

# LE PHENOMENE RECENT DE SECHERESSE PERSISTANTE ET L'ALIMENTATION EN EAU DE LA CITE D'ATHENES

I. NALBANTIS, N. MAMASSIS et D. KOUTSOYIANNIS

Division de Ressources en Eau, de Travaux Hydrauliques et Portuaires,  
Département de Génie Civil, Université Technique Nationale d'Athènes,

*5, rue Iroon Polytechniou, 15700 Zografou, Grèce*

## Sommaire:

Nous analysons statistiquement les échantillons hydrologiques historiques des bassins versants de Mornos et de B. Kifissos-Yliki. Une tendance décroissante est mise en évidence pour la précipitation et le débit de B. Kifissos. De plus, une diminution significative des apports annuels est constatée durant les six dernières années et ceci pour les deux bassins. L'analyse des précipitations n'a pas révélé une baisse analogue des précipitations annuelles mais c'est plutôt leur distribution suivant les mois de l'année qui est sensiblement modifiée. Plus précisément, on a observé une baisse significative des précipitations du mois de janvier durant les six dernières années, ce qui explique la chute des apports aux deux réservoirs de Mornos et Yliki.

## Summary:

We analyse statistically the historic hydrologic samples of the water basins of Mornos and B. Kifissos-Yliki. A decreasing trend on the precipitation and runoff for the B. Kifissos basin was found. Moreover, a significant reduction of the annual inflows was found for the period of the recent six-year drought for both basins. The analysis of the precipitations did not reveal any significant reduction on their annual values, but it is rather their within-year distribution that has been substantially modified. More specifically, the precipitation of January during the last six years is significantly less than that of the previous period, a fact that explains the significant reduction of the inflows to the reservoirs of Mornos and Yliki.

**Mots-clés:** Hydrologie; sécheresse; alimentation en eau.

**Key-words:** Hydrology; drought; water supply.

---

## Introduction

Durant les six dernières années nous avons été témoins d'un phénomène de sécheresse persistante qui a influencé de manière décisive le système d'alimentation en eau de la cité d'Athènes. Les apports des rivières Mornos et B. Kifissos qui alimentent respectivement les réservoirs de Mornos et Yliki, ont baissé considérablement par rapport à leurs valeurs de la période précédente. Le phénomène a été particulièrement intense en 1989-90 où les débits de deux rivières ont atteint leurs valeurs minimales jamais enregistrées. Les années hydrologiques 1991-92 et 1992-93 ont été aussi des années sèches et elles viennent juste après 1989-90.

Les changements de l'environnement naturel de provenance anthropogénique sont considérés comme responsables pour le changement du climat et devant des phénomènes de sécheresse on soupçonne toujours des changements climatiques plus permanents. Il est toutefois connu que, indépendamment de l'influence de l'homme, le climat varie dans toute échelle de temps (Mason, 1976).

Ceux qui étudient les ressources en eau se sont très tôt intéressés aux impacts des changements climatiques sur ces ressources (Klemeö et Klemeö, 1985; Gleick, 1987). En Grèce en particulier, des études ont été effectuées sur les impacts aux ressources en eau de différents scénarios d'évolution des grandeurs hydrologiques (Mimikou et al., 1990; Mimikou & Kouvopoulos, 1991). D'autres études concernent la détection de tendances de la précipitation (Amanatidis et al., 1992) ou les paramètres hydrologiques influençant l'alimentation en eau (Koutsoyiannis et al., 1992). L'apparition de tendance sur la précipitation et la température a été corrélée à la concentration des gaz à effet de serre (Marchand et al., 1988) au moyen des modèles de circulation atmosphérique générale (GCM). Maheras et Kolyva-Mahera (1990) ont corrélé les précipitations abondantes en Grèce avec la circulation méridienne des dépressions et la sécheresse avec la circulation zonale.

Dans ce qui suit nous présentons les résultats de nos analyses statistiques effectuées sur les variables du débit de rivière, de la précipitation et de l'évapotranspiration selon Penman qui sont liées au système d'alimentation en eau de la cité d'Athènes. Nous avons aussi examiné les variables météorologiques de la température et de l'insolation qui, parmi d'autres, déterminent l'évapotranspiration. Le but des analyses était de détecter des déviations significatives par rapport à la variation aléatoire usuelle qui est inhérente aux variables examinées. Ces déviations, une fois constatées, devraient être considérées comme des changements climatiques, provisoires ou encore permanents.

