

TENDANCES DES PRÉCIPITATIONS MENSUELLES ET QUOTIDIENNES DANS LE SUD-EST MÉDITERRANÉEN FRANÇAIS (1950-51 / 1999-2000)

C. NORRANT ET A. DOUGUÉDROIT

*Institut de Géographie, UMR 6012 Espace, Université de Provence
c.norrant@free.fr*

Résumé

Dans la perspective des scénarios pour les tendances des précipitations établis par les modèles pour la fin du XXI^e siècle, nous nous sommes interrogées sur l'existence possible d'une amorce d'un changement pluviométrique dans la deuxième moitié du XX^e siècle dans le sud-est méditerranéen français. En plus des précipitations totales mensuelles, nous avons étudié au pas de temps mensuel le nombre de jours de pluie, les précipitations quotidiennes moyennes et le niveau du 95^{ème} centile entre 1950-51 et 1999-2000. Nous avons procédé à leurs régionalisations par des Analyses en Composantes Principales avec Rotation. Dans les trois régions obtenues seuls quelques mois montrent une diminution significative des totaux mensuels de pluies : octobre à l'est du Rhône, novembre dans la vallée du Rhône et mars à l'ouest du Rhône. Ces diminutions sont associées dans les deux premières régions à une diminution significative des moyennes quotidiennes de pluie et dans la dernière région à une diminution significative du nombre de jours de pluie. Parallèlement à cela, la part des précipitations supérieures au 95^{ème} centile a augmenté au cours de la deuxième moitié du XX^e siècle de part et d'autre du Rhône. Les diminutions significatives des précipitations sont en relation significative inverse avec les pressions de surface locales.

Mots-clés : Précipitations mensuelles et quotidiennes, indices pluviométriques, tendances, pressions de surface, Sud-est méditerranéen français.

Abstract

Monthly and daily rainfall trends in the French Mediterranean South-east (1950-51 / 1999-2000)

According to the scenarios of GCMs about rainfall trends for the end of the 21st century, a beginning of a rainfall change in the second half of the 20th century has been researched in the Mediterranean South-East of France. The monthly rainfall amounts, the monthly number of rainy days, the mean daily rainfall and the 95th precipitation percentile have been studied from 1950-51 to 1999-2000. Regionalizations have been performed with Rotated Principal Component Analyses. In the three obtained regions, only few months show a significant decrease of rainfall : October east of the Rhône valley, November in the Rhône valley and March west of the Rhône valley. These rainfall decreases are in relation, in the first and second regions, with a significant decrease of the mean daily rainfall and in the last region with a significant decrease of the number of rainy days. In the same time, the percentage of the rainfall higher than the 95th percentile has increased in the second half of the 20th century along the coast. The

significant decreases of the rainfall have negative significant relations with regional mean sea level pressures.

Keywords : Monthly and daily rainfall, rainfall indices, trends, sea level pressures, Mediterranean South-East of France.

Introduction

Dans la perspective actuelle du changement climatique, les scénarios de sortie des modèles s'accordent sur une diminution de la pluviométrie dans le Bassin méditerranéen pour ce siècle (IPCC, 2001). Les plus récents d'entre eux, à échelle régionale, montrent une diminution des précipitations d'hiver accompagnée d'une augmentation simultanée des fortes précipitations dans la région méditerranéenne pour la fin du XXI^{ème} siècle (Gibelin et Déqué, 2003, Déqué, 2003, Räisänen et al., 2004). Ces perspectives nous font nous interroger sur l'existence possible d'une amorce du changement climatique dans la pluviométrie de la deuxième moitié du XX^{ème} siècle. La plupart des études dans ce domaine se sont intéressées aux précipitations annuelles et saisonnières sauf récemment (Norrant, 2004). Elles ont conclu à la quasi-absence d'évolution tendancielle significative, sauf en Grèce où les précipitations annuelles diminuent de façon significative (Schönwiese et al., 1993, Carrega 1993, Quereda-Sala et al., 2001, Moisselin et al., 2002, Douguédroit et Norrant, 2003, Piervitali et Colacino, 2003).

A la suite de ces résultats nous voulons déterminer si des variations significatives, en termes de tendances linéaires des précipitations mensuelles, se sont produites pendant ce demi-siècle dans le sud-est méditerranéen français de 1950 à 2000. Et en cas de variations significatives des précipitations mensuelles nous avons recherché si celles-ci sont associées à des variations des précipitations quotidiennes, soit en nombre, soit en quantité moyenne ou bien à un changement de l'importance des fortes précipitations qui sont, c'est bien connu, à l'origine des crues et inondations catastrophiques (Rivrain, 1997). Nous avons aussi retenu le niveau du 95^{ème} centile, son intérêt étant d'appréhender les fortes précipitations tout en s'affranchissant du maximum qui est souvent exceptionnel (Brunetti et al., 2001a). Les précipitations quotidiennes ont été étudiées en Italie de 1951 à 1996 en terme de nombre de jours de pluie et de quantiles (Brunetti et al., 2001a et b) et à Oran en terme de pluies égales ou supérieures à 10 mm (Matari et al., 1999).

De plus, comme la hausse de la pression de surface ainsi que du niveau du géopotential 500 hPa en Méditerranée occidentale a été confirmée pendant cette seconde moitié du siècle dernier (Conte et Giuffrida, 1989, Schönwiese, 1993), nous avons également recherché si les résultats obtenus au niveau des pluies sont cohérents avec une telle évolution régionale des pressions de surface. L'influence des ces pressions de surface a fait l'objet d'analyses préliminaires concernant la Méditerranée (Piervitali et Colacino, 2003, Norrant et

Douguédroit, 2003) et a été étudiée en rapport avec les pluies en Israël (Kutiel et Paz, 1998).

1. Données et méthodes

1.1. Données

Les données de précipitations sous forme de cumuls quotidiens et mensuels proviennent de 24 stations (origine : Météo-France) dans la région méditerranéenne française à l'exclusion de la Corse (figure 1; liste des stations en annexe). Elles sont réparties de façon non homogène. Lors d'études préliminaires les Analyses en Composantes Principales avec Rotation ont rattaché la station d'Embrun (13) à l'ouest du Rhône et Mont Aigoual (20) à la vallée du Rhône; c'est pourquoi nous les avons conservées dans cette analyse. Toutes les stations de pluie conservées ont été testées comme homogènes par le test de Mann-Kendall. Nous avons retenu deux pas de temps : mensuel, avec les cumuls des précipitations, quotidien avec la moyenne des précipitations quotidiennes, le nombre de jours de pluie et le 95^{ème} centile des pluies journalières.

