvoir être intégrées par l'algorithme de classification, toutes les données ont été interpolées sur une grille de 100 km de résolution indépendamment de leur résolution initiale.

2. Méthode

La méthode employée est une classification automatique de types de circulations atmosphériques. Elle regroupe les situations de hauteur géopotentielle journalière similaires sur base d'un indice de similitude proche d'une corrélation afin de mettre en évidence quelques types représentatifs de la circulation atmosphérique de la région considérée (Fettweis *et al.*, 2010 ; Philipp *et al.*, 2010 ; El-Kadi et Smithson, 1992). Cette démarche permet ainsi une analyse des simulations des GCM à l'échelle journalière en considérant des types de circulations relativement homogènes, contrairement aux analyses habituelles qui se limitent aux moyennes mensuelles et qui négligent ainsi la variabilité des circulations atmosphériques (Bardossy *et al.*, 2002). Or, c'est précisément cette variabilité qui permet d'expliquer les canicules, les sécheresses et de manière générale les événements climatiques extrêmes. Notre but est donc, à l'aide de la classification, d'analyser en particulier l'aptitude des GCM à simuler la variabilité de la circulation atmosphérique (Anagnostopoulou *et al.*, 2009 ; Demuzere *et al.*, 2008 ; Kysely et Huth, 2006). Pour cela, la classification est d'abord appliquée aux données des réanalyses NCEP-NCAR 1 sur la période 1961-1990 afin de mettre en évidence les principaux types de circulations. Cette classification sera utilisée comme référence pour forcer les classifications des données des GCM. En effet, comme la méthode de classification est automatique, si elle est appliquée à des jeux de données différents, les classes formées seront différentes, empêchant toute comparaison. Vu qu'ici les classes sont imposées et donc identiques pour tous les jeux de données, la comparaison peut se faire uniquement sur base des différences de fréquences pour chaque classe.

Dans un premier temps, les simulations des GCM pour le climat récent (scénario 20C3M) sont comparées aux réanalyses NCEP-NCAR 1 sur la même période (1961-1990). Ceci permet d'évaluer la capacité des GCM à simuler le climat des dernières décennies ; ce qui est essentiel pour se faire une idée de la fiabilité de leurs projections futures. La même démarche est réalisée pour les réanalyses ECMWF qui servent de validation à la qualité des réanalyses NCEP-NCAR 1. Ensuite, l'analyse est répétée pour les deux périodes futures (2046-2065 et 2081-2100, scénario A1B). La comparaison directe avec les résultats de la classification pour les réanalyses NCEP-NCAR 1 et les simulations 20C3M des GCM permet une analyse détaillée de l'évolution future de chaque type de circulation.

3. Résultats

3.1. Analyse préliminaire

Le tableau 1 reprend la moyenne saisonnière (juin, juillet et août) ainsi que l'écart-type moyen saisonnier de la hauteur géopotentielle à 500 hPa sur l'ensemble du domaine pour les trois périodes de chaque GCM ainsi que pour les réanalyses. Il apparaît clairement que tous les GCM sous-estiment la hauteur géopotentielle pour le climat récent, excepté HadGEM1 qui la surestime légèrement. Pour le futur, les GCM projettent une hausse généralisée de la hauteur géopotentielle moyenne, tout en conservant leurs biais. Ainsi, plusieurs GCM affichent une hauteur géopotentielle moyenne plus proche de celle des réanalyses pour la première période future (2046-2065) que pour le climat récent.

Quant à l'écart-type de la hauteur géopotentielle, qui caractérise la variabilité de celle-ci, la plupart des GCM le sous-estiment fortement, excepté CCCma/T63. Ceci est très important vu

que les résultats de la classification dépendent fortement de la variabilité des données.

Tableau 1 : Moyenne et écart-type saisonniers (juin, juillet et août) de la hauteur géopotentielle à 500 hPa pour les trois périodes considérées pour les réanalyses et les GCM (en m).

Moyenne	BCCR	CCCma/T47	CCCma/T63	HadCM3	HadGEM1	IPSL	NCEP	ECMWF
1961-1900	5686	5653	5657	5683	5725	5656	5703	5704
2046-2065	5723	5711	5723	5745	5780	5706		
2081-2100	5750	5736	5747	5777	5826	5737		

Écart-type	BCCR	CCCma47	CCCma63	HadCM3	HadGEM1	IPSL	NCEP	ECMWF
1961-1900	69,11	88,66	96,82	84,49	86,07	76,93	91,32	94,38
2046-2065	70,48	92,65	97,23	89,53	82,13	78,68		
2081-2100	66,21	94,83	99,54	87,54	81,48	79,27		

3.2. Climat récent

Le nombre de classes a été fixé à 12 car d'une part, tous les principaux types de circulations observés en Europe de l'ouest sont représentés, et d'autre part, ce nombre de classes minimise les écarts des fréquences de chaque classe entre les réanalyses NCEP-NCAR 1 et ECMWF.

