

LA SAISON PLUVIEUSE AU PROCHE-ORIENT : UNE TENDANCE AU RACCOURCISSEMENT

Myriam TRABOULSI ^{1,2}

¹ Université Libanaise, Faculté des Lettres
Beyrouth – Liban

² Archéorient UMR 5133 – Maison de l'Orient et de la Méditerranée
Université Lyon2
7 rue Raulin
69365 Lyon Cedex 7 – France
traboulsim@yahoo.fr

Résumé

Les précipitations proche-orientales sont caractérisées par une grande variabilité interannuelle, particulièrement au début et à la fin de la saison pluvieuse, lorsque se produisent les précipitations les plus utiles pour la vie végétative. Cette contribution propose de déterminer des dates de démarrage et de fin de la saison pluvieuse pour la période allant de septembre 1970 à juin 2002 en appliquant une Analyse en Composantes Principales sur les données quotidiennes de 20 stations réparties sur le Liban, la Syrie, la Jordanie et Israël. Les valeurs minimales et maximales des scores cumulés de la première composante (42,2 % de la variance), calculées année par année, ont permis de déterminer des dates de début et de fin de la saison pluvieuse. Les séries temporelles montrent une tendance au raccourcissement de cette saison qui est plus liée à une fin précoce qu'à un démarrage tardif. Ce raccourcissement est associé à une tendance à la hausse du géopotential 500 hPa, durant la saison printanière, au-dessus de la zone étudiée.

Mots-clés : Variabilité pluviométrique, Proche-Orient, début et fin de saison pluvieuse, géopotential 500 hPa.

Abstract

The rainy season in the Middle East: a tendency to shortening

Near East precipitation is characterized by a high interannual variability especially at the beginning and end of the rainy season. Rains at this time of the year are most useful for vegetative life. This contribution proposes to determinate onset and cessation dates of the rainy season for the period September 1970 to June 2002 by applying a Principal Component Analysis on daily data from 20 stations spread over Lebanon, Syria, Jordan and Israel. The minimum and maximum cumulative scores of the first component (42.2% of the variance) calculated year by year enabled to determine the onset and cessation dates. The time series show a trend towards a shortening of the rainy season, which is mainly due to an early end rather than to a delayed start. This shortening is associated with an upward trend in 500 hPa geopotential during the spring season, over the area studied.

Keywords: Rainfall variability, Middle East, onset and cessation of the rainy season, 500 hPa geopotential.

Introduction

En général, la saison des pluies est caractérisée par son cumul pluviométrique, mais la qualité de cette saison ne peut être réduite à cette seule caractéristique. D'autres indicateurs sont à prendre en compte comme la fréquence et la durée des périodes sèches qui s'intercalent au sein de la saison, le nombre total de jours de pluie, notamment ceux qui sont capables de satisfaire les besoins en eau des plantes, enfin, les dates de démarrage et de fin de la saison pluvieuse (sa durée) qui sont l'objet de cette étude. Depuis les années 1970, les études menées sur le démarrage de la saison des pluies se multiplient dans le monde (Camberlin et Philippon, 2002 ; Camberlin *et al.*, 2009 ; Liebman *et al.*, 2007) et particulièrement en Afrique. En général, les méthodes proposées sont divisées en deux catégories : 1) celles fondées sur la répartition des précipitations (ou plus généralement sur le bilan hydrique), approche

agronomique ; 2) celles prenant en compte la dynamique de l'atmosphère, approche aérologique.

A l'échelle du Proche-Orient, les études sur la caractérisation de la saison pluvieuse font défaut. Reiser et Kutiel (2007) en ont réalisé une sur l'ensemble de la Méditerranée (sa rive Nord notamment), le Proche-Orient n'étant représenté que par une seule station : Jérusalem. Dans cette étude, la durée de la saison pluvieuse a été définie comme la période recevant entre 10 % (date du début de la saison de pluies) et 90 % (date de fin) des précipitations annuelles. Mais cette méthode ne permet pas une définition pertinente de la saison pluvieuse parce qu'elle néglige une caractéristique importante des précipitations méditerranéennes, à savoir, les périodes sèches intercalaires séparant les épisodes pluvieux et qui sont parfois très longues. La détermination des dates de début et de fin de la saison pluvieuse pour la région proche-orientale est délicate étant donné le caractère des précipitations méditerranéennes. Elles sont concentrées sur un petit nombre de jours et tombent au cours d'épisodes qui durent en général de 2 à 10 jours, lors d'advections d'air septentrional froid (Blanchet et Traboulsi, 1993), séparées par des périodes plus ou moins longues de beau temps anticyclonique. La fréquence de ces épisodes « humides », leur durée ainsi que celle des périodes sèches qui les séparent, varient considérablement d'une année à l'autre. Cette variabilité rend très difficile l'adoption de l'approche agronomique, notamment compte tenu de l'extension et de la configuration géographique de ce domaine d'étude qui reçoit entre 50 et 1800 mm de précipitation moyenne annuelle. Il est encore plus difficile d'adopter l'échelle aérologique parce que les données atmosphériques ne sont pas toujours disponibles, sans oublier que l'extension spatiale des systèmes perturbés en Méditerranée orientale varie elle aussi, selon plusieurs paramètres géographiques (altitude, latitude, continentalité) et atmosphériques (diminution de l'alimentation des perturbations en air froid avec la latitude).

Etant donné la grande variabilité des précipitations des périodes de transition (automne et printemps), une « bonne » ou « mauvaise » année pluviométrique est déterminée non par le total annuel mais plutôt par la distribution de la pluie au cours de la saison pluvieuse. Ceci pose le problème de la durée de cette saison, donc de la variabilité des dates de démarrage des pluies et de leur fin. A quantité égale, deux saisons pourront se révéler « bonne » ou « mauvaise » en fonction essentiellement de la répartition intra-saisonnière des pluies, et de son adéquation avec les besoins en eau de la végétation (Nieuwolt, 1986 ; Jackson, 1989 ; Camberlin, 2004). Les résultats aideront à déterminer la période d'irrigation, les dates de semis et de moissons, la période de rationnement en eau ainsi que la quantification des besoins en eau qui sont accrus dans une région à démographie galopante.

Dans cette étude, nous allons d'abord déterminer des dates régionales, au lieu de locales, pour le début et la fin de la saison des pluies au Proche-Orient, sur la base des données disponibles des précipitations. Puis nous analysons les variations interannuelles de ces dates depuis les années 1970-71, et leur relation avec la durée totale de la saison ainsi qu'avec les cumuls pluviométriques. Des dates de précipitations sont calculées dans les différentes sous-régions composant l'espace proche-oriental afin de vérifier la représentativité des dates régionales ainsi calculées. Enfin, nous analysons le lien entre la variabilité de la durée de la saison pluvieuse et la circulation atmosphérique régionale.

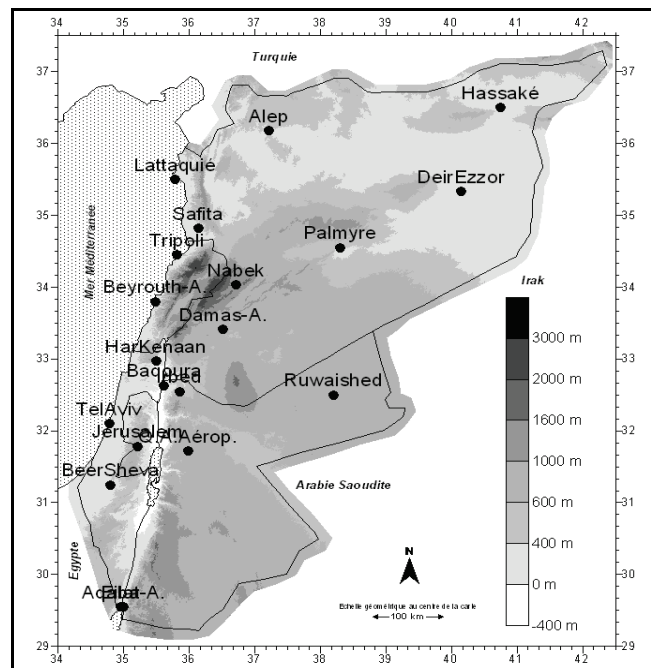
1. Données et méthodes

1.1. Les données climatiques

Pour cette étude, nous utilisons les données pluviométriques quotidiennes de 20 stations (inégalement réparties dans l'espace, notamment au Liban) couvrant le Liban, la Syrie, la Jordanie et Israël (figure 1) pour une période de 32 ans allant de septembre 1970 à juin 2002

(années hydrologiques). Ces données sont recueillies directement auprès des Services Météorologiques des pays concernés sauf pour Israël. Dans ce dernier cas, elles proviennent du site web suivant : <http://climexp.knmi.nl/>. Les stations choisies sont réparties entre 8 stations en Syrie, 5 en Jordanie, 5 en Israël et 2 au Liban (Beyrouth et Tripoli sont les deux seules stations possédant des données quotidiennes complètes pour la période retenue). Ce choix est déterminé par la disponibilité des séries pluviométriques complètes, d'où la concentration des stations dans les régions intérieures (notamment en Syrie) du domaine d'étude.

Figure 1 : La zone d'étude (Liban, Syrie, Jordanie et Israël) (d'après Depraetere, 1998).
The study area (Lebanon, Syria, Jordan and Israel) (from Depraetere, 1998).



1.2. Les méthodes

En général, les méthodes utilisées pour la détermination des dates de démarrage et de fin se basent sur deux approches.

1.2.1. Approches agronomiques et aérologiques

Le démarrage *local* ou *agronomique* de la saison de pluies est souvent défini à partir de critères agroclimatologiques basés sur des seuils empiriques de précipitations ou d'évapotranspiration potentielle à l'échelle de la station. Cette approche permet d'appréhender le stress hydrique des plantes au travers du seuillage des précipitations. Ainsi, ces valeurs seuil garantissent la disponibilité en eau nécessaire à la plante durant la période végétative afin d'éviter le flétrissement des plantes et la perte des récoltes (Walter, 1967 ; Omotosho, 1990, 1992 ; Omotosho *et al.*, 2000). Marengo *et al.* (2001), dans leur étude portant sur le bassin amazonien, prennent en compte des moyennes pentadaires (moyennées sur plusieurs stations) en les assortissant d'un seuil. Le résultat obtenu, selon les auteurs, reste sensible au choix de ce seuil.

La majorité des études agroclimatologiques, (Stern *et al.* 1981 ; Nicholls, 1984 ; Sivakumar, 1988 ; Omotosho, 1992 ; Diop, 1996 ; Houndénou et Hernandez, 1998 ; Omotosho *et al.*, 2000 ; Dodd et Jolliffe, 2001 ; Marengo *et al.*, 2001 ; Ati *et al.*, 2002), proposent, pour la date de démarrage de la saison des pluies, une définition basée sur l'occurrence d'une période humide de N jours recevant X mm de pluie, à condition, qu'une période de S jours secs ne soit pas observée après la date de démarrage de la saison des pluies.