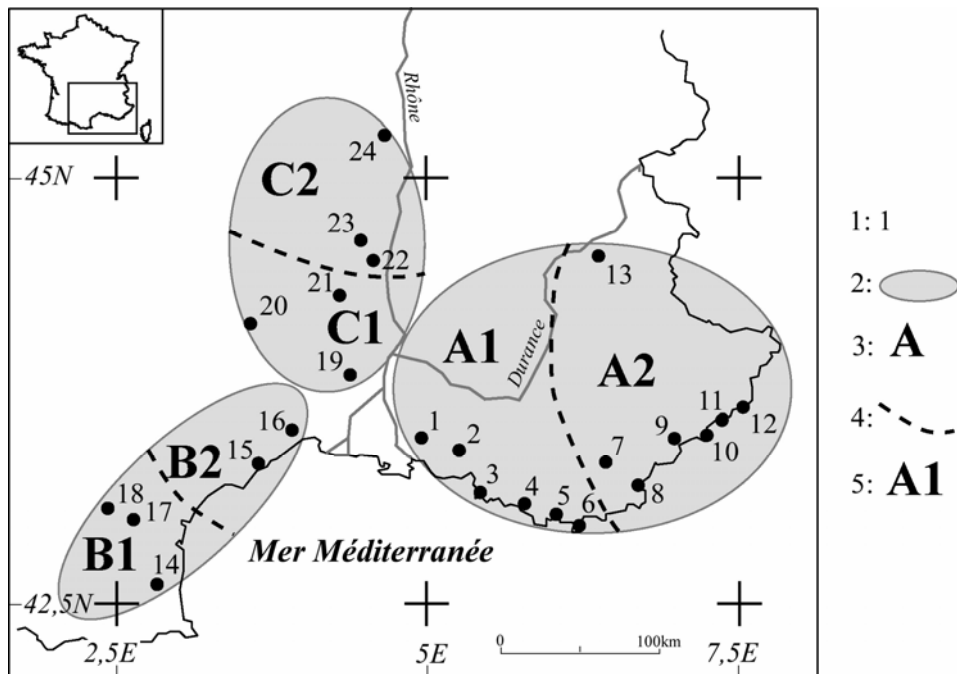


Figure 1 : Localisation des stations pluviométriques et des points de grille de pression au niveau de la mer. 1: Stations 2: Limite de régions 3: Région 4: Limite de subdivision régionale 5: Subdivision régionale. *Location of rainfall stations and sea level pressure grid points. 1: Stations 2: Region boundary 3: Region 4: Subregion boundary 5: Subregion*

Les pressions de surface utilisées sont celles, mensuelles, mesurées à la station de Perpignan (origine : Météo-France) et aux six points de grille à proximité des stations : latitudes 42,5N et 45N et longitudes 2,5E, 5E et 7,5E des réanalyses du NCEP (National Center for Environmental Prediction, USA). Elles proviennent du modèle CDAS-1 dont la fiabilité de reconstitution est reconnue (Niveau A : Kalnay et al., 1996). Les points de grille choisis encadrent les stations et les régions, au nord et au sud mais aussi à l'est et à l'ouest.

L'étude s'étend sur 50 années hydrologiques, allant de septembre 1950 à août 2000.

1.2. Méthodes

La régionalisation des précipitations et des paramètres qui leur sont associés a été obtenue par des Analyses en Composantes Principales avec Rotation (ACPR) de type Varimax qui ont pour particularité de conserver l'orthogonalité entre les facteurs (Richman, 1986). Elles ont été effectuées sur les paramètres cités précédemment. L'ACPR regroupe sur chacun de ses facteurs les stations dont les évolutions temporelles se ressemblent, c'est-à-dire ayant une variabilité temporelle identique, sans tenir compte de l'effet de taille ni d'un éventuel événement extrême du fait de la standardisation des données; en d'autres termes, l'existence d'un seul événement de très fortes précipitations ne peut pas modifier la régionalisation, même si celle-ci est partiellement dépendante du réseau de stations. Il y a ainsi autant de régions que de facteurs retenus. Chacune n'explique qu'une partie de la variance des stations qu'elle regroupe, c'est ce que nous désignons sous le terme de "variance expliquée" de la région (Von Storch et Zwiers, 1998).

Les divers paramètres associés aux pluies d'octobre, novembre et mars correspondant à chaque station ont été régionalisés par des ACPR avec les stations en variables et le mois étudié (temps) en observations de 1950-51 à 1999-2000. Tous présentent, dans ses grandes lignes, une régionalisation identique qui repose sur trois régions principales : est du Rhône, vallée du Rhône et ouest du Rhône (figure 1).

A partir des séries temporelles régionales ainsi déterminées (scores) pour chacun des paramètres étudiés nous avons calculé des tendances linéaires. La signification de toutes ces tendances a été testée au niveau 0,05 par le test non paramétrique sur les rangs de Kendall (Sneyers, 1975). Nous avons exclu les saisons et mois montrant des tendances non significatives dans ce sens. Nous n'étudierons ici que les résultats correspondant aux mois d'octobre, novembre et mars lors desquels les précipitations totales ont des tendances significatives dans une des régions déterminées par les ACPR précédentes. Nous avons appliqué un test de Mann-Kendall sur les scores significatifs à la recherche d'une éventuelle rupture, suivi d'un test de Student pour contrôler la significativité de la différence entre les demi-séries ainsi obtenues.

La modélisation statistique des pluies par la tendance linéaire (équation de type $y=ax+b$) permet d'estimer la différence modélisée du total mensuel des pluies entre début et fin de la série. L'équation de forme $y_1=ax_1+b$ de la tendance représente la valeur standardisée pour 1950-51 et $y_{50}=ax_{50}+b$ la valeur standardisée pour 1999-2000. En calculant la différence entre ces deux valeurs standardisées ($y_{50}-y_1$) que nous multiplions par l'écart type moyen des stations d'une région nous pouvons reconstituer la variation régionale brute des pluies mensuelles au cours de la période étudiée.

Ensuite, afin d'évaluer l'importance des relations entre les pressions régionales et les précipitations, nous avons mis en évidence des corrélations simples entre les précipitations et les pressions de surface à Perpignan (pour la seule région à l'ouest du Rhône) et, dans tous les cas, aux points de grille déjà mentionnés pendant les mois pour lesquels les précipitations totales ont des tendances significatives. Ces corrélations ont été considérées comme statistiquement significatives au niveau 0,05 par le test de Bravais-Pearson, c'est-à-dire dans notre cas lorsque les corrélations sont en valeur absolue $\geq 0,20$ même si les pourcentages de variance expliquée qu'elles expriment sont faibles.

2. Régionalisation des précipitations mensuelles et des paramètres quotidiens

Une étude préliminaire portant sur les cumuls mensuels de précipitations (dont les résultats détaillés ne sont pas développés ici) a été menée sur tous les mois des 24 stations. Elle a montré que seuls octobre, novembre et mars présentent des tendances significatives des totaux mensuels de septembre 1950 à août 2000. Aussi avons-nous limité ici notre étude à ces trois mois pour montrer comment les précipitations quotidiennes contribuent aux diminutions significatives des pluies.

Dans les trois ACPR relatives aux cumuls mensuels de pluie avec les stations comme variables et les totaux mensuels de pluie en observations, les trois régions principales citées plus haut apparaissent, avec toutefois des subdivisions certains mois (figure 1). La variance totale est toujours élevée avec trois facteurs (tableau 1) :

	Octobre	Novembre	Mars
A : Est du Rhône	33,3% ↘	27,8% =	37,9% ↘
C : Vallée du Rhône	21% ↘	C1 : 26,4% ↘ C2 : 14,8% ↘	10,7% =
B : Ouest du Rhône	15,8% ↗	11,6% ↘	28,6% ↘
Variance totale	70,1%	80,6%	77,2%

Tableau 1 : Variances des totaux régionaux mensuels de pluie expliquées par ACPR. Tendances : diminution : ↘ significative, ↘ non significative; ↗ augmentation non significative; = pas de tendance. *Variances of the regional monthly rainfall amounts explained by RPCA. Trends: decrease: ↘ significant, ↘ non significant, ↗ non significant increase, = no trend*

Les analyses relatives au nombre mensuel de jours de pluie avec les stations en variables et le nombre mensuel de jours de pluie en observations ont mis en évidence des régions quasiment identiques à celles obtenues précédemment (figure 1), avec toutefois une fusion entre deux régions en octobre et novembre (tableau 2).

