

## ESSAI D'ÉTUDE DES TYPES DE CIRCULATION ATMOSPHÉRIQUE À DIFFÉRENTES ALTITUDES : L'EXEMPLE DE BEYROUTH

**M. TRABOULSI** <sup>(1,2)</sup>, **K. TOLIKA** <sup>(3)</sup>, **Ch. ANAGNOSTOPOULOU** <sup>(3)</sup>, **I. TEGOULIAS** <sup>(4,3)</sup> et **P. MAHERAS** <sup>(3)</sup>

<sup>1.</sup> *Université Libanaise, Faculté des Lettres, Corniche Mazraa, Beyrouth, Liban*

<sup>2.</sup> *Archéorient UMR 5133. Maison de l'Orient et de la Méditerranée, CNRS-Université Lyon 2, 7 rue Raulin, 69007 Lyon. [traboulsim@yahoo.fr](mailto:traboulsim@yahoo.fr)*

<sup>3.</sup> *Département de Météorologie et Climatologie. Aristote Université de Thessaloniki, 54124 Grèce*

<sup>4.</sup> *ELGA - Meteorological Applications Center, International Airport Macedonia, 55103 Thessaloniki, Greece*

**Résumé :** Ce travail a pour objectif l'étude des liens entre les types de circulation atmosphérique à différentes altitudes et les précipitations au-dessus de Beyrouth (Liban) pour la période 1959-2016. Les corrélations et les tendances des précipitations et les fréquences des types de circulation sont explorées. Cette étude montre qu'il y a une tendance croissante à l'apparition anticyclonique, alors que les fréquences des types de circulation cyclonique sont à tous les niveaux en baisse. Les pourcentages de précipitations, ainsi que le nombre de jours pluvieux que l'on obtient pour les mêmes types de circulation cyclonique dépendent des niveaux des hauteurs géopotentielles. Enfin, les corrélations les plus élevées apparaissent entre les fréquences des types de circulation des surfaces les plus voisines.

**Mots clés :** types de circulation, précipitations, tendance, Beyrouth-AIB.

**Abstract:** **Study of the circulation types at different altitudes: The Beirut example.** The aims of this work is to study the links between the types of atmospheric circulation at different altitudes and precipitation over Beirut (Lebanon) for the period 1959-2016. Correlations and trends in precipitation and frequencies of circulation types are explored. This study shows that there is an increasing trend of anticyclonic types over the region, while cyclonic patterns are at all levels decreasing. The percentages of precipitation and the number of rainy days obtained for the same types of cyclonic circulation depend on the levels of the geopotential heights. The highest correlations occur between the frequencies of the most neighboring surface circulation types.

**Keywords:** circulation types, precipitation, trend, Beirut-AIB.

### Introduction

Le Liban comme toute la région de la Méditerranée orientale est une zone qui se trouve dans un abri météorologique (loin des perturbations du front polaire), la situation atmosphérique en altitude étant dès lors déterminante (Blanchet, 1976 ; Traboulsi, 2004). Il est en effet connu que la classification de la circulation atmosphérique en types synoptiques ou météorologiques peut être utilisée pour comprendre les relations entre la circulation atmosphérique à grande échelle et les variables climatiques. C'est ainsi que de nombreuses études ont été publiées en partant de l'hypothèse qu'il existe une variabilité régionale des éléments climatiques qui peut être identifiée par les schémas de la circulation. Citons à cet égard les études intéressantes le Liban et qui concernent soit les précipitations moyennes (Traboulsi *et al.*, 2019) et extrêmes (Traboulsi *et al.*, 2020) à Beyrouth, soit les changements des températures à Beyrouth (Traboulsi *et al.*, 2021). Les études mentionnées ci-dessus ont mis en relation la variabilité des éléments climatiques avec les types de

circulation obtenus pour la surface de 500 hPa par l'application de la méthode objective de classification développée par Anagnostopoulou *et al.* (2009), applicable partout dans le monde. Dans ce travail nous reprenons la même méthode utilisée dans les travaux cités mais pour différentes surfaces géopotentielle.