Quant à la date de fin de la saison pluvieuse, elle est déterminée par symétrie à la date de démarrage de cette saison. Cette définition, dépourvue de justification agronomique, permet uniquement une comparaison des éléments caractéristiques que sont le début de la saison des pluies et sa fin (Marteau, 2010 ; Marteau *et al.*, 2010).

L'approche aérologique utilisée pour la détermination des dates de démarrage de la saison des pluies, se base sur les caractéristiques spatiales et temporelles des processus météorologiques, comme les systèmes convectifs et les perturbations (Sultan et Janicot, 2000, Balme *et al.*, 2005 ; Fontaine *et al.*, 2008). L'utilisation des données atmosphériques reste délicate, celles-ci n'étant pas toujours disponibles (Camberlin et Diop, 2003 ; Camberlin et Okoola, 2003 ; Camberlin, 2004), mais elle fournit une définition plus robuste (Joseph *et al.*, 1994 ; Fasullo et Webster, 2003).

1.2.2. L'approche retenue

Etant donné les caractéristiques climatiques et l'extension géographique (308 702 km²) de la région étudiée, nous n'avons pas retenu les approches citées plus haut pour délimiter la saison pluvieuse, mais nous avons adopté une démarche similaire à celle appliquée au Sénégal (Camberlin et Diop, 2003) et en Afrique de l'Est (Camberlin et Okoola, 2003), même si les climats sont différents. Les auteurs ont adopté, pour la détermination des dates de démarrage et de fin de la saison de pluies, une échelle régionale et non locale (l'échelle locale – *i.e.* stationnelle – sert de base pour l'approche agronomique) ; les résultats ont été jugés satisfaisants après validation sur le terrain. Cette méthode repose sur l'utilisation des anomalies cumulées des précipitations qui vont décrire l'évolution de la saison des pluies.

Afin d'obtenir des dates de démarrage et de fin pertinentes, pour le grand espace géographique étudié, nous avons appliqué une Analyse en Composantes Principales en utilisant une matrice de corrélation (qui donne initialement le même poids à toutes les stations de la matrice d'entrée), et en prenant les stations en variables et les pluies quotidiennes en observations. Afin d'atténuer l'asymétrie des distributions, nous avons appliqué l'ACP sur la racine carrée des données journalières des 20 stations, soit une matrice de 9696 lignes (303 jours x 32 années) et de 20 colonnes (20 stations). Dans un deuxième temps, nous avons procédé à une rotation (de type Varimax) des composantes obtenues par l'ACP classique (Richman, 1986). Cette méthode permet la régionalisation des stations dans le but de comparer les dates sous-régionales calculées avec celle de l'ensemble de l'espace proche-oriental.

Le choix de la période retenue pour l'étude, du 1^{er} septembre au 30 juin (303 jours pour chaque saison pluvieuse, les 29 février sont éliminés), est justifié par le fait que cette période englobe *a priori* toutes les dates potentielles de démarrage et de fin de la saison des pluies pour l'ensemble de la région.

Pour résumer les caractéristiques de la saison pluvieuse, nous avons appliqué une méthode de classification automatique (Classification Hiérarchique Ascendante, CHA) pour classer les 32 années. Le critère d'agrégation est celui de Ward (Sanders, 1990). Les scores cumulés de la première composante servent de base pour cette analyse typologique.

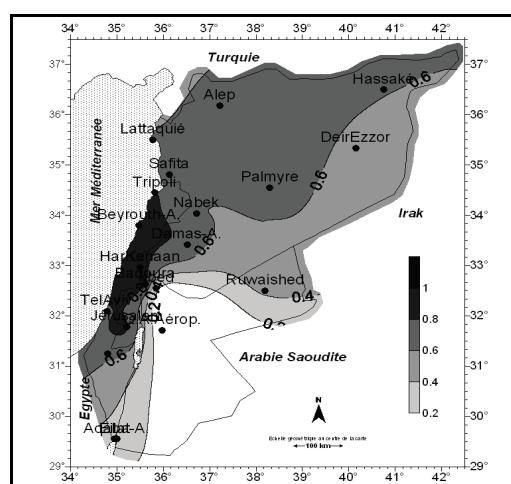
Une étude fréquentielle est ensuite appliquée sur les dates de démarrage et de fin de la saison des pluies aux niveaux de probabilité 20, 40, 50, 60 et 80 % correspondant aux dates de début et de fin qui sont dépassées deux années sur dix (Q4), quatre années sur dix (Q3), cinq années sur dix (médiane), six années sur dix (Q2) et huit années sur dix (Q1) (Groupe Chadule, 1994 ; Lahousse et Piédanna, 1998). Cette étude fait ressortir la distribution des précipitations au sein de la saison des pluies et les périodes à risque pluviométrique pour les cultures.

2. Définitions des dates de démarrage et de fin de la saison pluvieuse

2.1. Détermination des dates de démarrage et de fin de la saison pluvieuse

L'Analyse en Composantes Principales (avant rotation) pour la période 1970-2002 montre que la première composante principale (CP1) explique 42,2 % de la variance (la deuxième composante – CP2 – explique 11,2 % de la variance totale, alors que la troisième et la quatrième en expliquent respectivement 6,8 et 6,2 %), ce qui est un pourcentage très élevé compte tenu de la répartition inégale des précipitations quotidiennes. Les coefficients de saturation montrent qu'une part importante de la variance est commune à toutes les stations même à l'échelle journalière (figure 2). Les coefficients les plus faibles (coefficients de corrélation $< 0,2$) sont enregistrés dans le Sud-Est de la région étudiée (absence quasi complète de stations). Cependant, toutes les stations sont corrélées positivement à la première composante, ce qui signifie que toutes les stations ont une pluviométrie partiellement commune.

Figure 2 : Analyse en Composantes Principales (avant rotation) des précipitations quotidiennes de septembre 1970 à juin 2002 : coefficients de saturation de la première composante. *Principal Component Analysis (before rotation) of daily precipitation from September 1970 to June 2002 (factor loadings of the first component).*



La chronique associée à la première composante présente une caractérisation générale des différentes saisons des pluies (figure 3). Pour déterminer les dates de démarrage et de fin de la saison pluvieuse, nous calculons les scores cumulés de la première composante, individuellement pour chaque année du 1^{er} septembre à 30 juin (figure 4). Le maximum et le minimum sont considérés (successivement) comme les dates du début et de fin de la saison pluvieuse.

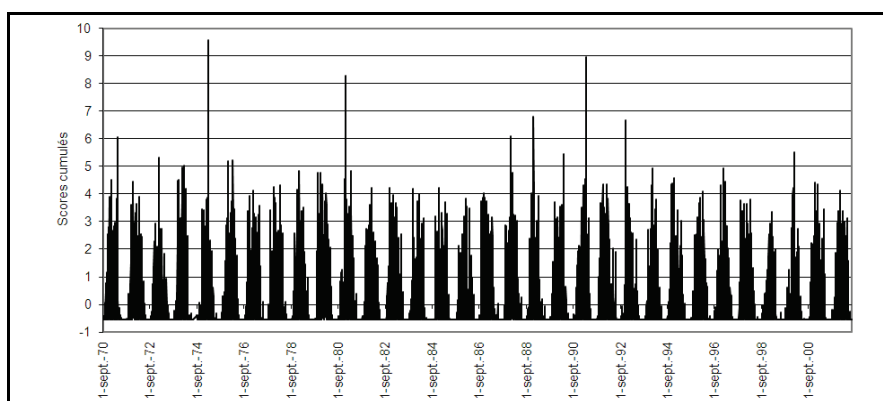


Figure 3 : Analyse en Composantes Principales des précipitations quotidiennes de septembre 1970 à juin 2002 : chronique associée à la première composante représentant les différentes saisons pluvieuses. *Principal Component Analysis of daily precipitation from September 1970 to June 2002: time series associated with the first component representing the different rainy seasons.*

Selon cette détermination, les années sont groupées en deux catégories. La première catégorie englobe les années durant lesquelles la saison des pluies est bien structurée avec des dates faciles à déterminer. Cela est dû à la continuité temporelle des épisodes pluvieux avec une fréquence faible des périodes sèches intercalaires (figure 4a). La deuxième catégorie présente les saisons mal structurées avec une incertitude dans la détermination des dates très grande (figure 4b).

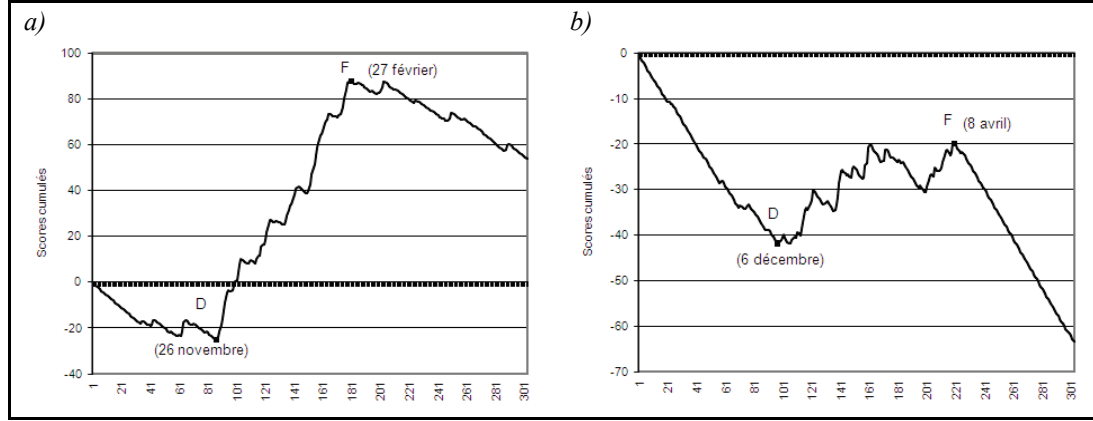


Figure 4 : Scores cumulés de la 1^{ère} composante principale des précipitations journalières pour les années a) 1992 et b) 1999. Les symboles indiquent respectivement le démarrage (D) et la fin (F) de la saison des pluies, au Proche-Orient, du premier septembre (1) au 30 juin (303). *Cumulative score of the first principal component of daily precipitation for the years a) 1992 b) 1999. The symbols respectively indicate the start (D) and end (F) of the rainy season in the Middle East, September 1 (a) June 30 (303).*

2.2. Validation des dates de démarrage et de fin de la saison pluvieuse

Pour vérifier la validité des dates, nous établissons des séquences composites qui consistent à calculer la moyenne des pluies totalisées de 1 à 4 jours avant et après la date de démarrage de la saison des pluies de chaque année sur l'ensemble de la période (32 ans). L'augmentation des précipitations le premier jour après la date de démarrage est presque générale sur l'ensemble de la région, même si les quantités sont beaucoup plus grandes dans le Nord-Ouest. La cartographie de ces composites, montre bien l'installation brusque des pluies (figure 5). Le même calcul, appliqué aux dates de fin de la saison des pluies, donne une différence similaire entre les périodes pré- et post-fin de saison pluvieuse (figure 6), avec un retrait brusque des pluies.