	Octobre	Novembre	Mars
A : Est du Rhône	53,4% ↗	42,2% =	35,4% =
C : Vallée du Rhône	26,7% ↗	27,7% ↗	19,5% ↗
B : Ouest du Rhône			28,5% ↘
Variance totale	80,1%	69,9%	83,4%

Tableau 2 : Variances des nombres régionaux mensuels de jours de pluie expliquées par ACPR. Tendances : diminution : ↘ significative, ↘ non significative ; ↗ augmentation non significative ; = pas de tendance. *Variances of the regional number of rainy days explained by RPCA. Trends: decrease: ↘significant, ↘ non significant, ↗ non significant increase, = no trend.*

Dans le cas des précipitations moyennes quotidiennes avec les stations en variables et les moyennes quotidiennes mensuelles des pluies en observations on retrouve la même régionalisation que précédemment (figure 1, tableau 3). Seul l'ouest du Rhône présente en novembre une division entre est et ouest et en mars la vallée du Rhône entre sud et nord. Les variances totales expliquées par ces ACPR sont relativement faibles par rapport aux analyses précédentes, mais prendre un plus grand nombre de facteurs ne permet pas de les augmenter de beaucoup. Ceci signifie que les précipitations quotidiennes moyennes ont de très grandes variations spatiales et ne peuvent pas être aisément organisées en régions homogènes.

	Octobre	Novembre	Mars
Est du Rhône	26,5% ↘	26,8% ↘	22,5% ↘
Vallée du Rhône	17,1% ↘	14% ↘	C1 : 9,4% = C2 : 24,6% =
Ouest du Rhône	13,2% ↘	B1 : 10,7% = B2 : 13% ↘	9,5% ↘
Variance totale	57,6%	63,8%	66%

Tableau 3 : Variances des 95^{ème} centiles régionaux mensuels expliquées par ACPR. Tendances : diminution : ↘ significative, ↘ non significative ; = pas de tendance. *Variances of the regional mean daily precipitation explained by RPCA. Trends: decrease: ↘significant, ↘non significant, ↗non significant increase, = no trend*

Les analyses calculées sur le niveau du 95^{ème} centile des précipitations avec les stations en variables et les 95^{ème} centiles mensuels en observations donnent une régionalisation identique, avec des variances totales expliquées comprises entre celles des ACPR sur les totaux mensuels et le nombre de jours de pluie d'une part et les précipitations moyennes quotidiennes d'autre part (tableau 4). Des subdivisions régionales apparaissent au cours de chacun des trois mois.

	Octobre	Novembre	Mars
Est du Rhône	26,2% ↘ Embrun : 7,7% =	22,9% =	A1 : 19,6% = A2 : 20,4% ↘
Vallée du Rhône	17,1% ↘	16,3% ↘	C1 : 8,1% = C2 : 15,5% =
Ouest du Rhône	12,8% ↗	B1 : 12,2% = B2 : 11,5% =	11,1% ↘
Variance totale	63,9%	62,9%	74,7%

Tableau 4 : Variances des nombres régionaux mensuels de jours de pluie expliquées par ACPR. Tendances : diminution : ↘ significative, ↘ non significative; ↗ augmentation non significative; = pas de tendance. *Variances of the 95th percentile of the regional rainfall explained by RPCA. Trends: decrease: ↘ significant, ↘ non significant, ↗ non significant increase, = no trend*

3. Tendances linéaires des précipitations régionales

Nous avons calculé les tendances linéaires sur les séries de scores des trois facteurs de chaque paramètre obtenus par ACPR sur les trois mois étudiés. Puis nous avons testé la signification de ces tendances grâce au test non paramétrique sur les rangs de Kendall.

3.1. Tendances linéaires majoritairement non significatives

Au sein des régions déterminées précédemment les totaux mensuels montrent plutôt des diminutions, sauf en octobre à l'ouest du Rhône où les précipitations augmentent (tableau 1). Seuls les totaux mensuels des précipitations de trois mois ont des tendances significatives : octobre à l'est du Rhône, novembre dans le vallée du Rhône et mars à l'ouest du Rhône (Tableau 1). Nous allons limiter notre étude à ces trois cas.

Les nombres de jours de pluie par contre sont plutôt en augmentation, excepté à l'ouest du Rhône en mars où ils diminuent (tableau 2). Les moyennes des précipitations quotidiennes quant à elles sont en diminution sur l'ensemble des sous-régions au cours des mois étudiés (tableau 3). Le niveau du 95^{ème} centile est aussi en diminution, sauf à l'ouest du Rhône en octobre où il est en augmentation (tableau 4).

Le signal général qui se dégage des tendances des précipitations et des paramètres qui leur sont associés est principalement une absence de tendance significative. Toutefois dans une même région au cours du même mois, les tendances des précipitations moyennes quotidiennes, du nombre de jours de pluie et du niveau du 95^{ème} centile sont cohérentes avec la tendance des totaux de pluie. Par exemple à l'ouest du Rhône en octobre où les totaux de pluie augmentent non significativement, de façon cohérente avec l'augmentation non significative du nombre de jours de pluie et du niveau du 95^{ème} centile et la diminution significative des moyennes quotidiennes de pluie dans la même région pendant le même mois.

3.2. Diminution significative des précipitations d'octobre à l'est du Rhône

En octobre les précipitations mensuelles à l'est du Rhône diminuent significativement (test de Kendall à $-2,20$) (figure 2). La diminution modélisée va de 101,3 mm à 53,9 mm en 50 ans, soit une différence de 47,4 mm. Les tests de Mann-Kendall et Student appliqués à la même série de scores montrent une rupture significative au milieu des années 1970.

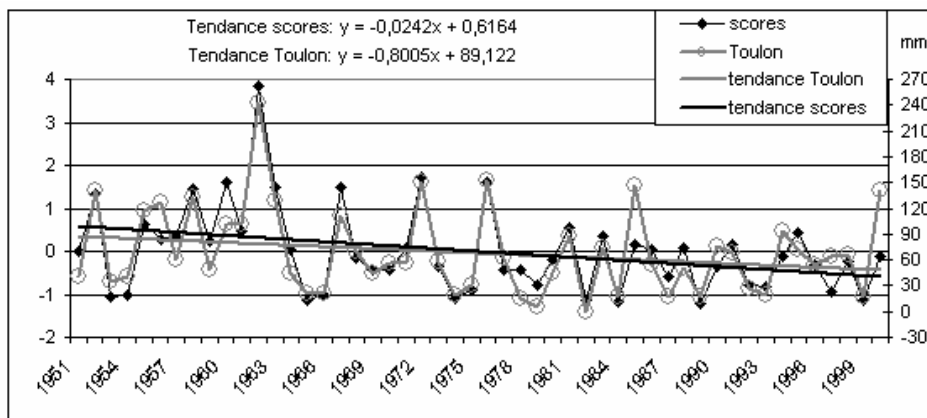


Figure 2 : Tendances linéaires des précipitations d'octobre à l'est du Rhône (d'après les scores du premier facteur d'une ACPR sur les précipitations d'octobre) et à Toulon. *Linear trends of October rainfall East of the Rhone river (according to the scores of the first eigenvector of a RPCA on October precipitation) and in Toulon*

Une étude à l'échelle stationnelle (Toulon, station la mieux corrélée au facteur représentant cette région : 0.88) confirme cette diminution significative des précipitations d'octobre. Nous avons estimé (cf. 1.2.) la différence entre les précipitations à Toulon en 1950 (119,4 mm) et en 1999 (79,4 mm) à 40 mm en 50 ans. Ce mois est bien celui qui présente la plus grande différence de valeurs entre 1950-1951 et 1999-2000 d'après les tendances linéaires des précipitations mensuelles (figure 3).