## 1. Echantillons historiques

L'information hydrologique des bassins de Mornos et B. Kifissos-Yliki, est très importante pour le système d'alimentation en eau de la cité d'Athènes. En particulier, les débits de Mornos et de B. Kifissos constituent les variables du plus grand intérêt car ils forment les ressources en eau principales de la cité d'Athènes. Trois stations limnimétriques, neuf pluviomètres, et deux stations météorologiques ainsi que des calculs du bilan des réservoirs du système ont été à la base de la formation des échantillons des données historiques. La qualité des données est plutôt médiocre sauf quelques exceptions. Pour le bassin de B. Kifissos des séries temporelles de longueur importante ont pu être constituées.

Les apports au lac Yliki proviennent essentiellement du bassin de B. Kifissos ayant une superficie de 2010 km<sup>2</sup> et alimentent Yliki à travers le tunnel de Karditsa. Des mesures de niveau sont effectuées par l'Entreprise pour l'Alimentation en Eau et l'Assainissement de la cité d'Athènes (EAEAA) depuis 1906-07. Jusqu'à 1975-76 les mesures se faisaient à l'Ancien Tunnel de Karditsa, puis au Nouveau Tunnel. Le calcul du débit se fait au moyen de méthodes hydrauliques, mais le coefficient de rugosité utilisé a été calculé sur la base d'un seul jaugeage. La précipitation sur le bassin de

Yliki est mesurée en deux stations du Ministère de Travaux Publics dont l'une a été Mouriki et l'autre Aliartos du Service Météorologique National (SMN). Les mesures sont fiables et pour la station de Aliartos on possède de données depuis 1906-07 mais provenant de trois sites différents. Les données météorologiques utilisées dans les calculs de l'évapotranspiration selon Penman proviennent des stations de Aliartos et de Lamia (de SMN).

L'échantillon du débit de Mornos (557 km<sup>2</sup> de superficie) comprend des données de trois provenances différentes: (a) les mesures de niveau au site de Steno (1951-52 à 1955-56), (b) les mesures à Perivoli (1963-64 à 1966-67), et (c) le bilan du réservoir de Mornos (depuis sa construction en 1979-80 à nos jours) établi avec les données de trois stations pluviométriques, une station météorologique et de données de gestion du réservoir. La précipitation sur le bassin de Mornos est mesurée en sept stations du Ministère de Travaux Publics dont une (Lidoriki) comprend aussi des mesures météorologiques, alors que les données de gestion du réservoir sont recueillies par EAEAA. Toutes les stations de mesure de précipitations possèdent des données à partir des années 1950 alors que pour les variables météorologiques les échantillons sont courts (à partir de 1977).

## 2. Méthodes statistiques d'analyse de variables hydrométéorologiques

Le plus souvent, la détection de changements climatiques se fait au moyen de méthodes statistiques, qui testent essentiellement la stationnarité des séries chronologiques observées. Les tests concernent la tendance, la périodicité et des sauts ou changements brusques des paramètres statistiques comme la moyenne. Parmi les tests qu'on trouve dans la bibliographie (Kite, 1989; Cavadias, 1993), nous n'avons utilisé que certains.

La tendance dans une série temporelle est localisée à l'aide de graphiques soit de la série même, soit de sa moyenne mobile. Par la suite, on teste si cette tendance est significative pour un niveau de signification choisi. Dans ce travail, on a utilisé les tests de Kendall et de la régression linéaire (Kottegoda, 1980, p. 32-34). Le test de Kendall cherche si dans une série temporelle  $X_1, X_2, \dots, X_N$ , le nombre de couples  $X_k, X_t$  où  $X_k X_t$  avec  $kt$ , est significativement différent de son espérance mathématique pour une série absolument aléatoire. Il est évident que ce nombre devient maximal pour une série strictement croissante. Le test de régression linéaire présuppose une tendance linéaire et il teste si la pente de la droite de moindres carrés résultant d'une corrélation des valeurs de la série avec le temps, est significativement différente de zéro.

La périodicité est localisée à l'aide de l'autocorrélogramme et la fonction de densité spectrale. Tout d'abord, elle fait apparaître des coefficients d'autocorrélation significatifs qui permettent de calculer par la suite la fonction de densité spectrale pour les fréquences choisies. Si la valeur de cette fonction dépasse la limite de confiance pour une certaine fréquence, alors la périodicité correspondante est considérée significative (Kottegoda, 1980, p. 54-56).