Pour évaluer la robustesse des dates obtenues, nous avons utilisé un coefficient empirique d'indétermination (CI) des dates (Camberlin, *com. pers.*). Cet indice *CI*, défini sur la base des analyses produites par Camberlin et Diop (2003), est calculé comme une somme des scores cumulés des dates encadrant la date de démarrage, selon la formule :

$$CI_a = \sum_{j=dmi-10}^{DSP_a-1} \frac{1}{1 + (SC_{aj} - SCDSP_a)^2} * (abs(J - DSP_a))^{0.5} + \sum_{j=DSP_a+1}^{dma+10} \frac{1}{1 + (SC_{aj} - SCDSP_a)^2} * (abs(J - DSP_a))^{0.5}$$

Avec *dmi*, la date la plus précoce du démarrage des pluies sur les 32 ans ; *dma*, la date la plus tardive ; *DSP_a*, la date du démarrage des pluies pour l'année *a* ; *SCDSP_a*, le score cumulé obtenu à la date *DSP_a* pour l'année *a* ; *SC_{aj}*, le score cumulé obtenu au jour *j* de l'année *a*.

Plus le coefficient d'indétermination est grand, plus l'incertitude sur la date est élevée. L'introduction du coefficient *abs(j - DSP_a)* permet de tenir compte du fait que, si un jour avec un SC proche de celui de la date de démarrage se situe à 2 à 3 jours seulement de cette date, l'incertitude est faible. Par contre, si on obtient un jour avec un SC lui aussi proche de celui de

la date de démarrage, mais éloigné dans le temps (30 jours par exemple), alors le degré d'incertitude est beaucoup plus grand.

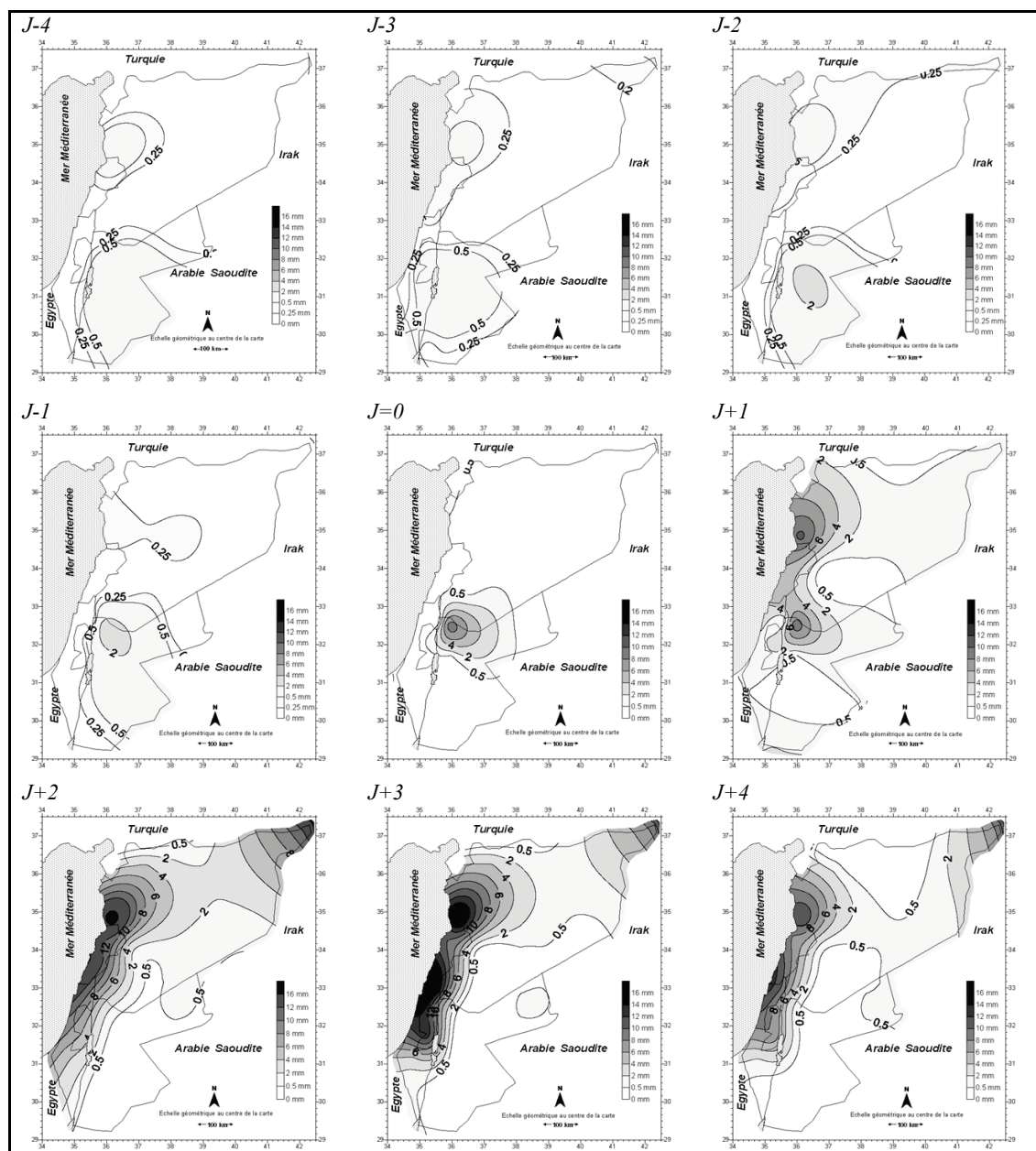


Figure 5 : Précipitations moyennes des jours allant de J-4 à J+4 en fonction de la date de démarrage de la saison des pluies (J=0) au Proche-Orient (du 1^{er} septembre 1970 au 30 juin 2002). *Average days of J-4 to J+4 depending on the starting date of the rainy season (J=0) in the Middle East (September 1, 1970 to June 30, 2002).*

La comparaison entre les dates de démarrage de la saison des pluies avec les coefficients d'indétermination ainsi calculés pour la période étudiée montre que, en réalité, ce sont les années sèches qui ont les dates les plus incertaines (figure 7), avec une saison des pluies mal structurée, par exemple les années 1973, 1979, 1984 et 1999.

Outre la détermination des dates de démarrage et de fin de la saison pluvieuse, le calcul des scores cumulés de la première composante peut fournir des informations pertinentes sur la caractérisation de la saison des pluies. La dernière valeur cumulée de chaque année (c'est-à-dire la valeur du jour 303 pour la période étudiée) donne une idée sur la performance de cette

saison en termes de pluies cumulées ; ceci est confirmé par le coefficient de corrélation très élevé (0,94) entre les 32 dernières valeurs cumulées (32 années) et les 32 indices des précipitations saisonnières (valeurs standardisées) de septembre à juin, calculés pour l'ensemble de la région. Les valeurs cumulées des chroniques de la première composante permettent également d'identifier les ruptures majeures au sein de la saison pluvieuse.

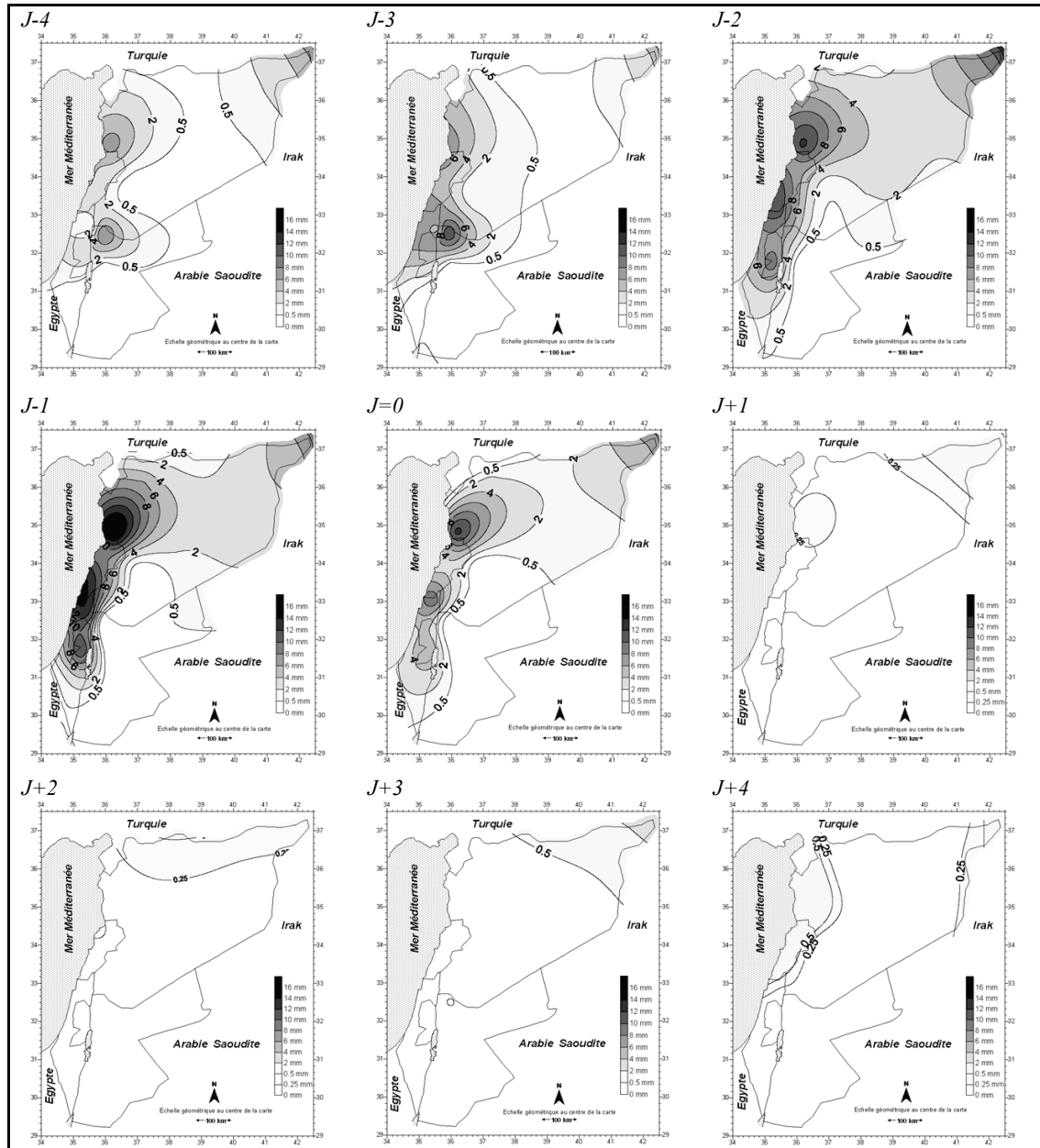


Figure 6 : Précipitations moyennes des jours J-4 à J+4 en fonction de la date de fin de la saison des pluies (J=0) au Proche-Orient (du 1^{er} septembre 1970 au 30 juin 2002). *Average days of J-4 to J+4 depending on the end date of the rainy season (J=0) in the Middle East (September 1, 1970 to June 30, 2002).*

Pour tester la validité des dates ainsi calculées, nous avons fait le même calcul pour deux autres périodes différentes, allant du 15 septembre au 15 juin (274 jours) et du 1^{er} octobre au 30 mai (243 jours), parce que ce sont les mois de septembre et octobre d'une part, et mai et juin d'autre part, qui limitent pratiquement la saison des pluies dans la région proche-orientale. Dans les deux cas, la variance expliquée par la première composante est également élevée, respectivement de l'ordre de 41,6 et 41 %. Les dates de démarrage obtenues sont les

mêmes dans 80 % des cas, alors que les dates de fin correspondent dans presque 90 % des cas (figure 8).

