

RELATIONS ENTRE LES PRÉCIPITATIONS MOYENNES ET EXTRÊMES ET LES TYPES DE CIRCULATION ATMOSPHÉRIQUE EN BELGIQUE

Panagiotis MAHERAS, Konstantia TOLIKA et Christina ANAGNOSTOPOULOU

Résumé

On se propose d'analyser les relations entre les précipitations moyennes et extrêmes en Belgique et les types de circulation au niveau de 500hPa pour la période 1958-2003. Pour ce faire, on utilise les données journalières des précipitations de trois stations en Belgique pour la période choisie, ainsi que le calendrier journalier des types de circulation au niveau de 500hPa pour la Belgique, obtenu par l'application d'une nouvelle méthode de classification automatique. L'analyse des tendances montre qu'en règle générale les précipitations moyennes et extrêmes ($\geq 95^{\text{e}}$ et du $\geq 99^{\text{e}}$ centiles) en Belgique vont dans le sens des scénarios de MCG (Modèle de Circulation Globale) pour la fin de ce siècle pour l'Europe du Nord, annonçant une augmentation des précipitations annuelles ainsi qu'une augmentation des précipitations extrêmes. Pour tenter d'expliquer ce phénomène, nous avons étudié les tendances des précipitations en relation avec les types de circulation. Il en résulte que les totaux de précipitation des types de circulation présentant un caractère pluviogène élevé, connaissent dans leur ensemble des tendances positives quelques fois significatives (types : Cne, Csw, C) même si leurs fréquences présentent des tendances négatives. Dans la plupart des cas, les types de circulation provoquant des précipitations extrêmes sont associés au flux zonal (circulation d'ouest) ou sous-zonal (circulation de sud-ouest) entraînant avec lui des perturbations atlantiques. L'influence de ces circulations sur les précipitations est associée, d'une part à l'activité des fronts, d'autre part au creusement de la dépression correspondant au courant perturbé.

Mots-clés

Précipitations extrêmes, types de circulation, tendances, Belgique

Abstract

The main scope of the present study is the analysis of the links between the mean and extreme precipitation in Belgium and the circulation types for the 500hPa level for the period 1958-2003. Daily precipitation data for three meteorological stations in the study area were used, as well as a daily calendar of 500hPa circulation types derived from a new automatic classification scheme. The analysis of the trends showed that generally the mean and the extreme rainfall heights ($\geq 95^{\text{th}}$ et du $\geq 99^{\text{th}}$ percentiles) agree with the future projections of the GCMs (Global Circulation Model) for the end of this century in Europe, with an increase of the annual mean and extreme precipitation. Trying to explain this phenomenon, we analyzed the precipitation trends in relation to the circulation types. It was found that in general the circulation types present an increase in their precipitation heights with positive trends, which in some cases are statistically significant (types : Cne, Csw, C), although their frequencies seem to be decreasing. In the majority of the case the prevailing circulation types during extreme precipitation events are associated with zonal fluxes (western or southwestern circulation) driving also with them depressions from the Atlantic. The influence of this circulation to the precipitation events could be associated either with the frontal activity as well as with the deepening of the depression corresponding to these currents.

Keywords

Extreme precipitation, circulation types, trends, Belgium

INTRODUCTION

La Belgique, par sa situation géographique, a un climat tempéré océanique vrai, car l'air d'origine maritime qui l'envahit par l'ouest, est souvent instable et humide, doux en hiver et frais en été. Le caractère dominant de ce climat est l'atténuation des extrêmes thermiques. Le volume annuel des précipitations, sauf exaspération sur les reliefs, est modéré ; il varie entre 700mm sur la côte au nord-ouest et plus de 1 000mm sur la crête de l'Ardenne. La région côtière connaît un régime pluviométrique simple avec un maximum de pluviosité en automne, la partie située au sud de la crête de l'Ardenne connaît au contraire un net maximum durant l'hiver (Alexandre *et al.*, 1992). En plus des deux types de régime mentionnés, il n'est pas rare qu'apparaisse un régime pluviométrique mixte avec la caractéristique supplémentaire du climat continental, c'est-à-dire un maximum de pluies en été. Durant l'année, pendant la moitié des journées, la pression est égale ou supérieure à 1017hPa (Alexandre *et al.*, 1992) et par temps anticyclonique, dans une circulation perturbée, on peut observer l'incursion d'un front froid ou d'un front occlus déterminant un temps pluvieux ou au moins nuageux.

Dans un tel contexte, une attention particulière est d'autant plus portée aux perspectives climatiques en relation avec le changement climatique que les Modèles de Circulation Générale (MCG) s'accordent sur une augmentation des précipitations, en Europe occidentale et centrale concernant surtout les pays qui se trouvent au nord du 50° parallèle (Frei *et al.*, 2006). Les scénarios de ces derniers modèles suggèrent pour la même période, une augmentation des précipitations extrêmes allant de pair avec l'augmentation de certains totaux saisonniers des précipitations. Le risque de voir donc apparaître des précipitations extrêmes plus importantes représente une menace qui doit être prise en considération du fait de leurs conséquences sur l'environnement et notamment sur les activités humaines.

De telles perspectives nous amènent à nous interroger si des caractéristiques identiques à celles annoncées par les MCG pour la fin de ce siècle seraient amorcées vu les tendances des précipitations de la seconde moitié du 20^e siècle en Belgique.

Pour ce faire, nous avons déterminé des indices pluviométriques annuels saisonniers et quotidiens et recherché si leurs tendances soutiendraient l'hypothèse d'un début de changement climatique. Le but principal de ce travail consiste donc en une recherche sur l'évolution des indices pluviométriques moyens et extrêmes retenus au terme de tendances linéaires significatives, afin d'avoir une meilleure connaissance de leurs relations avec les dynamiques de la circulation atmosphérique à l'échelle atlantico-européenne. En effet, si des tendances significatives des précipitations, pour des stations de Belgique, ont été observées durant la seconde moitié du 20^e siècle, ces changements devraient être également présents soit dans l'évolution des fréquences des types de circulation

atmosphérique d'altitude, soit dans l'évolution de l'intensité des indices pluviométriques en relation avec ces types de circulation.

C'est ainsi que nous avons déterminé quels types de circulation, au niveau de 500hPa, sont les plus fréquents lors des événements des précipitations extrêmes et quelles modifications, dans ces types de circulation, expliquent les tendances saisonnières significatives des précipitations. Puis, nous avons étudié les configurations des types de circulation mentionnés ci-dessus.

I. DONNÉES ET MÉTHODES

Nous avons utilisé les lames d'eau journalières de trois stations en Belgique dont le cumul moyen annuel varie entre 748mm (Middelkerke) et 1 113mm (Saint-Hubert). La troisième station est celle de Uccle avec 829mm. La période sélectionnée s'étend sur 46 années (1958-2003).

À partir des lames d'eau journalières, pour chaque année et chaque saison, nous avons retenu et calculé pour les précipitations supérieures ou égales à 0.1mm les paramètres suivants :

1. le nombre de jours de précipitation,
2. les lames d'eau,
3. la hauteur journalière des 95^e et 99^e centiles,
4. les nombres de jours de précipitations supérieures aux 95^e et 99^e centiles,
5. les lames d'eau moyennes des 95^e et 99^e centiles,
6. le maximum de précipitation journalière,
7. le rapport : maximum de pluie journalière /95^e centile et maximum / 99^e centile.

Ensuite, des tendances linéaires ont été calculées sur les séries chronologiques des paramètres 1 à 5 mentionnés ci-dessus. Le test de significativité mis en œuvre pour les analyses des tendances, a été celui du tau de Mann-Kendall au niveau 0.05 afin de pouvoir juger de leur significativité.