## 1. Données et méthodes

Pour ce travail visant à comprendre le lien entre la tendance des précipitations et les types de circulation à différentes surfaces géopotentielle, deux ensembles de données différentes sont utilisés, pour la période 1958-2016 : précipitations quotidiennes de la station de Beyrouth (elles proviennent du service météorologique du Liban), et hauteurs géopotentielle quotidiennes pour les surfaces 1000 hPa, 850 hPa, 700 hPa et 500 hPa qui sont issues des Réanalyses NCEP/NCAR obtenues sur une maille de 2°5. Un système de classification des types de circulation a été adapté et appliqué à Beyrouth, à la suite des travaux de Traboulsi *et al.* (2019, 2020 et 2021) sur une fenêtre large s'étendant de 20° N à 60° N en latitude et de 10 W à 65° E en longitude avec un point central dont les coordonnées sont 35° de latitude N et 35° de longitude E.

La présente étude propose, dans un premier temps, une classification des types de circulation pour les surfaces 1000 hPa, 850 hPa, 700 hPa et 500 hPa en utilisant les anomalies des hauteurs géopotentielle et l'analyse de leurs fréquences et de leurs tendances (Anagnostopoulou *et al.*, 2009). En effet, l'utilisation des anomalies des hauteurs géopotentielle élimine la saisonnalité, et les centres d'action principaux, anticyclones ou dépressions, sont facilement détectables. Dans un deuxième temps, nous proposons l'étude des précipitations à Beyrouth en relation avec les types de circulation aux différentes hauteurs géopotentielle pour ces mêmes surfaces ainsi que leurs tendances. Enfin, dans un troisième temps, nous abordons les corrélations entre les fréquences des types de circulation pour les différents niveaux d'altitude. Le but final est, dans la mesure du possible, l'analyse des avantages et des désavantages des différentes surfaces géopotentielle pour l'étude des relations entre les précipitations et les types de circulation à Beyrouth.

## 2. Résultats

### 2.1. Fréquences élevées des types anticycloniques

Les fréquences relatives des 12 types de circulation divisées en groupes anticycloniques et cycloniques aux quatre hauteurs géopotentielle sont présentées dans le tableau 1. Comme le montre ce tableau, à l'échelle annuelle les types anticycloniques présentent des fréquences légèrement(?) plus élevées que celles des types cycloniques, la surface de 850 hPa connaît le maximum des fréquences anticycloniques (55,2 %) tandis que la surface de 1000 hPa présente le minimum de fréquences (52,0 %). En hiver et au printemps, alors que ces pourcentages sont très proches pour tous les niveaux géopotentiels, les types cycloniques sont plus fréquents que les types anticycloniques ; la surface de 500 hPa présente en hiver le maximum des fréquences (59,3 %) tandis que, pour le printemps, c'est la surface de 1000 hPa qui présente ce maximum de fréquences (58,5 %). En automne et en été, les types anticycloniques apparaissent largement majoritaires, surtout en été ; la surface de 850 hPa connaît le maximum de fréquences tant pour l'été (74,6 %) que pour l'automne (61,1 %).

**Tableau 1** : Fréquences saisonnières et annuelles des types de circulation (en pourcentage) à Beyrouth-AIB (1958-59 /2015-16) pour les niveaux 500 hPa, 700 hPa, 850 hPa et 1000 hPa.

	500 hPa	500 hPa	700 hPa	700 hPa	850 hPa	850 hPa	1000 hPa	1000 hPa
	Anticyclo	Cyclo	Anticyclo	Cyclo	Anticyclo	Cyclo	Anticyclo	Cyclo
Année	53,8	46,2	54,7	45,3	55,2	44,8	52,0	48,0
Automne	58,8	41,2	60,5	39,5	61,1	38,9	55,4	44,6
Hiver	40,7	59,3	42,2	57,8	43,3	56,7	41,3	58,7
Printem.	43,2	56,8	42,5	57,5	41,7	58,3	41,5	58,5
Été	72,2	27,8	73,3	26,7	74,6	25,4	69,5	30,5

Enfin, en ce qui concerne les fréquences individuelles des types, en règle générale (avec cependant quelques exceptions), on observe une baisse progressive, de bas en haut (de la surface 1000 hPa vers 500 hPa), des fréquences des types cycloniques (Csw et Cse) et anticycloniques (Ase) dont le centre se trouve au sud du Liban, en faveur des types (hausse des fréquences de bas en haut) dont le centre se trouve au nord du pays (résultat non illustré).

