

RESSOURCES HYDRIQUES ET MODIFICATION DU CLIMAT AU MOYEN-ORIENT

Mamdouh SHAHIN

(traduit de l'anglais par J. Grimbérieux)

Résumé

Le but de cet article est d'examiner les ressources en eau du Moyen-Orient et la modification de son climat, de manière à évaluer l'impact des changements climatiques sur le bilan hydrique de la région. Les apports des diverses ressources en eau sont estimés d'après les données disponibles, qui ne couvrent pas souvent d'assez longs laps de temps. La recherche concernant la modification du climat a reposé sur la détection des tendances dans les plus longues séries annuelles de données concernant la température de l'air et les précipitations, provenant d'un certain nombre de stations de la région et de quelques-unes du voisinage. Malgré la tendance qui a été observée dans la plupart des séries observées, des tests statistiques ont démontré que cette tendance ne peut être considérée comme significative que pour quelques cas et que son effet n'est que local. L'article discute aussi, brièvement, les conséquences des changements climatiques sur l'écoulement dans les bassins. Il envisage aussi quelques difficultés auxquelles se heurte toute étude de l'impact de la modification du climat sur les ressources hydriques.

Mots-clés

eau courante, eau douce, eau régénérée, eau souterraine, modification du climat, Moyen-Orient, précipitations, ressources hydriques, température, tendance, tests statistiques

Abstract

The aim of this paper is to review the water resources of the Middle East and the variability of its climate. This is essential for evaluating the impact of climate change on the water balance of the region. The yields of the different water resources are estimated from the available data, which do not often cover sufficiently long periods of time. Investigation of the climatic change has been based on trend detection in the longest available annual series of air temperature and precipitation at a certain number of stations in the region, with few locations outside. Despite the apparent trend observed in most of the series used, statistical tests have clearly shown that only in few cases the trend can be accepted as significant and its effect as local in extent. The paper further discusses, in brief, catchment runoff response to the climate change. It also reviews some of the difficulties which may confront any study of the impact of climate change on water resources.

Key Words

streamflow, freshwater, reclaimed water, groundwater climate change, Middle East, precipitation, water resources, temperature, trend, statistical testing

INTRODUCTION

Le Moyen-Orient, tel qu'il est envisagé ici, est un territoire qui couvre plus de $12,5 \cdot 10^6$ km². Cette surface, qui coïncide avec la description du British War Office en 1940-1942 (Beaumont et al., 1976) s'étend, d'ouest en est, de la Libye à l'Iran et, du nord au sud, de la Turquie et de l'Iran à l'Éthiopie et à la Somalie. Cette région comprend ainsi 21 pays, qui sont : Arabie saoudite, Bahreïn, Djibouti, Égypte, Érythrée, Éthiopie, Irak, Iran, Israël, Jordanie, Koweït, Liban, Libye, Oman, Palestine, Qatar, Somalie, Soudan, Syrie, Turquie et Yémen (Fig. 1). Selon les Nations unies, la population absolue devrait y atteindre environ $710 \cdot 10^6$ habitants en 2025, alors qu'elle n'était que de $330 \cdot 10^6$

habitants en 1990 (Engleman et Le Roy, 1995).

En plus des ressources hydriques traditionnelles (précipitations, eaux courantes, aquifères), il existe dans la région des ressources moins habituelles telles que eau désalinisée, eau régénérée à partir de celle des égouts urbains et ruraux et aquifères fossiles, profonds. Les statistiques dignes de foi estiment que la quantité disponible par habitant tombera de 2.300 m^3 par an en 1990 à seulement 1.050 m^3 par an en 2025. Dans certains pays, elle est déjà, de nos jours, inférieure à 100 m^3 . On craint que le réchauffement global, auquel on a assisté dans les trois dernières décennies, ne réduise les ressources en eau douce, ce qui aggraverait encore la difficulté de répondre à la demande.

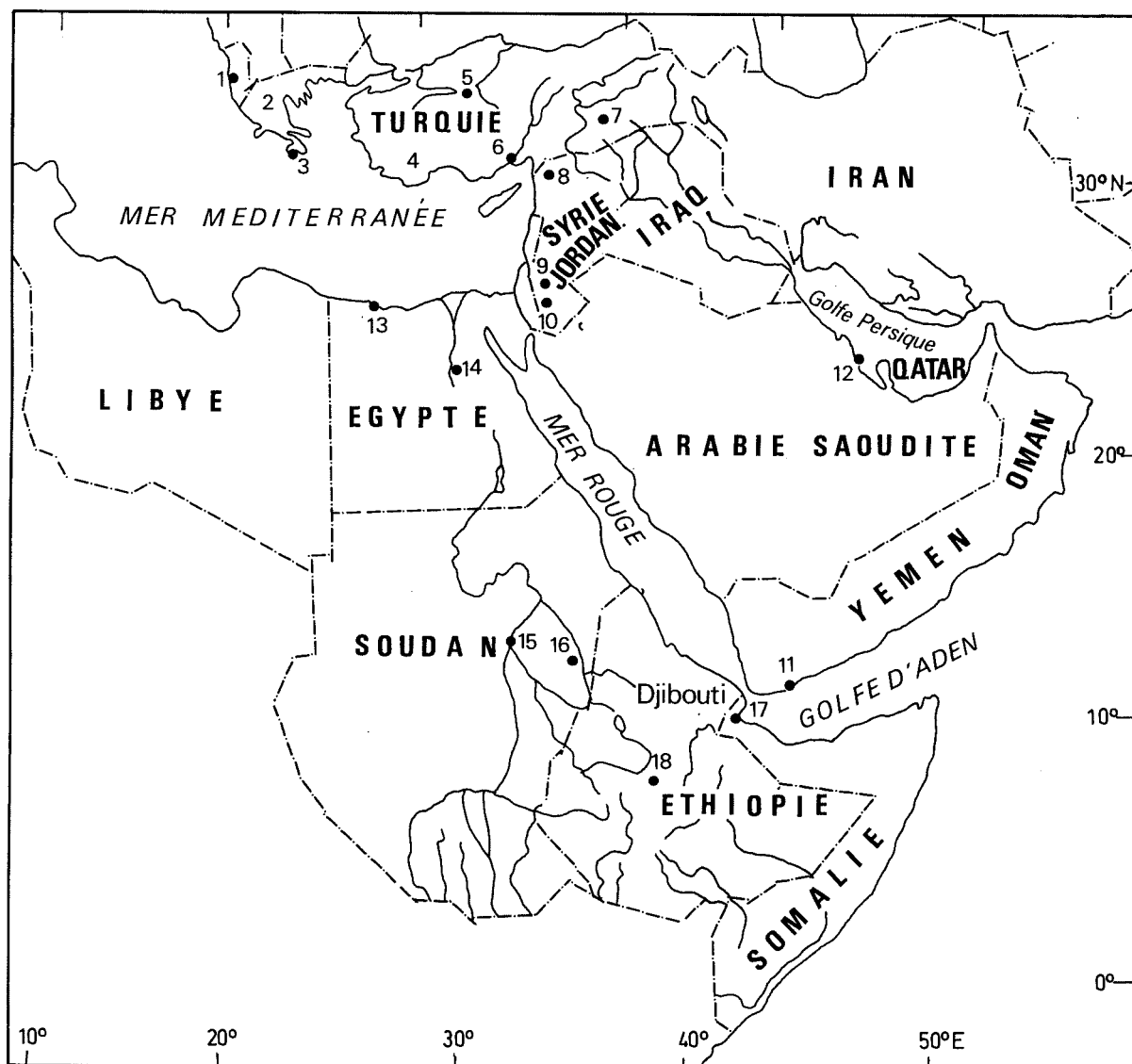


Figure 1. Carte du Moyen-Orient montrant la situation des stations citées dans cette étude

Stations : 1 = Fier (Albanie); 2 = Grèce; 3 = Athènes (Grèce); 4 = Turquie; 5 = Ankara (Turquie); 6 = Adana (Turquie); 7 = Diyarbakir (Turquie); 8 = Alep (Syrie); 9 = Jordanie; 10 = Ash Shawbak (Jordanie); 11 = Aden (Yémen); 12 = Manama (Bahreïn); 13 = Alexandrie (Égypte); 14 = El Minya (Égypte); 15 = Khartoum (Soudan); 16 = Gedaref (Soudan); 17 = Djibouti; 18 = Addis-Abeba (Éthiopie).

I. BRÈVE DESCRIPTION DU CLIMAT

La région du Moyen-Orient se situe entre les isothermes de 12°C et 28°C. Elle est caractérisée par un fort rayonnement solaire et une longue durée à la fois des journées et de l'ensoleillement réel. Un important facteur de son climat est le relief.