En plus des données des précipitations en Belgique, nous avons utilisé également les géopotentiels d'altitude (500hPa) en points de grille, pour la même période que les précipitations (1958-2003), qui proviennent des réanalyses du NCEP-NCAR fournies selon une grille de 2.5° x 2.5° de résolution (Kalnay *et al.*, 1996).

En utilisant ces données, une nouvelle méthode de classification automatique de types de circulation a été appliquée pour obtenir le calendrier journalier (Tolika *et al.*, 2007 ; Anagnostopoulou *et al.*, 2008). La fenêtre utilisée est très large, elle s'étend de 20°N à 75°N de latitude et de 35°W à 50°E de longitude. Le point central concerné par la classification est situé sur la Belgique et ses coordonnées sont les suivantes : latitude 50°N et longitude 5°E (Figure 1).

À partir du calendrier des types de circulation journalière obtenue pour la Belgique, nous avons calculé un certain nombre de paramètres par saison, comme par exemple, les fréquences saisonnières des types de circulation, les

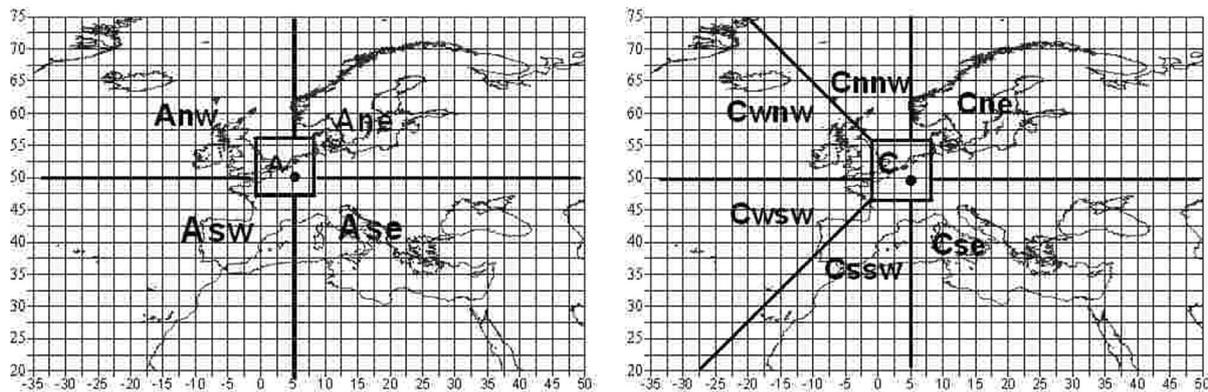


Figure 1. La localisation des types de circulation, anticycloniques (a) et cycloniques (b) concernant la Belgique

tendances de fréquences saisonnières des types cycloniques et anticycloniques, les cartes moyennes saisonnières, dites composites, des types de circulation, etc.

Pour traiter simultanément les deux types de variables comme précipitations et types de circulation, nous avons calculé un certain nombre de paramètres entre les deux variables, tels :

- le pourcentage saisonnier des précipitations par type de circulation pour voir quels sont les types les plus pluvieux,
- les tendances des précipitations saisonnières par type de circulation,
- les tendances de fréquences des précipitations saisonnières par type de circulation,
- la hauteur journalière du 95^e et du 99^e centiles pour les deux types de circulation les plus fréquents responsables de ces indices,
- les jours de pluie du 95^e et du 99^e centiles pour les deux types de circulation les plus fréquents responsables de ces indices,
- les totaux de pluies moyennes (en pourcentage) du 95^e et du 99^e centiles pour les deux types de circulation les plus fréquents,
- le rapport : maximum pluies journalières/95^e et maximum / 99^e centiles, pour les deux types les plus fréquents responsables de ces indices.

II. RÉSULTATS

A. Les précipitations annuelles et saisonnières

La station de Saint-Hubert est la plus pluvieuse à l'échelle annuelle (1 113mm, Figure 2) suivie par la station de Uccle (829mm) et la station de Middelkerke (748mm). À l'échelle saisonnière, la station de Saint-Hubert présente le maximum pluviométrique en hiver et en automne, et le minimum au printemps. La station de Uccle connaît un double maximum en hiver et en été avec un minimum également au printemps, et enfin la station de Middelkerke présente un maximum en automne et un minimum au printemps.

Les tendances de jours de pluie sont tout à fait différentes pour les trois stations (Tableau 1). C'est ainsi que la station de Uccle connaît partout des tendances négatives significatives, excepté en automne, la station de Middelkerke présente des tendances positives (significatives en automne), excepté l'été qui a des tendances négatives et la station de Saint-Hubert connaît des tendances positives non significatives en hiver et en automne, et des tendances négatives également non significatives au printemps et en été et pendant toute l'année.

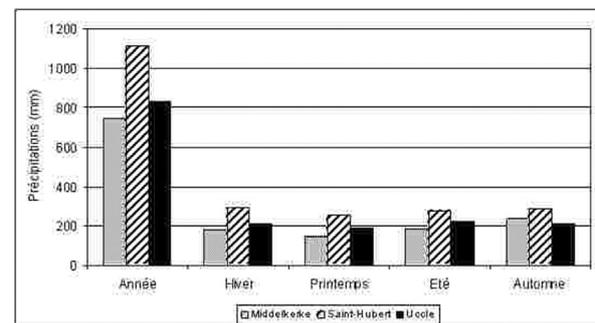


Figure 2. Les hauteurs des précipitations annuelles et saisonnières des trois stations : Middelkerke, Saint-Hubert et Uccle

Tableau 1. Tendances des jours de précipitations. La couleur gris foncé montre les cas où les tendances sont statistiquement significatives au niveau 0.05

	Hiver	Printemps	Été	Automne	Année
Middelkerke	+	+	-	+	+
Saint-Hubert	+	-	-	+	-
Uccle	-	-	-	-	-

Les tendances des hauteurs des précipitations apparaissent tout à fait différentes par rapport aux tendances des fréquences. En effet, pour l'année et pour toutes les saisons les tendances sont positives (excepté en été pour les stations : Saint-Hubert et Uccle, Tableau 2). Parmi ces tendances positives, celles pour l'année et pour les stations de Middelkerke et de Saint-Hubert apparaissent significatives.

Tableau 2. Tendances des hauteurs des précipitations. La couleur gris foncé montre les cas où les tendances sont statistiquement significatives au niveau 0.05

	Hiver	Printemps	Été	Automne	Année
Middelkerke	+	+	+	+	+
Saint-Hubert	+	+	-	+	+
Uccle	+	+	-	+	+

B. Les précipitations extrêmes

D'après le tableau 3, on constate que les hauteurs des précipitations journalières de deux centiles : $\geq 95^{\circ}$ et du $\geq 99^{\circ}$ sont relativement faibles. Les valeurs maximales apparaissent dans la station la plus pluvieuse (Saint-Hubert, 17.3mm et 28.3mm). Également, les hauteurs maximales des précipitations journalières sont relativement faibles, la même station présente la valeur maximale (75.6mm). Si l'on compare avec les mêmes paramètres des stations Méditerranéennes présentant à peu près la même hauteur annuelle de pluie que les stations de Belgique utilisées, on constate, qu'en Méditerranée, ces valeurs sont deux fois plus élevées qu'en Belgique (Tolika *et al.*, 2007). Pourtant, les rapports des précipitations maximales des X° centiles sont équivalents pour les deux régions. Pour les trois stations, le 95° centile varie entre 4.23 et 4.76 et pour le 99° centile entre 2.4 et 2.9. C'est la station de Uccle qui présente le maximum de ce rapport.

