

## LA VARIATION DE LA TEMPÉRATURE DE L'AIR DANS LA RÉGION DE STRASBOURG : CHANGEMENT CLIMATIQUE OU EFFET DE L'URBANISATION ?

P. PAUL<sup>(1)</sup> ET I. HAIDU<sup>(2)</sup>

(1) Faculté de Géographie, Université Louis Pasteur, 3 rue de V Argonne, F -67083 Strasbourg -  
[paul@geographie-strasbg.fr](mailto:paul@geographie-strasbg.fr)

(2) Faculté de Géographie, Université Babes-Bolyai de Cluj-Napoca, 5-7 rue Clinicilor, -Cluj-Napoca, Roumanie -  
ionel [haidu@yahoo.com](mailto:haidu@yahoo.com)

### Résumé

L'étude consiste à comparer des températures mensuelles de l'air (minimum, moyenne, maximum) d'un environnement urbain (Strasbourg-ville) à celles d'un environnement non urbanisé (Strasbourg-aéroport). L'objectif est de savoir si l'élévation de la température est due à l'influence de l'urbanisation ou à celle d'un changement climatique. Les résultats statistiques montrent que dans les années 60, une "rupture de stationnarité" de la série des températures minimales s'est produite autant à la station urbaine (Strasbourg) que dans l'espace non urbanisé (Entzheim), la cause possible étant le changement climatique actuel. Les températures maximales sont restées stationnaires. Les conséquences principales de l'augmentation des températures minimales sont un printemps plus précoce et un climat plus doux, ainsi que la désorganisation de la saisonnalité, comme le montre la variation des paramètres du modèle de Thomas-Fiering. Bien que certains changements des caractéristiques statistiques des séries temporelles soient évidents, surtout pour les minimales, on ne peut détecter avec certitude un changement climatique avant que ces conclusions ne soient confirmées au niveau régional.

### Abstract

The study aims to compare the monthly air temperatures (minimum, mean, maximum values) of an urban environment (Strasbourg city) to those of a non-urbanized environment (Strasbourg-airport), in order to see to what extent the increase in values is due to the influence of urbanization or could possibly indicate a climatic change. The statistical results show that in the '60s a « stationarity rupture » occurred in the series of minimal temperatures in both the urbanized station (Strasbourg) and the non-urbanized one (Entzheim), having as a possible cause the present climatic change. The maximal temperatures have remained stationary. The main consequence of the increase in minimal nocturnal temperatures is a more precocious spring and a milder climate, the disorganization of seasonality, as the variation of the Thomas-Fiering model shows it. Although certain changes of the statistical characteristics of the temporal series are obvious, especially for minimal values, a climatic change cannot be asserted with certainty until these conclusions are confirmed at regional level.

**Mots-clés** : température de l'air, climat urbain, changement climatique, Strasbourg.

**Keywords** : air temperature, urban climate, climatic change, Strasbourg.

### Introduction

Les travaux de climatologie urbaine, ont, parmi d'autres objectifs, celui d'examiner l'apparition de certaines modifications climatiques à l'intérieur de la ville (élévation de la température, diminution de l'insolation liée à la fréquence accrue du brouillard et des impuretés, réduction de l'humidité de l'air, affaiblissement du vent, etc.). Kratzer (1956) a élaboré une synthèse sur les différences thermiques entre 22 villes d'Europe, d'Amérique du Nord et d'Asie et les zones avoisinantes. Chandler (1965) a approfondi l'étude du climat urbain et a obtenu pour Londres et ses environs des gradients thermiques horizontaux orientés concentriquement de la périphérie vers le centre de la ville.

De telles zones, plus chaudes que le milieu rural, ont été appelées « îlots de chaleur ». Mais, dans le contexte de l'hypothèse des changements climatiques globaux, l'objectif de notre travail n'est pas celui d'une étude classique de climatologie urbaine. Farcas (1999) attire l'attention sur le fait que la tendance de variation d'une station urbaine doit absolument être comparée à celle provenant de stations non affectées par l'influence de la ville et dont les changements sont causés par des facteurs naturels. Aussi notre étude vise-t-elle à comparer les températures mensuelles de l'air (minimum, moyenne, maximum) d'un environnement urbain (Strasbourg-ville) à celles d'un environnement non urbanisé (Entzheim). Dans ces conditions, le changement climatique éventuel doit affecter à parts égales les deux stations. De telles comparaisons entre la température de la ville et celle de l'aéroport ont été réalisées par Landsberg (1981) pour plusieurs villes nord-américaines, mais sans poser le problème des tendances sur une longue durée.

