

**DEVELOPPEMENT DE SCENARIOS POUR LES PARAMETRES  
HYDROMETEOROLOGIQUES A THESSALONIKI EN UTILISANT LES  
RESEAUX DE NEURONES ARTIFICIELS**

**DEVELOPMENT OF SCENARIOS FOR HYDROMETEOROLOGICAL  
PARAMETERS IN THESSALONIKI USING ARTIFICIAL NEURAL  
NETWORKS**

**MACHAIRAS C. VAFIADIS M.** Département du Génie Civil. Division d'Hydraulique et du Génie de l'Environnement.

**TOLIKA K.** Ecole de Géologie. Département de Météorologie et de Climatologie. Université Aristote de Thessaloniki. 54124 Thessaloniki, Grèce

**MAHERAS P.** Ecole de Géologie. Département de Météorologie et de Climatologie. Université Aristote de Thessaloniki. 54124 Thessaloniki, Grèce

**ANAGNOSTOPOULOU C.** Ecole de Géologie. Département de Météorologie et de Climatologie. Université Aristote de Thessaloniki. 54124 Thessaloniki, Grèce

**Résumé :** Deux techniques de désagrégation d'échelle différentes (statistique et dynamique) ont été appliquées dans la présente étude pour le développement de futurs scénarios de plusieurs paramètres hydrométéorologiques à Thessaloniki. Les résultats des deux approches présentent des différences. Le modèle statistique montre, en général, une augmentation des indices des précipitations sur une base mensuelle. Au contraire, le modèle dynamique prévoit une diminution des indices de l'étude ; la seule exception est le maximum de l'indice de séquences sèches, aussi bien que d'autres indices durant les mois d'automne.

**Mots clés :** Paramètres hydrométéorologiques, indice de précipitations, scénarios, désagrégation d'échelle statistique, désagrégation d'échelle dynamique, circulation générale, modèles, Thessaloniki

**Abstract:** Two different downscaling techniques (statistical and dynamical) are applied in the present study for the development of future scenarios of several hydrological parameters in Thessaloniki. The results derived from the present differences of the two approaches. The statistical model shows in general an increase of the precipitation indices on a monthly basis. Contrarily, the dynamical models predicts a decrease of the indices under study. The only exception is the maximum dry spell index, as well as the other indices, during the autumn months.

**Key words:** hydrometeorological parameters, precipitation indices, scenarios, statistical downscaling, dynamical downscaling, general circulation models, Thessaloniki

## **INTRODUCTION**

Les caractéristiques principales des précipitations à Thessaloniki, comme la hauteur annuelle, le régime annuel, le nombre de jours de pluie, la variabilité des hauteurs mensuelles et annuelles etc. sont assez bien connus par des études déjà existantes soient

générales, soient spéciales (Maheras, 1979; Angouridakis and als, 1973; Angouridakis, 1975). En outre, les caractéristiques des précipitations journalières et horaires à Thessaloniki ont été traitées par de nombreux chercheurs. Alexandrou (1940) a étudié, pendant une période de neuf ans, la distribution quotidienne des pluies à Thessaloniki. Maheras et al (1980) ont étudié le rythme journalier de la pluie à Thessaloniki, durant la période chaude, 1963-1978 ; Balafoutis et al (1980) ont étudié les précipitations et les orages pendant la période estivale, Maheras et al (1987) ont étudié les caractéristiques des précipitations horaires à Thessaloniki pour la période 1946-1997 et enfin Maheras et al., (2004), Tolika (2006) et Tolika et al., (2006), se sont occupés des développements des méthodes statistiques de désagrégation d'échelle dans le but de construire des scénarios concernant les précipitations en Grèce, où se trouve la station de Thessaloniki.

L'objectif principal de la présente étude est le développement des scénarios pour la pluviométrie et les paramètres hydrométéorologiques (indices des précipitations) dans la région de Thessaloniki pour le 21<sup>e</sup> siècle, en utilisant les résultats des modèles atmosphériques de la circulation générale (GCM, Global Circulation Model).

Dans une première étape, on calcule et on analyse les fluctuations et les tendances à échelle mensuelle des paramètres hydrométéorologiques (précipitations mensuelles, intensité moyenne des précipitations mensuelles, nombre maximal des jours secs consécutifs, valeurs de précipitations supérieures au centile 90<sup>e</sup>, maximum des précipitations cumulées sur 5 jours) dans la station de l'Université Aristote de Thessaloniki (U.A.Th.) pour la période 1958-2005.