En ce qui concerne le nombre de jours de pluie de deux centiles, il est très élevé. Évidemment la station de Saint-Hubert connaît le maximum de ce nombre pour les deux indices. Les tendances des précipitations annuelles extrêmes, tant des fréquences que des totaux pluviométriques dans leur ensemble, apparaissent positives. Seules les tendances des fréquences et des totaux de très fortes précipitations (Tableau 4) dans la station

de Saint-Hubert connaissent des tendances négatives, non significatives. Parmi les tendances positives, celles de la station de Middelkerke sont partout significatives. Également significatives sont les tendances des fréquences et des totaux du $\geq 95^{\circ}$ centile à la station de Saint-Hubert.

C. Les types de circulation : description, fréquences et tendances

La classification comprend 5 types anticycloniques et 7 cycloniques (Figures 1 et 3). La distinction des types se fait principalement selon la position du centre des anomalies positives (types anticycloniques) ou des anomalies négatives (types cycloniques) des géopotentiels au niveau de 500hPa.

Une telle classification est valable si chaque type correspond à un géopotentiel caractéristique visuellement distinct des autres et s'il produit le flux d'altitude et le temps que l'on attend. Afin de la vérifier, nous avons construit des cartes moyennes saisonnières dites composites des « anomalies » des 12 types de circulation retenus (Figure 3, hiver). Pour toutes les saisons et tous les types, on a appliqué le « t-test » aux valeurs maximales, positives ou négatives des anomalies. Il en ressort que tous les champs des anomalies sont significatifs au seuil de $P \geq 0.05$.

La comparaison des composites fait apparaître les champs anticycloniques et cycloniques comme des images inversées.

Les fréquences relatives moyennes annuelles des 12 types donnent un total de 48% pour les anticycloniques et 52% pour les cycloniques. Le type Cne (Tableau 5) présente la fréquence la plus élevée (12.3%) suivi par le type Ane (11.6%). À échelle saisonnière, le type Cne présente les plus forts scores pour l'hiver (15.6%) et le printemps (16.9%), et le type Ase pour l'été (17.9%) et l'automne (14.9%).

Tableau 3. Les caractéristiques des précipitations extrêmes des trois stations utilisées

Stations	X° centile		Nombre de jours moyen avec précipitations $\geq X^{\circ}$ centile		Maximum des précipitations journalières (mm)	Rapport de max préc.journ/ X° centile	
	95 ^e	99 ^e	95 ^e	99 ^e		95 ^e	99 ^e
Middelkerke	14.2	25.1	9.4	1.9	60	4.23	2.4
Saint-Hubert	17.3	28.3	10.6	2.1	75.6	4.37	2.7
Uccle	14.6	24.0	10.0	2.0	69.5	4.76	2.9

Tableau 4. Tendances des précipitations extrêmes (fréquences et hauteurs) pour les deux centiles ($\geq 95^{\circ}$ et $\geq 99^{\circ}$). La couleur gris foncé montre les cas où les tendances sont statistiquement significatives au niveau 0.05

	$\geq 95^{\circ}$		$\geq 99^{\circ}$	
	Fréquences	Hauteurs	Fréquences	Hauteurs
Middelkerke	+	+	+	+
Saint-Hubert	+	+	-	-
Uccle	+	+	+	+

Tableau 5. Fréquences saisonnières et annuelles de types de circulation

	Anw	Ane	A	Asw	Ase	C	Cnnw	Cwnw	Csw	Cssw	Cse	Cne
Hiver	7.9	8.5	3.9	7.5	6.9	6.5	3.5	6.7	13.5	4.4	15.1	15.6
Printemps	7.7	11.4	5.4	7.8	5.6	7.6	3.3	5.9	11.7	4.0	12.7	16.9
Été	10.8	15.1	4.3	17.5	17.9	6.4	1.4	3.3	8.3	2.4	5.5	7.1
Automne	13.0	11.3	3.9	10.7	14.9	5.2	3.8	5.1	8.9	2.6	10.9	9.7
Année	9.8	11.6	4.4	10.9	11.3	6.4	3.0	5.2	10.6	3.3	11.0	12.3

Des tendances positives significatives apparaissent presque partout pour les types anticycloniques, excepté l'automne (Tableau 6), et au contraire des tendances négatives significatives pour les types cycloniques apparaissent également presque partout. En automne, l'image est différente. Les anticyclones présentent des tendances négatives non significatives, et au contraire les cyclones connaissent des tendances positives également non significatives.

Tableau 6. Tendances des fréquences saisonnières et annuelles des types de circulation. La couleur gris foncée montre les cas où les tendances sont statistiquement significatives au niveau 0.05

	Anticyclonique	Cyclonique
Hiver	+	-
Printemps	+	-
Été	+	-
Automne	-	+
Année	+	-

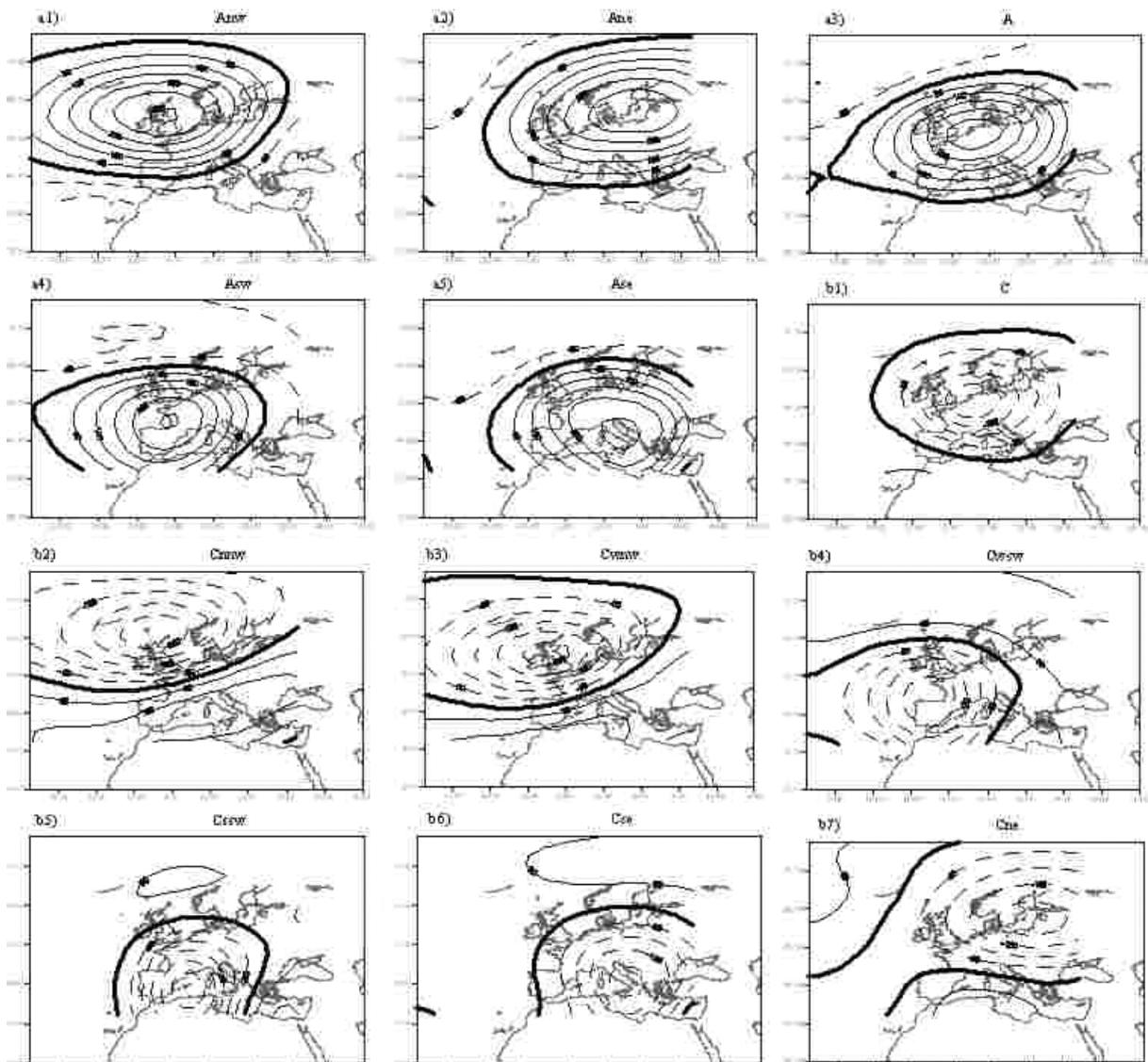


Figure 3. Les anomalies moyennes des types de circulation pour l'hiver (A.M.G.) : anticycloniques (a) et cycloniques (b). Les valeurs des anomalies sont multipliées par 100