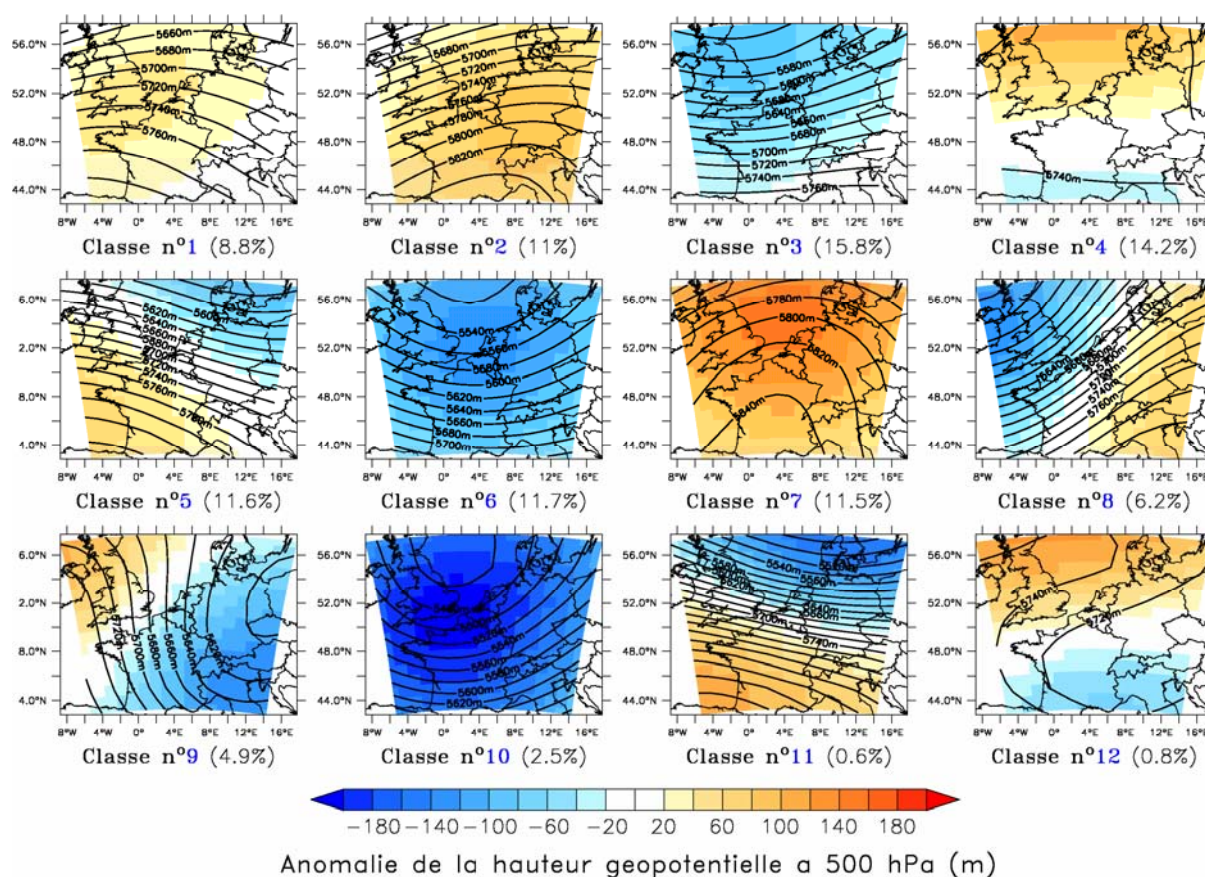


Figure 1 : Résultats de la classification des réanalyses NCEP-NCAR 1 pour les mois de juin, de juillet et d'août sur la période 1961-1990. Les courbes représentent les isohypses à 500 hPa de la circulation moyenne de la classe. La couleur de fond indique l'anomalie de la hauteur géopotentielle à 500 hPa de chaque classe par rapport à la moyenne saisonnière. La fréquence de chaque classe est indiquée entre parenthèses.