Figure 7 : Comparaison entre les dates de démarrage de la saison des pluies et les coefficients d'indétermination calculés au Proche-Orient (1970-71/2001-02). *Comparison between the dates of the start of the rainy season and the coefficients of indeterminacy in the Middle East (1970-71/2001-02).*

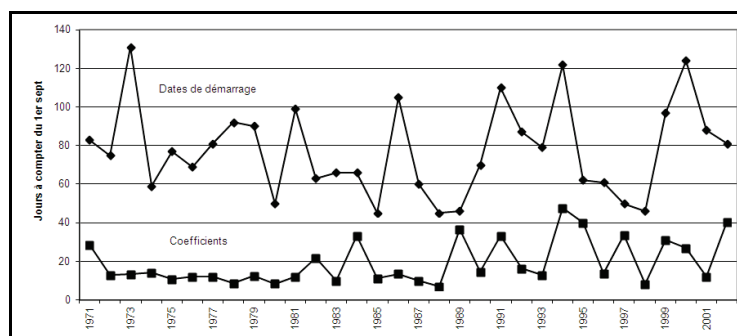
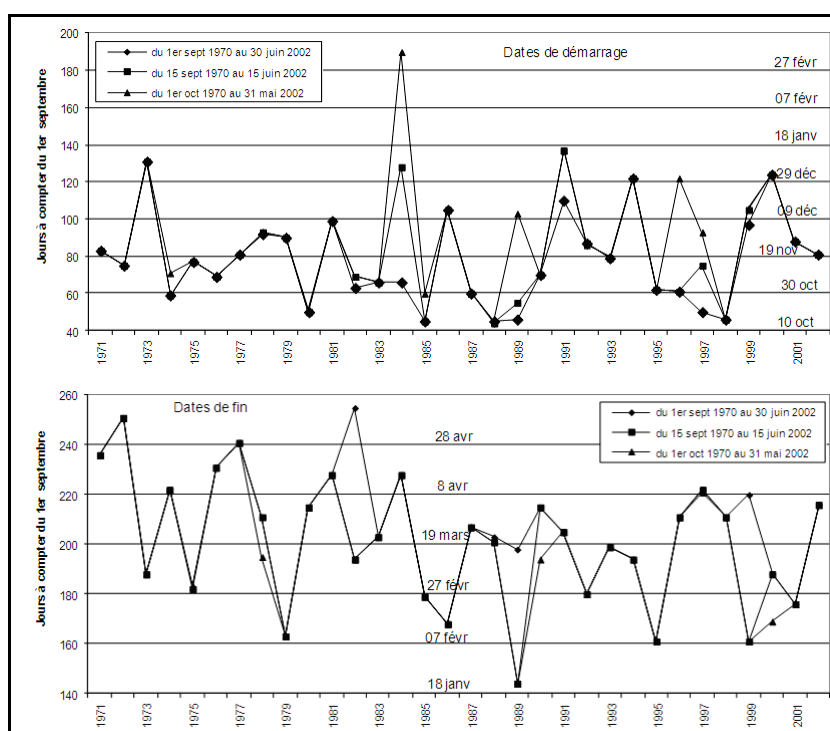


Figure 8 : Dates de démarrage (en haut) et de fin (en bas) pour les trois périodes de la saison pluvieuse (1970-71/2001-02). *Start dates (top) and end (bottom) for the three periods of the rainy season (1970-71/2001-02).*



3. Variabilité interannuelle des descripteurs de la saison pluvieuse

3.1. Variabilité interannuelle des dates de démarrage et de fin de la saison des pluies

La série temporelle des dates de fin de la saison pluvieuse calculée sur la période 1970-2002 (figure 9) montre une tendance à la baisse (significative au seuil de 1 % selon le test de Mann-Kendall) sur la période 1970-1995, indiquant que cette saison a tendance à finir plus tôt. Cette tendance est significative au seuil de 10 % pour l'ensemble de la période. La date moyenne de fin de la saison pluvieuse se situe vers le 25 mars.

Les dates de démarrage présentent aussi une légère tendance à la hausse (c'est-à-dire que cette saison a tendance à se produire plus tard) mais qui n'est pas significative (figure 10). La date moyenne de démarrage se situe autour du 17 novembre. Il faut souligner que ces dates moyennes sont différentes de celles obtenues par une simple moyenne des dates calculées station par station.

Pour tester la validité de la tendance de la fin précoce de la saison pluvieuse, nous avons calculé les scores moyens de la première composante (obtenus par l'Analyse en Composantes

Principales sur les données quotidiennes des 20 stations, pour des périodes glissantes de 30 jours (avec un décalage de 10 jours au départ) du 1^{er} septembre 1970 au 30 juin 2002. Les pentes des droites de régression appliquées sur les 32 valeurs annuelles des 28 périodes obtenues montrent bien la tendance à une fin précoce de la saison pluvieuse (printemps), significative au seuil de 10 % (Ktest = -1,89).

Figure 9 : Variabilité interannuelle des dates de fin de la saison des pluies au Proche-Orient (1970-71/2001-02). *Interannual variability of the end dates of the rainy season in the Middle East (1970-71/2001-02).*

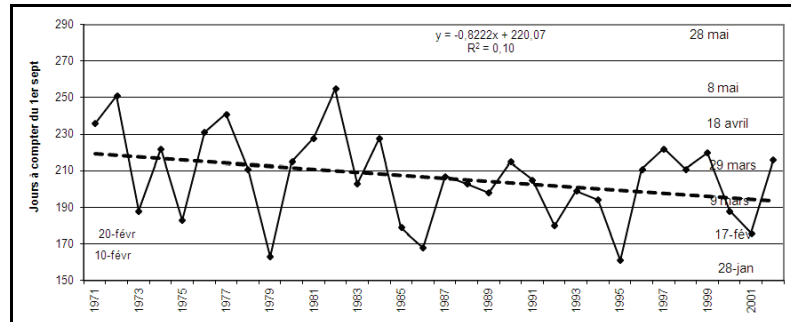
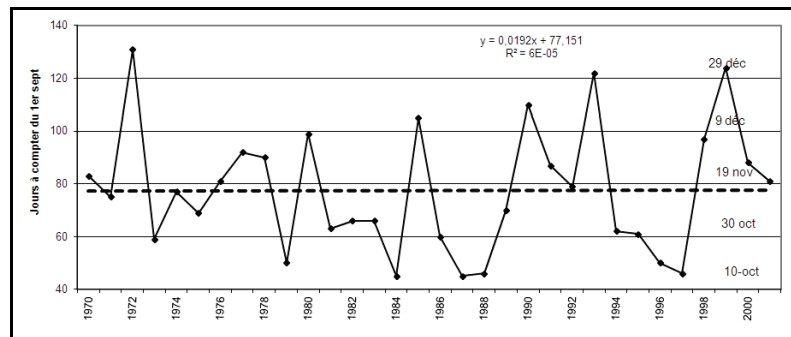


Figure 10 : Idem que figure 9, mais pour les dates de démarrage de la saison des pluies. *Same as figure 9 but for the starting dates of the rainy season.*



3.2. Variabilité interannuelle du cumul et de la durée de la saison des pluies

La durée de la saison pluvieuse obtenue par le calcul des dates de démarrage et de fin, présente une tendance au raccourcissement, mais elle est significative seulement au seuil de 10 % jusqu'à l'année 1995 et de 20% sur l'ensemble de la période étudiée (selon le test de Mann Kendall). Cette tendance au raccourcissement est liée davantage à une fin précoce qu'à un démarrage tardif.

La variabilité interannuelle des totaux pluviométriques est caractérisée par une tendance à la baisse, qui n'est cependant pas significative. Cependant, l'examen des coefficients de corrélation entre les cumuls pluviométriques et la durée de la saison pluvieuse montre qu'ils sont corrélés positivement (corrélation faible même significative au seuil de 5 %). Bien qu'elle pèse plus lourdement que la date de fin dans la variabilité du cumul pluviométrique, la date de démarrage présente un coefficient de corrélation faible avec le total pluviométrique (significatif au seuil de 5 %), alors que la date de fin présente une corrélation insignifiante. Par contre, la corrélation est très forte entre d'une part, les dates de démarrage et de fin de la saison des pluies et, d'autre part, la durée, respectivement de l'ordre de -0,77 et 0,87. Nous pouvons déduire que la réussite de la saison des pluies dépend aussi bien de la précocité de son démarrage que du caractère tardif de sa fin.

La variabilité des totaux pluviométriques est beaucoup plus liée aux dates de démarrage qu'à celles de fin. La figure 11 illustre bien cette relation entre la durée et le cumul pluviométrique à travers l'exemple des années 1992, 1995 et 2002. Les totaux pluviométriques moyens sont semblables sur l'ensemble de la région (418 mm) durant les années 1995 et 2002, mais la durée de la saison des pluies n'est pas la même. Le début de la saison 1995 se tient autour du 1^{er} novembre, alors qu'il se produit 19 jours plus tard en 2002.

La différence entre les dates de fin est beaucoup plus grande, de l'ordre de 55 jours (respectivement le 8 février et le 4 avril), mais la récession des pluies en 1995 a prolongée la saison jusqu'au 4 avril. L'année 1992 a totalisé une quantité moyenne de 576 mm mais sur 180 jours, avec un début plus tardif de 25 jours que celui de l'année 1995 (le 26 novembre) et une fin précoce (le 27 février) par apport à l'année 2002. Une fin tardive de la saison pluvieuse n'est donc pas associée à un total pluviométrique élevé ; de même, un début précoce n'est pas non plus associé à un faible total pluviométrique annuel.