Tous les paramètres régionaux associés en octobre aux précipitations tombant à l'est du Rhône présentent une tendance à la diminution. Mais si les précipitations moyennes quotidiennes et le 95^{ème} centile diminuent significativement, ce n'est pas le cas du nombre de jours de pluie. Il semblerait alors que la diminution significative des précipitations mensuelles puisse plutôt être reliée à la diminution significative des moyennes quotidiennes ainsi que du 95^{ème} centile. Cette hypothèse se vérifie lorsque l'on calcule les coefficients de corrélation entre les séries temporelles (scores) des totaux mensuels de pluie et des autres paramètres : les corrélations significatives et élevées au niveau 0,05 apparaissent avec les moyennes quotidiennes (0,80) et le 95^{ème} centile (0,82), non avec le nombre de jours de pluie (-0,01). A l'échelle des stations, les

corrélations entre totaux de pluie et moyennes quotidiennes des précipitations ou 95^{ème} centile sont comprises entre 0,77 (Istres) et 0,92 (La Ciotat et Fréjus), ce qui sous-entend un rôle prépondérant de ces paramètres dans la tendance du total mensuel des pluies.

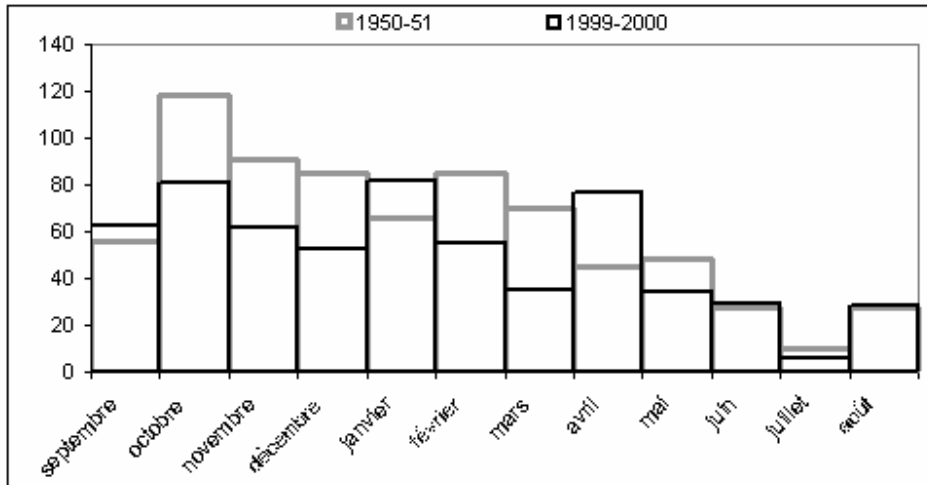


Figure 3 : Régimes pluviométriques modélisés en mm à Toulon (1950-51 et 1999-2000). *Modeled rainfall regime in mm of Toulon (1950-51 and 1999-2000)*

Nous avons également voulu contrôler le pourcentage de précipitations mensuelles au-delà du 95^{ème} centile aussi bien au niveau régional que stationnel (à partir de la station de Toulon prise en exemple). A partir des tendances linéaires mensuelles, on a calculé (cf. 1.2.) la moyenne régionale des pluies d’octobre en 1950-51 et 1999-2000, la valeur du 95^{ème} centile de ces mêmes années et ensuite le pourcentage que représentent les pluies supérieures au 95^{ème} centile par rapport au total mensuel. Ainsi ce pourcentage passe-t-il de 68,2 à 70,9 pour la moyenne régionale de l’est du Rhône et de 77,4 à 81,1 pour le cas de Toulon. La part des cinq derniers centiles, très élevée dans la région, a augmenté de 2 points environ dans le total mensuel d’octobre au cours du dernier demi-siècle.

3.3. Diminution quasi-significative des pluies de novembre dans le sud de la vallée du Rhône

Les précipitations totales diminuent quasi-significativement en novembre dans le sud de la vallée du Rhône (test de Kendall à -1,94, significatif à -1,96 au niveau 0,05) (figure 4). Nous avons obtenu à partir de l’équation de tendance une modélisation de la variation du régime sur 50 ans : la diminution modélisée des précipitations est estimée à 13,2 mm (82,7-69,5) en 50 ans. Sur les scores régionaux les tests de Mann-Kendall et de Student ne détectent aucune rupture significative.

En revanche les totaux mensuels des pluies dans les stations de cette région prises une à une diminuent significativement. Le mois de novembre à Nîmes, station la mieux corrélée (0.79) au facteur représentant cette région, possède une diminution modélisée de 40,7 mm en 50 ans (140,4 mm-99,7 mm) (figure 5).

La diminution quasi-significative des précipitations régionales est associée, comme dans le cas précédent (3.2.), aux diminutions quasi-significatives des moyennes quotidiennes de pluie et du 95^{ème} centile (tests de Kendall de $-1,92$ et $-1,95$ respectivement). Les coefficients de corrélation calculés entre les scores des totaux de pluie et des autres paramètres vont dans ce sens : les corrélations au niveau 0,05 sont significatives, quoique relativement faibles, avec les moyennes quotidiennes de pluie (0,50) et le 95^{ème} centile (0,60) mais non significative avec le nombre de jours de pluie (0,17). Les corrélations entre les totaux mensuels et la moyenne quotidienne ou le niveau du 95^{ème} centile des pluies à l'échelle stationnelle sont significatives mais relativement faibles elles aussi, allant de 0,64 (Lapalud) à 0,79 (Nîmes). La moyenne quotidienne des précipitations et le niveau du 95^{ème} centile ont donc en novembre dans la vallée du Rhône une influence réelle mais plus limitée sur les variations des totaux mensuels que dans le cas précédent de Toulon.

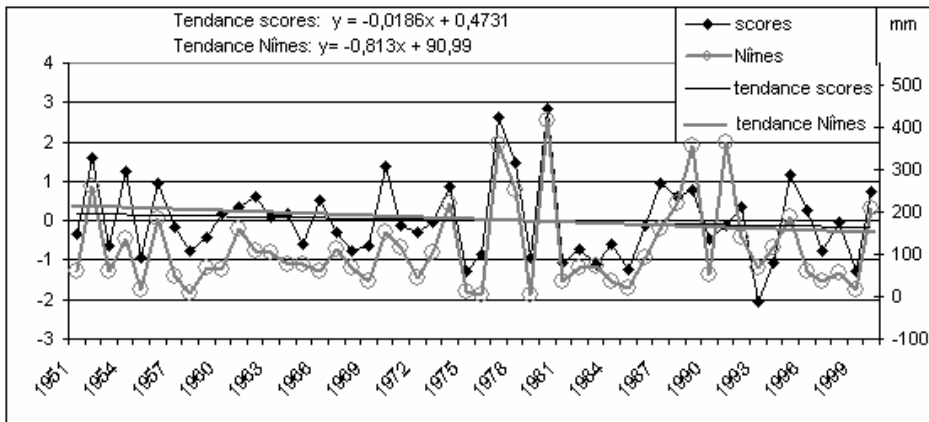


Figure 4 : Tendances linéaires des précipitations de novembre dans le sud de la Vallée du Rhône (d'après les scores du deuxième facteur d'une ACPR sur les précipitations de novembre) et à Nîmes. *Linear trends of November rainfall in the South of the Rhone Valley (according to the scores of the second eigenvector of a RPCA on November precipitation) and in Nîmes*

La part des précipitations supérieures au niveau du 95^{ème} centile, aussi bien au niveau régional que stationnel (exemple de Nîmes) passe de 61,1 à 56,2% pour la moyenne régionale de la vallée du Rhône et de 72,3 à 69,6% pour le cas de Nîmes. La part des cinq derniers centiles très élevée dans la région a diminué de 5 points environ dans le total mensuel de novembre au cours du dernier demi-siècle.

3.4. Diminution significative des pluies de mars à l'ouest du Rhône

En mars les précipitations totales diminuent significativement dans la région à l'ouest du Rhône (test de Kendall à $-1,96$) (figure 6). Une diminution significative des pluies du mois de mars a déjà été détectée au Portugal (Trigo et DaCamara, 2000). A partir de l'équation de tendance nous avons obtenu une modélisation de la variation du régime sur 50 ans : une diminution de 31,2 mm (79,5 mm-48,3 mm) en 50 ans. Les tests de Mann-Kendall et Student appliqués aux scores régionaux mettent en évidence une rupture significative vers le milieu des années 1970, tout comme à l'est du Rhône au mois d'octobre.