D. Relations entre les types de circulation et les précipitations

À l'échelle annuelle, la contribution des types anticycloniques (Tableau 7), par rapport au total des hauteurs des précipitations, est égale à 23.2%. Cette contribution pluviométrique des types anticycloniques relativement élevée par rapport à la contribution des mêmes types en Méditerranée ($\leq 10\%$) est sans doute liée à l'instabilité des masses d'air en Belgique plus forte qu'en Méditerranée, surtout en été où cette contribution pluviométrique peut atteindre des valeurs très élevées ($\sim 36\%$). À cet égard, Escourou (1978) écrit : « *En Normandie, des pluies très importantes peuvent tomber jusqu'à 1025hPa et on note de faibles pluies avec une pression de 1032 à 1036hPa si l'air est très humide, même en l'absence d'un front* ». Il s'agit d'anticyclones dont le centre se trouve soit dans le SW (advection de NW, en altitude) soit dans le SE (advection de SW) de la Belgique. Dans le premier cas, un front froid subsiste en surface un certain temps dans la zone de haute pression qu'occupe la Belgique, la circulation en altitude étant de NW ; dans le second cas, le front chaud peut également traverser la Belgique dans la zone de haute pression, la circulation étant de SW en altitude.

Évidemment, la contribution pluviométrique des types cycloniques est très élevée ($>75\%$, Tableau 7). À l'échelle annuelle, le type cyclonique Cne présente en moyenne le pourcentage le plus élevé (19.7%), suivi par le type Csw (14.1%) et le type C (11.7%). À l'échelle saisonnière, le type Cne est trois fois plus pluvieux (hiver : 25.9%, printemps : 24.1% et automne : 18.2%), le type Csw restant aussi pluvieux (été : 19.3%). Le type Csw au printemps (15.3%), le type Cnw en hiver (14.8%) et le type C en été (14.7%) connaissent également des pourcentages élevés.

La supériorité pluviométrique du type cyclonique Cne est une surprise par rapport à ce qui se passe en Méditerranée où partout les deux types les plus pluvieux sont les C et Csw (Tolika *et al.*, 2007). Ce phénomène peut s'expliquer, d'une part, par les fortes fréquences du type Cne et, d'autre part, surtout par le fait que les précipitations en Belgique proviennent essentiellement des centres cycloniques, des fronts occlus ou des fronts doubles (Alexandre *et al.*, 1992), tandis qu'en Méditerranée où les fronts froids et chauds sont moins actifs

qu'en Belgique, les précipitations proviennent surtout des centres dépressionnaires, la pluviosité étant fonction de la baisse de pression (Tolika *et al.*, 2007).

En règle générale, à l'échelle annuelle dans la majorité de cas, les tendances des fréquences des précipitations par type de circulation sont positives (Tableau 8). Seules les fréquences de trois types, toujours les mêmes pour les trois stations (Tableau 8), sont négatives. Il s'agit de deux types cycloniques, en général pluvieux (C et Csw), et du type anticyclonique très peu pluvieux Anw. À l'échelle saisonnière, la majorité des cyclones connaissent également des tendances positives. Seul le type cyclonique C présente partout des tendances négatives, excepté en automne dans la station de Saint-Hubert. La saison qui connaît le plus grand nombre de tendances négatives est pour toutes les stations l'été. Comme on l'a vu précédemment, il s'agit de la même saison dont les tendances des fréquences des précipitations sont négatives. Il est à noter que les deux stations Middelkerke et Uccle présentent, pour toutes les saisons et tous les types, exactement les mêmes tendances positives et évidemment négatives.

Les tendances des hauteurs des précipitations, par type de circulation, sont relativement différentes de celles des fréquences (Tableau 9). À l'échelle annuelle, la différence la plus importante est constituée par le fait que les tendances des hauteurs du type cyclonique C sont partout positives. À l'échelle saisonnière, parmi les types les plus pluvieux (Cne, Csw, C), des tendances négatives apparaissent :

- Cne : en hiver et en automne pour Uccle,
- Csw : en automne pour les trois stations et en été pour Saint-Hubert,
- C : en hiver pour les trois stations, au printemps pour Middelkerke et Uccle, et en automne pour Saint-Hubert.

Les précipitations extrêmes apparaissent de préférence avec trois types de circulation, presque toujours les mêmes pour les trois stations. Effectivement, dans la station de Middelkerke, les précipitations fortes ($\geq 95^{\text{e}}$ centile) apparaissent avec le type Cne (19.7%, Tableau 10) et le type Csw (16.9%), tandis que les précipitations très fortes ($\geq 99^{\text{e}}$ centile) avec le type C (17.4%) et le type Csw (14.0%). À Saint-Hubert, les précipitations fortes apparaissent avec les types Cne (23.8%) et Csw (12.7%), et les précipitations très fortes avec les types Cne (32.7%) et Csw (12.%)

Tableau 7. Les pourcentages des précipitations par type de circulation, en moyenne, pour les trois stations utilisées

	Anw	Ane	A	Asw	Ase	C	Cnw	Cnw	Csw	Cssw	Cse	Cne
Année	2.5	4.8	0.7	7.4	7.8	11.7	6.5	10.9	14.1	3.2	10.7	19.7
Hiver	2.1	1.4	0.8	7.4	4.6	8.4	8.8	14.8	11.5	2.3	12.0	25.9
Printemps	2.0	4.4	0.9	5.5	4.1	12.0	6.0	11.9	15.3	3.8	9.9	24.1
Été	3.5	10.0	0.6	8.9	13.4	14.7	2.1	5.5	19.3	4.4	6.7	10.9
Automne	2.3	3.3	0.7	7.6	8.7	11.4	9.1	11.4	11.0	2.6	13.6	18.2

Tableau 8. Les tendances des fréquences des précipitations par type de circulation. La couleur gris foncé montre les cas où les tendances sont statistiquement significatives au niveau 0.05

		Anw	Ane	A	Asw	Ase	C	Cnnw	Cwnw	Csw	Cssw	Cse	Cne
Année	Middelkerke	-	+	+	+	+	-	+	+	-	+	+	+
	SaintHubert	-	+	+	+	+	-	+	+	-	+	+	+
	Uccle	-	+	+	+	+	-	+	+	-	+	+	+
Hiver	Middelkerke	+	+	+	+	+	-	-	+	+	+	+	+
	SaintHubert	-	+	+	+	+	-	-	+	+	+	+	+
	Uccle	+	+	+	+	+	-	-	+	+	+	+	+
Printemps	Middelkerke	+	+	+	+	+	-	-	+	+	+	+	-
	SaintHubert	+	+	-	+	+	-	+	+	+	+	+	-
	Uccle	+	+	+	+	+	-	-	+	+	+	+	-
Été	Middelkerke	-	+	+	+	+	-	-	-	-	+	+	+
	SaintHubert	+	+	-	+	+	-	-	-	-	+	+	+
	Uccle	-	+	+	+	+	-	-	-	-	+	+	+
Automne	Middelkerke	-	+	+	+	+	-	+	+	-	+	+	+
	SaintHubert	+	-	+	-	+	+	+	+	-	+	+	+
	Uccle	-	+	+	+	+	-	+	+	-	+	+	+