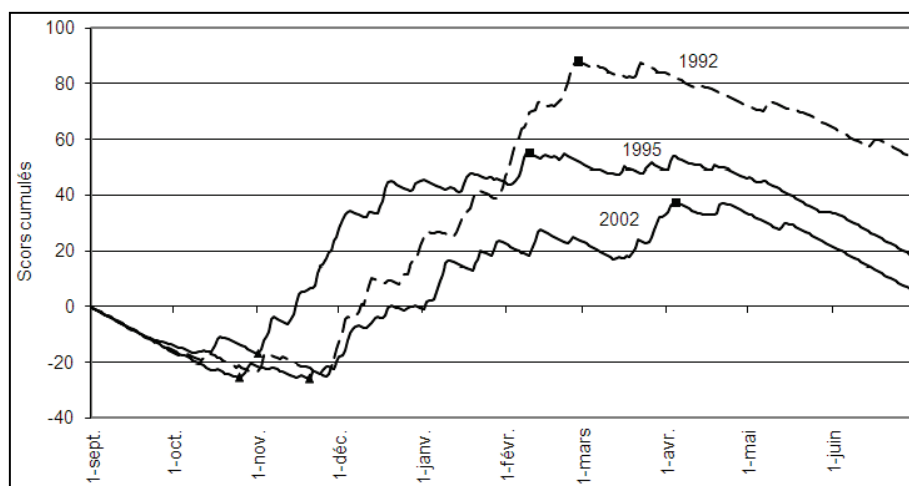


Figure 11 : Comparaison des scores cumulés de la première composante entre les années 1992, 1995 et 2002 au Proche-Orient sur la période allant du 1^{er} septembre au 30 juin (les triangles représentent les dates de début de la saison des pluies, les carrés représentent les dates de sa fin). *Comparison of cumulative scores of the first component between the years 1992, 1995 and 2002 in the Middle East on the period from September 1 to June 30 (the triangles represent the dates of the beginning of the rainy season, the squares represent end dates).*

3.3. Analyse typologique des saisons des pluies au Proche-Orient

Nous avons retenu quatre types principaux, obtenus par classification automatique de type CHA, pour décrire la saison des pluies (figure 12). Le type 1 correspond aux « très bonnes » années, telles que 1980, 1988 et 1992, caractérisées par des totaux pluviométriques annuels élevés, une bonne performance globale de la pluie (périodes sèches intercalaires courtes) et à la fois un début précoce de la pluie et un arrêt relativement précoce (1980 et 1988).

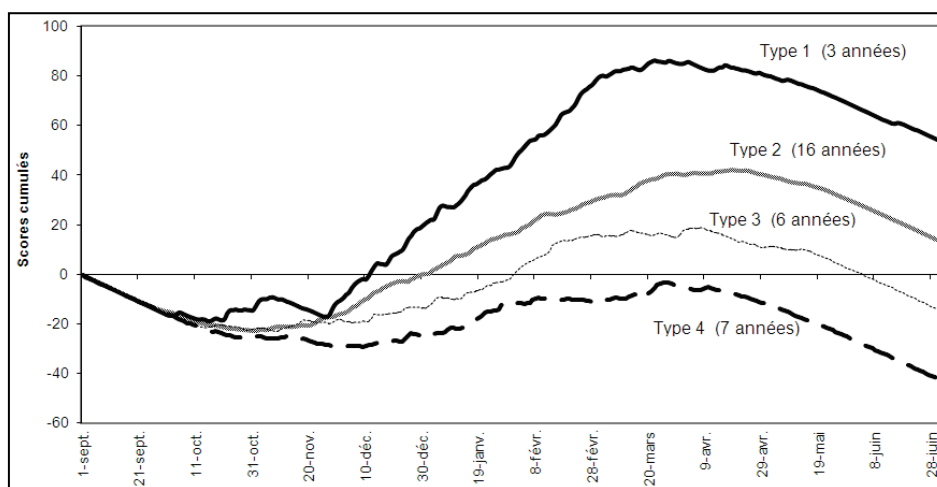


Figure 12 : les quatre types d'années selon l'analyse typologique de la saison pluvieuse : composites des scores cumulés des 4 types selon une classification automatique de type CHA au Proche-Orient (1970-71/2001-02). *Four years according to the types of cluster analysis of the rainy season: composite score of four types according to cumulative automatic classification type CHA in the Middle East (1970-71/2001-02).*

Le type 2, qui enregistre la plus grande fréquence (16 années), présente un démarrage relativement tardif (par rapport au type 1) et également une fin tardive mais avec des quantités de pluie inférieures. Le type 3 correspond aux années dont la durée de la saison pluvieuse est courte ; le démarrage est relativement tardif, alors que le retrait est précoce (par rapport au type 2). Les quantités annuelles sont encore plus faibles que pour les deux types précédents. Enfin, le type 4 caractérise les « mauvaises » années en termes de totaux annuels et de performance (dates incertaines de démarrage et de fin). Ce type correspond aux années les plus sèches au Proche-Orient durant la période étudiée.

La répartition des types 1, 3 et 4 est souvent aléatoire alors que le type 2 présente une concentration sur la décennie 70 (7 années sur 16) et la deuxième moitié de la décennie 90 (4 années sur 16).

En résumé, à partir du calcul des scores cumulés moyens (selon la méthode appliquée) pour chaque jour du 1^{er} septembre 1970 au 30 juin 2002, il est possible d'isoler les sept différentes phases de la saison des pluies (figure 13) :

- 1) le prolongement de la saison sèche qui dure jusqu'à mi-octobre ;
- 2) la phase d'installation des pluies (de part et d'autre de la date moyenne) avec des pluies modérées qui durent jusqu'à fin novembre ;
- 3) la phase des pluies plus fortes avec une installation possiblement tardive de la saison tardive (début janvier) ;
- 4) le cœur de la saison pluvieuse qui dure jusqu'au 10 février ;
- 5) le retrait précoce de la saison des pluies (jusqu'à fin mars) ;
- 6) le retrait habituel de la saison des pluies (fin avril) ;
- 7) le retrait tardif de la saison des pluies, située vers mi-mai.

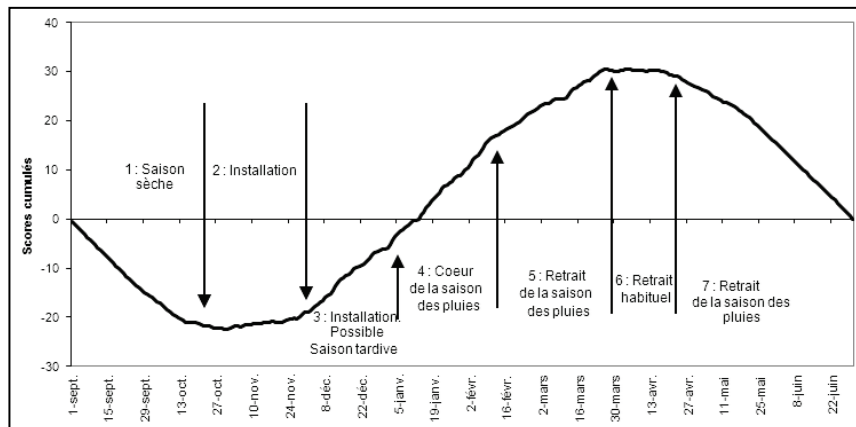


Figure 13 : Scores cumulés moyens issus d'une ACP des précipitations journalières au Proche-Orient pour chaque jour du 1^{er} septembre 1970 au 30 juin 2002, décrivant les sept phases moyennes principales de la saison pluvieuse. *Cumulative average score from a PCA of daily precipitation in the Middle East for each day of 1 September 1970 to June 30, 2002, describing the seven main average phases of the rainy season.*

Etant donnée l'extension géographique de la zone étudiée, des différences régionales apparaissent dans les dates de démarrage et de fin de la saison pluvieuse ainsi que dans les cumuls annuels, à mesure que l'on va vers l'intérieur (sud et est). Ces différences sont dues aux effets de la latitude (entre 29°N et 34°N), de l'altitude (présence en bordure de la mer d'un double obstacle montagneux séparant des régions méditerranéennes, au sens strict du terme, à l'ouest, des régions steppiques sèches à l'est) et de la continentalité (Traboulsi, 2004). Pour mettre en valeur ces différences, la détermination des dates sous-régionales de la saison pluvieuse permet d'éclairer cette variabilité spatiale de sa durée.

4. Définition des dates de démarrage et de fin de la saison des pluies dans les sous-régions proche-orientales

4.1. Essai de régionalisation

Dans un but de régionalisation, nous avons appliqué, sur le même réseau de stations et pour la même période, une Analyse en Composantes Principales selon la méthode Varimax (transformation des composantes par rotation), ce qui a l'avantage de clarifier les structures spatiales de chaque composante. Le principe est ensuite de déterminer à quelle composante chaque station est la mieux corrélée (Richman, 1986). Nous avons retenu quatre composantes, représentant 66,4 % de la variance totale (figure 14).