Des températures élevées prédominent dans de nombreuses parties du Moyen-Orient. La saison qui va de juin à août est, à l'intérieur et dans les déserts, chaude à très chaude. Des climats moins chauds existent le long de la Méditerranée et des plus frais encore dans les montagnes du Levant et sur les hautes terres du Yémen et de l'Éthiopie. Généralement, c'est janvier qui est le mois

le plus froid; les températures minimales de ce mois sont inférieures d'environ 10°C aux températures maximales. Toutefois, dans le sud du Soudan, la période la plus fraîche de l'année est juillet et août (au milieu de la saison des pluies). L'Éthiopie et le nord de la Somalie ont un climat qui est fortement influencé par l'altitude, par la latitude (comprise entre 18°N et 1°S) et par leur position sur des mers très chaudes : la mer Rouge, le golfe d'Aden et l'océan Indien. Dans certaines régions, ce n'est pas en juillet-août que la température est la plus haute, ni en janvier qu'elle est la plus basse, comme ailleurs. À Addis-Abeba et à Mogadiscio, par exemple, les températures les plus élevées de la saison la plus chaude s'observent entre mars et mai, tandis que les températures maximales les plus basses se situent en juillet et en août.

En hiver, l'humidité relative dépasse largement les 70 % sur la plupart des côtes de la Méditerranée, entre le Tigre et l'Euphrate en Irak, sur le golfe Persique, dans la partie sud de la mer Rouge et sur le golfe d'Aden. Dans la partie occidentale du désert d'al-Khali, l'humidité relative est faible et est très faible dans les montagnes du Yémen. C'est l'été qui est la saison la plus sèche; l'humidité relative y reste supérieure à 65 % le long de la Méditerranée et de la mer Rouge, mais elle est inférieure à 30 % à l'intérieur, inférieure à 20 % en Mésopotamie centrale et en Arabie saoudite. Dans le sud de la péninsule Arabique et autour des golfes Persique et d'Oman, la mousson fait monter l'humidité relative à plus de 50 ou 60 %. En Éthiopie et en Somalie, elle dépend étroitement du relief, de l'altitude et de la durée d'influence des masses d'air humides. En janvier, elle est de 20-30 % en Éthiopie occidentale, 60-70 % sur la côte de l'Érythrée et du golfe d'Aden, 80 % sur l'océan Indien. En juillet, elle monte à 60-70 % sur les versants ouest du plateau d'Éthiopie et dépasse 70 % sur les côtes (Martyn, 1992).

II. INVENTAIRE DES RESSOURCES HYDRIQUES DISPONIBLES

On peut classer les ressources en eau du Moyen-Orient en ressources conventionnelles et non conventionnelles. Les premières comprennent les précipitations, les eaux courantes et les nappes aquifères. Les ressources non conventionnelles sont l'eau désalinisée, l'eau traitée après avoir été récupérée des égouts urbains et ruraux et l'eau des aquifères fossiles. Selon les disponibilités et les besoins, on peut aussi les classer en ressources primaires et secondaires comme suit :

Ressources primaires

Précipitations	Liban, Syrie, Jordanie, nord du Yémen, sud du Soudan, Éthiopie, Djibouti et Érythrée
Eaux courantes	Égypte, nord du Soudan, Turquie, Iran et Irak
Nappes aquifères	Libye, Émirats arabes unis, Bahreïn, Qatar, Arabie saoudite et sud du Yémen
Eau désalinisée	Koweït

Ressources secondaires

Précipitations	Libye, Turquie, Iran, Irak et sud du Yémen
Eaux courantes	Syrie, Liban, Israël et Jordanie
Nappes aquifères	Égypte, Jordanie, Palestine et Oman
Eau désalinisée	Bahreïn, Qatar, Arabie saoudite et Émirats arabes unis

Nous reviendrons plus loin sur ces différentes ressources, au point de vue quantitatif.

A. Précipitations

Le total annuel des précipitations dans les pays du Moyen-Orient dépend étroitement en premier lieu de la proximité des réservoirs d'humidité (Méditerranée, mer Noire, mer Caspienne, mer Rouge et océan Indien) et en second lieu de l'altitude du lieu. Les principales régions qui reçoivent des précipitations annuelles relativement abondantes sont :

- une partie des terres basses proches de la mer Noire, dans le nord de la Turquie;
- une partie des terres basses de l'Iran sur la mer Caspienne;
- la frange littorale méditerranéenne du sud de la Turquie;
- le rivage oriental de la Méditerranée, en Syrie, au Liban et en Israël, ainsi que les montagnes adjacentes;
- le sud du Soudan, surtout le Sud-Ouest;
- les hauts plateaux éthiopiens.

Les régions qui viennent d'être citées reçoivent par an plus de 1.000 mm de précipitations et jusqu'à plus de 2.000 mm certaines années. Les régions qui les suivent ne reçoivent généralement pas plus de 800 mm par an : le sud du Soudan, l'Éthiopie, la Syrie, l'Irak, l'Iran et la Turquie. Au moins la moitié du Moyen-Orient reçoit moins de 100 mm de précipitations par an. Le total des précipitations annuelles pour l'ensemble peut être estimé à environ $3.400.10^6 \text{ m}^3$, ce qui correspond à une hauteur d'eau d'approximativement 270 mm. Le nombre de jours de précipitations par an est compris entre 50 et 60 au Levant (Liban, nord de la Syrie et de l'Irak), mais est inférieur à 10 dans la moitié sud du golfe Persique et dans les pays des golfes d'Oman et d'Aden. Dans les régions les plus pluvieuses de l'Éthiopie, il pleut de 120 à 200 jours par an. Dans la dépression Danakil (Éthiopie) et en Somalie, le nombre tombe à 20 ou 30.

Une partie des précipitations est perdue par évaporation et interception avant d'arriver au sol. De l'eau qui atteint le sol, une partie s'infiltre et une autre (s'il en reste) ruisselle à la surface puis arrive dans le réseau hydrographique, les lacs et les mers. De l'eau du sol s'évapore encore, de l'eau disparaît aussi dans les sebkhas et dans les terres incultes, ce qui fait d'autres quantités perdues. L'agriculture consomme l'eau qui imprègne le sol ou l'eau qu'apporte l'irrigation. Les usages domestiques et autres utilisent l'eau superficielle ou l'eau des nappes souterraines.

B. Eaux courantes

Comme cela a déjà été dit, les eaux des précipitations deviennent en partie des eaux courantes. Puisque certaines régions du Moyen-Orient connaissent une forte aridité, beaucoup de réseaux hydrographiques sont endoréiques en Libye, en Égypte, dans le nord du Soudan, dans la péninsule Arabique, en Syrie, en Irak, en

Jordanie, en Érythrée et en Somalie.

Des cours d'eau qui traversent le Moyen-Orient sont permanents, tandis que d'autres sont intermittents (saisonniers) ou même éphémères (les oueds). La plupart des rivières pérennes sont internationales et peuvent être considérées comme des ressources hydriques partagées. Le Nil et ses affluents, le Tigre et l'Euphrate en sont des exemples. Sauf l'Euphrate et le Tigre, qui bénéficient en plus de la fonte de neige, les cours d'eau du Moyen-Orient ont une alimentation pluviale.

Le volume total de l'eau qu'apportent les rivières permanentes du Moyen-Orient n'est pas connu de façon très précise. Les données dont on dispose montrent cependant que le débit annuel moyen du Nil à Assouan est de 85.10^9 m^3 . Les débits cumulés du Tigre et de l'Euphrate sont estimés à 80.10^9 m^3 par an, que se partagent la Turquie, la Syrie et l'Irak. Les cours d'eau iraniens roulent annuellement de 45 à 50.10^9 m^3 , dont la moitié provient du Dez et du Karun. Des rivières moins importantes qui coulent en Turquie et en Syrie (le Khabur, le Belikh, l'Afrien,...) procurent à ces deux pays environ 3.10^9 m^3 par an. L'Oronte (Nahr al-Asi), dont les eaux sont partagées entre le Liban, la Syrie et la Turquie, fournit 2.10^9 m^3 par an. Ensemble, tous les cours d'eau relativement petits de la Turquie, de l'Iran, de la Syrie, du Liban, de l'Irak, de la Jordanie et d'Israël ont un débit annuel qui doit atteindre quelque 70.10^9 m^3 . Pas moins de 30.10^9 m^3 sont fournis par le Chébéli et le Djouba (Somalie et Éthiopie) et par l'Awash et d'autres rivières éthiopiennes en dehors du bassin du Nil. Au total, on peut estimer qu'au Moyen-Orient environ 310.10^9 m^3 d'eau passent en moyenne, par an, dans l'ensemble des rivières. Des détails à propos de certaines d'entre elles ont récemment été publiés par Shahin (1996).

Si l'on divise ce débit total par le total annuel des précipitations, on obtient un coefficient d'écoulement de 9 % seulement. *L'Atlas of World Water Balance* (Korzun, 1974) montre qu'un tel coefficient se réduit à 1 % dans la plus grande partie de la Libye, de l'Égypte et de la péninsule Arabique. Au nord de celle-ci, il monte jusqu'à 30 à 40 % dans quelques régions de la Turquie, de l'Iran, du Liban, de la Syrie et de l'Irak. Il atteint même 60 % sur certains versants qui surplombent les côtes des mers Caspienne, Noire et Méditerranée. Sur les grands plateaux du Soudan, le faible relief explique que ce coefficient n'est que de 10 % ou moins; au contraire, sur les pentes raides des montagnes de l'Éthiopie, il est de 20 à 25 %.