Les sauts, ou changements brusques de la moyenne d'une variable sont localisés

tout d'abord graphiquement et par la suite leur présence est confirmée au moyen de tests statistiques. Le test que nous avons utilisé dans ce travail est celui de Cruskal-Wallis (Freund et al., 1988) qui est non paramétrique et ne fait pas les hypothèses usuelles sur la normalité de la population ou la constance de sa variance. Le test travaille non pas sur les valeurs mêmes de la série mais sur les rangs de ses valeurs. Il teste si deux ou plusieurs parties de la série appartiennent à la même population.

### 3. Détection de tendances et de périodicités

La longueur importante des échantillons du débit de B. Kifissos et de la précipitation à Aliartos nous a permis d'effectuer de tests de tendance et de périodicité sur ces séries. Il a été démontré que les deux séries ont une tendance linéaire décroissante à partir de 1920-21 (Fig. 1). Les niveaux de signification, pour lesquelles on aurait pu accepter l'hypothèse d'absence de tendance sont inférieurs à 1% et ceci pour les deux tests (Kendall et régression linéaire). La baisse de la précipitation moyenne est de 44% depuis 1920-21 jusqu'à nos jours alors que pour les débits la baisse est encore plus grande (53%). L'analyse spectrale sur les deux séries après l'écartement de la tendance n'a pas montré de fréquences significatives (Fig. 2). Pour ce qui est des autres séries chronologiques disponibles, leur longueur insuffisante ne nous a pas permis de tirer de conclusions certaines.

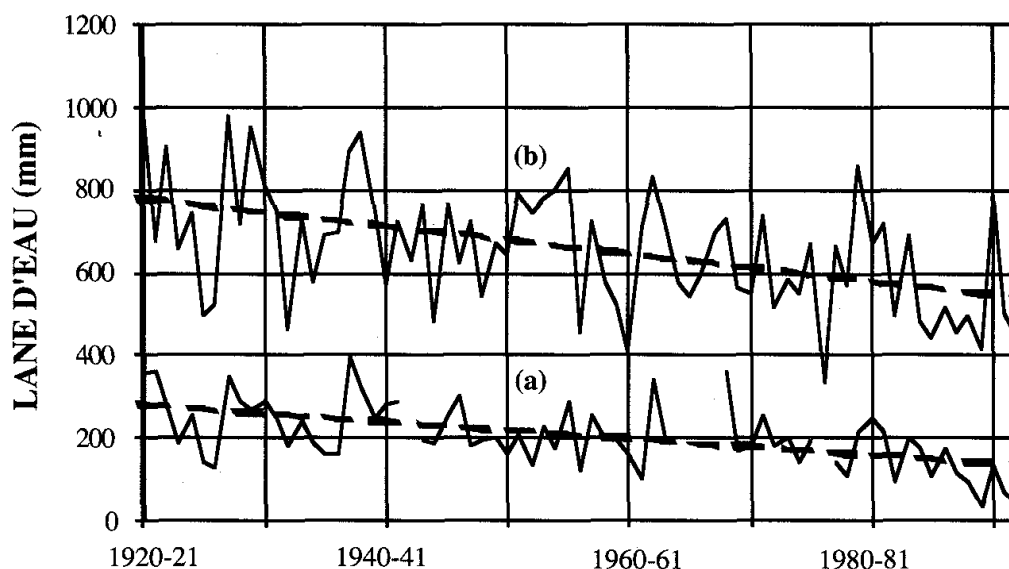
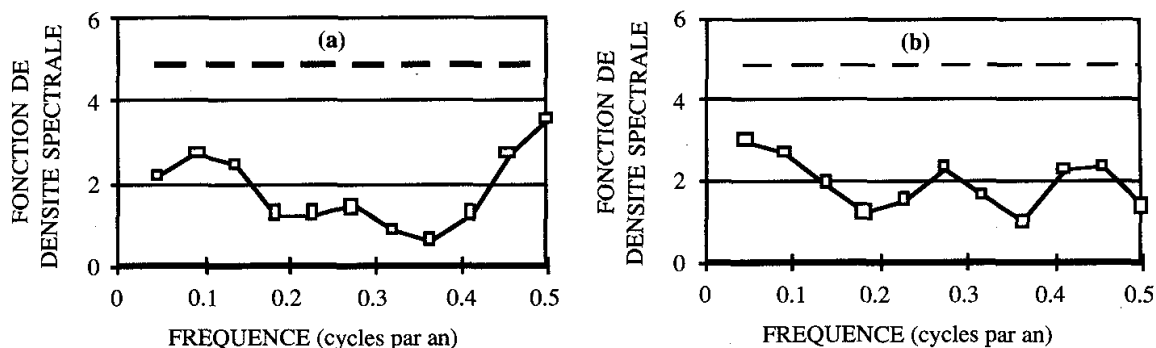