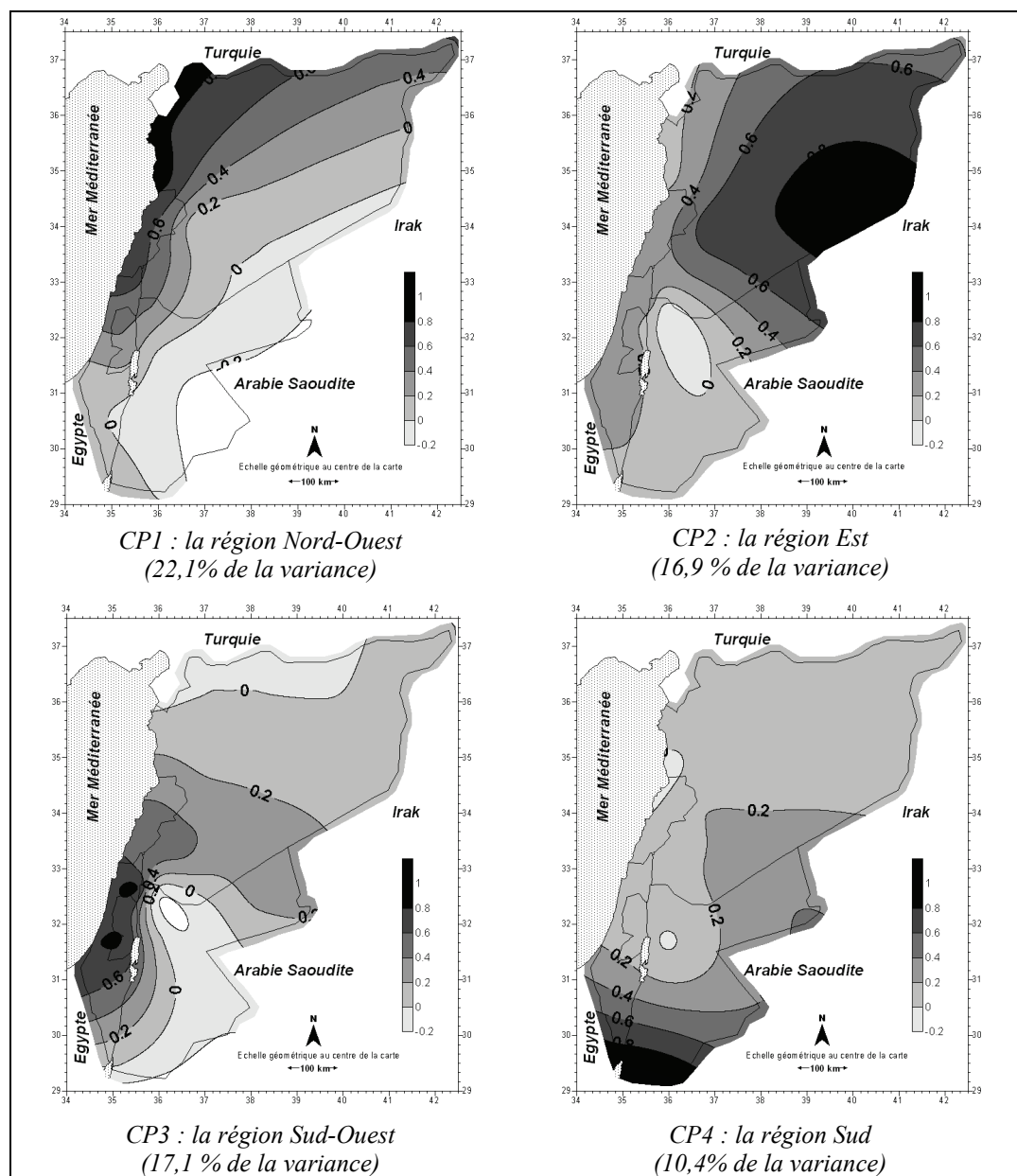


Figure 14 : Analyse en Composantes Principales avec Rotation (Varimax) des précipitations quotidiennes de septembre 1970 à juin 2002. Champs des CP1 à CP4 représentant les quatre sous-régions proche-orientales. *Principal components analysis with rotation (Varimax) of daily precipitation from September 1970 to June 2002. CP1 to CP4 fields representing the four Near Eastern subregions.*

La première composante représente la région Nord-Ouest du Proche-Orient, englobant les stations du Nord-Ouest de la Syrie et le Liban (région la plus arrosée du domaine d'étude) corrélées positivement (au seuil de 5 %). La deuxième composante décrit le Sud-Ouest du Proche-Orient, englobant toutes les stations de l'extrême Sud-Ouest de la Syrie, de l'extrême Nord-Ouest de la Jordanie et du Nord d'Israël. La troisième composante représente la région Est du domaine étudié (Est de la Syrie notamment, et l'extrême Nord-Est de la Jordanie). La quatrième composante décrit une région résiduelle située au Sud de l'ensemble étudié (Sud d'Israël et Sud de la Jordanie, région mal représentée à cause de la faible densité du réseau de stations utilisées).

4.2. Détermination des dates de démarrage et de fin de la saison des pluies dans les sous-régions

Nous appliquons la même méthode sur les composantes représentant trois des quatre régions (Est, Sud-Ouest et Nord-Ouest). Les dates de la quatrième région (Sud) n'ont pas été déterminées parce qu'elle englobe seulement deux stations (Eilat et Aqaba), avec un faible pourcentage de variance. Dans la région Nord-Ouest, la plus arrosée, la saison des pluies commence tôt par rapport aux autres régions, la date moyenne de démarrage étant observée vers le 13 novembre alors que le retrait des pluies est précoce, vers le 27 mars. Par contre, les deux régions Est et Sud-Ouest enregistrent un démarrage tardif (respectivement le 23 et 29 novembre) ainsi qu'un retrait tardif. La date de la fin de la saison des pluies dans ces deux régions arrive respectivement vers le 2 et le 3 avril. Dans les trois régions, les dates de démarrage ne présentent aucune tendance significative sur l'ensemble de la période. Par contre, dans la région Nord-Ouest, les dates de fin de la saison des pluies affichent une tendance à la baisse (raccourcissement), significative au seuil de 5 % (selon le test de Mann Kendall). La région Sud-Ouest enregistre aussi un raccourcissement (significatif au seuil de 5 %) jusqu'à l'année 1992.

Les caractéristiques de la saison pluvieuse sont semblables à l'échelle de l'espace proche-oriental et à l'échelle sous-régionale. Nous retrouvons les mêmes très bonnes années ou très mauvaises années dans les deux cas, ce qui est lié sûrement aux généralisations des conditions atmosphériques favorables ou défavorables aux précipitations.

4.3. Etude fréquentielle des dates de démarrage et de fin de la saison des pluies

Selon B. Sarre (1995), l'étude fréquentielle est nécessaire dans la détermination des dates optimales de semis et de récolte, et pour l'élaboration d'un calendrier cultural (tableaux 1 et 2).

Dates de démarrage	Les régions proches-orientales			
	Proche-Orient	Nord-Ouest	Sud-Ouest	Est
Q1 (premier quintile : dépassée 8 années sur 10)	29 oct.	16 oct.	9 nov.	29 oct.
Q2 (deuxième quintile : dépassée 6 années sur 10)	8 nov.	4 nov.	20 nov.	18 nov.
Q3 (troisième quintile : dépassée 4 années sur 10)	22 nov.	18 nov.	5 déc.	28 nov.
Q4 (quatrième quintile : dépassée 2 années sur 10)	14 déc.	6 déc.	30 déc.	19 déc.
Médiane (dépassée 5 années sur 10)	16 nov.	8 nov.	29 nov.	23 nov.
Moyenne	17 nov.	13 nov.	29 nov.	23 nov.
Date la plus précoce	15 oct.	1 ^{er} oct.	18 oct.	6 oct.
Date la plus tardive	9 jan.	9 jan.	27 jan.	6 mars

Tableau 1 : Les dates de démarrage de la saison de pluie au Proche-Orient pour les niveaux de probabilités 20, 40, 50, 60 et 80 % (1970-71/2001-02). *The start dates of the rainy season in the Middle East for the levels of probability 20, 40, 50, 60 and 80% (1970-71/2001-02).*

Dates de fin	Les régions proches-orientales			
	Proche-Orient	Nord-Ouest	Sud-Ouest	Est
Q1 (premier quintile : dépassée 8 années sur 10)	2 mars	1 ^{er} mars	8 mars	22 mars
Q2 (deuxième quintile : dépassée 6 années sur 10)	22 mars	22 mars	30 mars	28 mars
Q3 (troisième quintile : dépassée 4 années sur 10)	3 avril	3 avril	23 avril	8 avril
Q4 (quatrième quintile : dépassée 2 années sur 10)	19 avril	11 avril	13 mai	22 avril
Médiane (dépassée 5 années sur 10)	30 mars	26 mars	11 avril	2 avril
Moyenne	25 mars	27 mars	3 avril	2 avril
Date la plus précoce	8 fév.	15 jan.	25 jan.	10 jan.
Date la plus tardive	13 mai	29 avril	21 mai	4 mai

Tableau 2 : Idem que tableau 1, mais pour les dates de fin de la saison de pluie. *Same as Table 1, but for the end dates of the rainy season.*

L'étude fréquentielle montre que les écarts entre les dates de démarrage aux fréquences de 20 et 80 % sont très importants. La valeur atteinte ou dépassée deux fois sur dix serait 1,4 fois plus élevée que la médiane pour l'ensemble de la zone d'étude, 1,34 fois dans la sous-région Sud-Ouest, 1,3 dans l'Est et 1,41 fois dans le Nord-Ouest. Pour les dates de fin, la valeur atteinte ou dépassée deux fois sur dix serait une fois plus élevée que la médiane dans l'ensemble de la zone d'étude et dans l'Est, 1,1 fois dans le Nord-Ouest et le Sud-Ouest.

Le démarrage de la saison des pluies se produit, deux années sur dix, au mois de décembre (à partir du 14 décembre pour l'ensemble de la région étudiée, du 6 décembre pour la région Nord-Ouest, du 19 décembre pour la région Est et du 30 décembre pour la région Sud-Ouest). Le retrait de la saison des pluies se produit deux années sur dix à partir du 19 avril pour l'ensemble de la région, du 11 avril pour le Nord-Ouest, du 22 avril pour l'Est, et du 13 mai pour le Sud-Ouest.

Les dates les plus tardives du démarrage et les plus précoces pour la fin sont enregistrées lors des années très sèches, comme 1984 ou 1999. Les valeurs les plus probables des dates de démarrage, comprises entre Q1 et Q3 (aux niveaux de probabilité 20 et 60 %), se situent entre les mois d'octobre et novembre, que ce soit pour l'ensemble de l'espace proche-oriental ou pour les sous-régions Est et Nord-Ouest, alors qu'elles se situent entre novembre et le début du mois de décembre pour la région Sud-Ouest.

L'étude fréquentielle fait ressortir les irrégularités des dates du début et de fin de la saison des pluies au Proche-Orient, avec une nette distinction entre la région Nord-Ouest et les régions intérieures. Les dates de démarrage se situent, dans la plupart des cas, entre le 18 et le 29 novembre (début décembre dans le Sud-Ouest) dans les deux régions Sud-Ouest et Est (tableau 1), alors que dans la région Nord-Ouest, le démarrage est plus précoce (entre le 4 et le 18 novembre). Cette date se situe entre le 8 et le 22 novembre pour l'ensemble de l'espace proche-oriental. Les dates de fin sont aussi relativement plus précoces dans la région Nord-Ouest (entre le 22 mars et le 3 avril). En revanche, ces dates se situent entre la fin du mois de mars et le 23 avril pour le Sud-Ouest, ou le 8 avril pour l'Est, entre le 22 mars et le 3 avril dans l'ensemble de la région.

Cette étude fréquentielle comparative, nous permet de constater que les dates moyennes de démarrage et de fin ainsi déterminées pour l'ensemble de la région proche-orientale durant la période 1970-71/2001-02 (17 novembre pour le démarrage et 25 mars pour la fin) sont des dates réalistes, particulièrement pour les régions intérieures.