Pratiquement, tous les pays arides ou semi-arides sont caractérisés par un grand nombre de cours d'eau éphémères qu'on appelle oueds. Ces oueds sont à sec sauf brièvement, pendant et après de gros orages. Le débit des oueds peut passer de zéro à plusieurs centaines ou à

plusieurs milliers de m^3 par seconde en peu de temps, après quoi il diminue jusqu'à des valeurs très faibles en quelques heures ou en quelques jours (Fig. 2). Néanmoins, dans certains cas, un débit substantiel et plus durable peut s'observer. Le débit d'un oued peut différer considérablement d'une année à l'autre et, lors d'une même pluie, d'un endroit à l'autre, selon les pertes et la distance entre deux lieux arbitrairement choisis. Un problème grave lié à l'écoulement dans les oueds est l'érosion excessive provoquée par les torrents qui l'alimentent. Cela peut entraîner le colmatage de lacs de retenue qui servent à alimenter directement la consommation d'eau ou à recharger l'aquifère sous-jacent.

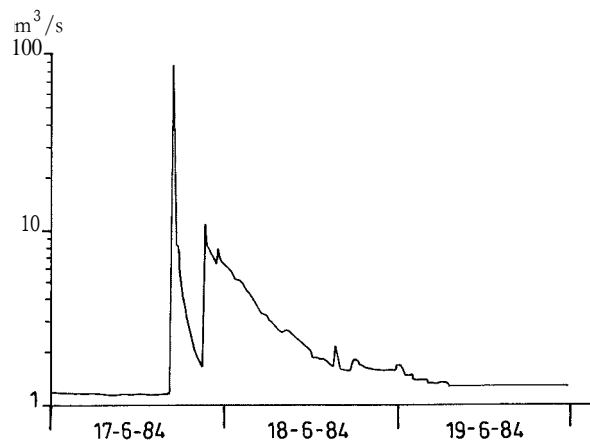


Figure 2. Hydrogramme du Wadi Surdud à Faj al-Hussein (Rép. Arabe du Yémen), 1984

Il n'est pas facile de donner une estimation fiable du débit total des oueds du Moyen-Orient. L'information disponible se limite à quelques pays. Les valeurs données dans cet article doivent donc être utilisées avec beaucoup de circonspection. En outre, elles ne s'appliquent qu'aux endroits où elles ont été mesurées. En Arabie saoudite, le débit annuel des oueds qui ont été jaugés est d'environ $2,1.10^9 \text{ m}^3$, dont 60 % proviennent de ceux de la bande côtière de la mer Rouge et le reste des oueds qui sont situés à l'est et au sud-est de cette frange. Au Yémen, une valeur à peu près équivalente a été mesurée ou estimée, dont 37 % pour les oueds qui aboutissent dans la mer Rouge, 24 % pour ceux du golfe d'Aden, 30 % dans la mer d'Oman et le reste dans le Rub al-Khali. Dans le sultanat d'Oman, on a mesuré approximativement $0,92.10^9 \text{ m}^3$, répartis comme suit : plaine d'Al-Batinah 38 %, intérieur 29 %, Est 10 %, Salala et Dhofar 11 %, reste du pays 12 %. Le débit annuel total des oueds restants, dans la péninsule Arabique, l'Égypte, la Libye, le Soudan, l'Érythrée, l'Éthiopie, la Syrie, la Jordanie, l'Iran et la Turquie peut être arbitrairement estimé à 20.10^9 m^3 . On arriverait ainsi, en tout, à quelque 25.10^9 m^3 .

C. Eau des nappes souterraines

Le Moyen-Orient a la chance de posséder bon nombre d'aquifères étendus qui sont exploités exhaustivement dans certains pays pour répondre, totalement ou partiellement, à la demande en eau douce. Les déserts de la Libye, de l'Égypte, du Soudan, de la Syrie, de la Jordanie et de l'Arabie saoudite ne sont que des exemples de régions sous lesquelles il existe de grands aquifères. Le principal inconvénient d'un soutirage excessif est la détérioration possible de la qualité de l'eau. La figure 3 montre l'accroissement énorme de la quantité d'eau soustraite aux aquifères du Koweït (Sayed et Al-Ruwaith, 1995). La seconde difficulté est que l'abaissement du niveau d'une nappe provoque une augmentation du coût d'exploitation, ce qui influence négativement l'économie et le soutien des projets, par exemple l'agriculture irriguée dans certains endroits du Yémen (Van der Gun et al., 1992). Les pays arabes du Moyen-Orient utilisent à eux seuls 17.10^9 m³ par an (UNESCO, 1995). Ce volume, ajouté aux 13.10^9 m³ employés par Israël, l'Iran et la Turquie et aux 8.10^9 m³ que consomment chaque année le Soudan, la Somalie, l'Érythrée et l'Éthiopie, porte le total à environ 38.10^9 m³, sans compter le débit des sources qui coulent librement.

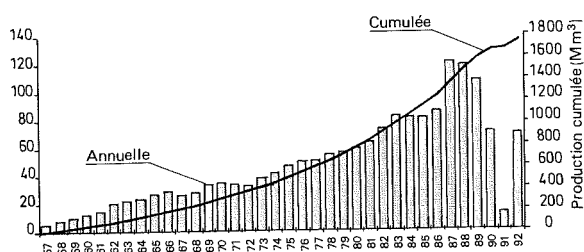


Figure 3. Accroissement de la production des aquifères du Koweït de 1957 à 1992

D. Eau désalinisée

On prétend que 2/3 des capacités mondiales des usines de désalinisation sont situées dans les états arabes du Golfe. L'information disponible (Bushnak, 1995) rapporte que l'Arabie saoudite, les Émirats arabes unis et le Koweït produisent ensemble 75 % de l'eau désalinisée du Moyen-Orient. À elle seule, la production annuelle d'eau désalinisée de l'Arabie saoudite est passée de 10.10^6 m³ en 1970 à 173.10^6 m³ en 1980, pour arriver à $1,31.10^9$ m³ en 1988. On prévoit $3,25.10^9$ m³ en 2000 (Mohorjy, 1988). Les chiffres de 1980, 1988 et 2000 représentent 1,4 %, 9,6 % et 19 % des demandes respectives en eau douce de l'Arabie saoudite.

E. Eau récupérée ou traitée

La réutilisation des eaux usées peut répondre à certains besoins : ceux de l'agriculture, ceux de l'industrie, la

recharge des aquifères, voire la consommation domestique. L'eau qui est réutilisée a trois origines : eau ayant déjà servi pour l'agriculture, eau des égouts urbains, eau récupérée lors de l'extraction du pétrole. L'eau qui a servi pour l'agriculture est réutilisée soit telle quelle, soit après traitement, selon sa qualité, le genre de culture ou les propriétés du sol. L'Égypte est en tête avec, avant 2005, 7.10^9 m³ par an d'eau réutilisée après avoir déjà servi dans l'agriculture. Il est de règle que l'eau provenant des égouts urbains bénéficie d'un traitement plus complet que celle qui vient des champs. En Arabie saoudite, en 1985, le volume d'eau urbaine retraitée était d'environ 100.10^6 m³ et devrait atteindre 730.10^6 m³ en 2000. Cela correspondrait à environ 15 % des ressources conventionnelles nationales en eau.

À présent, les usines de traitement de Qatar et des Émirats arabes unis ont des capacités respectives de 14.10^6 m³ et de $62,4.10^6$ m³. Les eaux usées susceptibles d'être réemployées pour l'irrigation avaient, au Yémen, un volume de 23.10^3 m³ en 1990 et en 2005 cela devrait monter à 108.10^3 m³.

En totalisant toutes ces données, on peut dire qu'en 1990 environ 5.10^9 m³ d'eaux usées retraitées étaient employées au Moyen-Orient. Entre 2000 et 2005, ce volume devrait doubler.

F. Total de l'eau disponible au Moyen-Orient

Dans certaines parties du Moyen-Orient, telles que la Turquie, la Syrie, le Liban, le Soudan et l'Éthiopie, l'agriculture dépend totalement ou partiellement de la pluie. On estime qu'elles consomment directement 10 % du volume total des précipitations annuelles, soit 340.10^9 m³. Si l'on y ajoute les 330.10^9 m³ d'eau des rivières permanentes et des oueds, les 38.10^9 m³ d'eau empruntée aux aquifères et les 12.10^9 m³ d'eau désalinisée ou récupérée et traitée, on arrive, pour le premier quart du XXI^e siècle, à une prévision de 720.10^9 m³. En rapportant ce total à la population absolue prévisible, on trouve entre 1.000 et 1.100 m³ par personne et par an.

III. LA VARIATION DU CLIMAT

Dans cette partie de l'article, les effets possibles des activités humaines sur le changement global du climat sont mis en relief. Cela sera suivi de la présentation de la variation, au Moyen-Orient, de la température de l'air et des précipitations et d'une brève discussion à ce sujet.

A. Effets des activités humaines sur le climat global

1. Dégagement de chaleur

Près de 12.10^{12} watts d'énergie calorifique sont actuelle-

ment produits. Cette quantité est minime comparée au rayonnement solaire incident, qui s'élève à $82.000.10^{12}$ watts. Il est donc improbable qu'elle puisse avoir un effet global significatif.