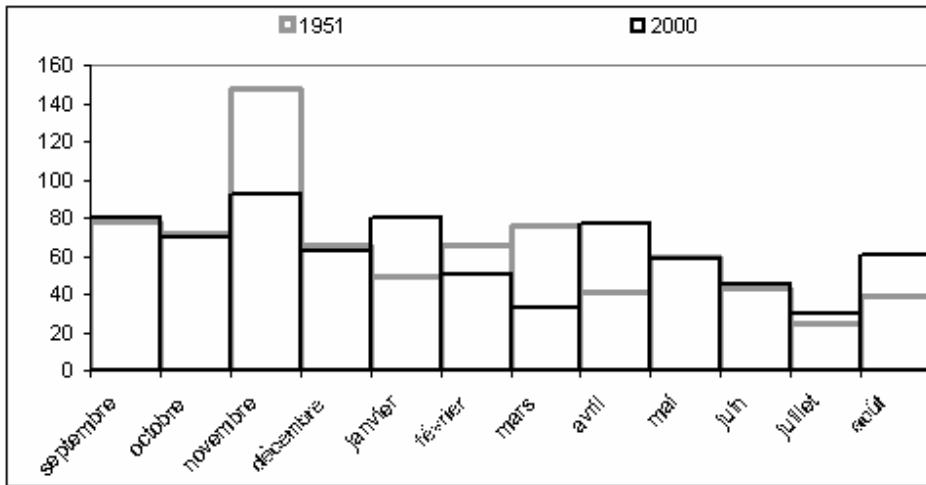


Figure 5 : Régimes pluviométriques modélisés en mm à Nîmes (1950-51 et 1999-2000). Modeled rainfall regime in mm of Nîmes (1950-51 and 1999-2000)

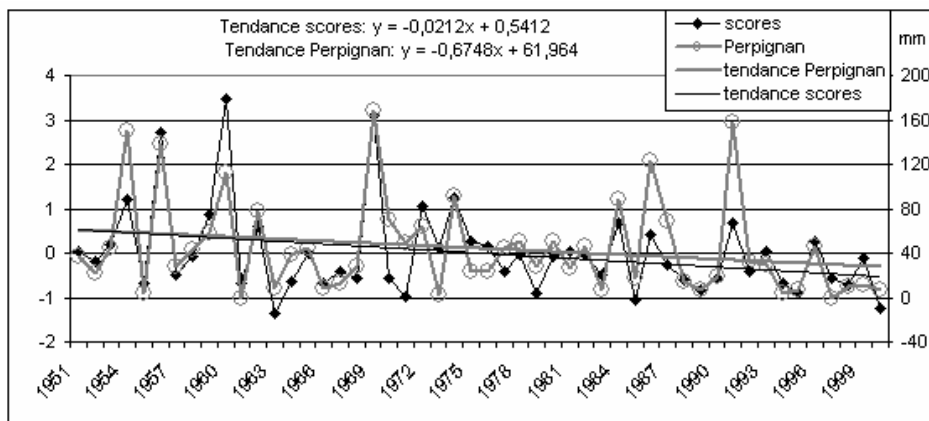


Figure 6 : Tendances linéaires des précipitations de mars à l'Ouest du Rhône (d'après les scores du deuxième facteur d'une ACPR sur les précipitations de mars) et à

Perpignan. *Linear trends of March rainfall West of the Rhone river (according to the scores of the second eigenvector of a RPCA on March precipitation) and in Perpignan.*

Le mois de mars à Perpignan, station la mieux corrélée (0.79) au facteur représentant cette région, montre une diminution modélisée de 33,8 mm (64-30,2) en 50 ans. Ce mois est bien celui qui présente la plus grande différence de valeurs entre 1950-1951 et 1999-2000 d'après les tendances linéaires des précipitations mensuelles (figure 7). Notons qu'en janvier, malgré une forte augmentation des précipitations, la tendance n'est pas donnée comme significative par le test de Kendall sur les rangs.

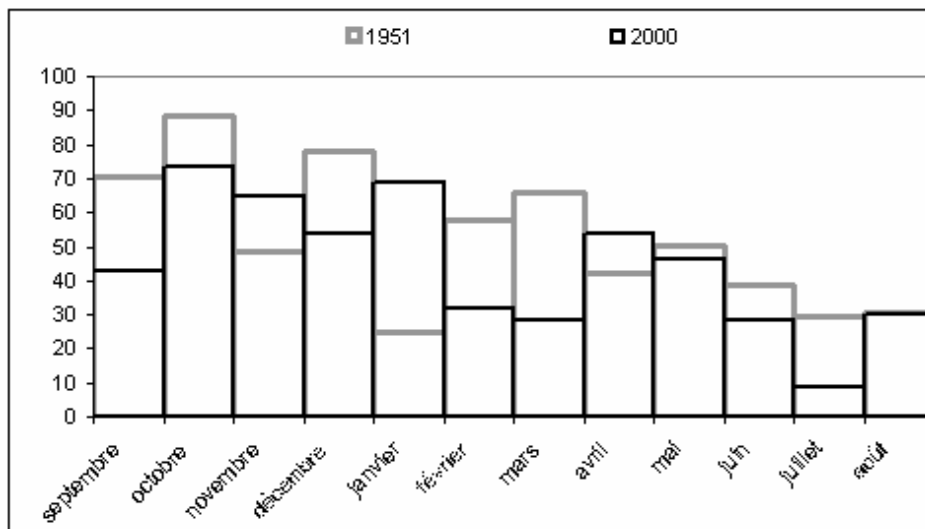


Figure 7 : Régimes pluviométriques modélisés en mm à Perpignan (1950-51 et 1999-2000). *Modeled rainfall regime in mm for Perpignan.*

Nous avons comparé cette diminution significative des précipitations de mars avec les autres paramètres calculés sur les précipitations du même mois (moyennes quotidiennes, nombre de jours de pluie et niveau du 95^{ème} centile). Les corrélations sont toutes significatives au niveau 0,05 mais à des degrés divers : elles sont moins élevées avec le nombre de jours de pluie (0,45) qu'avec les moyennes quotidiennes et le niveau du 95^{ème} centile (0,55 et 0,74 respectivement). Dans le cas précis du mois de mars à l'ouest du Rhône, les trois paramètres jouent simultanément un rôle, bien qu'avec des poids différents, dans la diminution des totaux de pluie. Toutefois les corrélations relativement faibles indiquent une influence limitée de chacun des différents paramètres pris en compte sur les totaux de pluie. Cette logique se retrouve dans l'étude des stations de cette région ouest prises une par une au mois de mars.

Comme précédemment, nous avons de nouveau contrôlé le pourcentage des précipitations supérieures au 95^{ème} centile à l'échelle régionale et de la station la mieux représentée sur le facteur (Perpignan). Il passe de 70,8 à 82,6 pour la

moyenne régionale de l'ouest du Rhône et de 65,6 à 66,7 pour le cas de Perpignan. La part des cinq derniers centiles très élevée dans la région a eu tendance à augmenter de 12 points environ dans le total mensuel de mars au cours du dernier demi-siècle.

Les précipitations dans le sud-est méditerranéen français entre 1950 et 2000 montrent une tendance linéaire générale à la diminution mais cette dernière n'est que rarement significative. Cela ne se produit que pendant un mois pour chacune des trois régions pluviométriques. Ces diminutions significatives affectent deux mois parmi les plus pluvieux, octobre et novembre à l'est et dans la vallée du Rhône, alors qu'à l'ouest c'est le "maximum" déjà très relatif de mars qui s'estompe. On constate aussi le long du littoral, à l'est et à l'ouest du Rhône, une augmentation des pourcentages représentés par les précipitations >95^{ème} centile.