Dans une seconde étape, on calcule et on analyse les paramètres hydrométéorologiques pour la période de contrôle de simulation (1960-1990), en utilisant deux techniques différentes (désagrégation d'échelles statistique et dynamique).

Dans une troisième étape, on calcule et on analyse les changements des mêmes paramètres hydrométéorologiques, en utilisant les mêmes méthodes de désagrégation d'échelles, pour la période du futur, scénarios 2070-2100.

Enfin, dans une quatrième et dernière étape, on discute et on analyse les résultats les plus importants de notre étude.

## **DONNEES ET METHODE**

Dans cette étude, on utilise les données journalières des précipitations de la station de Thessaloniki pour la période 1958-2005. Les séries chronologiques ont été examinées afin de vérifier leur homogénéité (Alexandersson, 1986). C'est ainsi que toutes les séries mensuelles sont homogènes, sans avoir des lacunes importantes de données. Par application d'un logiciel approprié, ont été calculés quatre (4) indices des précipitations, à base mensuelle, qui sont décrits analytiquement dans le tableau 1.

**Tableau 1.** Description des indices hydrométéorologiques.

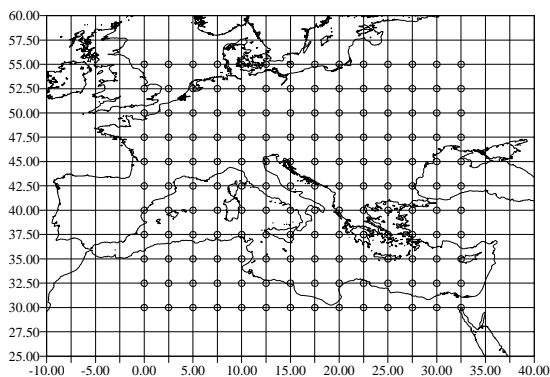
Indice	Paramètre
Pq90	Valeurs de précipitations supérieures au 90 <sup>e</sup> centile (mm/jour)
Pxcdd	Nombre maximal des jours secs consécutifs
Px5d	Maximum des précipitations cumulées sur 5 jours
Pint	intensité moyenne des précipitations (mm/jour)

Dès que l'on a calculé les indices hydrométéorologiques à échelle mensuelle, on a appliqué la méthode des moindres carrés afin d'examiner les tendances des séries chronologiques des indices étudiés. L'ajustement statistique a été examiné par l'utilisation du t-test de Kendall au seuil de  $P \geq 0.05$ .

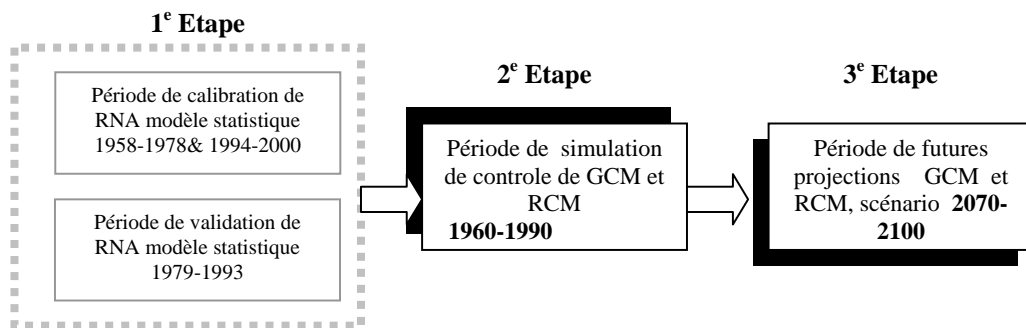
La méthode statistique de désagrégation d'échelle que l'on a développé est basée sur la technologie des réseaux de neurones artificiels (RNA). Comme prédicteurs, on a choisi les géopotentiels au niveau de 500 hPa à cause des relations très élevées, qu'ils présentent avec les précipitations (fenêtre de  $30^{\circ}$  à  $55^{\circ}$  N et de  $0^{\circ}$  à  $32.5^{\circ}$  E, figure 1).