Figure 1: Détection de tendance:

- (a) Débit annuel de B. Kifissos et la droite de sa tendance  $Q(t) = 278.3 - 2.02t$ ,
- (b) Précipitation à Aliartos et la droite de sa tendance  $P(t) = 778.0 - 3.31t$ .  $Q(t)$  et  $P(t)$  sont respectivement le débit moyen et la précipitation moyenne au temps  $t$  exprimés en mm. Les droites de tendance sont données en lignes discontinues.



**Figure 2: Détection de périodicité à l'aide de la fonction de densité spectrale pour:**  
 (a) le débit annuel de B. Kifissos, et  
 (b) la précipitation à Aliartos. Les limites de confiance 95% sont données en lignes discontinues.

#### 4. Les caractéristiques hydrométéorologiques des six dernières années

Les six dernières années sont caractérisées par des apports très faibles des deux réservoirs Mornos et Yliki. Ceci nous a amenés à diviser nos échantillons en deux: le premier sous-échantillon comprend les données d'avant 1987-88 et le deuxième celles de la période sèche de 1987-88 à 1992-93. Par la suite, on a testé, à l'aide du test de Cruskall-Wallis, si les deux échantillons proviennent de la même population. De plus, on a calculé la probabilité d'apparition des années les plus sèches 1989-90, 1991-92 et 1992-93 au moyen des fonctions de répartition Gamma et Gauss. La valeur de ces probabilités est bien sûr limitée car elle suppose, d'emblée, que la fonction de répartition est restée la même pendant la période 1987-88 à 1992-93. Pour le bassin de Mornos on a examiné le débit d'entrée, la précipitation à Lidoriki, la précipitation spatiale calculée sur la base de sept stations du bassin et enfin la température à Lidoriki. Pour la région de Yliki - B. Kifissos, outre la série des débits d'entrée, on a testé la précipitation à Aliartos et Mouriki, la température à Aliartos et l'insolation à Aliartos et Lamia. De plus, pour la station de Aliartos on a examiné l'évapotranspiration potentielle selon Penman.

Les échantillons du débit mettent en évidence trois années très sèches: 1989-90, 1991-92 et 1992-93. En 1989-90 on a mesuré le débit minimal à Mornos sur toute la période d'observations de 23 ans. De même pour Yliki où le débit d'entrée a atteint sa valeur minimale depuis 1906-07, qui est deux fois plus petite que celle de 1916-17, jusqu'alors l'année la plus sèche. Les deux dernières années ont, bien sûr, complètement changé cette image car elles sont les plus sèches après 1989-90. Sur le Tableau 1 qui suit on présente les valeurs de la probabilité d'apparition du débit de chaque rivière pour les trois années sèches suivant les lois de Gauss et Gamma.