## 2.2. Corrélations temporelles entre les champs moyens des types de circulation anticycloniques et cycloniques

Le coefficient de corrélation temporelle sur la période 1958-2016 (CC) entre les champs moyens (anticycloniques et cycloniques) des types de circulation pour les quatre hauteurs géopotentielle a été calculé, individuellement pour chaque saison. Les résultats de l'analyse de corrélation sont présentés dans les tableaux 2 et 3. La corrélation entre les types anticycloniques (entre eux) (ou cycloniques) de toutes les surfaces indique des signes positifs, tandis que la corrélation entre anticycloniques et cycloniques (ou l'inverse) indique des signes négatifs. L'analyse de corrélation se réfère aux valeurs absolues. Les types de circulation hivernale à 1000 hPa présentent des coefficients de corrélation qui varient entre 0,567 et 0,930 avec les types de circulation des autres surfaces. Les coefficients de corrélation au printemps présentent des valeurs inférieures à celles de l'hiver, ils varient entre 0,481 et 0,925. Il est à noter que les valeurs les plus élevées des CC tant pour l'hiver que pour le printemps apparaissent entre les surfaces les plus voisines (hiver = 0,922 entre les types cycloniques de 700 hPa et 500 hPa).

**Tableau 2** : Coefficients de corrélation entre les types cycloniques et anticycloniques des quatre classifications pour l'hiver (en grisé) et le printemps (en gras).

	Print.	500 hPa		700 hPa		850 hPa		1000 hPa	
Hiver		Anti	Cyclo	Anti	Cyclo	Anti	Cyclo	Anti	Cyclo
500 hPa	Anticyclo.	1	-1	<b>0,925</b>	<b>-0,925</b>	<b>0,768</b>	<b>-0,768</b>	<b>0,481</b>	<b>-0,481</b>
	Cyclo.	-0,999	1	-1	<b>1</b>	<b>-0,913</b>	<b>0,913</b>	<b>-0,670</b>	<b>0,670</b>
700 hPa	Anticyclo.	0,922	-0,919	1	-1	<b>0,913</b>	<b>-0,913</b>	<b>0,670</b>	<b>-0,670</b>
	Cyclo.	-0,923	0,922	-0,999	1	<b>-0,913</b>	<b>0,913</b>	<b>-0,670</b>	<b>0,670</b>
850 hPa	Anticyclo.	0,782	-0,777	0,921	-0,918	1	-1	<b>0,869</b>	<b>-0,869s</b>
	Cyclo.	-0,782	0,779	-0,922	0,920	-1,00	1	<b>-0,869</b>	<b>0,869</b>
1000 hPa	Anticyclo.	0,576	-0,567	0,757	-0,750	0,92	-0,921	1	-1
	Cyclo.	-0,580	0,572	-0,761	0,755	-0,93	0,925	-0,999	1

**Tableau 3** : Coefficients de corrélation entre les types cycloniques et anticycloniques des quatre classifications pour l'automne (en gras) et l'été (en grisé).

	Autom.	500 hPa		700 hPa		850 hPa		1000 hPa	
Ete		Anti	Cyclo	Anti	Cyclo	Anti	Cyclo	Anti	Cyclo
	Anti	1	<b>-1</b>	<b>0,887</b>	<b>-0,887</b>	<b>0,659</b>	<b>-0,659</b>	<b>0,298</b>	<b>-0,298</b>
500 hPa	Cyclo	-1	<b>1</b>	<b>-0,887</b>	<b>0,887</b>	<b>-0,659</b>	<b>0,659</b>	<b>-0,298</b>	<b>0,298</b>
	Anti	0,885	-0,885	1	-1	<b>0,898</b>	<b>-0,898</b>	<b>0,619</b>	<b>-0,619</b>
700 hPa	Cyclo	-0,885	0,885	-1	1	<b>-0,898</b>	<b>0,898</b>	<b>-0,619</b>	<b>0,619</b>
	Anti	0,664	-0,664	0,905	-0,905	1	-1	<b>0,847</b>	<b>-0,847</b>
850 hPa	Cyclo	-0,655	0,655	-0,904	0,904	-0,999	1	<b>-0,847</b>	<b>0,847</b>
	Anti	0,418	-0,418	0,725	-0,725	0,913	-0,912	1	<b>-1</b>
1000 hPa	Cyclo	-0,42	0,418	-0,725	0,725	-0,913	0,912	-1	1