Durant le processus d'évaluation du modèle on a constaté que la structure la plus appropriée a été celle avec un niveau interne (caché) et douze neurones (STARDEX projet 2005, Tolika, 2006). C'est ainsi que le modèle développé a été appliqué tant pour les données de NCEP/NCAR que pour les données de HadAM3P (période 1960-1990 et 2070-2100).

Enfin, on a utilisé les données d'un modèle climatique régional (HadRM3P désagrégation d'échelle dynamique) ayant une analyse spatiale de  $\sim 0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$  et on a calculé tous les indices des précipitations pour les quatre (4) points de grille entourant la station de l'étude. Les résultats du modèle dynamique ont été comparés tant avec les données réelles qu'avec les données simulées. La période de comparaison est celle de 1960-1990, dans le but de faire l'évaluation de deux méthodes. Ensuite, on a analysé les valeurs simulées de deux processus 'climat futur' (prévision) pour la seconde moitié du 21<sup>e</sup> siècle.



**Fig. 1** La fenêtre de géopotentiels (point de grille) qui a été employé pour la désagrégation d'échelle statistique.



## RÉSULTATS

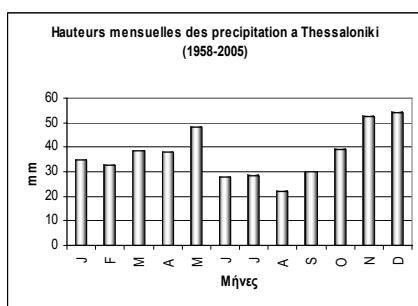
### Étude des indices des précipitations pour la période 1958-2005

Dans la première partie de la présente étude on a fait un effort d'analyser les séries chronologiques de quatre indices choisis pendant une période de 48 ans de 1958 à 2005. Pour ce faire on a tout d'abord calculé les hauteurs moyennes des précipitations

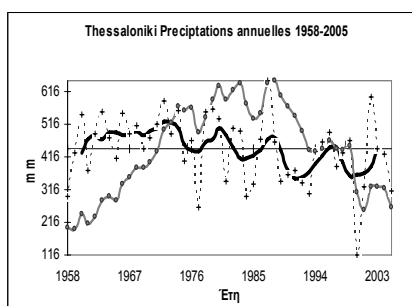
mensuelles et annuelles et ensuite on a analysé les fluctuations des précipitations annuelles tant par la méthode des moyennes mobiles que par celle des écarts cumulés normés. On a également calculé les tendances des indices hydrométéorologiques pour tous les mois et on a évalué leur ajustement statistique selon le t-test de Kendall.

D'après la figure 2, on constate que le maximum mensuel des précipitations à Thessaloniki se situe durant les mois de novembre et de décembre avec 52.3mm et 54.1mm respectivement. En plus, le régime annuel présente un maximum secondaire durant le mois de mai avec 48.5mm. Les mois d'été présentent les hauteurs des précipitations les plus faibles, le minimum apparaît durant le mois d'août avec 21.7mm.

Pour la meilleure étude des fluctuations des précipitations annuelles à Thessaloniki on a construit deux courbes: la courbe des moyennes mobiles et celle des écarts cumulés normés (figure 3). D'après l'étude de cette figure on constate que la station de Thessaloniki connaît une période humide depuis l'année 1958 qui s'étend jusqu' au 1976. Au contraire, la période 1988-2005 peut être caractérisée comme sèche, avec une tendance caractéristique de diminution des précipitations à Thessaloniki. Durant les années intermédiaires les deux courbes présentent des fluctuations aléatoires.



**Fig 2.** Régime des précipitations à Thessaloniki pour la période 1958-2005



**Fig. 3.** Evolution des précipitations annuelles à Thessaloniki : 1958-2005  
 ..... courbe des hauteurs annuelles  
 — courbe de moyennes mobile à 5 termes  
 —○— courbe des écarts cumulés normés

Le tableau 2 présente les tendances des quatre indices hydrométéorologiques mensuelles pour la période 1958-2005. L'analyse montre que les valeurs de l'indice Pq90 (précipitations extrêmes) à Thessaloniki présentent une tendance positive surtout durant la période froide de l'année ainsi que durant le bimestre juillet - août. Au contraire, la période entre le mois de mars et le mois de juin ainsi que le mois de septembre, l'indice Pq90 connaît une tendance négative. Tant les tendances positives que les tendances négatives n'apparaissent pas statistiquement significatives.