Tableau 9. Les tendances des hauteurs des précipitations par type de circulation. La couleur gris foncé montre les cas où les tendances sont statistiquement significatives au niveau 0.05

		Anw	Ane	A	Asw	Ase	C	Cnnw	Cwnw	Csw	Cssw	Cse	Cne
Année	Middelkerke	+	-	+	+	+	+	+	-	-	+	+	+
	SaintHubert	+	+	+	-	+	+	+	+	-	+	+	+
	Uccle	+	+	+	-	+	+	+	+	-	+	+	-
Hiver	Middelkerke	-	-	+	+	+	-	-	+	+	-	+	+
	SaintHubert	+	+	+	+	+	-	-	+	+	-	-	+
	Uccle	+	+	+	+	+	-	-	+	+	-	+	-
Printemps	Middelkerke	+	+	+	-	+	-	+	-	+	-	+	+
	SaintHubert	+	+	+	-	+	+	+	+	+	-	+	+
	Uccle	+	+	+	-	+	-	-	+	+	+	+	+
Été	Middelkerke	+	-	+	+	+	-	-	+	+	+	-	+
	SaintHubert	+	+	+	+	-	+	-	+	-	+	+	+
	Uccle	-	+	+	+	+	+	-	+	+	+	-	+
Automne	Middelkerke	+	+	-	+	+	+	+	-	-	+	-	+
	SaintHubert	+	+	+	-	+	-	-	+	-	+	-	+
	Uccle	+	+	+	+	+	+	-	+	-	+	-	-

Enfin, dans la troisième station (Uccle), les deux indices des précipitations extrêmes apparaissent : le premier avec le type Cne (19.3%) et Csw (13.9%), et le second avec les types Csw (21.5% et Cne (18.3%).

Les pourcentages des précipitations extrêmes journalières varient entre 19.9% (Cne, Middlekerke) et 25.5% (Cne, Saint-Hubert) pour le premier indice

($\geq 95^{\circ}$ centile), et entre 31.2% (Cne, Uccle) et 39.0 % (Csw, Saint-Hubert) pour le second indice.

Enfin, le rapport $CT_{maxprec} / X^{\circ} prec$ est du même ordre que le même paramètre calculé pour l'ensemble des précipitations. Il varie entre 3.0 (Cne, Saint-Hubert) et 4.4 (Csw, Saint-Hubert) concernant le 95° centile, et entre 1.9 (Cne, Saint-Hubert) et 2.7 (Csw, Saint-Hubert) concernant le 99° centile.

Tableau 10. Analyse statistique de deux types de circulation les plus fréquents lors de l'apparition des précipitations extrêmes pour les deux centiles ($\geq 95 X^e$ et $\geq 99 X^e$)

Stations	Circulation Types (CTs)	Centiles	Nombre de cas avec préc. $\geq X^e$ centile	Fréquences (%) des types de circulation	Pourcentage des précipitations par type de circulation	Rapport de max. préc. journ/ X^e centile
Middelkerke	Cne	95 ^e	85	19.7	19.9	3.4
	C	99 ^e	15	17.4	31.9	2.0
	Csw	95 ^e	73	16.9	24.2	4.2
	Cne	99 ^e	12	14	31.3	2.0
Saint-Hubert	Cne	95 ^e	116	23.8	25.5	3.0
	Cne	99 ^e	32	32.7	35.6	1.9
	Csw	95 ^e	62	12.7	25.1	4.4
	Csw	99 ^e	12	12.2	39	2.7
Uccle	Cne	95 ^e	89	19.3	20.8	3.5
	Csw	99 ^e	20	21.5	32.8	2.3
	Csw	95 ^e	64	13.9	22.7	3.7
	Cne	99 ^e	17	18.3	31.2	2.1

E. Analyse des champs des géopotentiels des types de circulation responsables des précipitations extrêmes

Comme nous l'avons dit, nous avons calculé et construit des cartes moyennes, dites composites pour tous les types de circulation. Nous avons également construit, par station, les composites de deux types de circulation responsables des précipitations extrêmes, uniquement pour les cas où les précipitations journalières sont égales ou supérieures aux deux centiles. Enfin, nous avons construit les composites résultant de la différence entre les deux champs des anomalies précédentes : champ général moyen du type – champ moyen du même type des cas des précipitations extrêmes. Les figures 4 et 5 illustrent les résultats de ces calculs, mais uniquement pour les cas dont les tendances des précipitations extrêmes sont statistiquement significatives.

Le premier cas que l'on examinera se réfère à la station de Middelkerke pour le 95^e centile et pour le type Cne. L'examen de la composite montre qu'une vaste zone des anomalies négatives, dont le centre se trouve au NE de la Belgique, occupe presque toute l'Europe (Figure 4.1a). La composite illustrant les différences est très intéressante. Une vaste zone d'anomalies positives comportant deux pôles, le premier sur la Mer du Nord, le second sur la Grèce, s'étend du NW au SE de la Scandinavie à la Méditerranée orientale. Les fortes précipitations sont produites par le courant perturbé accompagné des fronts, selon une trajectoire de NW-SE, orienté par la circulation d'altitude (Figure 4.1b).

Le second cas concerne la même station et le même centile ($\geq 95^e$), mais avec le type de circulation Csw. Cette fois, le centre des anomalies négatives se trouve au SW de la Belgique, sur la Bretagne (Figure 4.2a). La carte moyenne des différences (Figure 4.2b) montre qu'une vaste zone d'anomalies positives s'étend du SW

au NE en occupant les îles Britanniques, une partie de l'Europe occidentale et la Scandinavie. Au SE de cette zone, s'étend une autre zone d'anomalies négatives occupant l'Europe méridionale et la Méditerranée. Dans ce cas, les fortes précipitations sont causées par le courant des perturbations qui se déplace du SW au NE sous l'influence de la circulation d'altitude.

Le troisième cas se réfère à la station Saint-Hubert pour le 95^e centile avec le type Cne (Figure 4.3). Comme l'on peut s'y attendre, le centre des anomalies négatives se trouve au NE de la Belgique, sur la Mer du Nord. Cette zone occupe toute l'Europe au Nord du 45^e parallèle (Figure 4.3a). La configuration illustrant les différences est tout à fait différente par rapport à celle du même type mais concernant la station de Middlekerke. En effet, une vaste zone d'anomalies positives dont le centre se trouve au NE des îles Britanniques s'étend d'ouest à l'est en occupant l'Europe du Nord (Figure 4.3b). Les fortes précipitations, cette fois, sont provoquées par le courant d'ouest dont les perturbations passent par la Belgique en déterminant un temps très instable et très pluvieux.

Le quatrième cas concerne la même station et le même centile (95^e) avec le type Csw (Figure 4.4). Cette fois, les conditions sont à peu près les mêmes comme pour la station de Middelkerke avec le même type (Figure 4.2). La description des cas suivants se réfère aux précipitations très fortes ($\geq 99^e$ centile) à la station de Middelkerke et aux deux types de circulation responsables de ces cas extrêmes.