4. Relations entre précipitations et pressions de surface régionales

Une telle diminution générale des précipitations mensuelles amène à se poser la question de l'influence possible de l'augmentation des pressions de surface au-dessus de la Méditerranée occidentale (Conte et Giuffrida, 1989, Schönwiese et al., 1993, Maheras et al., 1998, Douguédroit 2000, 2003). En effet, même si les précipitations sont des phénomènes localisés dans l'espace, leur genèse est influencée par l'évolution des pressions à des échelles spatiales beaucoup plus vastes. Nous allons là aussi limiter notre recherche aux trois mois dont les tendances linéaires des précipitations totales mensuelles ont diminué significativement.

Pour ces mois nous avons corrélé pour la période 1950-51 à 1999-2000 les scores régionaux des totaux mensuels, nombre de jours de pluie, moyenne quotidienne mensuelle et niveau du 95^{ème} centile ainsi que les totaux mensuels de pluie des stations avec les pressions mensuelles de surface aux points de grille les plus proches de la sous-région concernée par la tendance significative et à la station de Perpignan. Nous ne présentons, pour chaque mois, que les résultats des stations les mieux corrélées aux axes factoriels de chaque mois (saturations $\geq 0,75$), ces stations étant les plus représentatives de leur région.

4.1 Mois d'octobre à l'est du Rhône

Les pressions de surface aux points de grille ont augmenté significativement en octobre entre 1950 et 1999 (test de Kendall moyen : 2,4). Cette augmentation est modélisée d'après la tendance linéaire à 3,8 hPa, valeur moyenne de l'ensemble des points de grille, ce qui est cohérent avec les études précédentes fondées sur les relevés stationnels, mettant elles aussi en évidence une augmentation quasi-significative des pressions de surface pour la saison d'automne, mais plus modérée puisque estimée à 2h Pa entre 1961 et 1990 (Schönwiese et al., 1993).

A l'est du Rhône, en octobre, les corrélations entre précipitations et pressions de surface dans la même région sont toutes négatives et significatives au niveau 0,05 d'après le test de Bravais-Pearson, même si les valeurs sont relativement faibles, voire quasi-nulles pour le nombre de jours de pluie (tableau 5). Ceci est tout à fait cohérent, une diminution des précipitations étant associée à une augmentation régionale des pressions de surface.

Précipitations	Pressions de surface					
	42,5N-2,5E	42,5N-5E	42,5N-7,5E	45N-2,5E	45N-5E	45N-7,5E
Est du Rhône	-0,53	-0,54	-0,53	-0,46	-0,48	-0,48
Marseille	-0,55	-0,56	-0,55	-0,51	-0,52	-0,51
Toulon	-0,53	-0,54	-0,52	-0,46	-0,47	-0,45
Le Luc	-0,56	-0,57	-0,55	-0,56	-0,57	-0,56
Ramatuelle	-0,57	-0,57	-0,55	-0,52	-0,53	-0,52
Fréjus	-0,65	-0,63	-0,58	-0,62	-0,60	-0,57
Nb jours	0,04	0,02	0,01	0,06	0,05	0,05
Moy. quot.	-0,39	-0,41	-0,41	-0,38	-0,40	-0,40
95 ^{ème} centile	-0,51	-0,53	-0,52	-0,50	-0,52	-0,52

Tableau 5 : Corrélations entre précipitations et pressions de surface en octobre; en gras les résultats significatifs. *Correlation between precipitation and sea level pressures during October; significant results in bold*

Les variations des pressions régionales de surface n'ont pas d'influence sur celles du nombre de jours de pluie. La diminution mensuelle des pluies en octobre est statistiquement associée de façon significative, quoique faible, à celle de la moyenne des précipitations quotidiennes et des fortes précipitations mais avec une variance inférieure à 30 % en général. Tous les paramètres pluviométriques retenus ici varient essentiellement sous l'effet d'influences de la circulation atmosphérique extérieures à la région.

4.3 Mois de novembre dans la vallée du Rhône

L'étude des pressions de surface aux différents points de grille en novembre fait ressortir une augmentation moyenne non significative des pressions de surface, modélisée sur 50 ans à 1,04 hPa, l'augmentation étant plus faible à l'ouest qu'à l'est. Les études précédentes ont montré une augmentation significative saisonnière d'automne de 2 hPa entre 1961 et 1990, qui est susceptible d'associer la forte augmentation d'octobre à une autre beaucoup plus faible de novembre (Schönwiese et al., 1993).

Les corrélations entre les pressions de surface et les paramètres mensuels de pluie des stations de la vallée du Rhône sont plus faibles qu'en octobre mais

toutes négatives et significatives d'après le test de Bravais-Pearson, sauf pour les précipitations quotidiennes moyennes (tableau 6). Elles ne font pas de distinction entre nord et sud.

Dans la vallée du Rhône, en novembre, les corrélations entre pressions de surface et les paramètres explicatifs retenus ne sont pas significatives (moyennes quotidiennes des pluies) ou le sont faiblement (niveau du 95^{ème} centile). Les variations des pressions de surface régionales, du moins d'après les réanalyses NCEP, ont une relation significative mais relativement faible avec les variations des précipitations totales et du nombre de jours de pluie. Tous ces paramètres dépendent, encore plus nettement qu'à l'Est du Rhône, d'autres facteurs de la circulation atmosphérique que les pressions régionales.

Précipitations	Pressions de surface					
	42,5N-2,5E	42,5N-5E	42,5N-7,5E	45N-2,5E	45N-5E	45N-7,5E
Vallée du Rhône	-0,38	-0,34	-0,30	-0,43	-0,39	-0,35
Lapalud	-0,49	-0,42	-0,33	-0,48	-0,40	-0,31
Montségur	-0,56	-0,49	-0,40	-0,57	-0,49	-0,41
Montélimar	-0,52	-0,44	-0,34	-0,52	-0,44	-0,35
Nîmes	-0,48	-0,40	-0,32	-0,52	-0,44	-0,36
Nb jours	-0,32	-0,33	-0,32	-0,32	-0,33	-0,33
Moy. quot.	-0,19	-0,13	-0,08	-0,18	-0,14	-0,09
95 ^{ème} centile	-0,28	-0,23	-0,17	-0,28	-0,23	-0,18

Tableau 6 : Corrélations entre précipitations et pressions de surface en novembre; en gras les résultats significatifs. *Correlation between precipitation and sea level pressures during November; significant results in bold*

4.3 Mois de mars à l'ouest du Rhône

Une analyse préliminaire des pressions de surface mesurées à Perpignan montre une augmentation significative au cours de la période d'étude (test de Kendall : 3,24) estimée à 6 hPa. Les pressions réanalysées aux points de grille montrent aussi une augmentation significative sur la période estimée en moyenne à la même valeur de 6 Pa mais plus importante au nord qu'au sud et à l'ouest qu'à l'est. Les études précédentes, en revanche, ont montré une augmentation saisonnière de printemps non significative, estimée à 0,5 hPa entre 1961 et 1990 et à 1 hPa entre 1891 et 1990 (Schönwiese et al., 1993). Là encore les données réanalysées supposent des variations très différentes selon les mois d'une même saison. Elles semblent aussi poser quelques problèmes quant à la quantification de leurs tendances. Si l'on compare les pressions de surface à Perpignan en mars à celles du point de grille le plus proche, 42,5N-2,5E, (figure 8) on se rend compte que la réanalyse sous-estime l'observation

jusqu'à -2 hPa (1960-1966) puis la surestime jusqu'à 1 hPa (1978-1985) pour à nouveau la sous-estimer par la suite (Douguédroit, 2003).