**Tableau 2.** Les tendances de quatre indices hydrométéorologiques choisis dans la station de Thessaloniki pour la période 1958-2005

	Mois											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
<b>Pq90</b>	+	+	-	-	-	-	+	+	-	+	+	+
<b>Pxcdd</b>	+	-	+	-	+	+	+	-	+	+	+	+
<b>Px5d</b>	-	+	-	-	-	-	-	+	-	+	+	-
<b>Pint</b>	+	+	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+

Dans le cas de l'indice Pxcdd (nombre maximal des jours secs consécutifs) la tendance pour neuf (9) mois est positive (statistiquement significative pour 4 mois, janvier, mars, juin et juillet) et pour trois mois est négative.

L'indice Px5d (maximum des précipitations cumulées sur 5 jours) connaît de son tour une tendance négative, pour le plus grand nombre de mois à Thessaloniki (8 mois avec tendance négative contre 4 mois avec une tendance positive). Enfin, l'indice concernant l'intensité moyenne des précipitations à Thessaloniki présente des tendances positives pour le plus grand nombre de mois: 8 mois contre 4 mois avec tendance négative. On n'a pas trouvé des résultats significatifs pour cet indice.

### **Etude des indices des précipitations pour la période de simulation du contrôle 1960-1990**

Le tableau 3 nous donne les écarts calculés entre les valeurs simulées (modèle statistique et modèle dynamique) et les valeurs observées de quatre (4) indices pour la période de contrôle. Il est à noter que les calculs ont été faits pour tous les mois, mais à cause du nombre limité des pages, on présente uniquement les résultats de quatre mois: janvier (hiver), avril (printemps), juillet (été) et octobre (automne).

D'après l'examen de l'indice des pluies extrêmes (Pq90) il paraît évident que le modèle statistique fournit des résultats plus satisfaisants de l'indice durant tous les quatre mois présentés. Il est à noter que les écarts entre les valeurs simulées et les valeurs observées ne sont pas statistiquement significatifs et, en règle générale, le modèle surestime les valeurs de cet indice. Au contraire, les résultats de simulation du modèle dynamique apparaissent moins satisfaisants pour la période 1960-1990. Presque partout les écarts entre les valeurs simulées et les valeurs observées sont statistiquement significatifs: les écarts maximales apparaissent en juillet. Dans le cas de l'indice Pxcdd, en règle générale, le modèle statistique sous-estime les valeurs de cet indice. Les résultats du modèle dynamique sont comparables et presque partout les écarts sont négatifs. Il est à noter que ces écarts concernant le quatrième points de grille apparaissent statistiquement significatifs pour tous les mois.

Les valeurs de l'indice Px5d des trois mois (avril, juillet, octobre) apparaissent surestimées par le modèle statistique. Au contraire, les valeurs estimées de janvier sont sous-estimées et les écarts sont statistiquement significatifs. Comme pour les deux premiers indices le modèle dynamique sous-estime les valeurs de l'indice Px5d. Dans le cas de juillet cette sous-estimation est statistiquement significative.

On aboutit à des résultats comparables si l'on considère l'indice de l'intensité moyenne des précipitations (Pint). C'est ainsi que le modèle statistique fournit des simulations plus satisfaisantes par rapport aux simulations du modèle dynamique. On retrouve ainsi des intensités moyennes des pluies sous-estimées pour tous les mois (modèle dynamique) où dans la plupart des cas les écarts apparaissent statistiquement significatifs.

**Tableau 3.** Ecart entre les valeurs simulées et les valeurs observées (méthode statistique/dynamique – obs) des quatre indices hydrométéorologiques pour la période de simulation du contrôle (1960-1990). Les écarts statistiquement significatifs sont présentés en gris foncé. (P. de G.= Point de Grille).