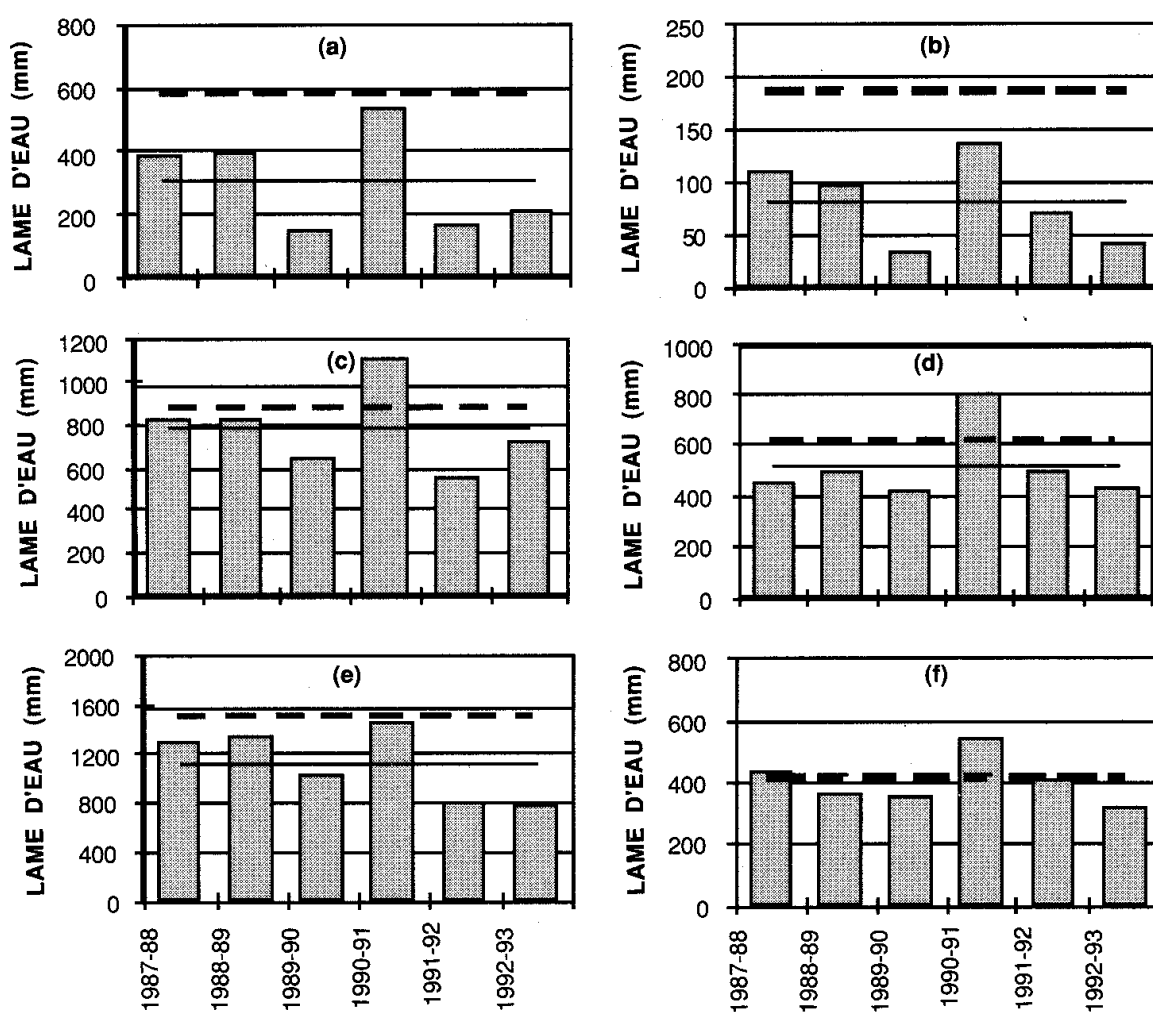
**Tableau 1:** Probabilité théorique d'apparition des valeurs annuelles du débit et de la précipitation.

ECHANTILLONS	LOI DE PROBABILITE					
	GAUSS			GAMMA		
DEBIT	1989-90	1991-92	1992-93	1989-90	1991-92	1992-93
Mornos	1 : 1350	1 : 860	1 : 323	$< 10^{-5}$	$< 10^{-5}$	1 : 7500
B. Kifissos	1 : 83	1 : 24	1 : 64	1 : 5500	1 : 77	1 : 1650
PRECIPITATION						
Mornos (spatiale)	1 : 42	1 : 815	1 : 1000	1 : 69	1 7800	$< 10^{-4}$
Lidoriki	1 : 16	1 : 47	1 : 6	1 : 19	1 : 89	1 : 6
Aliartos	1 : 16	1 : 5	1 : 12	1 : 21	1 : 5	1 : 15
Mouriki	1 : 3	1 : 2	1 : 5	1 : 3	1 : 2	1 : 5