Les principaux types de circulations mis en évidence peuvent être divisés en quatre catégories (voir figure 1) : les situations anticycloniques (classes 1, 2, 4 et 7), les situations cycloniques (classes 3, 6 et 10), les flux zonaux (classes 5, 8 et 11) et les flux méridionaux (classe 9). La dernière classe reprend les situations non classées, qui sont donc très rares et diversifiées.

La comparaison des fréquences des GCM et des réanalyses montre que les biais systématiques de la hauteur géopotentielle influencent fortement la répartition des situations de circulations au sein des classes (voir tableau 2). Ainsi, vu que tous les GCM, excepté HadGEM1, sous-estiment la hauteur géopotentielle, les classes présentant une anomalie saisonnière négative (classes 3, 6 et 10) y sont surreprésentées, alors que les classes plus anticycloniques (classes 2 et 7) y sont sous-représentées. L'écart est d'ailleurs d'autant plus grand que le biais de la hauteur géopotentielle moyenne est important. Les classes restantes sont plus ou moins bien représentées selon les GCM, mais il est intéressant de remarquer que globalement, ces classes sont moins présentes dans les jeux de données des GCM présentant un écart-type et donc une variabilité des circulations plus faibles. En particulier, les deux GCM qui sous-estiment le plus fortement la variabilité de la circulation (BCCR et IPSL) ne simulent aucun cas dans la classe 11 et très peu de situations de la classe 5 qui lui est très semblable. Par contre, ils surestiment largement la fréquence de la classe 4 qui présente un gradient très faible et est très proche de la moyenne saisonnière.

On peut conclure de cette analyse que les GCM HadGEM1, HadCM3 et dans une moindre mesure CCCma/T63 sont les plus aptes à simuler le climat des dernières décennies en Europe de l'ouest. Toutefois, la marge d'erreur reste très élevée même pour ces GCM en comparaison avec les écarts entre les réanalyses NCEP-NCAR 1 et ECMWF. Ainsi, même si les principaux types de circulations sont représentés, leur fréquence et leur hauteur géopotentielle moyenne sont fortement influencées par les biais systématiques de la hauteur géopotentielle et par une mauvaise appréhension de la variabilité de la circulation atmosphérique.

Tableau 2 : Fréquence (en %) de chaque classe pour les réanalyses et les GCM pour le climat récent (1961-1990, scénario 20C3M) et la deuxième période future (2081-2100, scénario A1B). Les fréquences en gras sont significativement différentes au seuil de significativité de 5% de celles des réanalyses NCEP-NCAR 1 d'après un test T de student (Demuzere *et al.*, 2008).

Classe	NCEP	ECMWF	BCCR		CCCma/T47		CCCma/T63		HadCM3		HadGEM1		IPSL	
	1961-1990	1961-1990	20C3M	A1B	20C3M	A1B	20C3M	A1B	20C3M	A1B	20C3M	A1B	20C3M	A1B
1	8,8	7,1	11,4	15,2	6,8	6,5	6,4	3,9	6,1	5,2	10,2	0,9	8,3	10,5
2	11,0	9,7	8,3	26,6	3,7	12,4	5,2	8,2	6,2	14,2	14,2	8,8	2,2	13,9
3	15,9	13,3	34,7	12,0	21,8	11,4	15,4	9,4	23,1	8,3	14,5	1,3	18,7	9,2
4	14,3	13,9	15,2	8,7	8,4	6,7	9,7	8,7	12,5	7,3	11,1	2,3	21,7	27,1
5	11,6	12,6	2,6	6,2	9,2	14,8	10,4	13,3	9,3	7,6	13,7	5,7	1,2	4,9
6	11,7	11,3	14,9	2,0	28,3	7,4	23,6	5,8	17,8	2,1	8,6	0,3	31,9	8,2
7	11,6	13,1	4,3	21,4	3,6	27,1	4,2	32,6	6,0	36,8	19,2	51,6	0,7	20,9
8	6,2	8,2	6,6	6,8	4,7	5,8	5,2	5,7	10,2	7,0	5,2	4,0	3,7	2,6
9	4,9	5,3	0,9	0,3	5,2	2,1	8,9	3,1	4,9	0,6	1,6	0,1	5,0	1,1
10	2,6	2,6	1,2	0,0	7,0	1,4	8,0	1,4	2,0	0,2	0,6	0,0	6,2	1,0
11	0,6	1,2	0,0	0,0	0,5	1,2	1,1	2,7	0,5	0,9	0,7	1,6	0,0	0,1
12	0,8	1,9	0,0	0,8	0,9	3,1	2,0	5,2	1,4	9,9	0,6	23,3	0,7	0,4