Quoique la grande majorité des spécialistes ne doutent plus du changement climatique global, peu nombreux sont ceux qui explorent les mécanismes possibles des éventuels changements. Les prémisses du travail de cet article consistent dans le fait qu'entre l'effet climatique de l'urbanisation et l'éventuel réchauffement global, des similitudes devraient apparaître avec un décalage dans le temps. Dans les grandes villes devenues des "oasis de chaleur" depuis les années 50-70, la température de l'air (minimum, maximum, moyenne), aussi bien que d'autres éléments climatiques, ont enregistré des hausses ou des tendances explicables. S'il y a réellement un changement climatique récent, caractéristique des 10-20 dernières années, comme l'affirment de nombreux spécialistes, les séries temporelles des stations climatiques rurales devraient relever des hausses ou des tendances similaires à celles observées dans des environnements urbanisés.

## 1. Caractéristiques des stations de mesures

Les stations de Strasbourg-ville et d'Entzheim sont situées au centre de la plaine du Fossé rhénan méridional, large de 30 à 40 km, dominé par le massif vosgien à l'ouest et la Forêt Noire à l'est. La station de Strasbourg-ville est localisée à vol d'oiseau à proximité du centre d'une agglomération de plus de 400 000 habitants. Le site de mesures se trouve au Jardin Botanique, dans un espace relativement dégagé pour un milieu urbain, à 1 km à l'est du noyau historique ancien de la ville. La station d'Entzheim (aéroport) est implantée dans un espace rural très dégagé, sans arbres, à 10 km à l'ouest à vol d'oiseau du site de Strasbourg-ville ; elle semble encore peu influencée par les effets thermiques urbains, la limite de l'agglomération se trouvant à environ 2,5 km à l'est, secteur qui correspond à une direction de vents rares.

## 2. Comparaison de l'évolution de la température à Strasbourg et à Entzheim

Le simple examen visuel de la variation des températures maximales et minimales annuelles des deux stations (Fig. 1) suggère une évolution approximativement parallèle, l'environnement urbain (Strasbourg) étant un peu plus chaud que l'environnement rural (Entzheim) tant de jour que de nuit. On peut soupçonner l'existence de tendances vers la hausse, puisque l'on discerne une légère élévation des extrêmes annuelles, qui est plus nette dans le cas des températures minimales.

Pour tester le caractère stationnaire des séries et l'existence possible de tendances significatives du point de vue statistique, on a utilisé les tests non paramétriques de Wald-Wolfowitz, Wilcoxon et Kendall. Ils ont été appliqués aussi bien à toute la série d'observations que par sous-périodes. Alors que dans le cas des températures maximales on ne peut pas contester le caractère stationnaire des séries, qui ne présentent pas de tendances significatives, il n'en est pas de même des températures minimales. Le test de toute la série d'observations (80 ans pour Entzheim et 64 ans pour Strasbourg) montre que les hypothèses nulles ( $H_0$ ) des tests précédents sont confirmées. Mais, par sous-périodes ou par séquences, les résultats peuvent être différents par rapport à la conclusion ci-dessus. Dans le cas des températures minimales, la sous-période 1962-2000 (39 ans) est caractérisée par une aug-

mentation nette (Fig. 2) qui invalide l'hypothèse nulle des tests non-paramétriques. Ainsi, la présence de cette tendance imprime un effet d'autocorrélation (de 1<sup>er</sup> ordre) confirmé par le test de Wald-Wolfowitz.

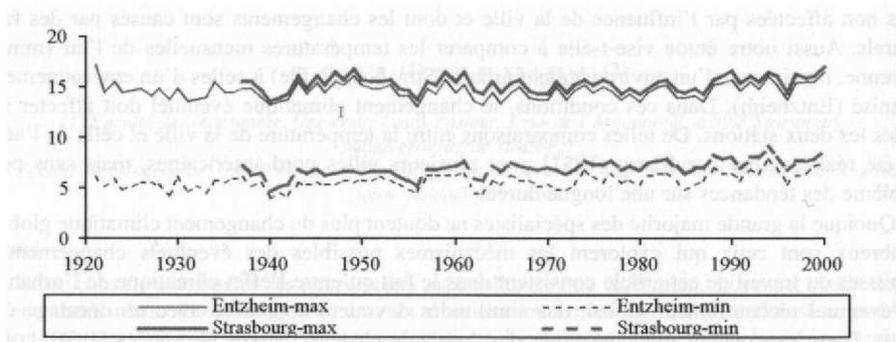


Figure 1 : Températures maximales et minimales (°C) à Strasbourg (1937-2000) et Entzheim (1921- 2000).