Indices	Méthode		Janvier	Avril	Juillet	October
P <sub>90</sub>	Statistique	RVA - Obs.	-0.5	1.0	4.2	0.4
		P.de G.1 - Obs.	-2.4	-4.2	-9.8	-8.2
	Dynamique	P.de G.2 - Obs.	0.4	-1.6	-8.1	-3.8
		P.de G.3 - Obs.	1.7	-1.7	-8.6	-6.5
		P.de G.4 - Obs.	-1.7	-6.5	-10.9	-8.7
		Moyenne P.de G - Obs.	-0.5	-3.5	-9.3	-6.8
P <sub>actl</sub>	Statistique	RVA - Obs.	2.4	-0.3	-4.2	-0.8
		P.de G.1 - Obs.	0.8	-2.6	-1.0	2.2
	Dynamique	P.de G.2 - Obs.	-5.1	-2.5	-2.5	0.5
		P.de G.3 - Obs.	-1.4	-2.6	0.8	1.3
		P.de G.4 - Obs.	-4.9	-6.0	-10.0	-5.1
		Moyenne P.de G - Obs.	-2.6	-3.4	-3.2	-0.3
P <sub>5d</sub>	Statistique	RVA - Obs.	-6.3	3.0	15.6	2.1
		P.de G.1 - Obs.	-7.4	-9.1	-15.8	-13.9
	Dynamique	P.de G.2 - Obs.	-0.4	0.6	-10.1	-4.7
		P.de G.3 - Obs.	4.9	-2.3	-14.5	-9.7
		P.de G.4 - Obs.	-3.3	-10.2	-16.9	-11.7
		Moyenne P.de G - Obs.	-1.5	-5.3	-14.3	-10.0
P <sub>int</sub>	Statistique	RVA - Obs.	-0.4	0.4	1.6	0.6
		P.de G.1 - Obs.	-1.3	-2.0	-4.0	-3.2
	Dynamique	P.de G.2 - Obs.	-1.0	-1.1	-3.2	-1.4
		P.de G.3 - Obs.	-0.2	-1.2	-3.8	-2.5
		P.de G.4 - Obs.	-1.4	-2.9	-4.4	-3.6
		Moyenne P.de G - Obs.	-1.0	-1.8	-3.8	-2.7

### Étude des indices des précipitations pour la période du «climat futur» 2070-2100

Dans ce chapitre on se propose de faire un effort d'estimer les changements climatiques et plus particulièrement les changements des indices hydrométéorologiques proposés pour la période de trois dernières décennies du siècle (2070-2100) à cause de l'augmentation de l'intensité de l'effet de serre (IPCC SRES Scénarios). Pour ce faire on a calculé les séries chronologiques des indices pour la période du futur, tant par le modèle

statistique que par le modèle dynamique (scénarios). Ensuite, on a calculé les écarts entre ces dernières simulations et les simulations concernant la période du contrôle (1960-1990). Les écarts calculés nous montrent les changements des valeurs des indices que l'on attend durant les trois dernières décennies du siècle (2070-2100). Il est à noter que pour les calculs des simulations on a choisi le A2 scénario (plutôt pessimiste) de IPCC (Cubash et al., 2001). D'après ce dernier scénario la quantité de CO<sup>2</sup> à l'atmosphère sera égale à 715ppm environ, le réchauffement entre la fin du 20<sup>e</sup> siècle et la fin du 21<sup>e</sup> siècle serait compris entre 3°C et 3.5°C, avec des impacts significatifs sur les événements extrêmes.

La figure 4 nous montre les écarts calculés (scénario (2070-2100)- simulation de contrôle (1960-1990)) par tous les deux processus (statistique et dynamique) pour les quatre indices étudiés et les quatre mois présentés (janvier, avril, juillet, octobre). D'après les résultats du modèle statistique les précipitations extrêmes (Pq90) seront en augmentation durant les trois premiers mois (janvier, avril, juillet) et en particulier durant le mois de juillet. Au contraire, on attend une faible diminution des valeurs de cet indice pour le mois d'octobre. Les résultats du modèle dynamique apparaissent tout à fait différents. C'est ainsi que le mois de janvier connaît partout une diminution importante de l'indice Pq90 à Thessaloniki. Les écarts négatifs de deux mois suivants (avril et juillet) apparaissent moins importants. Au contraire, durant le mois d'octobre le modèle dynamique prévoit une augmentation importante des valeurs de l'indice pour le plus grand nombre de points de grille entourant la station de Thessaloniki (figure 4 a-d).

Dans le cas de l'indice Pxcd (nombre maximal de jours secs consécutifs) le modèle statistique montre que les changements que l'on attend ne sont pas particulièrement élevés. On trouve une diminution en janvier en avril et en juillet et une légère augmentation en octobre. Les écarts du modèle dynamique apparaissent différents. On attend une augmentation de l'indice Pxcd durant les trois premiers mois (janvier, avril, juillet) et une diminution pour le mois d'octobre.