3.3. Projections futures

En répétant la même démarche pour les projections des deux périodes futures (2046-2065 et 2081-2100, scénario A1B), on constate que globalement tous les GCM ont les mêmes tendances. Ainsi, les classes 3, 6, 10 (classes cycloniques) et 9 (flux du nord), sont fortement en recul pour tous les GCM (voir tableau 2). La classe 10 qui est la classe avec la hauteur géopotentielle la plus basse, n'apparaît plus dans les données de la deuxième période future des GCM BCCR et HadGEM1. Parallèlement, les deux classes anticycloniques (2 et 7) voient leur fréquence augmenter fortement. Le changement de circulation et l'augmentation de la hauteur géopotentielle sont tels que la classe 7, qui est la classe la plus anticyclonique, devient la classe principale sur la période 2081-2100 pour presque tous les GCM. Ceci est bien en accord avec un réchauffement de la région, vu que la hauteur géopotentielle augmente avec la température pour un même type de circulation. Ainsi, les classes à hauteur géopotentielle plus élevée gagnent en importance au détriment des classes présentant une hauteur géopotentielle

inférieure à la moyenne saisonnière. Seul le GCM HadGEM1 indique une diminution de la fréquence de la classe 2, mais rappelons qu'il surestime la hauteur géopotentielle moyenne saisonnière. Ainsi, la hauteur géopotentielle de la classe 2 est inférieure à la moyenne totale de ce GCM. Une augmentation supplémentaire diminuera donc bien la fréquence de cette classe. Les classes restantes, qui, comme nous l'avons déjà constaté pour le climat récent, sont plus dirigées par la capacité des GCM à représenter la variabilité de la circulation que par la hauteur géopotentielle moyenne, restent relativement stables au cours des projections futures. Remarquons toutefois que la fréquence de la classe 11 augmente pour tous les GCM, excepté BCCR où elle reste complètement absente.

La fréquence de la dernière classe, qui reprend les situations non classées, est en augmentation pour tous les GCM sauf IPSL où elle diminue. En particulier pour les GCM HadCM3 et HadGEM1, cette classe atteint une fréquence importante face aux autres classes. Il convient donc de l'analyser plus en détail. Pour cela, la classification est appliquée uniquement aux situations de la classe 12 des GCM sur la période 2081-2100. Une classification à 3 classes suffit à mettre en évidence deux nouveaux types de circulations (voir figure 2), le troisième regroupe à nouveau les éléments non classés et ne sera pas considéré plus en détail. Le premier qui compte près de 3/4 des situations de la classe 12 est un anticyclone très marqué centré sur la mer méditerranée alors que le deuxième, qui reprend environ 1/5 des situations, présente une circulation avec un flux du sud-ouest proche de la classe 8 mais avec une hauteur géopotentielle nettement plus élevée. Ainsi, la classification a détecté deux nouveaux types de circulations, similaires à des types déjà existants, mais avec une hauteur géopotentielle plus élevée. Notons que ces types sont les mêmes pour tous les GCM dont la fréquence de la classe 12 pour la deuxième période future est significativement différente de celle des réanalyses NCEP-NCAR 1.

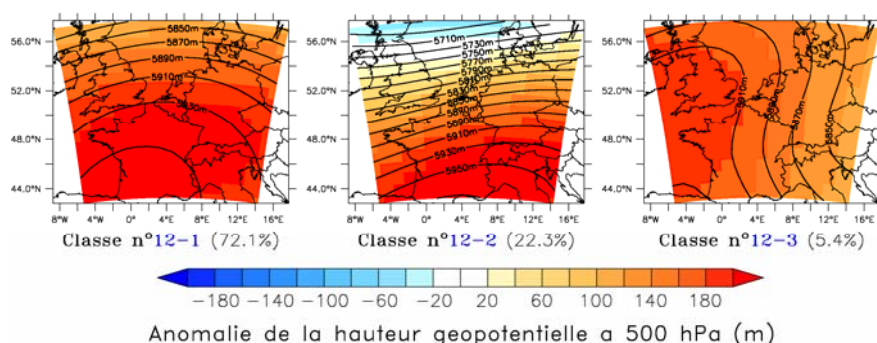


Figure 2 : Classification de la classe 12 du GCM HadGEM1 sur la période 2081-2100. Idem que pour la figure 1 sauf que les fréquences sont calculées par rapport au nombre de situations de la classe 12 uniquement. L'anomalie est toujours calculée par rapport à la moyenne saisonnière des réanalyses NCEP-NCAR 1.