2. Accroissement du dioxyde de carbone

Brûler des combustibles fossiles dégage beaucoup de chaleur, mais aussi de dioxyde de carbone. En 1980, on rapportait que l'atmosphère contenait alors quelque 700.10^6 tonnes de CO_2 , quantité qui augmentait d'environ 0,2 % chaque année. La conséquence de cet accroissement est le développement dans l'atmosphère d'un processus connu sous l'appellation *d'effet de serre*. Daniel (1980) concluait que 2 fois plus de dioxyde de carbone en feraient monter la température de $2^\circ C$ dans les 70 prochaines années. S'il en était ainsi, à un certain moment du siècle prochain, il ferait plus chaud que n'importe quand pendant le dernier millénaire. En outre, comme les régions polaires sont plus sensibles au changement de climat, l'accroissement de la température y serait 3 à 5 fois plus grand qu'en moyenne. Par contre, il est possible que le réchauffement provoquerait plus de convection et plus de nébulosité, ce qui diminuerait la quantité d'énergie solaire parvenant dans les couches basses de l'atmosphère et contrecarrerait le réchauffement.

3. Polluants atmosphériques

Les polluants qui montent dans l'atmosphère, jusqu'à la couche d'ozone, sont une autre cause de réchauffement. Le cycle de l'ozone étant perturbé par eux, plus de rayonnement solaire ultraviolet parvient jusqu'à la basse atmosphère et jusqu'au sol. Mais ce rayonnement peut y être pris au piège et entraîner un réchauffement supplémentaire.

4. Poussières et particules

Certains chercheurs affirment que les poussières et d'autres particules provenant de la pollution industrielle et d'autres activités humaines peuvent contribuer à diminuer le rayonnement solaire incident et donc à refroidir la Terre. Selon Daniel (1980), la quantité de poussières a été estimée à 700.10^6 t par an.

B. Exemples de changement global du climat

La température moyenne de l'atmosphère près de la surface du globe a augmenté de $0,5^\circ C$ depuis le XIXe siècle (Jones et al., 1986). D'après Wigley (1992), ce réchauffement n'a été ni continu ni spatialement homogène, les tendances ont différé de région à région. Le même auteur ajoute que, alors que la température a eu tendance à diminuer sur le bassin méditerranéen pendant les dernières 40 années, pendant les 20 années de 1967 à 1986, elle s'est élevée à l'ouest et a baissé à l'est.

Une analyse des données sur les précipitations sur les terres émergées de l'hémisphère Nord montre que, aux latitudes moyennes et élevées (35° à 70° de latitude N), les précipitations se sont accrues depuis 1920. Au contraire, aux latitudes tropicales à subtropicales (5° à $35^\circ N$), elles ont nettement diminué (Bradely et al., 1987).

L'exemple 1 (Fig. 4) montre, d'une part, à l'échelle du globe et, d'autre part, en Finlande, les anomalies des températures moyennes annuelles par rapport à une période normale arbitrairement choisie (1961-1990). Les modifications observées au XXe siècle dans le climat finlandais correspondent cependant à la variabilité climatique naturelle. À elles seules, elles ne peuvent ni confirmer ni infirmer que des niveaux accrus de gaz en rapport avec l'effet de serre ont influencé le climat de ce pays. Néanmoins, on a décelé quelques écarts extrêmes à implications possibles sur la population et sur les écosystèmes.

L'exemple 2 (Fig. 5) présente les anomalies de la température moyenne annuelle en Inde pour la période 1901-1982. La tendance indique un accroissement de la température de $0,4^\circ C$ en à peu près 80 ans.

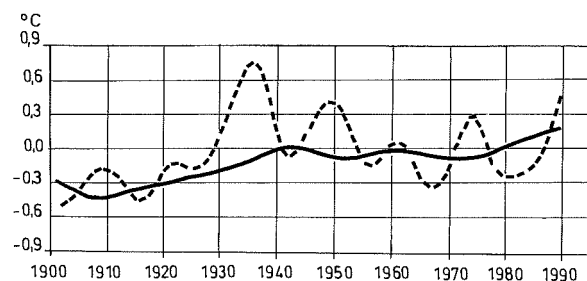


Figure 4. Anomalies, au XXe siècle, de la température moyenne annuelle par rapport à la normale de la période 1961-1990, dans le monde (trait noir) et en Finlande (trait interrompu)

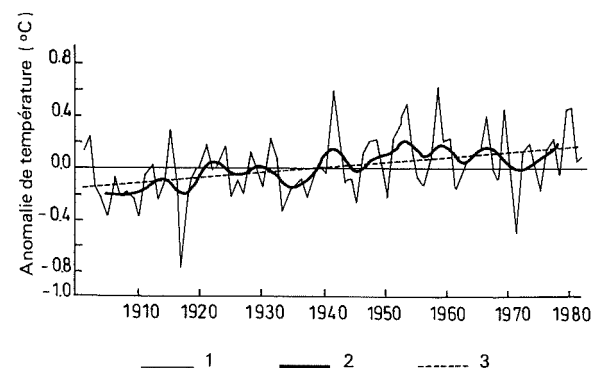


Figure 5. Anomalies, de 1901 à 1982, de la température moyenne annuelle en Inde

1 = valeurs brutes; 2 = valeurs filtrées; 3 = droite de tendance

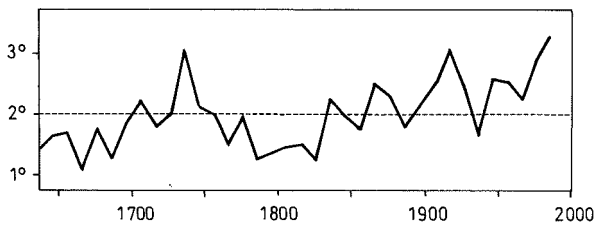


Figure 6. Moyennes décennales des températures hivernales à De Bilt (Pays-Bas), période 1634-1992

L'exemple 3 (Fig. 6) illustre la modification des températures hivernales à De Bilt, près d'Utrecht (Pays-Bas) entre 1634 et 1992. Avant 1706, les températures indiquées sont déduites du nombre de jours pendant lesquels le trafic sur les canaux a été bloqué par la glace entre Harlem, Leiden et Amsterdam. La série temporelle reportée à la figure 6 représente la moyenne décennale des températures hivernales.

L'exemple 4 (Fig. 7) montre l'évolution de la température moyenne annuelle en Grèce, en Europe centrale et dans le centre de l'Angleterre (Rykoort, cité in Flohn et Fantechi, 1984). Ce qui est remarquable, c'est que, entre 1890 et 1970, cette température a monté aussi bien en Angleterre qu'en Europe centrale, alors qu'elle a baissé en Grèce.

On pense que les modifications du climat global, à présent et dans l'avenir, seront dominées par l'effet de serre. Malgré le fait qu'un réchauffement global substantiel soit certain, les modifications concomitantes du climat à l'échelle locale sont très douteuses. Les quatre exemples donnés ci-dessus le prouvent. En outre, toute augmentation des gaz à effet de serre dans l'atmosphère n'entraîne pas nécessairement un réchauffement de la température de l'hydrosphère, où que ce soit. Cela ressort bien de la figure 8. Quand on estime l'impact potentiel de la modification du climat, il faut donc toujours garder à l'esprit les niveaux d'incertitude qui suivent :

- *connu et prouvé* : les gaz à effet de serre piègent la chaleur dans l'atmosphère et leur concentration ne fait qu'augmenter. La concentration de CO₂, le principal de ces gaz, s'accroît actuellement d'environ 1 ppm par an, en corrélation avec la consommation de combustibles fossiles;
- *certain* : l'effet de serre continuera à s'accroître en raison de la concentration croissante de gaz qui produisent cet effet;
- *incertain* : le niveau actuel de compréhension du système climatique complexe de la Terre ne permet pas de prédiction fiable de l'impact réel du réchauffement sur les éléments du climat ni de la distribution des événements extrêmes.

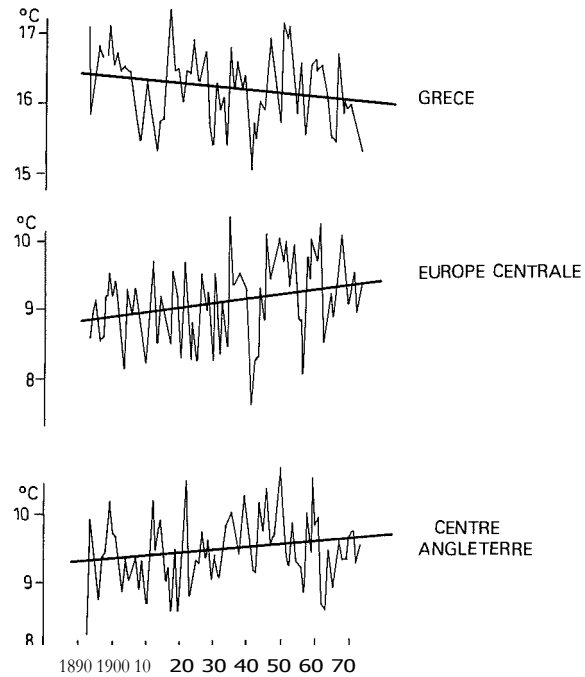


Figure 7. Tendances des températures moyennes annuelles en Grèce, en Europe centrale et en Angleterre centrale (d'après P.J. Rykoort, KNMI interne report, 1975)

IV. VARIABILITÉ DU CLIMAT AU MOYEN-ORIENT

Afin de tracer un portrait précis de la variabilité du climat au Moyen-Orient et dans une petite partie des environs immédiats, 7 séries de température et 15 séries de précipitations ont été examinées. Ces séries appartiennent à 18 stations climatiques situées dans 11 pays. La température moyenne de la Grèce et les précipitations moyennes de la Turquie y ont été ajoutées. Toutes les séries sont annuelles et la période la plus courte d'enregistrement couvre 50 ans.