Logiquement les corrélations calculées entre les précipitations des stations de l'ensemble ouest et les pressions de surface (Perpignan et points de grille) sont toutes négatives. Elles diminuent de l'ouest vers l'est, et ne sont pas statistiquement significatives pour les stations de l'intérieur (tableau 7).

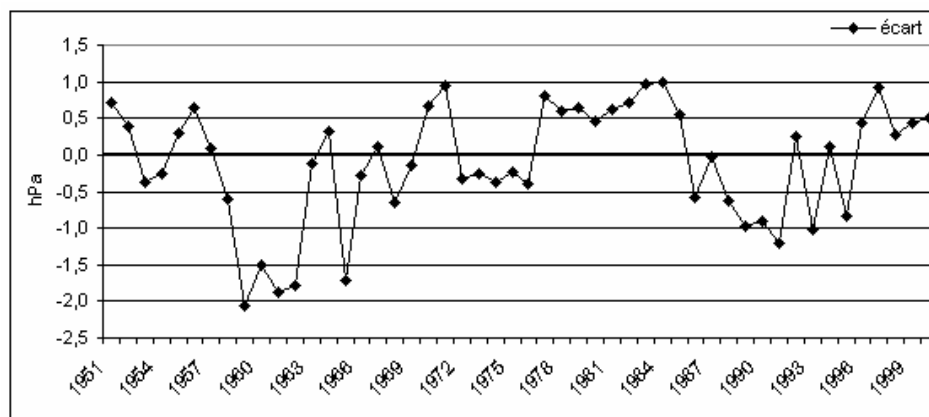


Figure 8 : Ecarts entre les pressions de surface réanalysées du point de grille 42,5N-2,5E et celles observées à Perpignan en mars. *Difference between reanalyzed sea level pressures at the 42,5N-2,5E grid point and observed pressures in Perpignan during March*

Précipitations	Pressions de surface						
	Perpignan	42,5N-2,5E	42,5N-5E	42,5N-7,5E	45N-2,5E	45N-5E	45N-7,5E
Ouest Rhône	-0,42	-0,46	-0,41	-0,36	-0,44	-0,40	-0,35
Perpignan	-0,49	-0,53	-0,49	-0,43	-0,52	-0,47	-0,42
Montpellier	-0,58	-0,60	-0,56	-0,51	-0,60	-0,56	-0,52
Sète	-0,20	-0,20	-0,21	-0,21	-0,19	-0,20	-0,20
Castelnaudary	-0,13	-0,11	-0,09	-0,07	-0,08	-0,06	-0,03
Carcassonne	-0,02	-0,02	-0,03	0,02	0,00	0,02	0,05
Nb jours pluie	-0,45	-0,48	-0,41	-0,36	-0,50	-0,44	-0,38
Moy. quot.	-0,23	-0,25	-0,21	-0,16	-0,22	-0,18	-0,14
95 ^{ème} centile	-0,39	-0,42	-0,48	-0,34	-0,41	-0,38	-0,34

Tableau 7 : Corrélations entre précipitations et pressions de surface en mars; en gras les résultats significatifs. *Correlation between precipitation and sea level pressures during March; significant results in bold*

Au pas de temps mensuel, l'effet régional des pressions de surface n'est donc statistiquement significatif que pour les stations côtières. Les influences principales de la circulation atmosphérique associées à l'origine des variations des divers paramètres sont à chercher ailleurs que dans les pressions de surface régionales, comme dans les deux régions précédentes.

Conclusion

Pendant le demi-siècle de 1950-51 à 1999-2000 les précipitations mensuelles présentent une tendance à la diminution qui est en général non significative dans la région méditerranéenne française sauf pendant trois mois, chacun au sein d'une des trois régions qui apparaissent régulièrement dans les régionalisations mensuelles des paramètres pluviométriques retenus. Elles sont significatives pour deux mois du maximum pluviométrique automnal, octobre à l'est du Rhône et novembre dans la vallée du Rhône. Là elles sont associées à une diminution de la moyenne mensuelle des pluies quotidiennes et du niveau du 95^{ème} centile (corrélations statistiquement significatives). En mars, à l'ouest du Rhône, elles le sont à une diminution du nombre mensuel de jours de pluie ainsi que du niveau du 95^{ème} centile mais pas de leur moyenne quotidienne. Ainsi pendant cette seconde moitié du XX^e siècle, si amorce des scénarios régionaux de diminution des précipitations pour 2071-2100 il y a, celle-ci est actuellement très limitée, à un ou deux mois par région.

Les pressions de surface aux points de grille les plus proches de la région d'étude sont en augmentation significative en octobre et mars, mais pas en novembre. Les corrélations entre précipitations et pressions de surface des diverses régions sont négatives et en général statistiquement significatives d'après le test de Bravais-Pearson au niveau 0,05 mais avec des variances expliquées inférieures à 20% environ, c'est-à-dire que, malgré la significativité du résultat, les relations sont faibles. Ceci confirme l'influence réelle mais réduite des pressions régionales sur les variations des précipitations dont les facteurs principaux sont à rechercher dans la circulation atmosphérique hors de la région. L'augmentation connue des pressions en Méditerranée occidentale ne joue ainsi qu'un rôle réduit sur les variations des précipitations des mois d'octobre, novembre et mars.

Au total, la détection d'une amorce au XX^e siècle des scénarios de diminution des pluies de la fin de ce siècle dans le Bassin méditerranéen (Gibelin et Déqué, 2003, Räisänen et al., 2004) se révèle délicate. Après les études antérieures qui ont montré des tendances linéaires annuelles et saisonnières non significatives (Schönwiese et al., 1993, Moisselin et al., 2002, Douguédroit et Norrant, 2003), nous avons trouvé pour le dernier demi-siècle en France méditerranéenne une tendance générale à la diminution mais celle-ci n'est significative que pour trois mois différents, chacun d'entre eux associé à une région différente, octobre à l'est du Rhône, novembre dans le sud de la

vallée du Rhône et mars à l'ouest du Rhône. Et nous ne pouvons évidemment pas savoir si de telles tendances significatives vont se poursuivre.

Bibliographie

- BRUNETTI M., COLACINO M., MAUGERI M. et NANNI T., 2001a : Trends in the daily intensity of precipitation in Italy from 1951 to 1996, *Int. J. Climatol.*, 21, pp. 299-316.
- BRUNETTI M., MAUGERI M. et NANNI T., 2001b : Changes in total precipitation, rainy days and extreme events in Northern Italy, *Int. J. Climatol.*, 21, pp. 861-871.
- CARREGA P., 1993 : Les tendances actuelles du climat de la Côte d'Azur (France), *Publ. Assoc. Intern. Climatol.*, 6, pp. 173-182.
- CONTE M. et GIUFFRIDA A., 1989 : L'oscillation méditerranéenne, *Publ. Assoc. Intern. Climatol.*, 2, pp. 217-218.
- DEQUE M., 2003 : Températures et précipitations extrêmes sur la France dans un scénario de changement climatique [dans :] *Les relations Climat-Homme-Climat, Dokumentacja Geograficzna*, 29, K. Blazejczyk et A.B. Adamczyk eds., pp. 77-80.
- DOUGUEDROIT A., 2000 : L'Oscillation Méditerranéenne en automne, *Publ. Assoc. Intern. Climatol.*, 13, pp. 326-334.
- DOUGUEDROIT A., 2003 : Pressure increase in the Mediterranean basin during the second half of the last century, *International Conference on Earth System and Modelling*, Hambourg, 15-19 Sept. 2003, CD-Rom Poster.
- DOUGUEDROIT A. et NORRANT C., 2003 : Annual and seasonal century-scale trends of the precipitation in the Mediterranean area during the twentieth century [dans :] *Mediterranean Climate. Variability and trends*. H.-J. Bolle ed., Springer, pp. 159-163.
- GIBELIN A.L. et DEQUE M., 2003 : Anthropogenic climate change over the Mediterranean region simulated by a global variable resolution model, *Climate Dynamics*, 20, pp. 327-339.
- IPCC, 2001 : *Summary for policymakers. A report of Working Group I of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, 879 p.
- KALNAY E., KANAMITSU M., KISTLER R., COLLINS W., DEAVEN D., GANDIN L., IREDELL M., SAHA S., WHITE G., WOOLLEN J., ZHU Y., CHELLIAH M., EBISUZAKI W., HIGGINS W., JANOWIAK J., MO K.C., ROPELEWSKI C., WANG J., LEETMAA A., REYNOLDS B., JENNE R. et JOSEPH D., 1996 : The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 77, pp. 437-472.
- KUTIEL H. and PAZ S., 1998 : Sea level pressure departures in the Mediterranean and their relationship with monthly rainfall conditions in Israel, *Theor. Appl. Climatol.*, 60, pp. 93-109.