Le premier exemple concerne le type C (Figure 5.1). Une vaste zone d'anomalies négatives dont le centre se trouve exactement sur la Belgique occupe toute l'Europe occidentale et centrale (Figure 5.1a). La composite illustrant les différences, montre la même image. Une zone des anomalies positives dont le centre se trouve également sur la Belgique occupe une grande partie de l'Europe occidentale et centrale. Donc, les très fortes précipitations se produisent par le champ dépressionnaire

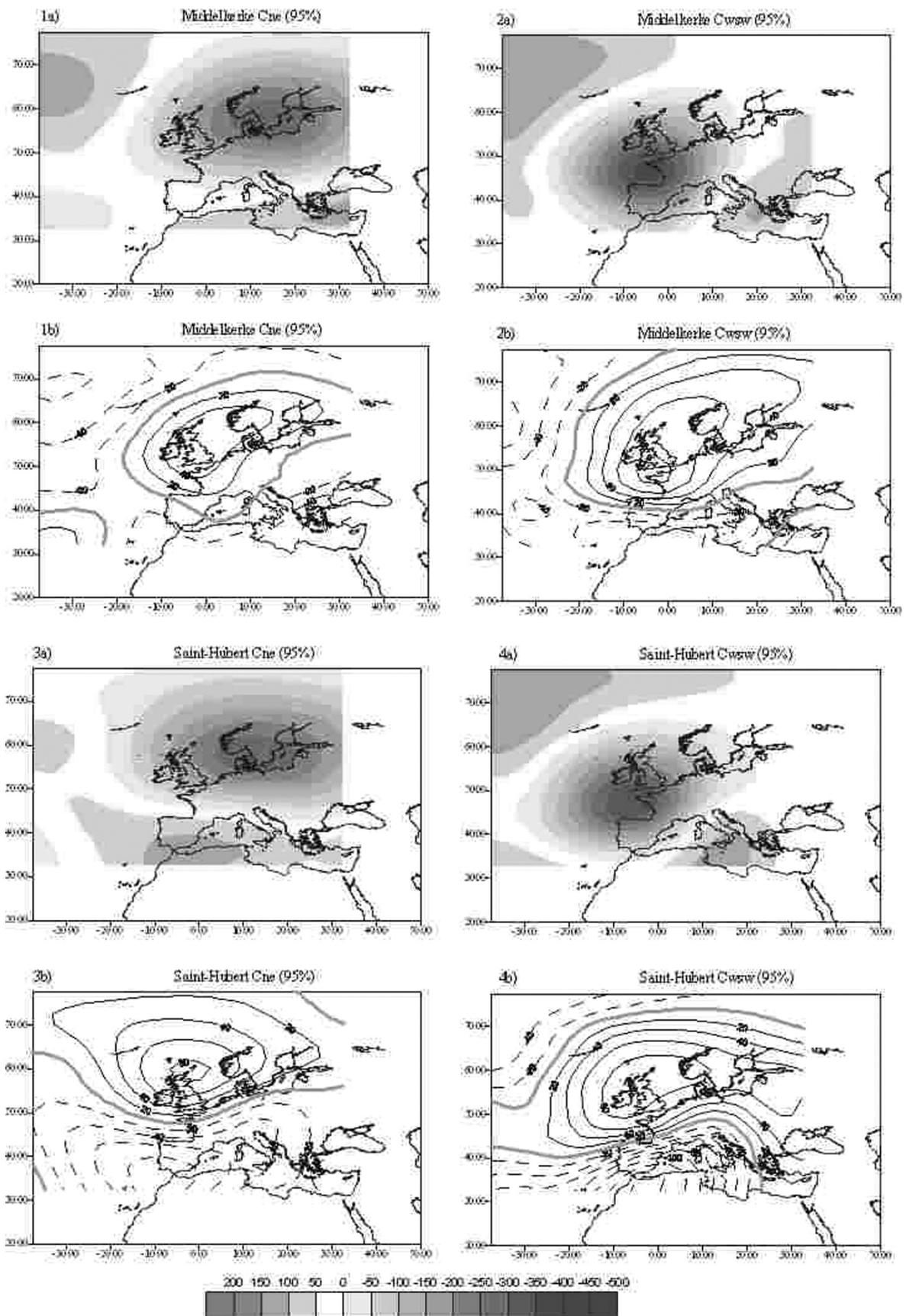


Figure 4. Les anomalies moyennes (a) de deux types de circulation des cas (A.M.C.) de fortes précipitations ≥ 95 X^c (95%) et les anomalies moyennes des différences (b) : anomalies moyennes générales du type (A.M.G. - A.M.C.). Les valeurs des anomalies sont multipliées par 100 (version couleur, p. 167)

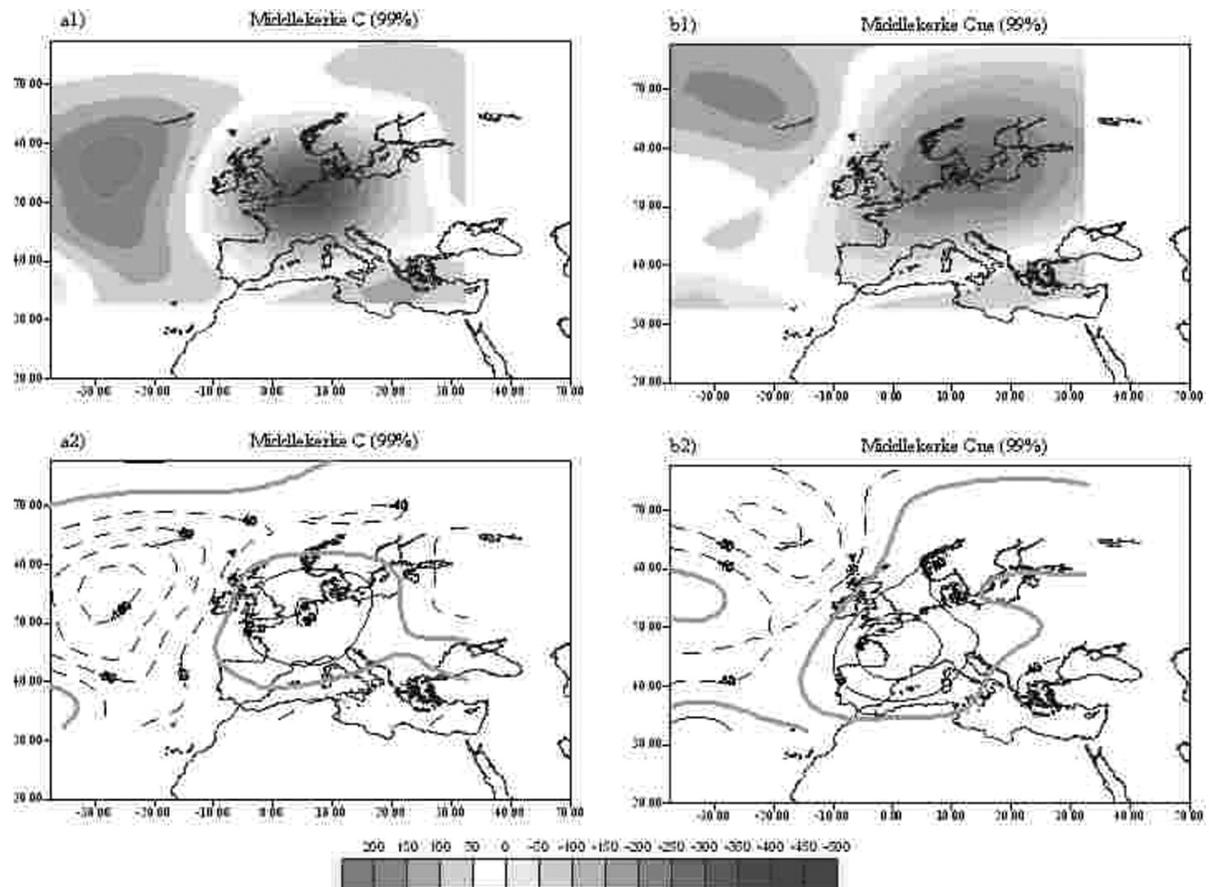


Figure 5. Les anomalies moyennes (a) de deux types de circulation des cas (A.M.C.) de fortes précipitations $\geq 99 X^{\circ}$ (99%) et les anomalies moyennes des différences (b) : anomalies moyennes générales du type (A.M.G – A.M.C.). Les valeurs des anomalies sont multipliées par 100 ((version couleur, p. 168)

(Figure 5.1b), accompagné plutôt des fronts s'étendant sur la Belgique, déterminant ainsi un temps très instable et très pluvieux.