Remarquons que le seul GCM à surestimer la hauteur géopotentielle moyenne du climat récent (HadGEM1), compte près de 70 % de ses situations de la période 2081-2100 dans seulement deux classes (7 et 12-1) qui sont les classes avec la hauteur géopotentielle la plus élevée. Finalement, il apparaît également que les GCM qui sous-estiment le plus la hauteur géopotentielle moyenne du climat récent (BCCR, CCCma/T47, CCCma/T63 et IPSL), ont des résultats pour la première période future plus proches des réanalyses NCEP-NCAR 1 que ceux du climat récent. Ainsi, les changements simulés pour le futur par ces GCM sont moins importants que leurs incertitudes à simuler le climat récent.

Conclusion

Cette étude montre que la classification automatique de types de circulations atmosphériques permet d'évaluer et d'étudier les simulations des modèles de circulation générale à l'échelle journalière. En effet, en groupant les moyennes journalières de la hauteur géopotentielle selon leur ressemblance, elle permet une analyse très fine avec une attention particulière à l'aptitude des GCM à reproduire la variabilité de la circulation atmosphérique.

L'évaluation des simulations des GCM pour le climat récent a mis en évidence les difficultés des GCM à reproduire correctement les différentes circulations et en particulier leur fréquence qui est fortement influencée par des biais dans la hauteur géopotentielle moyenne et par une forte sous-estimation de la variabilité de la circulation par la plupart des GCM.

L'analyse des projections futures indique une augmentation généralisée de la hauteur géopotentielle, ce qui aboutit pour certains GCM à l'individualisation de deux nouveaux types de circulations semblables à des types préexistants mais avec une hauteur géopotentielle moyenne nettement plus élevée. Par ailleurs, plusieurs GCM projettent des changements de circulations inférieurs à leurs incertitudes pour le climat récent, ce qui permet de douter de la fiabilité de ces simulations.

Bibliographie

- Anagnostopoulou C., Tolika K., Maheras P., 2009 : Classification of circulation types : a new flexible automated approach applicable to NCEP and GCM datasets. *Theoretical and Applied Climatology*, **96**(1-2), 3-15
- Bardossy A., Stehlik J., Caspary H.-J., 2002 : Automated objective classification of daily circulation patterns for precipitation and temperature downscaling based on optimized fuzzy rules. *Climate Research*, **23**, 11-22
- Demuzere M., Werner M., van Lipzig N., Roeckner E., 2008 : An analysis of present and future ECHAM5 pressure fields using a classification of circulation patterns. *International Journal of Climatology*, **29**, 1796-1810
- El-Kadi A., Smithson P., 1992 : Atmospheric classifications and synoptic climatology. *Progress in Physical Geography*, **16**(4), 432-455
- Fettweis X., Mabilbe G., Erpicum M., Nicolay S., Van den Broeke M., 2010 : The 1958-2009 Greenland ice sheet surface melt and the mid-tropospheric atmospheric circulation. *Climate Dynamics*, doi: 10.1007/s00382-010-0772-8
- Kysely J., Huth R., 2006 : Changes in atmospheric circulation over Europe detected by objective and subjective methods. *Theoretical and Applied Climatology*, **85**, 19-36
- Philipp A., Bartholy J., Beck C., Erpicum M., Esteban P., Fettweis X., Huth R., James P., Jourdain S., Kreienkamp F., Krennert T., Lykoudis S., Michalides S., Pianko K., Post P., Rassilla Alvarez D., Schiemann R., Spekat A., Tymvios F. S., 2010 : COST733CAT - a database of weather and circulation type classifications. *Physics and Chemistry of the Earth*, **35**(9-12), 360-373
- Randall D., Wood R., Bony S., Colman R., Fichefet T., Fyfe J., Kattsov V., Pitman A., Shukla J., Srinivasan J., Stouffer R., Sumi A., Taylor K., 2007 : Climate models and their evaluation. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Solomon S., Qin D., Manning M., Chen Z., Marquis M., Averyt K., Tignor M., Miller H. (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA
- Wilby R., Wigley T., 2000 : Precipitation predictors for downscaling : observed and general circulation model relationships. *International Journal of Climatology*, **20**, 641-661
- Yarnal B., Comrie A., Frakes B., Brown D., 2001 : Developments and prospects in synoptic climatology. *International Journal of Climatology*, **21**(15), 1923-1950