Les figures 3a et 3b montrent l'évolution du débit d'entrée des réservoirs durant les six dernières années. Sur la même figure on voit la moyenne jusqu'à 1986-87 et de 1987-88 à 1992-93. Afin d'accepter l'hypothèse que ces deux moyennes sont les mêmes, on aurait dû descendre jusqu'à un niveau de signification bien inférieur à 1%. L'examen des précipitations annuelles montre que les six dernières années n'étaient pas si pauvres en eau précipitée surtout pour le bassin de B. Kifissos - Yliki. Pour Mornos, les précipitations ont atteint leurs valeurs minimales en 1989-90, 1991-92 et 1992-93 et à Yliki la situation est tout à fait analogue. Dans tous les cas, l'année la plus humide de la période sèche était 1990-91. La probabilité d'apparition de chaque année est présentée sur la Tableau I ci-dessus. Les figures 3c à 3f présentent l'évolution de la précipitation annuelle pour toutes les séries testées. Dans tous les cas l'hypothèse que les deux moyennes (jusqu'à 1986-87 et de 1987-88 à 1992-93) sont statistiquement identiques est acceptée au seuil de 5% sauf pour la pluie spatiale de Mornos pour laquelle le seuil est 10%. Notre analyse montre que la baisse des précipitations durant les six dernières années n'était pas d'une telle ampleur qu'elle puisse expliquer la chute importante du débit des rivières. Ce paradoxe, à première vue, nous a conduits à examiner la distribution de la précipitation suivant les mois de l'année. La figure 4 montre la distribution de la précipitation mensuelle moyenne pour la station de Lidoriki (Fig. 4a) et Aliartos (Fig. 4b) pour les périodes jusqu'à 1986-87 et de 1987-88 à 1992-93. On observe que la distribution de la précipitation est sensiblement modifiée durant les six dernières années surtout pour le bassin de Mornos. Plus précisément, la courbe sous forme de cloche de la période avant 1987-88 est devenue une courbe à deux pics avec un niveau assez bas pour la précipitation du mois de janvier. L'évolution de la précipitation du mois de janvier durant les six dernières années est présentée sur la figure 5 avec les moyennes jusqu'à 1986-87 et 1987-88 à 1992-93. L'hypothèse que les deux moyennes soient identiques n'est pas acceptée pour tout niveau usuel de signification. Notons que durant les trois années les plus sèches, la précipitation en janvier était pratiquement nulle et sa probabilité théorique d'apparition est généralement faible comme on peut le constater sur le Tableau 2 qui suit.

**Tableau 2:** Probabilité d'apparition de la précipitation du mois de janvier.

ECHANTILLONS	LOI DE PROBABILITE					
	GAUSS			GAMMA		
	1989-90	1991-92	1992-93	1989-90	1991-92	1992-93
Mornos (spatiale)	1 : 24	1 : 23	1 : 13	$< 10^{-5}$	1 : 620	1 : 62
Lidoriki	1 : 25	1 : 22	1 : 9	$< 10^{-5}$	1 : 8200	1 : 15
Aliartos	1 : 23	1 : 9	1 : 6	1 : 623	1 : 13	1 : 6
Mouriki	1 : 7	1 : 5	1 : 4	1 : 45	1 : 5	1 : 4



**Figure 3:** Evolution des valeurs annuelles de grandeurs hydrologiques durant les six dernières années: (a) débit de Mornos, (b) débit de B. Kifisos, (c) précipitation à Lidorki, (d) précipitation à Aliartos, (e) précipitation spatiale du bassin de Mornos et (f) précipitation à Mouriki. Les lignes horizontales montrent les moyennes avant 1987-88 (ligne discontinue) et 1987-88 à 1992-93 (ligne continue).

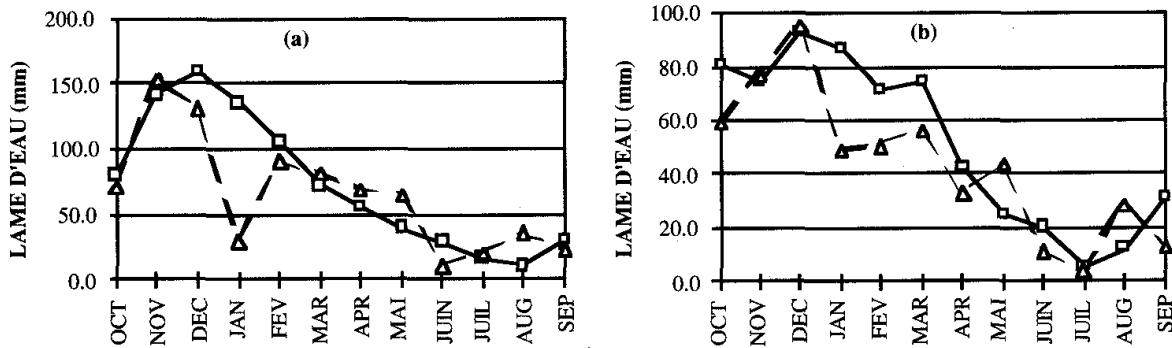


Figure 4: Distribution de la précipitation suivant les mois de l'année: (a) station de Lidoriki et (b) station de Aliartos pour les périodes avant 1987-88 (ligne continue avec des rectangles) et 1987-88 à 1992-93 (ligne discontinue avec des triangles).