Le second exemple concerne la même station mais avec le type Cne (Figure 5.2). La configuration correspondante (Figure 5.2a) montre une vaste zone d'anomalies négatives s'étendant du SW au NE dont le centre se trouve au NE de la Belgique sur la Scandinavie (Figure 5.2a). La composite illustrant les différences explique bien les très fortes précipitations. En effet, une zone étendue de fortes anomalies positives, qui s'étend du SW (de l'Espagne) au NE (à la Scandinavie) et dont le centre se trouve sur la France, occupe toute l'Europe occidentale et centrale. Les très fortes précipitations se produisent par le courant perturbé du SW, accompagné des fronts traversant le pays, et déterminant ainsi un temps très instable et très pluvieux.

Enfin, l'examen des documents, concernant les précipitations très fortes dans les deux autres stations, montre que ces précipitations (types : Cne et Csw) se produisent par le courant perturbé d'ouest ou du SW, accompagné des fronts, en déterminant un temps très pluvieux (Figures non présentées).

III. DISCUSSION ET CONCLUSIONS

L'objectif de ce travail a été de rechercher la possible existence de tendances significatives de jours et de totaux de pluies annuelles et saisonnières de trois stations représentatives en Belgique, ainsi que des précipitations extrêmes d'un éventuel changement climatique. Puis, nous avons appliqué une méthode de classification automatique des types de circulation comprenant 5 types anticycloniques et 7 types cycloniques. Nous avons ensuite étudié les relations entre les précipitations moyennes et extrêmes des types de circulation afin de comprendre comment ces derniers influencent les modifications des précipitations.

L'absence générale des tendances significatives des jours de pluie est la caractéristique des deux stations (Middelkerke et Saint-Hubert), avec une exception (Middelkerke, automne, tendances positives significatives), tandis que pour la troisième station, les tendances négatives des jours de pluie est la règle générale. Les totaux saisonniers et annuels de pluie montrent, au contraire, une augmentation générale des précipitations, en particulier des augmentations significatives des pluies annuelles des stations

de Middelkerke et de Saint-Hubert. Ce fait (diminution des fréquences et augmentation des totaux) se traduit par une augmentation de l'intensité de la pluie des stations étudiées. En effet, l'étude des tendances des précipitations extrêmes montre qu'en règle générale tant les fréquences que les totaux de pluie présentent des augmentations, en particulier des augmentations significatives pour la station de Middelkerke ($\geq 95^{\text{e}}$ et du $\geq 99^{\text{e}}$ centiles) et pour celle de Saint-Hubert pour le premier indice ($\geq 95^{\text{e}}$ centile). Il en ressort que les précipitations moyennes et extrêmes en Belgique vont dans le sens des scénarios des MCG pour la fin de ce siècle pour l'Europe du Nord, annonçant une augmentation des précipitations annuelles ainsi qu'une augmentation des précipitations extrêmes. De plus, ce sont les totaux pluviométriques, dans l'ensemble plus étroitement liés au changement, qui interviennent, plutôt que le nombre de jours des pluies moyennes et extrêmes. Ceci nous oriente vers l'analyse des types de circulation d'altitude en Belgique pour rechercher d'éventuels changements dans les types de circulation pluvio-gène, leurs fréquences et leurs tendances.

À l'échelle annuelle, les fréquences des types anticycloniques sont égales à 48% en suivant des tendances positives significatives, tandis que les fréquences des types cycloniques en suivant, au contraire, des tendances négatives significatives, atteignent 52%. Mais le caractère pluviométrique des types cycloniques est très élevé (76.8%) par rapport au même caractère des types anticycloniques (23.2%). Ce comportement des types cycloniques peut en partie expliquer les tendances générales des jours de pluie, mais dans aucun cas, il ne peut expliquer ni les tendances des totaux pluviométriques moyens ni ceux des précipitations extrêmes. Pour tenter de combler ce manque d'explications, nous avons étudié les tendances des précipitations (fréquences et hauteurs) en relation avec les types de circulation. Il en résulte que les totaux de pluie des types de circulation présentant un caractère pluvio-gène élevé connaissent dans leur ensemble des tendances positives, quelquefois significatives, même si leurs fréquences présentent des tendances négatives. À cet égard, le type cyclonique C est le meilleur exemple : tendances négatives des jours de pluie et tendances positives des totaux pluviométriques dans les trois stations. La validité de ces résultats est vérifiée par l'étude des types de circulation le plus souvent associés aux précipitations extrêmes. Il s'agit de types les plus pluvio-gènes : Cne, Cwsw, C dont les tendances des totaux pluviométriques, dans une très grande majorité, sont positives, quelques fois significatives.

Dans la plupart des cas, ces types de circulation provoquant les précipitations extrêmes sont associés au flux zonal (circulation d'ouest) ou sous-zonal (circulation de sud-ouest), entraînant avec lui des perturbations atlantiques. Une seule fois, la circulation est différente : du nord-ouest au sud-est. L'influence de ces circulations sur les précipitations est associée, d'une part, à l'activité

des fronts, d'autre part, au creusement de la dépression correspondant au courant perturbé. En effet, cette dernière caractéristique a été vérifiée par l'analyse dynamique des types de circulation où la dépression est devenue plus profonde durant la journée des précipitations extrêmes en Belgique (anomalies négatives plus élevées par rapport aux anomalies moyennes du type de circulation correspondant).

En tout cas, l'analyse dynamique des situations responsables des précipitations extrêmes n'explique que partiellement ce phénomène. Il faudrait une étude à partir d'autres sources de données et de documents pour obtenir des explications plus complètes.

BIBLIOGRAPHIE

- ALEXANDRE J., ERPICUM M. & VERNEMMEN C. 1992. Géographie de la Belgique crédit communal, *Le Climat*, Bruxelles, pp. 88-128.
- ANAGNOSTOPOULOU C., TOLIKA K. & MAHERAS P. 2008. Classification of circulation types : a new flexible automated approach applicable to NCEP and GCM datasets. *Theoretical and Applied Climatology*, Doi : 10.1007/s00704-008-0032-6.
- ESCOUROU G. 1978. *Climats et Types de Temps de Normandie*, Thèse d'Etat, H. Champion, 1081 p.
- FREI C., SCHOLL R., FUKUTOME S., SCHMIDLI J. & VIDALE P. 2006. Future change of precipitation extremes in Europe : Intercomparison of scenarios from regional climate models, *Journal of Geophysical Research*, 111, Doi : 1029/2005JD005965.
- KALNAY E. et al. 1996. The NCEP/NCAR 40-years reanalysis project. *Bulletin of The American Meteorological Society*, 77, pp. 437-471.
- TOLIKA K., ANAGNOSTOPOULOU C., MAHERAS P. & KUTIEL H. 2007. Extreme precipitation related to circulation types for four case studies over the Eastern Mediterranean. *Advances in Geosciences*, 12, pp. 87-93.