- MAHERAS P., KUTIEL H. et KOLYVA-MACHERA F., 1998 : Evolution de la pression atmosphérique en Europe méridionale et en Méditerranée durant la dernière période séculaire, *Publ. Assoc. Intern. Climatol.*, 10, pp. 304-312.
- MATARI A., KERROUCHE M., BOUSID H. et DOUGUEDROIT A., 1999 : Sécheresse dans l'ouest algérien, *Publ. Assoc. Intern. Climatol.*, 12, pp. 98-106.
- MOISSELIN J.-M., SCHNEIDER M., CANELLAS C. et MESTRE O., 2002 : Les changements climatiques en France au XX^{ème} siècle, *La Météorologie*, 38, pp. 45-56.
- NORRANT C., 2004 : *Tendances pluviométriques indicatrices d'un changement climatique dans le Bassin méditerranéen de 1950 à 2000. Etude diagnostique*, Thèse de doctorat de l'Université Aix-Marseille I, 261 p. et annexes
- NORRANT C. et DOUGUEDROIT A., 2003 : Tendances récentes des précipitations et des pressions de surface dans le Bassin méditerranéen, *Annales de Géographie*, 631, pp. 298-305.
- PIERVITALI E. et COLACINO M., 2003 : Precipitation scenarios in the Central-western Mediterranean Basin [dans :] *Mediterranean Climate. Variability and trends*. H.-J. Bolle ed., Springer, pp. 245-258.
- QUEREDA-SALA J., MONTON-CHIVA E., GIL A., OLCINA J. et RICO A., 2001 : *Nuestro porvenir climático : ¿Un escenario de aridez?* Premi d'investigació Consell Social de la Universitat Jaume I, 210 p.
- RÄISÄNEN J., HANSSON U., ULLERSTIG A., DÖSCHER R., GRAHAM L.P., JONES C., MEIER H.E.M., SAMUELSSON P. et WILLÉN U., 2004 : European climate in the late twenty-first century : regional simulations with two driving global models and two forcing scenarios. *Climate Dynamics*, 22, pp. 13-31
- RICHMAN M.B., 1986 : Rotation of principal component, *Journal of Climatology*, 6, pp. 293-335.
- RIVRAIN J.C., 1997 : Les épisodes orageux à précipitations extrêmes sur les régions méditerranéennes de la France, *Phénomènes remarquables*, 4, Météo-France.
- SCHÖNWIESE C.D., RAPP J., FUCHS T. et DENHARD M., 1993 : *Klimatrend-Atlas, Europa 1891-1990, Berichte des Zentrums für Umweltforschung*, 20, 218 p.
- SNEYERS R., 1975 : *Sur l'analyse statistique des séries d'observations*. Note technique n°143 de l'Organisation Météorologique Mondiale, Genève, Suisse, 192 p.
- TRIGO R.M. et DACAMARA C.C., 2000 : Circulation weather types and their influence on the precipitation regime in Portugal, *Int. J. Climatol.*, 20, pp. 1559-1581.
- VON STORCH H. et ZWIERS F.W., 1998 : *Statistical analysis in climate research*, Cambridge University Press, UK.

Annexe : Liste des stations pluviométriques utilisées

n°	Station	Octobre				Novembre				Mars			
		1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
1	Istres	74,2	8,6	8,6	25	51,7	7,9	6,5	18,8	40,6	8,1	4,5	13,3
2	Marignane	68,5	8,5	8	24,3	50,5	8	6,1	17,7	38,5	7,2	5	14,4
3	Marseille	73,6	8,6	8,1	25,4	58,5	8,3	6,8	19,8	40,8	7,5	5,2	13,9
4	La Ciotat	76	8,1	9,7	25,7	54,8	8,1	6,4	17,4	39,5	7,2	4,9	12,3
5	Toulon	99,4	9,2	10,6	29,3	68,7	9,6	6,9	21	53,2	8,6	5,7	16,8
6	Hyères	85,5	8,2	10,6	27,9	64,9	8,4	7,3	20	50,5	7,3	7,5	18,4
7	Le Luc	102,7	9,7	10,3	30,1	94,5	10,1	9	28,2	59,3	8,8	6,2	18,2
8	Ramatuelle	95	8,5	11,5	30,6	84,9	8,5	9,4	25,7	58,5	7,5	7,1	19,7
9	Fréjus	97,2	9,2	10,3	29,8	104,8	9,5	10,4	31,7	61,7	8,4	6,9	20,1
10	Cannes	115,3	9,1	12,9	36,9	118,9	9,7	12	34,6	67,9	8,5	7,4	21,6
11	Antibes	107,4	8,6	12,6	33,9	99,5	9	10,8	30,4	58	7,7	7,2	19
12	St Jean	94,2	8,4	10,2	27,8	89,6	8,9	9,3	27,1	54,1	7,7	6,4	17,9
13	Embrun	72,2	9,6	7,6	20,9	67,3	9,4	7,1	18,7	45,6	8,5	5	13,1
14	Perpignan	76,8	8,2	8,4	27,8	51,4	8	5,4	18,9	47,1	8,2	4,9	16
15	Sète	89,4	8,4	9,9	29,2	56,6	7,4	8,1	23,3	46	7,7	5,2	15,5
16	Montpellier	96,9	9,3	10,1	31,5	60	8,3	7,6	24,2	47,4	8,5	5,5	15,8
17	Carcassonne	62	11,9	5,1	17,9	57,8	13,5	4,1	14,3	54,9	13,1	4,1	12,3
18	Castelnaudary	55,4	10,7	5	14,9	56	13	4,4	13,3	56,4	11,8	4,6	12,6
19	Nîmes	73,2	9,5	8,2	34,6	120	12	7,1	23,1	50,2	8,7	5,4	15,4
20	Mont Aigoual	287,7	15,7	18	67,6	241,1	15,7	14,7	55,2	147,9	14,8	8,9	32,9
21	Lapalud	105,7	8,1	13	35,8	78	7,8	9,3	28,3	50	6,9	7	18,3
22	Montségur	82,9	7,7	10,8	26,8	62,8	7,2	8,5	22,3	50,1	6,8	6,9	17,6
23	Montélimar	108,3	11	9,6	32,5	83,3	11,4	6,9	24,1	61,3	10,5	5,5	18,4
24	St Sorlin	92,3	8,9	10,7	30,1	82,9	9,8	8,4	24,1	55,8	9,2	6	16,3

1 : total mensuel de pluie moyen (mm). 2 : nombre de jours de pluie moyen. 3 : moyenne des précipitations quotidiennes (mm). 4 : niveau du 95^{ème} centile moyen (mm).
 1: Mean monthly rainfall amounts (mm). 2: Mean numbers of rainy days. 3: Mean daily precipitation (mm). 4: Mean 95th percentiles (mm)