La baisse ou l'interruption de la précipitation en janvier durant les six dernières années a un effet important sur le débit de tous les mois qui suivent, ce qui produit une baisse significative des apports. Cet effet est dû à la forte non linéarité de la relation pluie-débit et à son dépendance d'autres facteurs comme l'évapotranspiration, l'humidité du sol et les nappes aquifères.

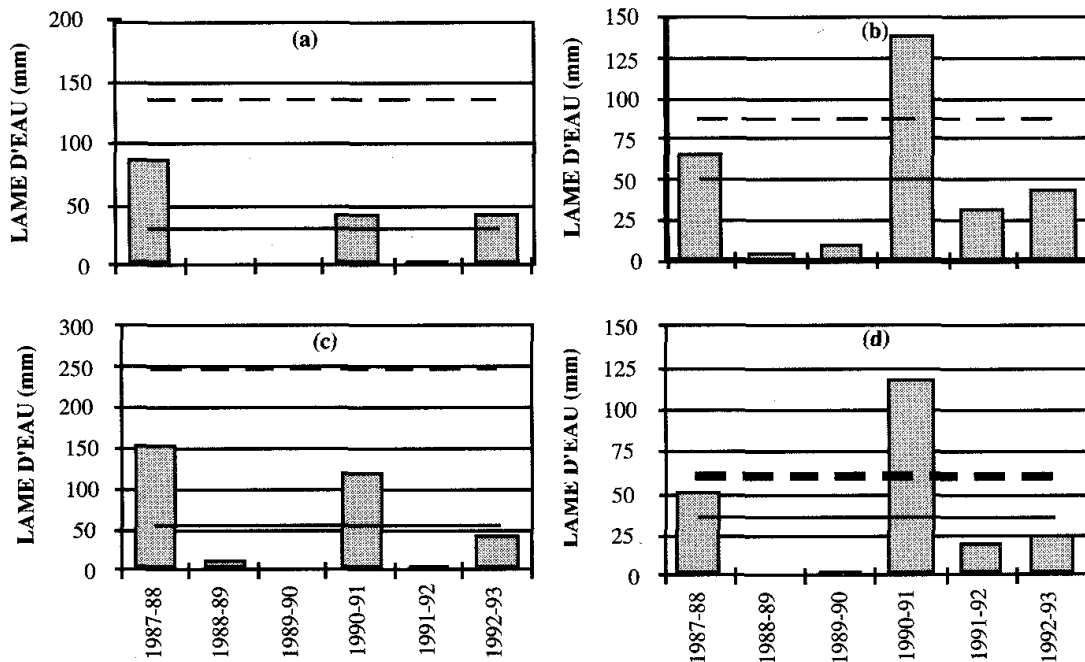


Figure 5: Evolution de la précipitation du mois de janvier durant les six dernières années: (a) à Lidoriki, (b) à Aliartos, (c) précipitation spatiale du bassin de Mornos, et (d) à Mouriki. Les lignes horizontales montrent les moyennes avant 1987-88 (ligne discontinue) et 1987-88 à 1992-93 (ligne continue).



En ce qui concerne les variables météorologiques, nous avons examiné l'évapotranspiration potentielle selon Penman pour la station de Aliartos de la région de Yliki. De plus, on a analysé les séries d'insolation aux stations de Aliartos et Lamia dans le bassin de B. Kifissos ainsi que les séries de température des stations de Aliartos et de Lidoriki. Bien que visuellement on ait constaté une baisse de la température du mois de janvier, l'analyse statistique n'a pas fait apparaître de différences significatives entre les périodes avant 1987-88 et 1987-88 à 1992-93.