Les valeurs des CC pour l'été et l'automne apparaissent relativement inférieures à celles de l'hiver et du printemps. La quantification a été faite par la comparaison entre les valeurs maximales et minimales de CC. Ces valeurs varient entre 0,912 et 0,418 pour l'été et entre 0,887 et 0,298 pour l'automne. Encore une fois les valeurs les plus élevées des CC apparaissent entre les surfaces les plus voisines (tableau 3).

### 2.3. Tendances des types de circulation et des précipitations

Les tendances des types de circulation apparaissent partout significatives au seuil de 0,05 ( test de Mann Kendall :  $K_{test} > 2$  voire 3 dans la plupart des cas. A savoir la tendance est significative au seuil de 5 % si  $K_{test}$  est supérieur ou égal à 1,95 en valeur absolue). , positives pour les anticycloniques et négatives pour les cycloniques (tableau 4) excepté en été pour les types cycloniques de la surface 1000 hPa.

**Tableau 4** : Tendances saisonnières et annuelles des types de circulation à Beyrouth-AIB (1958-59/2015-16) pour les niveaux 500 hPa, 700 hPa, 850 hPa et 1000 hPa.

	500 hPa	500 hPa	700 hPa	700 hPa	850 hPa	850 hPa	1000 hPa	1000 hPa
	Anti	Cyclo	Anti	Cyclo	Anti	Cyclo	Anti	Cyclo
Année	+*	-*	+*	-*	+*	-*	+*	
Automne	+*	-*	+*	-*	+*	-*	+*	-*
Hiver	+*	-*	+*	-*	+*	-*	+*	-*
Printem.	+*	-*	+*	-*	+*	-*	+*	-*
Été	+*	-*	+*	-*	+*	-*	+*	-

Les hauteurs des précipitations annuelles et saisonnières (en pourcentages) des types cycloniques (tableau 5) connaissent une baisse progressive des niveaux supérieurs (500 hPa) aux niveaux inférieurs (1000 hPa) et, au contraire, les précipitations anticycloniques présentent une hausse des surfaces supérieures aux surfaces inférieures. À l'échelle saisonnière, le printemps connaît partout le pourcentage le plus élevé des précipitations cycloniques (97,1 %) suivi par l'hiver (93,6 %). Au contraire, l'été présente partout le maximum des pourcentages des précipitations anticycloniques ; ce pourcentage connaît une hausse progressive des niveaux supérieurs (37 %, à 500 hPa) aux niveaux inférieurs (56,7 % à 1000 hPa) ; ce dernier pourcentage est supérieur à celui des types cycloniques (43,3 %) pour la même saison et la même surface. En ce qui concerne les apports des précipitations des types cycloniques individuels, il est évident que le type C dont le centre se trouve sur le Liban (Traboulsi *et al*, 2019) présente les hauteurs maximales moyennes (par comparaison avec celles des autres types de circulation ,p.e. pour la surface de 500hpa et pour

l'hiver, le type C=36,8% et le second type C<sub>sw</sub>=20,5%) pour toutes les saisons et toutes les surfaces (résultat non illustré) suivi par le type C<sub>se</sub> pour les deux premières surfaces (1000 et 850 hPa) et par le type C<sub>sw</sub> pour les deux surfaces plus élevées (700 et 500 hPa) pour toutes les saisons excepté l'été. L'automne est la saison qui connaît le pourcentage le plus élevé pour le type C dans toutes les surfaces (excepté l'été pour la surface de 700 hPa) sachant que la surface de 700 hPa enregistre le pourcentage le plus élevé des précipitations annuelles (43,4 %) pour ce même type C.

**Tableau 5 :** Hauteurs saisonnières et annuelles des précipitations (en pourcentage) à Beyrouth-AIB (1958-59/2015-16) pour les niveaux 500 hPa, 700 hPa, 850 hPa et 1000 hPa.