Le tableau 1 donne les coordonnées des stations examinées et la carte de la figure 1 montre leur situation géographique. Toutes les séries, sauf celle de la Grèce, ont été testées pour l'absence de tendance et d'interdépendance, en utilisant les techniques d'autocorrélation, les régressions linéaires et les coefficients de corrélation de Spearman. On trouvera les procédures de ces tests dans les manuels traitant des analyses statistiques (notamment Himmelblau, 1969; Yevjevich, 1972; Shahin et al. 1993).

Les résultats des séries mentionnées ci-dessus sont présentés dans les tableaux 2 et 3. Ces résultats sont également repris aux figures 9 et 10 (température) et aux figures 11, 12, 13 et 14 (précipitations). Pour chaque série, trois courbes sont représentées : la « k-série » (qui est simplement la valeur brute divisée par la moyenne), la moyenne mobile à pas de 5 ans et la ligne de tendance.

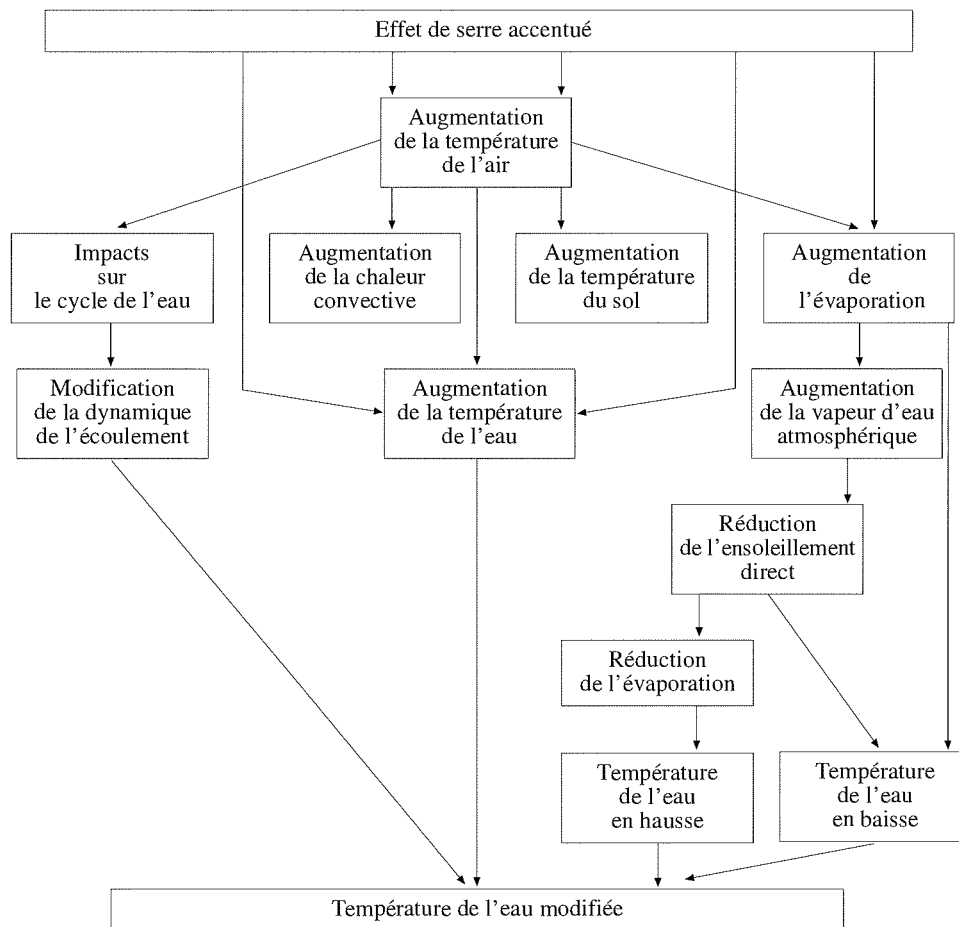


Figure 8. Impact du changement climatique sur la balance calorique des masses d'eau

Les résultats obtenus suscitent plusieurs commentaires.

- Quatre des sept séries de températures montrent une diminution moyenne d'environ $0,006^{\circ}\text{C}$ par an pendant la période enregistrée. Au contraire, les trois autres stations montrent un accroissement allant de $0,0035$ à $0,0083^{\circ}\text{C}$ par an pendant leur période respective d'enregistrement.
- Des quatorze séries de précipitations, huit accusent une tendance à la baisse, comprise entre $0,17$ mm par an à Athènes et $2,08$ mm par an à Ash Shawbak (Jordanie). Les six séries restantes indiquent une tendance à la hausse, de $0,035$ mm par an à Al-Manana (Bahreïn) à $2,17$ mm par an à Adana (Turquie).
- Il est évident que la plupart des tendances déjà indiquées ne sont pas des tendances réelles, mais plutôt des tendances apparentes. Les tableaux 2 et 3 montrent que l'hypothèse nulle (H_0) d'absence de tendance ne peut être rejetée significativement au niveau $0,05$ dans 18 des 21 cas. Quand on prend le niveau $0,1$, l'hypothèse d'absence de tendance est rejetée seulement dans 5 des 21 cas. Il pourrait être intéressant de mentionner que l'analyse de la série des précipitations

annuelles d'Aden (Yémen), qui couvre plus d'un siècle, n'a montré aucune tendance significative à long terme, ni de cycles bien définis d'années sèches et d'années pluvieuses. Au lieu de cela, il y a une alternance de précipitations supérieures à la moyenne (de 1 à 3 ans), avec des périodes, qui ne sont habituellement pas plus longues, de précipitations inférieures à la moyenne (Ministère du Pétrole et des Ressources minérales du Yémen et Institut de Sciences appliquées de la terre TNO, Pays-Bas, 1995). La composante périodique des précipitations annuelles à Addis-Abeba (Éthiopie), quoique non régulière, est certainement plus claire que dans le cas d'Aden.

- Les résultats des tests montrent que toutes les stations d'un même pays ne se comportent pas de la même façon en ce qui concerne la tendance. Par exemple, alors que la série des températures à Adana révèle une tendance à la hausse, les séries d'Ankara et de Diyarbakir montrent une tendance à la baisse. Il ne faut pas oublier que ces trois stations sont situées en Turquie. De même, les séries de température d'Alexandrie et d'Al-Minya (toutes deux en Égypte) ont des tendances différentes.

Tableau 1. Caractéristiques des stations analysées

N°	Pays Station	Latitude ϕ , N	Longitude λ , E	Altitude Z, m	Période d'observations	
					T*	P**
	Albanie					
1	Fier	40°44'	19°31'	60	-	1931-1990
	Grèce					
2	Grèce				1891-1972	-
3	Athènes	37°58'	28°43'	1,6	1871-1980	1885-1980
	Turquie					
4	Turquie				-	1926-1996
5	Ankara	39°57'	32°53'	894	1926-1993	1926-1994
6	Adana	36°59'	35°18'	20	1929-1993	1929-1994
7	Diyar Bakir	37°50'	40°12'	600	1929-1994	1929-1994
	Syrie					
8	Alep	36°11'	37°13'	392	-	1946-1995
	Jordanie					
9	Amman A.P.	31°58'	35°36'	700	-	1937-1994
10	Shobak Sch	30°32'	35°33'	1300	-	1937-1994
	Yemen					
11	Aden	12°50'	45°07'	2	-	1870-1990
	Bahrain					
12	Al-Manama	26°12'	50°36'	-	-	1929-1992
	Egypte					
13	Alexandrie	29°57'	31°12'	3	1942-1995	-
14	Al-Minya	28°05'	30°44'	39	1945-1995	-
	Soudan					
15	Khartoum	15°37'	23°33'	385	-	1938-1989
16	Gedaref	14°02'	35°24'	610	-	1900-1982
	Djibouti					
17	Djibouti Serp.	11°36'	43°09'	7	-	1900-1984
	Ethiopie					
18	Addis-Abeba	09°02'	38°44'	2440	-	1900-1990

* T = température moyenne annuelle

** P = hauteur annuelle des précipitations

- La tendance à la hausse d'une des séries de n'importe quelle station ne s'accompagne pas toujours d'une tendance à la baisse dans les autres séries de cette même station. Par exemple, la tendance à la hausse des précipitations à Adana est accompagnée par une tendance à la hausse aussi de la température. Puisque le nombre de stations qui ont été examinées et qui ont des séries accouplées de température et de précipitations se réduit à quatre, il n'est pas facile de faire une extrapolation raisonnable à partir de cette découverte. Ma-

nifestement, il aurait été très utile de disposer de plus de stations ayant chacune les deux séries simultanées, l'une pour la température annuelle moyenne, l'autre pour les précipitations annuelles, afin de les comparer.

La réponse des précipitations au changement de température est extrêmement importante et se manifeste sur d'autres composantes du cycle hydrologique telles que l'évapotranspiration et l'écoulement. Ceci sera le sujet de la prochaine et dernière partie de cet article.