## Conclusions

1. Les séries temporelles de la précipitation et du débit de B. Kifissos montrent une tendance décroissante qui est statistiquement significative. Par contre, l'analyse spectrale sur les mêmes séries n'a révélé aucune périodicité.
2. Les apports de deux réservoirs du système d'approvisionnement en eau (Mornos et Yliki) ont sensiblement diminué durant les six dernières années, la baisse ayant dépassé le niveau de 50%.
3. La baisse des précipitations n'est pas analogue surtout pour la région de B. Kifissos - Yliki. C'est plutôt la distribution de la précipitation suivant les mois de l'année qui est sensiblement modifiée.
4. Notre analyse montre que la perturbation du régime des précipitations surtout au niveau mensuel plutôt qu'annuel entraîne une baisse importante du débit des rivières qui alimentent le système d'approvisionnement en eau de la cité d'Athènes.

## Remerciements

Les échantillons historiques que nous avons utilisés dans ce travail sont basés sur des données du Ministère de l'Aménagement du Territoire, de l'Environnement et de Travaux Publics, de l'Entreprise pour l'Alimentation en Eau et l'Assainissement de la cité d'Athènes et du Service de Météorologie Nationale. Ils proviennent des rapports des programmes de recherche "Evaluation du potentiel existant pour l'approvisionnement en eau de la cité d'Athènes" et "Evaluation et gestion des ressources en eau de la Région de Sterea Hellas" qui ont été accomplis par un groupe de recherche de la Division de Ressources en Eau de l'Université Technique Nationale d'Athènes ayant comme responsable scientifique le professeur Th. S. Xanthopoulos. Pour le présent travail nous avons complété les séries existantes avec des données récentes. Les auteurs expriment leur reconnaissance à P. Anastassopoulou, K. Alexopoulou, Ch. Mantelis, D. Kentouris, A. Nianios et Y. Papageorgiou, pour la fourniture des données et leur aide dans la critique initiale de ces données.

## Références

- AMANATIDIS, G., PALIATSOS, A., ET BARTZIS, I., 1992: La distribution spatiale de tendances de la précipitation en Grèce, *Comptes-rendus du Colloque de EEDYP "Impacts sur l'environnement des travaux pour la gestion de ressources en eau"*, Athènes, 225-233 (en grec).

- CAVADIAS, G., 1992: A survey of current approaches to modelling of hydrological time series with respect to climate variability and change, *Report prepared for World Climate Programme, Project A2*.
- FREUND, J.E., WILLIAMS, F.J., PERLES, B.M., 1988: *Elementary business statistics*, Prentice Hall.
- GLEICK, P.H., 1987: Regional hydrologic consequences of increasing atmosphere CO<sub>2</sub> and other trace gases, *Clim., Change*, 10(2), 137-160.
- KITE, G., 1989: Use of time series analysis to detect climate change, *J. Hydrol.*, 111, 259-279.
- KLEMES V., and KLEMES, I., 1988: Cycles in finite samples and cumulative processes of higher orders, *Water Resour. Res.*, 24(1), 93-104.
- KOTTEGODA, N.T., 1980: *Stochastic water resources technology*, McMillan Press, Hong Kong.
- KOUTSOYIANNIS, D., NALBANTIS, I., et MAMASSIS, N., 1992: Evaluation du risque de défaillance du système d'approvisionnement en eau de la cité d'Athènes, *Comptes-rendus des Journées de l'Entreprise pour l'Alimentation en Eau et l'Assainissement de la cité d'Athènes*, Athènes (en grec).
- MAHERAS, P., and KOLYVA - MAHERA, F., 1990: Temporal and spatial characteristics of annual precipitation over Balkans in the twentieth century, *J. Climatol.*, 10, 495-504.
- MARCHAND, D., SANDERSON, M., HOWE D., and ALBAUCH, C., 1988: Climate change and Great Lake levels- The impact on shipping, *Clim. Change*, 12(2), 107-134.
- MASON, B.J., 1976: Towards the understanding and prediction of climatic variations, *Q. J. of the Royal Meteorological Society*, 102, 473 - 498.
- MIMIKOU, M.A., and KOUVOPOULOS, Y.S., 1991: Regional climate change impacts: 1. Impacts on water resources, *Hydrol. Sci. J.*, 36(3), 247-270.
- MIMIKOU, M.A., and KOUVOPOULOS, Y.S., Cavadias, G., and Vayianos, N., 1990: Regional hydrological effects of climate change, *J. Hydrol.*, 123, 119-146.