Adresse des auteurs :

Panagiotis MAHERAS
Département de Météorologie et Climatologie
Aristote Université de Thessaloniki
54124 Grèce
maheras@geo.auth.gr

Konstantia TOLIKA
Département de Météorologie et Climatologie
Aristote Université de Thessaloniki
54124 Grèce
diatol@geo.auth.gr

Christina ANAGNOSTOPOULOU
Département de Météorologie et Climatologie
Aristote Université de Thessaloniki
54124 Grèce
chanag@geo.auth.gr

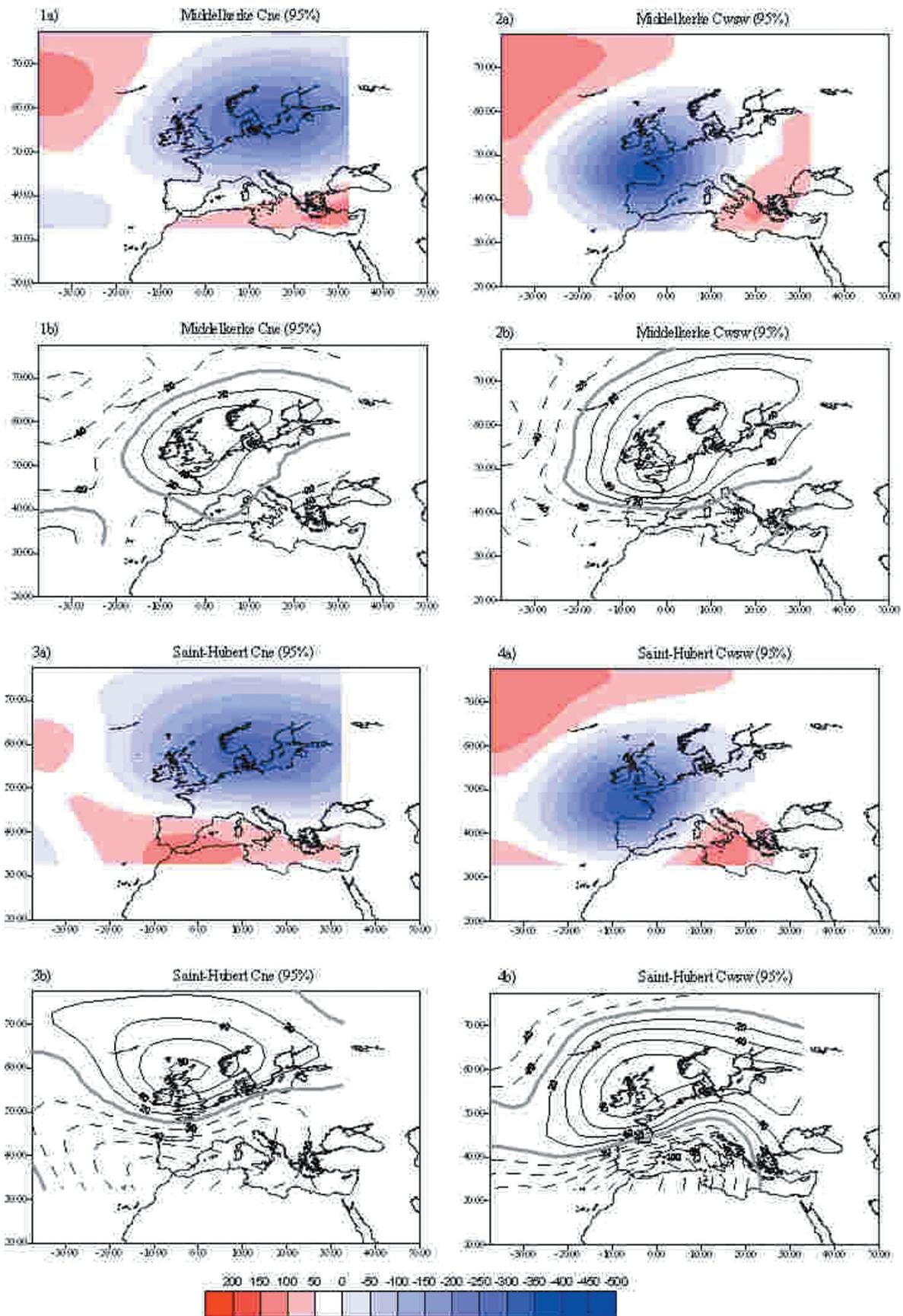


Figure 4. Les anomalies moyennes (a) de deux types de circulation des cas (A.M.C.) de fortes précipitations $\geq 95 X^e$ (95%) et les anomalies moyennes des différences (b) : anomalies moyennes générales du type (A.M.G. - A.M.C.). Les valeurs des anomalies sont multipliées par 100 (P. Maheras)

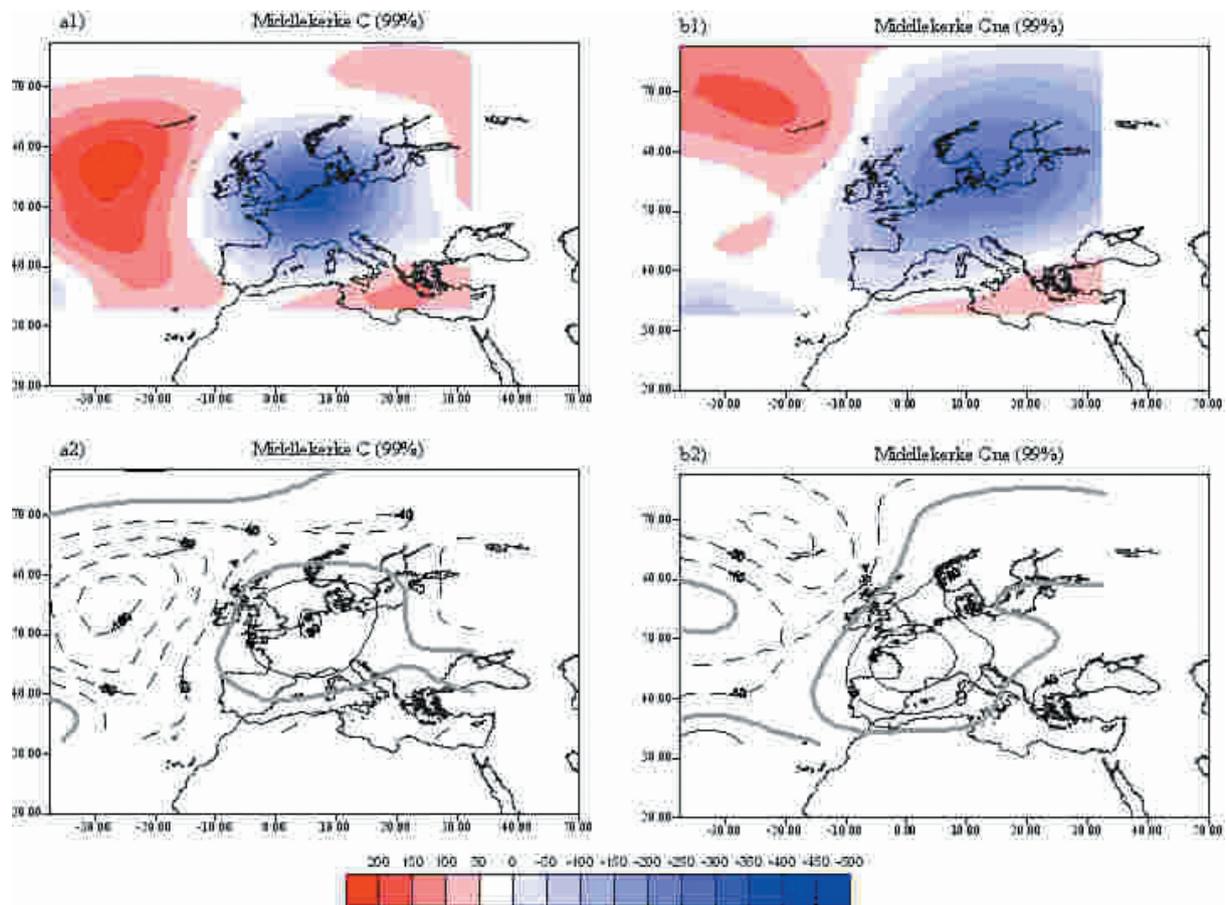


Figure 5. Les anomalies moyennes (a) de deux types de circulation des cas (A.M.C.) de fortes précipitations $\geq 99 X^\circ$. (99%) et les anomalies moyennes des différences (b) : anomalies moyennes générales du type (A.M.G – A.M.C.). Les valeurs des anomalies sont multipliées par 100 (P. Maheras)