De plus, le test de Wilcoxon montre clairement que la moyenne de l'échantillon précédant l'année 1962 diffère significativement de la moyenne de l'échantillon suivant. Dans l'intervalle 1960-1963, il semble que la stationnarité de la série subit une « rupture ». Le test de Kendall réfute l'hypothèse nulle au niveau de signification de 5% ; par conséquent, on peut accepter l'idée qu'il existe une tendance régulière croissante dans l'intervalle 1962-2000. L'origine de celle-ci peut avoir une cause naturelle, liée aux changements climatiques globaux, ou anthropique, comme l'effet de l'extension de l'influence urbaine. Une éventuelle modification des conditions locales, soit par le déplacement des stations, soit par l'effet de bâtiments récents sur les sites de mesures, pourrait aussi être prise en considération.

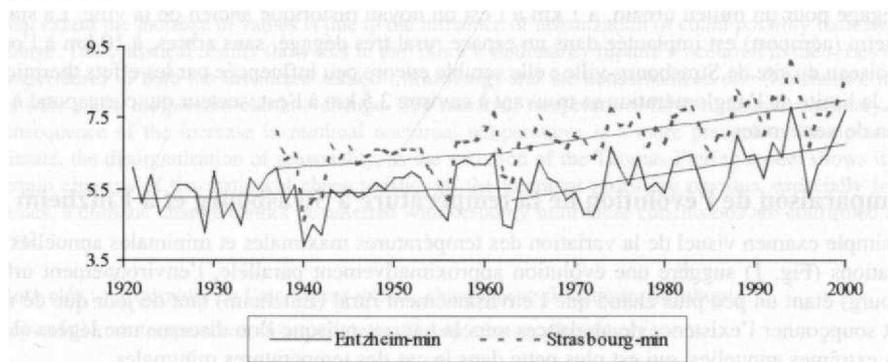


Figure 2 : Evolution des températures minimales (°C) et tendances séquentielles linéaires.

A Strasbourg, on a obtenu l'ajustement  $X_{s,t} = 6.59 + 0.037 t$  et pour Entzheim  $X_{e,t} = 5.17 + 0.042 t$ . Les températures minimales nocturnes montent autant à Strasbourg qu'à Entzheim, mais de façon plus rapide à Entzheim. La différence entre les deux pentes de  $0.005 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{an}$  montre que la tendance au réchauffement nocturne est plus accentuée qu'à Strasbourg. Cette atténuation avec le temps des différences entre la ville et l'extérieur de la ville peut provenir soit de l'extension de l'agglomération vers Entzheim, soit du réchauffement global.

En 1970, Dettwiller, cité par Farcas en 1999, a obtenu des résultats similaires à Paris. Il a montré que l'urbanisation a engendré pour la période 1891-1968 une élévation des températures maximales aussi bien que minimales, ces dernières présentant une hausse plus accentuée. En 1970, Fukui, cité toujours par Farcas ( 1999), a montré que dans les grandes villes du Japon, les températures maximales et minimales se sont élevées de façon beaucoup plus marquée durant la période de reconstruction après la seconde guerre mondiale. Là aussi les températures minimales nocturnes montent plus rapidement que les températures diurnes, ce qui réduit les amplitudes journalières.

### 3. La combinaison de l'effet de chaleur urbain et du réchauffement global

Nous avons voulu aussi vérifier l'hypothèse selon laquelle le changement climatique devrait affecter de façon homogène toute la plaine rhénane, alors que les processus d'urbanisation n'agissent qu'au site de Strasbourg. Mais, cette relation n'est pas facile à évaluer uniquement à partir des séries de données disponibles. La seule possibilité consiste à établir des séries d'écart et d'amplitudes thermiques journalières entre les 2 stations, ainsi que de réaliser des opérations algébriques entre celles-ci. Pour vérifier si, à l'intérieur de la ville apparaissent des changements thermiques par rapport à l'extérieur de la ville, on a établi la série des écarts entre la zone urbanisée (Strasbourg) et l'espace non urbanisé (Entzheim) pour les deux séries de températures extrêmes. L'évolution des écarts annuels entre les deux sites (Fig. 3) révèle qu'une différence significative entre la ville et le milieu rural avoisinant apparaît seulement dans le cas des températures minimales.