5. Relation entre la durée de la saison pluvieuse et la circulation atmosphérique régionale

Les précipitations proche-orientales sont liées à la circulation atmosphérique méridienne. Les années arrosées sont associées à la présence d'un talweg d'altitude au-dessus de la Méditerranée orientale et des régions avoisinantes, au niveau du géopotential 500 hPa (Traboulsi, 2004). Par contre, les années sèches sont associées à la présence d'une crête chaude au-dessus de la région. L'étude descriptive de la saison des pluies a montré que la durée de la saison des pluies présente une tendance au raccourcissement dû à une fin précoce plutôt qu'à un démarrage tardif. Cela serait l'effet d'une persistance de hauts géopotentiels au-dessus de la région proche-orientale.

Pour tester la réalité de cette relation, nous avons analysé les tendances du haut géopotential 500 hPa sur une fenêtre s'étendant de 20°N à 70°N en latitude et de 60°W à 60°E en longitude à partir des données de réanalyses NCEP-NCAR, fiables à partir de 1968 (Kalney *et al.*, 1996). Afin d'alléger le fichier sans perdre d'information, nous avons utilisé une maille en losanges de 5° de latitude sur 5° de longitude (Barnston et Livezey, 1987), soit 138 points de grille. Cette fenêtre a été choisie d'après les conclusions sur la relation entre précipitations et le niveau géopotential 500 hPa en Grèce (Xoplaki *et al.*, 1998) et dans le bassin méditerranéen (Dükeloh et Jacobeit, 2003 ; Norrant, 2004 ; Norrant-Romand et Douguedroit, 2010).

Les tendances moyennes de ces 138 points de grille sont calculées à partir des pentes de droites de régression appliquées à chaque point de grille durant la période 1971-2002 pour les mois du printemps (mars-avril-mai) qui comportent toutes les dates potentielles de fin de la saison des pluies. La figure 15 montre une tendance moyenne à la hausse du géopotential 500 hPa au-dessus de la région proche-orientale durant ces trois mois, particulièrement au mois d'avril mais également à l'échelle de la saison (la tendance moyenne se situe entre 20 et 30 mètres géopotentiels). Cette tendance à la hausse est plus faible au mois de mars.

Pour examiner la significativité de la tendance du haut géopotential 500 hPa au-dessus de la région proche-orientale, nous avons calculé un indice au-dessus de la Méditerranée orientale où les valeurs de ce géopotential sont moyennées pour la zone comprise entre 25° et 35°E en longitude et 30° à 40° N en latitude. Le choix de cette fenêtre est justifié d'une part par les résultats d'une analyse composite des années extrêmes dans la région proche-orientale (Traboulsi, 2004), qui fait ressortir, pour cette fenêtre, un talweg d'altitude au-dessus de la Méditerranée orientale et des régions avoisinantes. Il s'explique d'autre part, par les travaux antérieurs (Kozuchowski *et al.*, 1992 ; Xoplaki *et al.*, 1998 ; Alijani, 2002) sur la Grèce et l'Iran, qui ont mis en évidence le rôle déterminant des variations du géopotential 500 hPa à l'ouest de chacune de ces régions.

La figure 16 montre que l'indice du géopotential 500 hPa affiche une tendance à la hausse au printemps ainsi qu'aux mois d'avril et de mai. Cette tendance est significative au seuil de 10 % (test de Mann Kendall) durant le printemps et au seuil de 5 % durant la période allant de 1971 à 1995 au printemps et en avril. Cette tendance n'est pas significative au mois de mai. Le mois de mars n'affiche aucune tendance.

D'après ce qui précède, nous constatons que la tendance à la hausse de la hauteur du géopotential 500 hPa est surtout significative à l'échelle saisonnière, au printemps, pour l'ensemble de la période étudiée (1971-2002). Ce résultat est conforme avec la tendance significative à la baisse des précipitations de la fin de la saison pluvieuse. Le raccourcissement de cette saison (précocité de la fin), que ce soit à l'échelle de l'espace proche-oriental ou des sous-régions qui le composent, serait donc expliqué par les conditions

atmosphériques régionales régnantes au-dessus de la Méditerranée orientale représentées par la tendance à la hausse du géopotential 500 hPa (persistance d'une crête chaude au-dessus de la Méditerranée orientale et des régions avoisinantes).

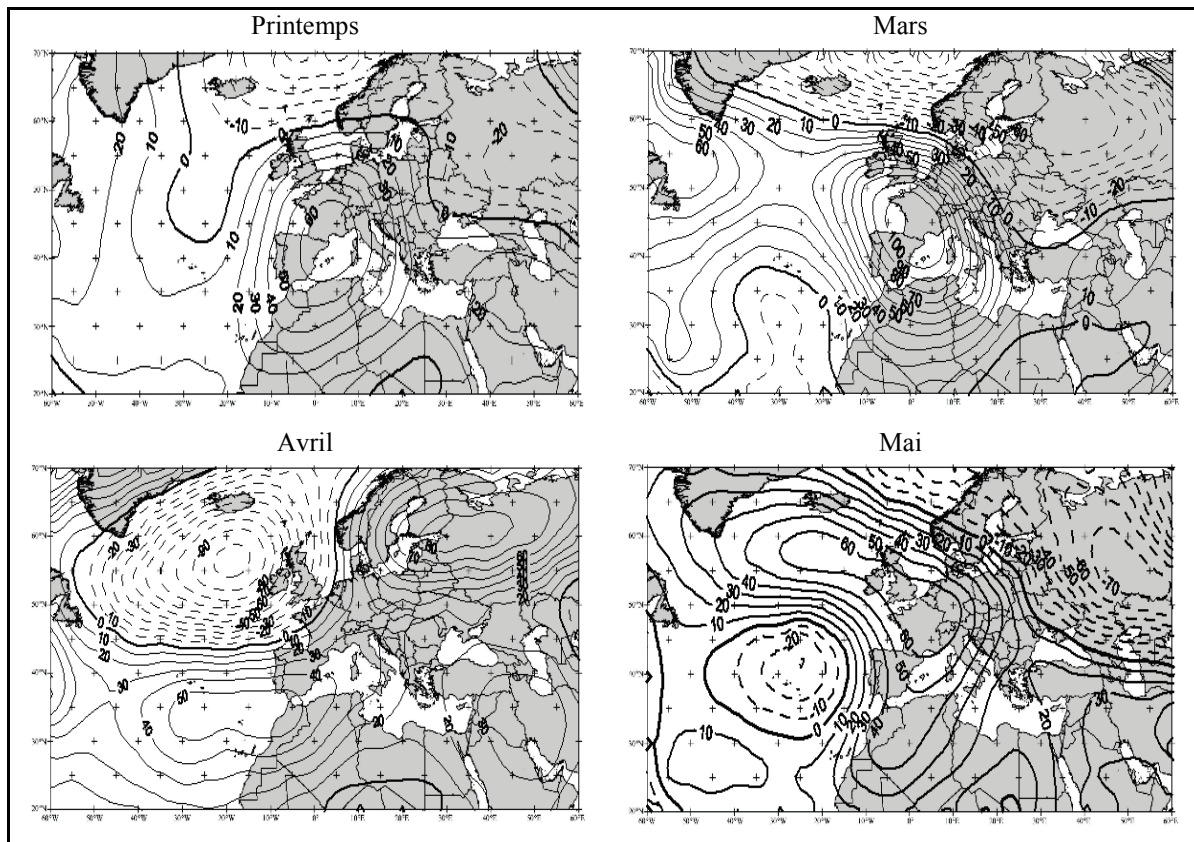


Figure 15 : Tendence moyenne (en mgp) du haut géopotential 500 hPa au printemps (mars-avril-mai) et aux mois de mars, avril et mai sur la période 1971-2002 ; ligne continue : tendance positive ; ligne discontinue : tendance négative (d'après les données de réanalyses NCEP/NCAR). *Average trend (in PGM) of 500 hPa geopotential height in the spring (March-April-May) and for March, April and May over the 1971-2002 period; solid line: positive trend, dashed line: negative trend (based on NCEP/NCAR reanalyses).*

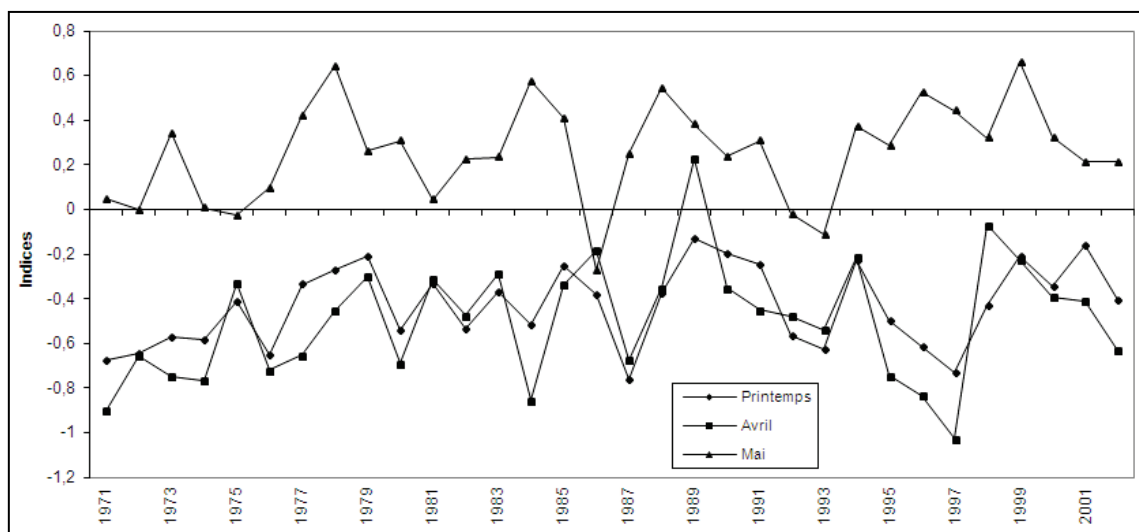


Figure 16 : Tendances de l'indice du géopotential 500 pour la Méditerranée Orientale (1971-2002). Les coefficients de détermination (R^2) sont respectivement de l'ordre de 0,06, 0,05 et 0,07 pour le printemps et les mois d'avril et mai. *Trends for a 500 geopotential index calculated over the Eastern Mediterranean (1971-2002). The coefficients of determination (R^2) are respectively about 0.06, 0.05 and 0.07 for spring and April and May.*

Conclusion

Les dates moyennes de démarrage (17 novembre) et de fin (25 mars) de la saison pluvieuse, sont obtenues par méthode factorielle. Elles ne s'appuient donc pas sur des critères agronomiques locaux, mais ont l'avantage de fournir une information pertinente, à valeur régionale, sur l'évolution de la saison des pluies. Cette méthode descriptive, notamment appliquée en climatologie tropicale où la saison des pluies est bien structurée, donne également de bons résultats sous climat méditerranéen, caractérisé par des épisodes pluvieux discontinus dans le temps et dans l'espace.