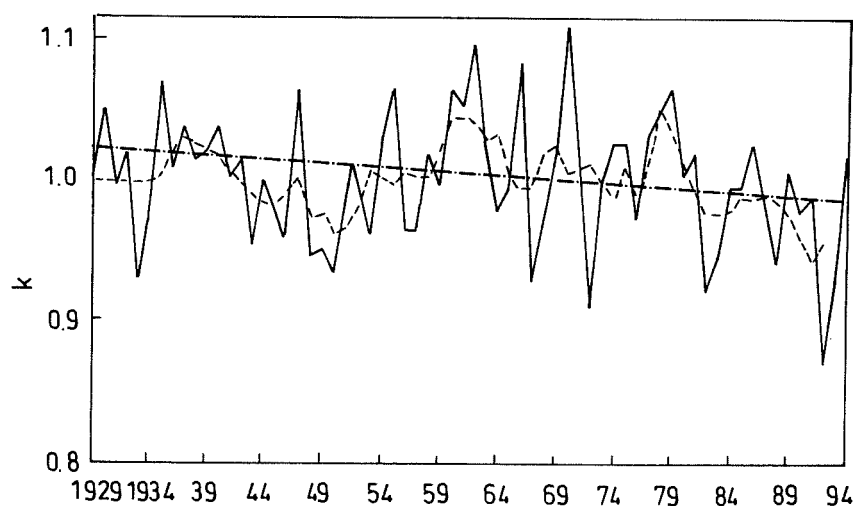


Figure 9. Série des températures annuelles à Diyarbakir (Turquie), 1929-1994

Trait plein = série brute; trait interrompu = moyenne glissante (pas de 5 ans); trait d'axe = droite de tendance.

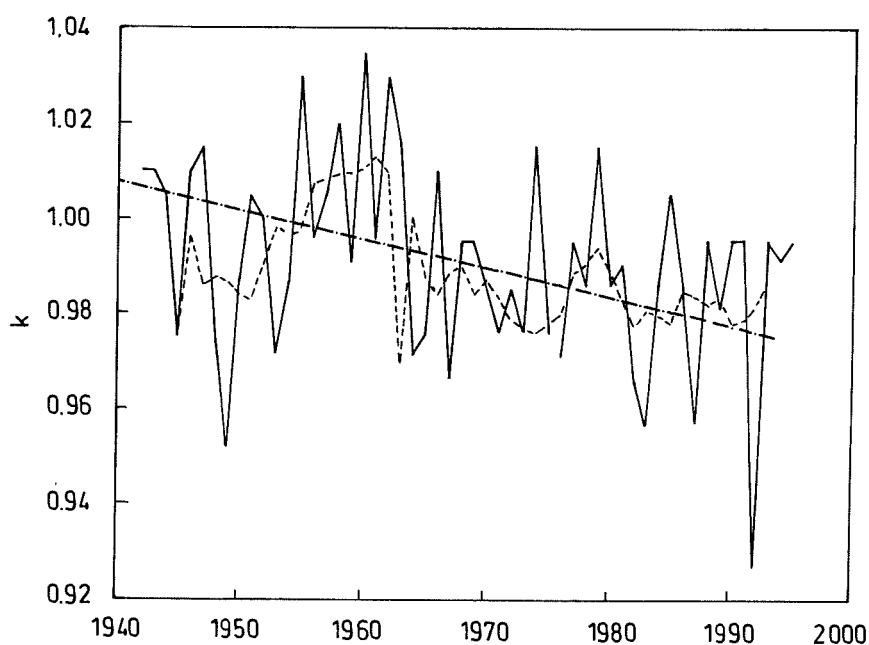


Figure 10. Série des températures annuelles à Alexandrie (Égypte), 1941-1994

Tableau 2. Résultats des tests effectués sur les séries des températures

Série N°	Pays Station	I/D°	équation de tendance	H ₀ ⁺ Y/N
2	Grèce	(?)	T = 16.45 – 0.00575 t*	(?)
3	Athènes	I	T = 17.65 + 0.00336 t	Y
5	Ankara	I	T = 11.87 – 0.00595 t	Y
6	Adana	D	T = 18.50 + 0.00828 t	N
7	Diyar Bakir	I	T = 15.97 – 0.00593 t	Y
13	Alexandrie	I	T = 20.31 – 0.00743 t	Y
14	Al-Minya	I	T = 21.06 + 0.00578 t	Y

° I = indépendant et D = dépendant.

+ H₀ = hypothèse nulle

* t = 1 pour la première année d'observation de chaque station

Tableau 3. Résultats des tests effectués sur les séries des précipitations

Série N°	Pays Station	I/D	équation de tendance	H ₀ [°] Y/N
1	Fier	I	P = 1008.8 – 1.85 t	Y
3	Athènes	I	P = 408.3 – 0.17 t	Y
4	Turquie	I	P = 570.8 + 0.79 t	Y
5	Ankara	D ⁺	P = 334.1 + 1.18 t	N
6	Adana	I*	P = 578.0 + 2.17 t	Y
7	Diyar Bakir	I	P = 457.7 + 1.04 t	Y
8	Alep	I	P = 320.9 + 0.26 t	Y
9	Amman A.P.	I	P = 298.9 – 0.79 t	Y
10	Shobak Sch.	I*	P = 377.2 – 2.08 t	Y
11	Aden	I	-	
12	Al-Manama	I	P = 73.6 + 0.035 t	Y
15	Khartoum	I	P = 179.6 – 1.125 t	Y
16	Gedaref	I	P = 540.9 – 1.135 t	Y
17	Djibouti Ser.	I	P = 121.0 – 0.336 t	Y
18	Addis-Abeba	D	P = 1264.9 – 1.26 t	N

+ = l'hypothèse nulle est rejetée au niveau 0,05

* = l'hypothèse nulle est rejetée au niveau 0,1

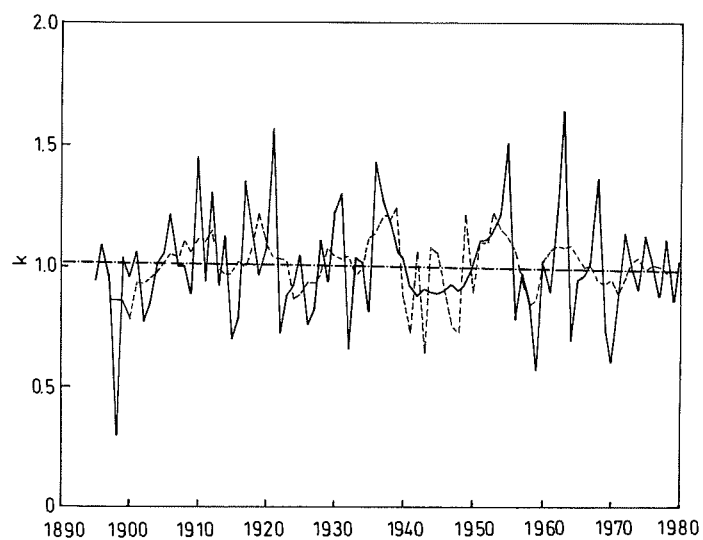


Figure 11. Série des précipitations annuelles à Athènes (Grèce), 1895-1980

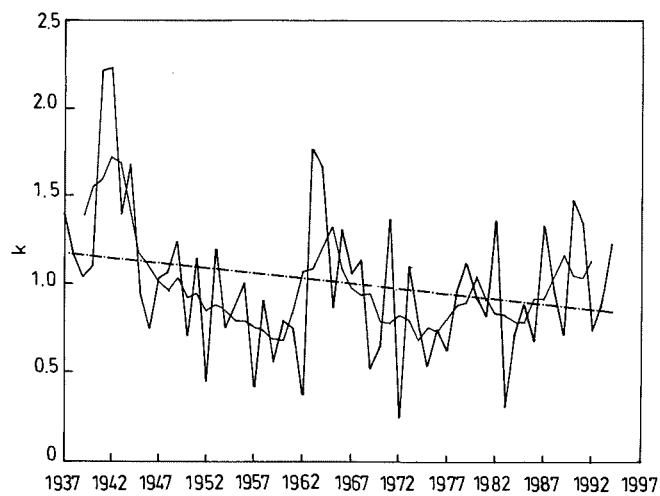


Figure 12. Série des précipitations annuelles à Adana (Turquie), 1929-1994

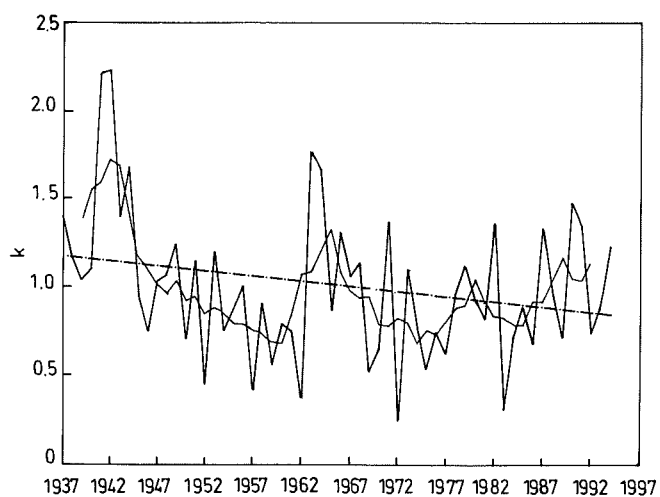


Figure 13. Série des précipitations annuelles à Ash Shawbak, (Jordanie), 1937-1994