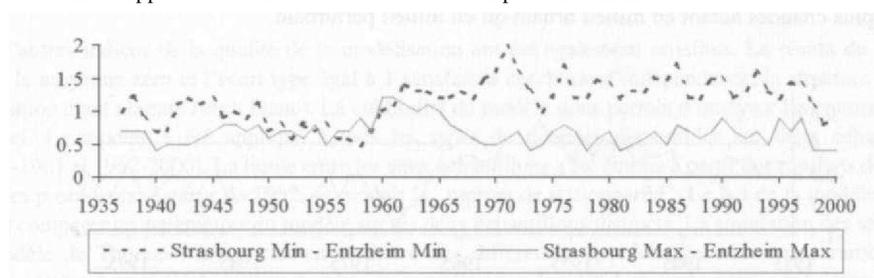


Figure 3 : Evolution des écarts annuels observés ( $^{\circ}\text{C}$ ) entre Strasbourg et Entzheim pour les températures minimales et maximales annuelles de 1937 à 2000.

Certaines inflexions curieuses de cette dernière courbe nécessitent des explications supplémentaires. Jusqu'en 1958, les écarts annuels entre les températures minimales décroissent de manière continue, atteignant  $0.5^{\circ}\text{C}$  à la fin de la période considérée, valeur la plus basse de l'intervalle étudié. Immédiatement après cette date, apparaît une période d'accroissement des écarts des minima, atteignant jusqu'à  $2.0^{\circ}\text{C}$  en 1971. Après 1971-1974, les oscillations deviennent plus ou moins stables, sans que l'on puisse affirmer avec certitude la présence d'une rupture relativement brutale dans entre 1958 et 1974 ou d'une élévation régulière dans la deuxième moitié du siècle dernier. Mais, on peut affirmer que durant les 40 dernières années, une différence de  $0.5$  à  $1.0^{\circ}\text{C}$  s'est stabilisée entre les deux séries d'écart annuels. Il convient de rappeler qu'en 1967, on a construit un immeuble à environ 30 m au NE de la station de Strasbourg, mais les changements évoqués sont apparus quelques années plus tôt.

Les évolutions des amplitudes thermiques journalières dans les deux stations (Fig. 4) ont été également comparées : la période postérieure aux années 60 diffère de la précédente : avant 1961, les deux courbes des amplitudes se recoupent parfois ; ensuite, les différences oscillent entre  $0.4$  à  $1.0^{\circ}\text{C}$ , l'amplitude d'Entzheim étant supérieure à celle de Strasbourg-ville.

La variation des différences entre les amplitudes journalières annuelles observées dans les deux sites (Fig. 5) convainc encore plus clairement que les différences ville-campagne ont subi des modifications notables autour des années 60. Une hypothèse possible serait que vers 1960-1965, des

ruptures climatiques brusques se soient produites, ayant comme conséquence la « rupture de stationnant ». L'origine de cette anomalie pourrait être naturelle ou, simplement liée à la construction d'un grand bâtiment à proximité de la station de Strasbourg.

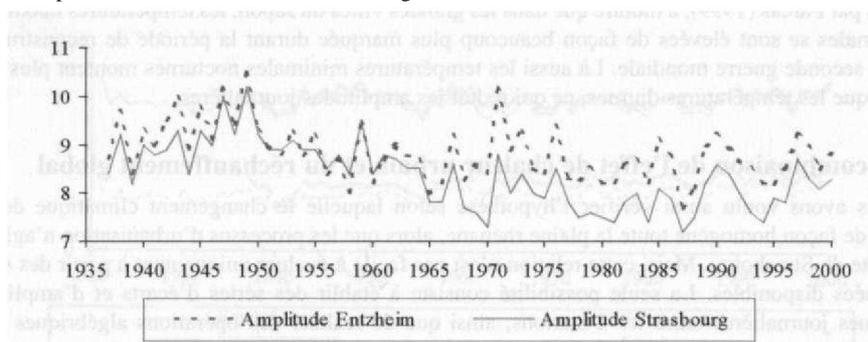


Figure 4 : Evolution de l'amplitude thermique journalière ( $^{\circ}\text{C}$ ), de 1937-2000 à Entzheim et Strasbourg.