Cette étude montre un raccourcissement de la saison des pluies, que ce soit à l'échelle de l'espace proche-oriental ou dans les sous-régions qui le composent. Cette fin est liée surtout à une fin précoce, ce qui signifie en termes de pluviométrie, la diminution des précipitations printanières qui sont nécessaires pour l'agriculture pluviale pratiquée, particulièrement, dans les régions intérieures du Proche-Orient (la steppe syrienne). Ce raccourcissement s'explique par les conditions atmosphériques régionales régnant au-dessus de la Méditerranée orientale (fréquence de plus en plus élevée des conditions inhibitrices des précipitations) qui tendent vers un assèchement progressif. Cette tendance reste à prouver sur la période récente (entre 2002 et 2012).

L'analyse de la saison des pluies au Proche-Orient constituerait un apport non négligeable pour la détermination du calendrier agricole, notamment dans les régions intérieures où l'agriculture, qui représente l'activité principale de la population, est dépendante des aléas climatiques, vu la faiblesse des ressources en eau dans cette région. L'étude fréquentielle permettrait de délimiter avec plus de précision les périodes d'irrigation, de rationnement en eau dont l'utilisation ne subit aucun contrôle.

Une étude à l'échelle stationnelle serait nécessaire pour examiner de près le déroulement de la saison des pluies, étant donné la grande variabilité spatiale des précipitations, dans ce grand espace géographique où le climat méditerranéen subit une forte dégradation en passant du climat franchement méditerranéen à l'Ouest, au climat désertique vers l'Est et le Sud-Est.

Remerciements : Mes vifs remerciements vont à Pierre Camberlin (Centre de Recherches de Climatologie, Dijon - France) pour ses conseils précieux. Ce travail a été réalisé grâce au programme de soutien à la recherche de l'Université Libanaise.

Bibliographie

- ALIJANI B., 2002 : Variations of 500 hPa flow patterns over Iran and surrounding areas and their relationship with the climate of Iran. *Theoretical and Applied Climatology*, 72, 41-54.
- ATI O. F., STIGTER C. J. et OLADIPO E. O., 2002 : A comparaison of methods to determine the onset of the growing season in Northern Nigeria. *International Journal of Climatology*, 22, 731-742.
- BALME M., GALLES S. et LEBEL T., 2005 : Démarrage de la saison des pluies au Sahel : variabilité aux échelles hydrologique et agronomique, analysée à partir des données EPSAT-Niger. *Sécheresse*, 16, 1, 15-22.
- BARNSTON A. G. et LIVEZEY R. E., 1987 : Classification, seasonality and persistence of low-frequency circulation patterns. *Monthly Weather Review*, 115, 1083-1126.
- BLANCHET G. et TRABOULSI M., 1993 : Froid, pluie, neige et tempête au Proche-Orient durant l'hiver 1991-92. *Publications de l'Association Internationale de Climatologie*, 6, 433-441.

- CAMBERLIN P. et PHILIPPON N., 2002 : The East African March-May rainy season: Associated atmospheric dynamics and predictability over the 1968-97 period. *Journal of Climate*, 15, 1002-1019.
- CAMBERLIN P. et DIOP M., 2003 : Application of daily rainfall principal component analysis to the assessment of the rainy season characteristics in Senegal. *Climate Research*, 23, 159-169.
- CAMBERLIN P. et OKOOLA R. E., 2003 : The onset and cessation of the "long rains" in eastern Africa and their interannual variability. *Theoretical and Applied Climatology*, 75, 43-54.
- CAMBERLIN P., 2004 : *Contributions à la compréhension de la variabilité pluviométrique multi-échelle en Afrique*. HDR, CRC - Université de Bourgogne, Dijon, France, 101 pages.
- CAMBERLIN P., MORON V., OKOOLA R., PHILIPPON N. et GITAU W., 2009 : Components of rainy seasons' variability in Equatorial East Africa: onset, cessation, rainfall frequency and intensity. *Theoretical Applied Climatology*, 98, 237-249.
- DEPRAETERE C., 1998 : *Nova Totius Terrarum*. Logiciel de traitement du Modèle Numérique du Terrain mondial, I.R.D., Montpellier.
- DIOP M., 1996 : A propos de la durée de la saison des pluies au Sénégal. *Sécheresse*, 7, 7-15.
- DODD D. O. S. et JOLLIFFE I. T., 2001 : Early detection of the start of the wet season in semi arid tropical climates of western Africa. *International Journal of Climatology*, 21, 1251-1262.
- DÜNKELOH A. et JACOBET J., 2003 : Circulation dynamics of the Mediterranean precipitation variability 1948-98. *International Journal of Climatology*, 23, 1843-1966.
- FASULLO J. et WEBSTER P. J., 2003 : A hydrological definition of Indian Monsoon onset and withdrawal. *Journal of Climate*, 16, 3200-3211.
- FONTAINE B., LOUVET S. et ROUCOU P., 2008 : Definition and predictability of an OLR-based West African monsoon onset. *International Journal of Climatology*, 28, 1787-1798.
- GROUPE CHADULE, 1994 : *Initiations aux pratiques statistiques en géographie*. 3^e édition, Masson, Paris, 203 pages.
- HOUNDENOU C. et HERNANDEZ K., 1998 : Modification de la saison pluvieuse dans l'Atakora (1961-1990). Un exemple de sécheresse au nord-est du Bénin (Afrique Occidentale). *Sécheresse*, 9, 23-34.
- JACKSON I. J., 1989 : *Climate, water and agricultural in the Tropics*. Longman, 374 pages.
- JOSEPH P. V., EISCHEID J. K. et PYLE R. J., 1994 : Interannual variability of the onset of the Indian Summer Monsoon and its association with atmospheric features, El Nino, and sea surface temperatures. *Journal of Climate*, 7, 8-105.
- KALNAY E., KANAMITSU M., KISTLER R., COLLINS W., DEAVAN D., GANDIN L., IREDELL M., SAHA S., WHITE G., WOOLLEN J., ZHU Y., CHELLIA M., EBUSUZAKI W., JANOWIAK J., MO K., ROPELEWSKI C., WANG J., LEETMAA A., REYNOLDS R., JENNE R. et JOSEPH D., 1996 : The NCEP-NCAR 40-years Reanalyses Project. *Bulletin. American. Meteorological. Society.*, 77, 437-471.
- KOZUCHOWSKI K., WIBIG J. et MAHERAS P., 1992 : Connection between air temperature and precipitation and geopotential height of the 500 hPa level in a meridional cross-section in Europe. *International Journal of Climatology*, 12, 343-352.

- LAHOUSSE P. et PIEDANNA V., 1998 : *L'outil statistique en géographie, tome 1*. Armand Colin, Paris, 95 pages.
- LIEBMAN B., CAMARGO S., SETH A., MARENGO J. A., CARVALHO L. M. V., ALLURED D., FU R., et VERA C. S., 2007 : Onset and end of the rainy season in South America in observations and the ECHAM 4.5 Atmospheric General Circulation Model. *Journal of Climate*, 20, 2037-2050.
- MARENGO J. E., LIEBMAN B., KOUSKY V. E., FILIZOLA N. P. et WAINER I. C., 2001 : Onset and end of the rainy season in the Brazilian Amazon Basin. *Journal of Climate*, 14, 833-849.
- MARTEAU R., SULTAN B., MORON V., BARON C., TRAORE S. B. et ALHASSANE A., 2010 : Démarrage de la saison des pluies et date de semis du mil dans le sud-ouest du Niger. *Actes du XXIII^{ème} colloque de l'Association Internationale de Climatologie*. Risques et changement climatique, Rennes, France, 379-384.
- MARTEAU R., 2010 : *Cohérence spatiale et prévisibilité potentielle des descripteurs intrasaisonniers de la saison des pluies en Afrique soudano-sahélienne. Application à la culture du Mil dans la région de Niamey*. Thèse de doctorat, Université de Bourgogne, Dijon, 212 pages.
- NICHOLLS N., 1984 : A system for predicting the onset of the north Australian wet-season. *International Journal of Climatology*, 4, 425-435.
- NIEUWOLTS S., 1986 : Agricultural drought in the Tropics. *Theoretical and Applied Climatology*, 37, 29-38.
- NORRANT C., 2004 : *Tendances pluviométriques indicatrices d'un changement climatique dans le bassin méditerranéen de 1950 à 2000. Etude diagnostique*. Thèse de doctorat, Université Aix-Marseille I, 266 pages.
- NORRANT-ROMAND C. et DOUGUEDROIT A., 2010 : Types de circulation atlantico-européens et régimes de temps pluvieux en Méditerranée. *BAGF-Géographies*, 2, 234-244.
- OMOTOSHO J. B., 1990 : Onset of thunderstorms and precipitation over northern Nigeria. *International Journal of Climatology*, 10, 849-860.
- OMOTOSHO J. B., 1992 : Long-range prediction of the onset and end of the rainy season in the West African Sahel. *International Journal of Climatology*, 12, 369-382.
- OMOTOSHO J. B., BALOGUN A. A., et OGUNJOBI K., 2000 : Predicting monthly and seasonal rainfall, onset and cessation of the rainy season in West Africa using only surface data. *International Journal of Climatology*, 20, 865-880.
- REISER H. et KUTIEL H., 2007 : Rainfall uncertainty in the Mediterranean : definition of the rainy season – a methodological approach. *Theoretical and Applied Climatology*, 94, 35-49.
- RICHMAN M. B., 1986 : Rotation of principal components. *Journal of Climatology*, 6, 293-335.
- SANDERS L., 1990 : *L'analyse statistique des données en géographie*. Reclus, Montpellier, 267 pages.
- SARR B., 1995 : *Climats et développement des aménagements hydro-agricoles en Afrique de l'Ouest : le cas du bassin du fleuve Sénégal*. Thèse de doctorat, Université de Bourgogne, Centre de Recherches de Climatologie, Dijon, 360 pages.

- SIVAKUMAR M. V. K., 1988 : Predicting rainy season potential from the onset of rains in southern sahelian and sudanian climatic zones of West Africa. *Agricultural Forest and Meteorology*, 42, 295-305.
- STERN R. D., DENNETT M. D. et GARBUTT D. J., 1981 : The start of the rains in West Africa. *International Journal of Climatology*, 1, 59-68.
- SULTAN B. et JANICOT S., 2000 : Abrupt shift of the ITCZ over West Africa and intra-seasonal variability. *Geophysical Research Letter*, 27, 3353-3356.
- 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 pages.
- WALTER M. W., 1967 : Length of rainy season in Nigeria. *Nigerian Geographical Journal*, 10, 123-128.
- XOPLAKI E., LUTERBACHER J., PATRIKAS J. et MAHERAS P., 1998 : Les précipitations hivernales en Grèce et leurs relations avec la circulation atmosphérique au niveau de 500 hPa. *Publications de l'Association Internationale de Climatologie*, 11, 374-382.