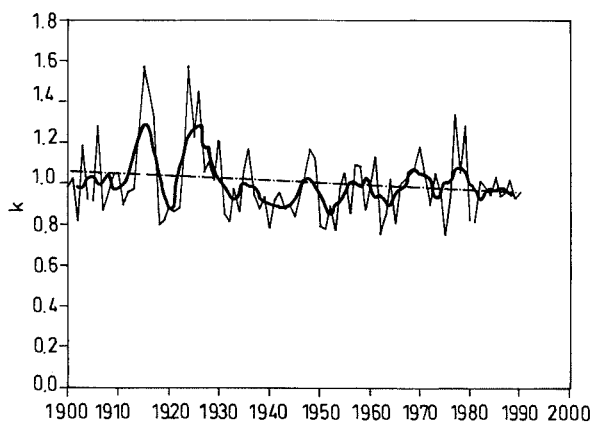


Figure 14. Série des précipitations annuelles à Addis-Abeba (Éthiopie), 1900-1990

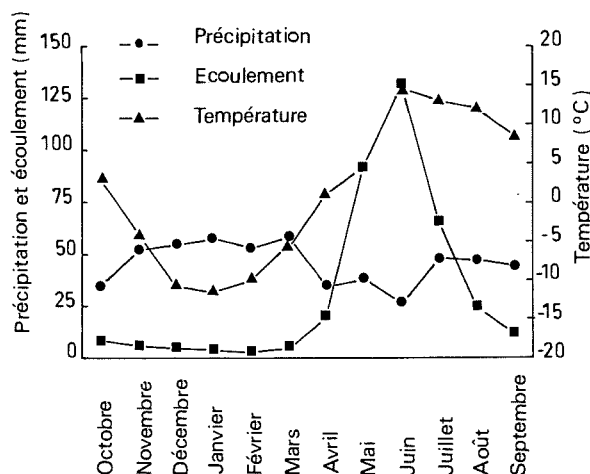


Figure 15. Température mensuelle moyenne, précipitations et écoulement pour le bassin de l'East River, 1973-1989

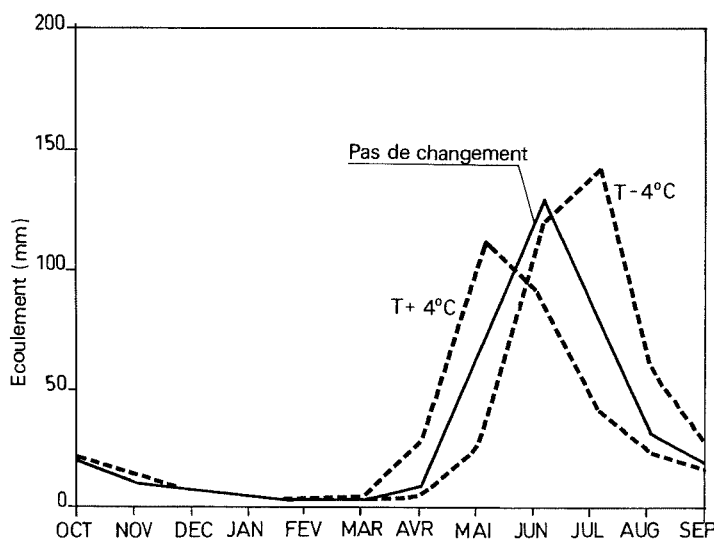


Figure 16. Écoulement mensuel moyen dans le bassin de l'East River simulé pour les conditions climatiques courantes (pas de changement), pour une hausse de 4°C de la température et pour une baisse de 4°C de la température

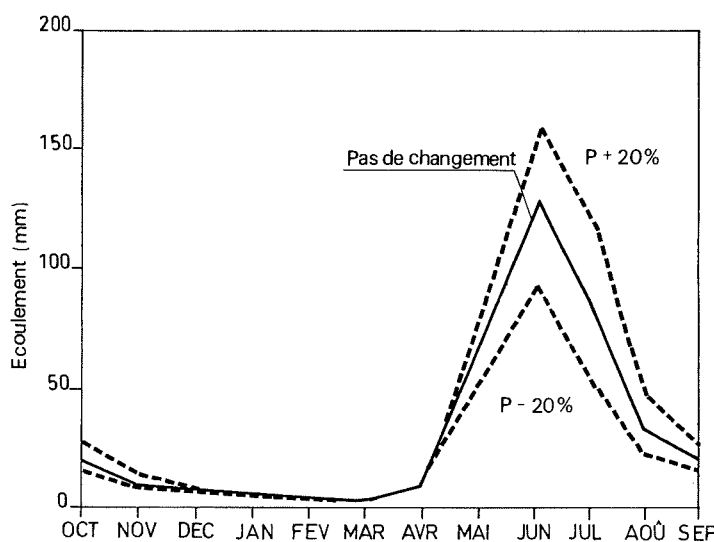


Figure 17. Écoulement mensuel moyen dans le bassin de l'East River simulé pour les conditions climatiques courantes (pas de changement), pour une hausse de 20 % des précipitations et pour une baisse de 20 % des précipitations

V. INFLUENCE DE LA MODIFICATION DU CLIMAT SUR L'ÉCOULEMENT DANS UN BASSIN

Les publications disponibles sur l'hydrologie et les ressources en eau du Moyen-Orient ne contiennent que peu d'informations à propos de l'influence des modifications de la température et/ou des précipitations sur un bassin hydrographique. Cet état de choses nous a conduit à rechercher une réponse fondée sur des études faites en dehors de la région, mais dans des conditions climatiques plus ou moins semblables. Il est peut-être intéressant de présenter ici un bref résumé de Dooge (1992) concernant certaines des études antérieures sur l'effet du changement du climat sur l'écoulement dans les bassins.

A. Modèles et résultats

Revelle et Waggoner (1983) ont effectué une étude dans douze bassins hydrographiques en Arizona. Ils ont utilisé un modèle empirique développé par Langbein. Les résultats obtenus dans les cinq bassins les plus humides étaient les suivants :

- une augmentation de 2°C de la température moyenne de l'air a provoqué une diminution de 23 % de l'écoulement;
- une baisse de 10 % de la hauteur des précipitations a entraîné une diminution de 23 % de l'écoulement;
- si l'accroissement de 2°C de la température se combine avec la baisse de 10 % des précipitations, l'écoulement diminue de 41 %.

Idso et Brazel (1984) ont répété le travail précédent, mais en considérant en plus que, si la quantité de CO₂ atmosphérique était multipliée par deux, l'évapotranspiration serait réduite à deux tiers, pour les niveaux courants de CO₂. Les résultats les plus importants obtenus par ces auteurs étaient :

- une hausse de 2°C de la température moyenne de l'air entraîne une augmentation de 67 % de l'écoulement;
- une diminution de 10 % de la hauteur des précipitations provoque une augmentation de 58 % de l'écoulement;
- si les deux facteurs précédents se combinent, l'écoulement augmente de 42 %.

Macabe et Hay (1995) ont rapporté l'étude, commencée en 1988 par l'USGS, des effets d'un changement potentiel du climat sur les ressources en eau de la Gunnison River, un affluent important du fleuve Colorado. Le modèle utilisé pour cette étude était le PRMS (*Precipitation-Runoff Modeling System*) de l'USGS, développé pour évaluer les diverses combinaisons des précipitations, de la température et de l'utilisation du sol sur la réponse d'un bassin hydrographique. Les données entrées dans le modèle étaient T (°C) la température mensuelle moyenne, P (mm) la hauteur des précipitations et Q (mm) l'écoulement, pour le bassin de l'East River, de 1973 à 1989. Ces données sont présentées sur le graphique de la figure 15. Voici les principaux résultats de cette étude :

- en général, les modifications dans les précipitations ont un effet plus prononcé sur l'écoulement que les changements dans les températures;

- les modifications dans les précipitations ont un effet significatif sur l'écoulement quelle que soit la saison;
- les modifications dans les températures ont affecté en premier lieu la répartition de l'écoulement sur l'année; elles influencent la date de la fonte de la neige et le rapport pluie/neige;
- sur base annuelle, un accroissement de la température ne provoque qu'une légère baisse de l'écoulement Une augmentation de 4°C de la température moyenne annuelle n'entraîne qu'une diminution des précipitations de 4 à 5 % ;
- pendant la période d'étude, la variation naturelle du climat a été forte et pourrait avoir caché les effets des modifications climatiques à long terme.

Pour le bassin en question, la figure 16 montre l'influence d'une modification de 4°C de la température moyenne et la figure 17 celle d'une modification de 20 % des précipitations.

B. Scénarios de changement global et modèles de circulation générale

Les scénarios de changement global du climat prédisent non seulement les modifications de la quantité globale de précipitations, mais aussi les modifications de leur répartition. Ceci influence à son tour les débits des rivières et peut accroître la variabilité et la magnitude des inondations et des sécheresses dans les endroits affectés. Les simulations courantes dans les GCM (*General Circulation Models*) suggèrent qu'il y aura approximativement une augmentation moyenne d'au moins 15 % des précipitations globales si la quantité de CO₂ double. Cependant, c'est la répartition géographique des précipitations, plutôt que leur moyenne globale, qui est importante pour une région particulière.