Une autre hypothèse pourrait se baser sur le fait, qu'à partir des années 60, apparaissent les signes d'un changement climatique concernant d'abord les températures minimales. Donc, les nuits semblent devenir plus chaudes autant en milieu urbain qu'en milieu périurbain.

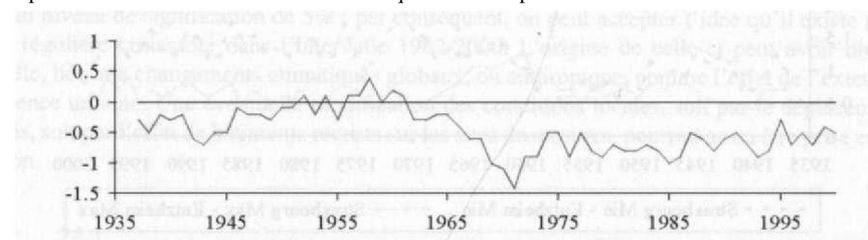


Figure 5 : Variation des différences de l'amplitude thermique journalière ( $^{\circ}\text{C}$ ) entre Strasbourg et Entzheim de 1937 à 2000.

La comparaison des moyennes sur les deux sous-périodes suggère le rôle de l'urbanisation dans le contexte du supposé réchauffement global. Pour Strasbourg, la moyenne de la sous-période avant 1961 est de  $6.36^{\circ}\text{C}$ , tandis qu'après cette année la moyenne atteint  $7.29^{\circ}\text{C}$ . Pour Entzheim, la moyenne de la sous-période précédant l'année 1961 est de  $5.48^{\circ}\text{C}$ , alors que la sous-période suivante a une moyenne de  $5.95^{\circ}\text{C}$ . Donc, la moyenne d'Entzheim a augmenté de  $0.5^{\circ}\text{C}$  durant 39 ans, alors qu'à Strasbourg, la hausse atteint près de  $1^{\circ}\text{C}$ . Evidemment, à Strasbourg, l'effet thermique de l'urbanisation estimé aussi à  $0.5^{\circ}\text{C}$  se combine à l'effet du réchauffement global, estimé également à environ  $0.5^{\circ}\text{C}$ . La différence entre les deux pentes, de  $0.005^{\circ}\text{C}$  en faveur d'Entzheim, montre que sur un territoire dépourvu de constructions et bien ventilé, l'effet du réchauffement global est plus prononcé. Mais, on peut s'interroger sur le maintien de ces tendances à l'avenir.

#### 4. Modélisation de la variation des températures mensuelles

Une analyse de la variation saisonnière des séries des températures a été effectuée avec le modèle de modèle proposé par Thomas et Fiering en 1962, utilisé pour des applications hydrologiques à l'échelle de temps mensuelle. Ce modèle de séries temporelles est capable de rendre la variation saisonnière quelle que soit la nature des données.

Dans ce modèle, il y a des relations autorégressives et de corrélation, non seulement entre les observations de mois successifs, mais également entre les observations du même mois dans des années successives. Le modèle numérique prend en considération la corrélation entre une valeur quelconque  $x_t$  de la série au cours d'un mois (sur la verticale), mais également un rapport avec le mois précédent (sur l'horizontale), donc avec la valeur  $x_{t-1}$ , et influence aussi la valeur du mois suivant ( $x_{t+1}$ ). Ainsi, la corrélation entre la colonne du mois de février et celle du mois de mars, par exemple, est évidente et ainsi de suite. De manière similaire, l'auto corrélation existant entre les valeurs des années successives d'un certain mois est évidente. Le degré de ressemblance de la série brute à la série filtrée (Fig. 6) est un indice de la qualité de la simulation.

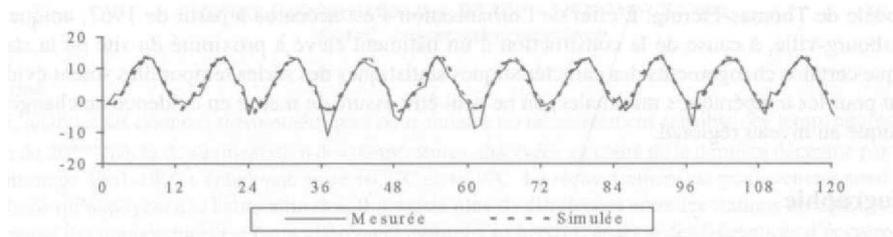


Figure 6 : Résultat de la simulation des températures minimales (°C) d'Entzheim à l'aide du modèle de Thomas-Fiering. Exemple pour l'intervalle janvier 1937 - décembre 1946 (10 ans).