	500 hPa	500 hPa	700 hPa	700 hPa	850 hPa	850 hPa	1000 hPa	1000 hPa
	Anti	Cyclo	Anti	Cyclo	Anti	Cyclo	Anti	Cyclo
Année	6,1	93,9	6,7	93,3	10,5	87,4	16,6	83,4
Automne	7,2	92,8	7,6	92,4	11,6	88,4	19,7	80,3
Hiver	6,4	93,6	7,2	92,8	11,2	88,8	15,8	84,2
Printemps	2,9	97,1	3,4	96,6	6,3	93,7	14,7	85,3
Été	37,0	63,0	41,4	58,6	41,6	58,4	56,7	43,3

Les tendances des hauteurs des précipitations anticycloniques, tant à échelle annuelle que saisonnière, pour toutes les surfaces apparaissent positives et significatives au seuil de 5 % selon le test de Mann-Kendall, à l'exception de l'été (tableau 6). Au contraire, les hauteurs des précipitations cycloniques pour l'année, pour toutes les saisons et pour toutes les surfaces présentent des tendances négatives significatives au seuil de 5 %, excepté les précipitations cycloniques de l'automne des surfaces 500 hPa et 700 hPa qui connaissent des tendances positives non significatives (tableau 6). Il est à noter que ces derniers résultats sont en accord avec les résultats des travaux antérieurs concernant le même sujet (Traboulsi *et al*, 2019).

**Tableau 6 :** Tendances saisonnières et annuelles des hauteurs de précipitations à Beyrouth-AIB (1958-59/2015-16) pour les niveaux 500 hPa, 700 hPa, 850 hPa et 1000 hPa.

	500 hPa	500 hPa	700 hPa	700 hPa	850 hPa	850 hPa	1000 hPa	1000 hPa
	Anti	Cyclo	Anti	Cyclo	Anti	Cyclo	Anti	Cyclo
Année	+*	-*	+*	-*	+*	-*	+*	-*
Automne	+*	+	+*	+	+*	-	+*	-
Hiver	+*	-	+*	-	+*	-*	+*	-*
Printem.	+*	-*	+*	-*	+*	-*	+*	-*
Été	+	-*	+	-*	+	-*	+	-*

Enfin, les tendances saisonnières et annuelles du nombre de jours des précipitations pour toutes les surfaces, en règle générale, ne diffèrent pas beaucoup des tendances des hauteurs. C'est ainsi que l'on observe presque partout des tendances positives significatives des jours de pluies anticycloniques et au contraire des tendances négatives des jours de pluie cycloniques avec quelques exceptions particulièrement en été (tableau 7).

**Tableau 7** : Tendances saisonnières et annuelles des nombres de jours de précipitations à Beyrouth-AIB (1958-59 /2015-16) pour les niveaux 500 hPa, 700 hPa, 850 hPa et 1000 hPa.

	500 hPa	500 hPa	700 hPa	700 hPa	850 hPa	850 hPa	1000 hPa	1000 hPa
	Anti	Cyclo	Anti	Cyclo	Anti	Cyclo	Anti	Cyclo
Année	+*	-*	+*	-*	+*	-*	+*	-*
Automne	+	-*	+	-*	+*	-*	+	-*
Hiver	+*	-*	+*	-*	+*	-*	+*	-*
Printem.	+*	-*	+*	-*	+*	-*	+*	-*
Été	+	-*	+	-*	+	-*	+	+

### 3. Conclusion et discussion

Un système de classification des types de circulation a été adapté et appliqué à Beyrouth, à la suite des travaux de Traboulsi *et al.* (2019, 2020 et 2021) et une étude comparative entre différentes hauteurs géopotentielles (1000 hPa, 850 hPa, 700 hPa et 500 hPa) a été réalisée. Les résultats les plus importants sont les suivants :