Les GCM prédisent aussi que la hausse de la température associée à l'émission de gaz à effet de serre ne sera pas globalement égale. Les régions polaires des deux hémisphères subiront une hausse plus forte, alors que, dans la région équatoriale, l'augmentation sera inférieure à la moyenne. Puisque les principales rivières permanentes du Moyen-Orient prennent leur source à la fois dans des régions tropicales et des régions tempérées semi-humides, l'impact du changement global sur cette grande partie de la surface de la Terre dépend directement de paramètres régionaux. En plus des modifications de température, des changements de la couverture neigeuse en Turquie orientale et des orages en Afrique tropicale pourraient avoir des effets sur l'hydrologie de la région arabe (Bazzac, 1994). On pense que ces chan-

gements pourraient influencer le débit annuel total et la répartition saisonnière du débit de l'Euphrate, du Tigre et du Nil. Il est vraisemblable que les populations connaîtront dans l'avenir une crise de l'eau si les disponibilités deviennent inférieures à celles d'aujourd'hui.

Enfin, et ce n'est pas le moins important, nous ne pouvons pas oublier que, parmi les questions pour lesquelles il n'y a pas encore de réponses adéquates, il y a les effets de la concentration croissante de CO₂ sur l'évapotranspiration des plantes cultivées, sur le rendement de l'agriculture et sur la qualité de celle-ci.

CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

Les ressources hydriques immédiatement disponibles au Moyen-Orient sont vraiment limitées, du moins dans une très grande partie de cette partie du monde. L'accroissement incessant de la population, à un taux qui dépasse celui du développement des ressources en eau, entraîne une nette diminution des disponibilités en eau douce par tête d'habitant.

Le réchauffement global est attribué à l'accroissement graduel et continu dans l'atmosphère de la quantité de CO₂ et d'autres gaz à effet de serre. On présume qu'un effet de serre accentué pourrait conduire à moins d'évaporation et d'évapotranspiration par rapport aux chiffres actuels. Mais d'autres chercheurs ne partagent pas l'opinion que les gaz précités aient un effet qui réduise l'évaporation.

Le climat du Moyen-Orient, tout comme celui de nombreuses régions du monde, subit une certaine variation sous forme de tendance à la hausse ou à la baisse de la température de l'air et des précipitations. Dans d'autres cas, le changement se marque par des successions irrégulières d'années qui dépassent les moyennes à long terme de ces éléments, ou au contraire leur sont inférieures. L'analyse statistique de ces modifications dans un certain nombre de stations du Moyen-Orient a pourtant montré que la variation du climat est dans la plupart des cas insignifiante.

Des modèles détaillés indiquent que les modifications de la température ont un effet mineur sur l'écoulement annuel, mais influencent fortement la distribution saisonnière de l'écoulement, en affectant le rapport pluie/neige et la date de la fonte de la neige. Par contre, les changements dans les précipitations ont une influence considérable à la fois sur l'écoulement annuel et sur sa répartition saisonnière. L'importance de la variation naturelle du climat pendant une période courte peut être tellement forte qu'elle en masque les effets des changements à long terme.

Les résultats des modèles de prédiction correspondant à un scénario donné de changement climatique diffèrent

d'un modèle à l'autre. Il est absolument nécessaire d'améliorer la précision des GCM existants. Il est également important de développer de nouveaux modèles à échelle plus fine pour servir de base à la prévision selon des scénarios spécifiques à certaines sous-régions, ce qui est actuellement impossible.

Il est extrêmement important que les pays du Moyen-Orient accordent une attention sérieuse à la collecte de données climatiques, à leur traitement, à leur publication et à leur échange. Cela devrait être fait effectivement, au moins pour des stations-clés sélectionnées. Il n'est pas besoin d'insister ici sur le fait que la qualité des découvertes et la valeur des résultats de toute étude dépendent fort de la quantité et de la fiabilité des données utilisées. Si, pour quelque raison que ce soit, ces données ne peuvent pas être publiées, elles devraient être accessibles aux personnes et aux organismes concernés, gratuitement ou presque.

BIBLIOGRAPHIE

- BAZZAC F. A., 1994. Global climatic change and its consequences for water availability in the Arab world. *Water in the Arab World: Perspective and Prognoses* (Rogers P. & Lyndon P., Eds), Division of Applied Sciences, Harvard University, USA, 243-252.
- BEAUMONT P., BLAKE G. & WAGSTAFF J. M., 1976. *The Middle East: A geographical Study*, John Wiley & Sons, Inc., London.
- BRANDY R. S., DIAZ H. F., EISCHEID J. K., KELLY P. M. & GOODNESS C. M., 1987. Precipitation fluctuations over Northern Hemisphere land areas since the mid-9th century. *Science*, 237, 171-175.
- BUSHNAK A. A., 1995. Putting a price on water. *Proceedings of the Middle East Consultants Conference on Desalination Technology and Economics*, Dar Al-Taquiniya, Jeddah, Saudi Arabia, 1-50.
- DANIEL H., 1980. *Man and climatic variability*, Publications of the World Climate Programme, World Meteorological Organization, Geneva.
- DOOGE J., 1992. Climate change, actual evaporation and catchment runoff. *Proceedings 25 Years International Course for Hydrologists*, IHE Report Series (Shahin M. & Zhou, Y., Eds), Delft, The Netherlands, 57-70.
- ENGELMAN R. & LE ROY P., 1995. *Sustaining water: an update to population and the future of renewable water supplies* (update version of 1993 report), Population and Environment Program/Population Action International, Washington, DC.
- FLOHN H. & FANTECHI R. (Eds), 1984. *Climate of Europe: past, present and future*, D. Reidel Publishing Co.
- HIMMELBLAU D. M., 1969. *Process analysis by statistical methods*, John Wiley & Sons Inc., London, New York.
- IDSO S. B. & BRAZEL A. J., 1984. Rising atmospheric carbon dioxide concentrations may increase stream flow, *Nature*, 312, 51-53.
- JONES P. D., RAPER S. C., BRADELY R. S., DIAZ H. F., KELLY P. M. & WIGLEY T. M., 1986. Northern Hemisphere surface air temperature variations, 1851-1984. *J. Climatology and Applied Meteorology*, 25, 161-179.
- KORZUN Y., 1974. *World water balance and water resource*

- of the earth* (translated from Russian), United Nations Educational, Scientific and Cultural Organisation of the United Nations, UNESCO, Paris.
- MARTYN D., 1992. Climates of the world. *Development in Atmospheric Science* 18, Elsevier Publishing Co, Amsterdam and PWN, Polish Scientific Publishers, Warsaw.
- McCABE G.J. Jr. & HAY L.E., 1995. Hydrological effects of hypothetical climate change in the East River basin, Colorado, USA. *Hydrological Sciences Journal* 40 (3), June 1995, 303-318.
- MINISTRY OF OIL AND MINERAL RESOURCES OF YEMEN AND TNO INSTITUTE OF APPLIED GEOSCIENCES (The Netherlands), 1995. *The water resources of Yemen*, Report Wray-35, Sana' a and Delft.
- MOHORIY A. M., 1988. Water resources management in Saudi Arabia and water use. *Wat. Int.*, 13(3), 161-171.
- REVELLE R. & WAGGONER P.E., 1983. Effects of a carbon dioxide induced climate change on water supplies in the western United States. *Changing climate. Report of the carbon Dioxide Assessment Committee*, National Academy Press, Washington DC.
- SAYED S.A. & AL-RUWAIH F.M., 1995. Relationships among hydraulic characteristics of the Damman aquifer and wells in Kuwait. *J. Hydrogeol.*, 3(1), 57-70.
- SHAHIN M. 1996. *Hydrology and scarcity of water resource in the Arab region*, IHE Monograph 1, A. Balkema, Publishers, Rotterdam, The Netherlands, and Brookfield, USA, 137 p.
- SHAHIN M., VAN OORSCHOT H. & DE LANGE S., 1993. *Statistical analysis in water resources engineering*. Applied Hydrology Monograph 1, A. Balkema, Publishers, Rotterdam, The Netherlands, and Brookfield, USA, 394 p.
- UNESCO/ACSAD, 1995. *Groundwater protection in the Arab region*, UNESCO, Paris, Cairo.
- VAN DER GUN J.A., ELDERHORTS W.I. & KRUSEMAN G.P., 1992. Predicting long-term impacts of groundwater abstraction from an intensively exploited coastal aquifer. *Proc. 23rd intl. Cong. Md Assoc. Hydrogeol., Tenerife, 1991* (Simmers I, Villarroya F. & Rebollo L.F., Eds), 3, 303-318.
- WIGLEY T. M., 1992. Future climate of the Mediterranean Basin with particular emphasis on changes in precipitation. *Climatic Change and the Mediterranean*, (Jefic L., Milliman J. & Sastini G., Eds), United Nations Environment Programme.
- YEVJEVIC V. M., 1972. *Stochastic processes in hydrology*. Water Resources Publications, Ford Collins, Colorado, USA.

Adresse de l'auteur :
 Prof. Dr. Mamdouh SHAHIN
 Water Resources Engineering Consultant
 Flaviusstraat, 11
 2275 VG VOORBURG
 The Netherlands