D'autres indices de la qualité de la modélisation ont été également satisfaits. Le résidu du modèle ayant la moyenne zéro et l'écart type égal à 1 satisfait la condition d'indépendance, la structure d'auto-corrélation étant absente (bruit blanc). La crédibilité du modèle nous permet d'analyser les paramètres de celui-ci. Le modèle a été appliqué à tous les types de données disponibles sur deux échantillons (1937-1961 et 1962-2000). La limite entre les deux échantillons a été établie à partir des résultats des paragraphes précédents; à partir de 1962, se produit la „rupture de stationnarité". Le but de la modélisation a été de comparer les paramètres du modèle sur les deux échantillons distincts. La simulation des séries par le modèle de Thomas-Fiering met en évidence des différences appréciables entre les paramètres du modèle élaboré pour l'échantillon de série temporelle jusqu'en 1961 et après cette année (Fig. 7). La figure 7a montre un exemple de croissance de moyennes mensuelles (juin à août) d'approximativement 0.5 °C pour 1962-2000 par rapport à la période précédente. En ce qui concerne les coefficients de corrélation entre les mois successifs (Fig. 7.b), les résultats obtenus pour l'intervalle 1962-2000 mettent en évidence une désorganisation de la saisonnalité de ces indices par rapport à l'intervalle 1937-2000.

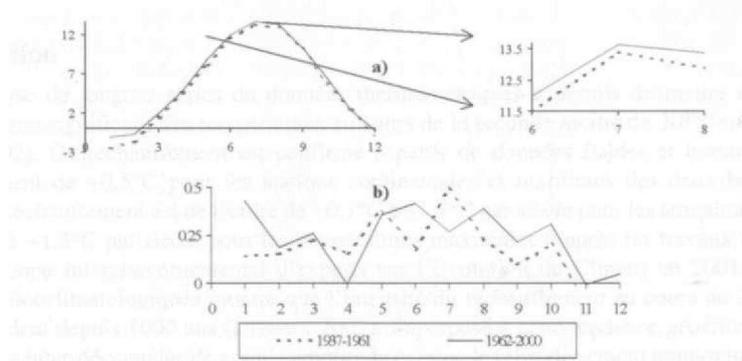


Figure 7 : Variation mensuelle des paramètres du modèle de Thomas-Fiering pour les températures minimales d'Entzheim pour les périodes 1937-1961 et 1962-2000: a) - moyennes, b) - coefficients de corrélation.

## Conclusion

L'étude statistique des séries annuelles de températures de Strasbourg-ville et d'Entzheim conduit à quelques conclusions intéressantes. Dans les années 60, une « rupture de stationnarité » de la série des températures minimales s'est produite autant dans la station urbaine qu'à Entzheim. La cause pourrait être le changement climatique actuel. Cependant, les températures maximales sont restées stationnaires. Dans les deux stations, à partir de 1962, les températures minimales présentent une tendance linéaire de croissance, légèrement plus accentuée à Entzheim. La conséquence de cette hausse des températures minimales nocturnes est un printemps plus précoce et un climat plus doux, une tendance vers une désorganisation de la saisonnalité, comme le montre la variation des paramètres du modèle de Thomas-Fiering. L'effet de l'urbanisation s'est accentué à partir de 1967, uniquement à Strasbourg-ville, à cause de la construction d'un bâtiment élevé à proximité du site de la station. Bien que certains changements des caractéristiques statistiques des séries temporelles soient évidents, surtout pour les températures minimales, on ne peut être assuré de mettre en évidence un changement climatique au niveau régional.

## Bibliographie

- CHANDLER, T.J., 1965 : *The Climate of London*. Hutchinson and Co. Ltd., London.
- DETTWILLER, J., 1970 : *L'évolution du climat de Paris. Influence de Vurbanisation*. Mémorial de la Météorologie Nationale, 52 p.
- FARCAS, I., 1999 : *Clima urbana*. Casa Cartii de Stiinta, Cluj-Napoca.
- KRATZER, P.A., 1956 : *Das Stadtklima*, Braunschweig.
- LANDSBERG, H.E., 1981 : *The Urban Climate*. Academic Press, New York.
- THOMAS, H.A., FIERING, M.B., 1962 : *Mathematical Synthesis of Streamflow Sequences for the Analysis of River Basins by Simulation*. Design of Water Resources Systems, Harvard University Press, Cambridge.