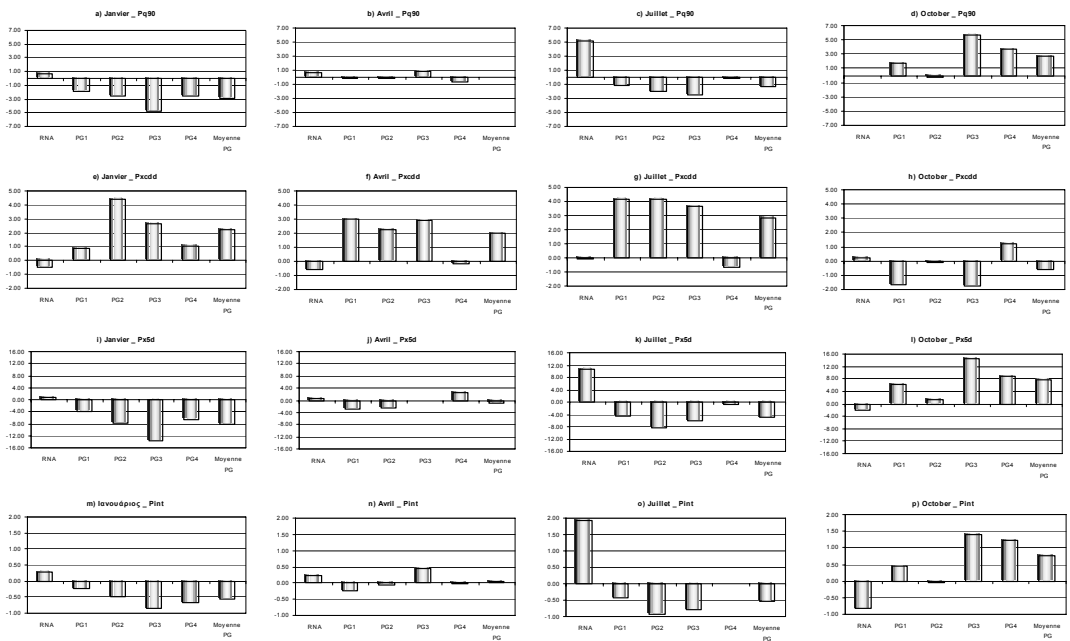
Les résultats de deux modèles concernant les simulations de l'indice Px5d (maximum des précipitations cumulées sur 5 jours) apparaissent encore une fois contradictoires. Le modèle statistique prévoit une légère augmentation de l'indice pour les mois de janvier et d'avril et une augmentation plus élevée pour le mois de juillet. Une faible diminution on attend pour le mois d'octobre. Au contraire, le modèle dynamique prévoit une diminution pour les trois premiers mois et une augmentation pour le quatrième mois (figure i-l).

Enfin, l'analyse des résultats concernant l'indice Pint (intensité moyenne des précipitations) montre que le modèle statistique prévoit une augmentation durant les mois de janvier, d'avril et de juillet tandis que l'intensité moyenne d'octobre se trouve en baisse. Au contraire, le modèle dynamique prévoit une diminution de l'intensité pour les trois premiers mois et une augmentation importante pour le mois d'octobre (figure m-p).

## Conclusions

Les indices de quatre paramètres hydrométéorologiques concernant: les précipitations extrêmes, le nombre maximal de jours secs consécutifs, le maximum des précipitations cumulées sur 5 jours et l'intensité moyenne de précipitations présentent, selon le mois considéré, des comportements différents p.e. les précipitations extrêmes présentent des tendances positives durant sept mois et tendances négatives durant cinq mois (trois au printemps), non statistiquement significatives. Le nombre maximal de jours secs