- Les fréquences des types anticycloniques à l'échelle annuelle sont partout plus élevées que celles des types cycloniques, mais à l'échelle saisonnière, au printemps et en hiver, les types cycloniques sont, dans toutes les surfaces, largement supérieurs à celles des types anticycloniques.
- Les coefficients de corrélation les plus élevés entre les types de circulation, cycloniques ou anticycloniques, apparaissent entre les surfaces les plus voisines surtout en hiver et au printemps.
- La tendance généralisée négative des précipitations cycloniques, pour toutes les saisons et les surfaces, semble être responsable de la baisse significative des précipitations saisonnières et annuelles à Beyrouth car la tendance positive des précipitations anticycloniques ne peut pas compenser, ne serait-ce que partiellement, la baisse des pluies cycloniques.
- La tendance généralisée positive et significative des types anticycloniques mais surtout la tendance négative et significative des types cycloniques dans tous les niveaux de l'atmosphère confirme l'hypothèse que, en Méditerranée orientale, il y a un déplacement progressif vers le nord des trajectoires cycloniques (Maheras *et al.*, 2002) qui se traduit par la tendance négative et significative des précipitations à Beyrouth et également en Grèce (Maheras *et al.*, 2004).
- La baisse progressive de fréquences de bas en haut (de 1000 hPa à 500 hPa) d'un certain types cycloniques dont le centre se trouve au sud de Liban en faveur des types cycloniques dont le centre se trouve au nord du pays est en accord avec l'hypothèse que les dépressions de Chypre sont caractérisées par des champs barocliniques remarquablement plus forts comparés à d'autres dépressions de la région méditerranéenne (Maheras *et al.*, 2002). Ce fait, comme nous l'avons déjà analysé, s'exprime par les hauteurs de pluie plus élevées dans les basses surfaces (1000 et 850 hPa) lors du type Cse à cause des fréquences plus fortes et au contraire des hauteurs de pluie plus élevées dans les hautes surfaces (700 et 500 hPa) lors du type Cne.

Les travaux antérieurs concernent uniquement la surface de 500hpa. Donc, les résultats de ce travail sont originaux surtout en ce qui concerne la comparaison des résultats parmi les différentes surfaces. Ces résultats vraiment confirment les résultats des travaux antérieurs concernant la méditerranée orientale.

▪ Enfin, dans le futur, on se propose d'appliquer aux résultats déjà obtenus des méthodes de statistiques plus avancées et plus sophistiquées afin d'avoir des réponses plus claires en ce qui concerne les avantages et les désavantages de la méthode d'étude des types de circulations aux différentes surfaces d'altitude.

## **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**, p. 3-15.

Blanchet G., 1976 : *Le temps au Liban, approche d'une climatologie synoptique*. Thèse de 3<sup>e</sup> cycle, Lyon. T. 1 : 477 p. (texte et tabl.), T. II : (Atlas).

Maheras P., Flocas H.A., Patrikas I., 2002 : On the vertical structure of composite surface cyclones in the Mediterranean. *Theoretical and Applied Climatology* **71**, p. 199-217.

Maheras P., Tolika K., Anagnostopoulou Ch., Patrikas I., Flocas H.A., 2004 : On the relationships between circulation types and changes in variability in Greece. *International Journal of Climatology*, **24**, p. 1695-1712.

Traboulsi M., 2004 : *Les précipitations au Proche-Orient, variabilité spatio-temporelle et relations avec la dynamique de l'atmosphère (1960-61/1989-90)*. Atelier National de reproduction des thèses. Lille, 233 p. ISBN : 2-7295-6191-9.

Traboulsi M., Tolika K., Anagnostopoulou C., Maheras P., 2019 : Les précipitations à Beyrouth et leurs relations avec les types de circulation atmosphérique. *Actes du XXXII<sup>ème</sup> colloque de l'Association Internationale de Climatologie*, Thessaloniki 2019, p. 523-528.

Traboulsi M., Tolika K., Anagnostopoulou C., Maheras P., 2020 : Les précipitations extrêmes à Beyrouth et leurs relations avec les types de circulation atmosphérique. *Actes du XXXIII<sup>ème</sup> colloque de l'Association Internationale de Climatologie*, Rennes 2020, p. 685-690.

Traboulsi M., Tolika K., Anagnostopoulou C., Maheras P., 2021 : Les changements de températures extrêmes à Beyrouth et leurs relations avec les types de circulation atmosphérique. *Actes du XXXIV<sup>ème</sup> colloque de l'Association Internationale de Climatologie*, Casablanca 2021, en publication.