consécutifs connaît des tendances positives durant neuf mois (statistiquement significatives pour 4 mois). Les tendances de l'indice Px5d, dans la majorité des cas, apparaissant négatives et enfin les tendances concernant l'indice de l'intensité moyenne, dans le plus grand nombre des mois, sont positives. L'analyse des résultats montre que malgré la diminution relative des précipitations annuelles à Thessaloniki durant la période 1958-2005, les valeurs des indices concernant l'intensité présentent pour la majorité de mois des tendances positives. Le calcul et l'analyse des indices des paramètres hydrométéorologiques par l'application de deux modèles différents (statistique et dynamique) tant pour la période de simulation de contrôle (1960-1990) que pour la période «climat futur» montrent que les résultats de deux modèles, en règle générale, sont contradictoires. P.e. l'indice des précipitations extrêmes simulé par le modèle statistique présente une augmentation durant les trois premiers mois et une légère diminution durant le mois d'octobre, le même indice simulé par le modèle dynamique présente de diminution durant les trois premiers mois et d'augmentation importante durant le mois d'octobre. Les résultats concernant les autres indices apparaissent semblables. En conclusion, la méthode de désagrégation d'échelles peut contribuer à l'augmentation de la fiabilité des scénarios concernant les changements climatiques, mais on doit interpréter les résultats de ces scénarios avec prudence. A notre avis pour augmenter la fiabilité des prévisions du climat nous devons analyser les résultats d'un plus grand nombre des modèles de circulation générale ainsi que d'appliquer plusieurs méthodes de désagrégation d'échelles (statistique et dynamiques). Ensuite, nous allons comparer et corriger les résultats de ces analyses.



**Fig. 4.** Ecarts entre les valeurs simulées de la période 2070-2100 et les valeurs simulées de la période de contrôle 1960-1990

**Remerciements:** *Ce travail a été effectué dans le cadre du programme GABARDINE (Groundwater Artificial recharge Based on Alternative sources of water: aDvanced INtegrated technologies and managEment) contract (518118) financé par l'Union Européenne.*

## REFERENCES

- Alexandersson H. (1986) "A homogeneity test applied to precipitation data", *Journal of Climatology*, 6, 661-675.
- Angouridakis V. (1975), "Sequences of Rain and Drought in Thessaloniki (II)", *Meteorologika* No 33, Publ. of the Met-Climat. Institute, University of Thessaloniki.
- Angouridakis V and Maheras P. (1973) "Precipitation in Thessaloniki (I)", *Meteorologika* No32, Publ. of the Met-Climat. Institute, University of Thessaloniki.
- Cubasch U., Meehl G.A., Boer G.J., Stouffer M. Dix., Noda A., Senior C.A., Raper S., Yap K.S. (2001), "Projections of Future Climate Change". In IPCC WG1 TAR.
- Maheras P. (1979): "Climatologie de la Mer Egée et de ses marges continentales-Etude de Climatologie descriptive et de Climatologie dynamique". Thèse de Doctorat d'Etat. Université de Dijon, p. 783.
- Maheras P., Tolika K., Anagnostopoulou Chr., Vafiadis M., Patrikas I. and Flocas H. (2004), On the "Relationships between circulation types and changes in Rainfall in Greece", *International Journal of Climatology*, 24, 1695-1712.
- Stardex project. (2005), "Statistical and Regional dynamical Downscaling of Extremes for European regions", <http://www.cru.uea.ac.uk/projects/stardex>
- Tolika K., Maheras P., Flocas H., Vafiadis M. and Arseni – Papadimitriou A. (2006), "Simulation of Seasonal Precipitation and Raindays over Greece: A statistical downscaling technique based on Artificial Neural Networks (ANNs)", Accepted for publication on the *International Journal of Climatology*.
- Alexandrou L. (1940), "Distribution journalière de la pluie en Thessaloniki", *Publications Scientifiques Annuelles de la Faculté des Sciences de l'Université Aristote de Thessaloniki.*, Volume 6, p 1-20.
- Maheras P and Gkika S. (1987), "Caractéristiques de pluies horaires à Thessaloniki", *Actes du 3<sup>e</sup> Congrès Hellenique de la Société Hydrotechnique de Grèce. Thessaloniki* Volume 3, p. 577-586
- Maheras P et Balafoutis Ch. (1980), "Sur le rythme journalier de la pluie à Thessaloniki pendant la période chaude", *Meteorologika* No 69, p. 151-157.
- Balafoutis Ch and Maheras P. (1980), "Sur les orages dans la région de Thessaloniki pendant la période chaude", *Actes du 1<sup>er</sup> Congrès de climatologie Greque-Britannique, Athènes*, p. 57-67.
- Tolika K. (2006), "Changements climatiques estimés en Grèce durant le 21<sup>e</sup> siècle par de modèles climatiques", *Thèse de Doctorat. Université Aristote de Thessaloniki*, p. 305.