



Géophysique externe, climat et environnement

## Longues séries d'insolation homogénéisées en France

Jean-Marc Moisselin\*, Claire Canellas

*Météo France, direction de la climatologie, 42, av. Gaspard-Coriolis, 31057 Toulouse, France*

Reçu le 15 décembre 2004 ; accepté après révision le 5 avril 2005

Présenté par Michel Petit

### Résumé

Disposer de longues séries de mesures d'insolation exploitables nécessite au préalable un effort de recherche de données anciennes, puis de numérisation. Dix-huit séries ont été homogénéisées sur la période 1931–2000. Ces séries viennent enrichir le jeu de diagnostics sur le changement climatique à l'échelle du territoire, confortent une partie des résultats établis pour les températures et offrent de nouvelles pistes d'analyse des mécanismes d'évolution du climat. **Pour citer cet article : J.-M. Moisselin, C. Canellas, C. R. Geoscience 337 (2005).**

© 2005 Académie des sciences. Publié par Elsevier SAS. Tous droits réservés.

### Abstract

**French homogenized sunshine-duration long-term series.** Prior to have long-term sunshine-duration series, data rescue effort has to be engaged. Eighteen series have been homogenized over the period 1931–2000. These series complete the set of diagnoses on climate change at a regional scale, confirm part of the diagnosis established for the temperatures, and offer new tracks for the mechanisms of climate change. **To cite this article : J.-M. Moisselin, C. Canellas, C. R. Geoscience 337 (2005).**

© 2005 Académie des sciences. Publié par Elsevier SAS. Tous droits réservés.

*Mots-clés :* Insolation ; Héliographe ; Série climatique ; Homogénéisation ; Changement climatique ; France

*Keywords :* Sunshine duration; Heliograph; Climate series; Homogenization; Climate change; France

### 1. Introduction

Plusieurs points justifient le fait de s'intéresser à un paramètre assez peu étudié, la durée d'insolation en France.

D'abord, si températures et précipitations sont généralement employées pour décrire le climat d'un lieu donné, l'ensoleillement, au même titre que d'autres paramètres atmosphériques (vent, humidité), participe également à la définition du climat. L'étymologie en offre d'ailleurs une preuve supplémentaire : le mot climat, du mot latin *clima*, d'origine grecque, désigne en effet l'angle entre les rayons solaires et la surface ter-

\* Auteur correspondant.

Adresse e-mail : [jean-marc.moisselin@meteo.fr](mailto:jean-marc.moisselin@meteo.fr)  
(J.-M. Moisselin).

reste ; il est donc à rapprocher de l'ensoleillement. De nombreux secteurs d'activités sont, par ailleurs, demandeurs de données d'insolation : agrométéorologie, tourisme, secteur énergétique.

Ensuite, si le réchauffement global au cours du XX<sup>e</sup> siècle et sa nature anthropique dans la seconde partie de ce siècle sont maintenant un fait avéré [5], les données permettant d'établir ce type de diagnostics sont établies à partir de bases de données mondiales mensuelles à annuelles. Ces données masquent la diversité des évolutions vues à l'échelle régionale. Les diagnostics à l'échelle de notre pays sont les éléments clés de la réflexion autour de la mise en place des mesures d'adaptation : ils participent à la validation des modèles climatiques régionaux, ces derniers permettant de contraindre les modèles de calcul des impacts [11].

Enfin, les travaux sur l'insolation se situent dans la lignée des recommandations du GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat), à savoir « élargir les bases conventionnelles des études du climat » [5].

## 2. Les données instrumentales anciennes d'insolation

La recherche et la numérisation de données anciennes sont une priorité partagée par l'ensemble des services climatologiques dans le monde, comme en témoigne, par exemple, le projet DARE (*data rescue*) de l'OMM (Organisation météorologique mondiale). À Météo France, le programme s'est accéléré à partir de 1994, et continue depuis à être centralisé et animé par la direction de la climatologie. Sur une période de plusieurs décennies, les changements de définition et de capteur sont fréquents.

La durée d'insolation a d'abord été définie sommairement comme étant la durée pendant laquelle le soleil a brillé. Cette durée correspond à celle où le contour apparent du disque solaire est clairement visible. Plus tard, l'insolation a été définie comme étant la durée durant laquelle « les objets naturels opaques donnent lieu à des ombres portées nettement dessinées sur une surface horizontale » [10]. La durée d'insolation est actuellement définie de manière conventionnelle par la commission des instruments et méthodes d'observation (CIMO) de l'OMM (recommandation 10 de la 8<sup>e</sup> session CIMO, Mexico, 1981). Il s'agit du temps

pendant lequel l'éclairement énergétique du rayonnement solaire direct est supérieur à  $120 \text{ W m}^{-2}$ .

Les règles d'implantation des capteurs imposent maintenant un lieu parfaitement dégagé, d'où le soleil est visible dès que sa hauteur dépasse  $3^\circ$  au-dessus de l'horizon. Différents types de capteurs ont été utilisés au cours du temps. Les héliographes de type Campbell (1853) ou Jordan (1888), souvent en alternance, ont été majoritairement utilisés jusqu'à l'automatisation du réseau en 1985 et, avec elle, l'installation progressive de l'héliographe à fibre optique Cimel. Le dépouillement des bandes de carton de l'héliographe Campbell, sphère massive de verre focalisant les rayons solaires, conduisait à une précision de mesure quotidienne de l'ordre de 2 à 4 dixièmes d'heure (à comparer avec la résolution de la mesure d'un héliographe Cimel, 36 s).

## 3. Valorisation des données anciennes

### 3.1. Cadre général : des postes aux séries homogénéisées

La continuité de la mesure météorologique sur un même site est exceptionnelle sur une longue période, même si elle est souvent citée en exemple (Paris-Montsouris, Marseille-Observatoire). Pour obtenir un jeu conséquent de séries climatologiques, les opérations d'aboutement de mesures en différents postes météorologiques sont indispensables : on parle alors de série climatologique. Cette opération d'aboutement crée des ruptures dans la série. D'autres ruptures sont présentes dans la série ; elles peuvent être liées aux brusques modifications de l'environnement de mesure, aux changements de capteurs, aux changements de définition du paramètre, etc. La série climatologique brute peut être considérée comme la résultante de la superposition d'un signal climatique et d'effets de postes, ces derniers provenant de l'accumulation de ces différentes ruptures. Ces effets de poste doivent être supprimés avant de pouvoir prétendre à l'étude du signal climatique. La série débarrassée des effets de poste est appelée série homogénéisée.

Il existe différentes méthodes d'homogénéisation (voir, par exemple, [1]); la méthode utilisée à Météo France est celle définie par O. Mestre [8]. Les séries homogénéisées deviennent les candidates privilégiées pour l'étude des changements climatiques

en France [9]. Les 70 séries de températures homogénéisées ont permis de chiffrer le réchauffement en France au cours du XX<sup>e</sup> siècle à environ 1,0 °C, le réchauffement étant plus marqué pour les températures nocturnes que diurnes et présentant de fortes disparités régionales. La distribution spatiale de ces séries a permis des études sur la détection des changements climatiques à l'échelle régionale, dans le cadre desquelles on examine dans quelle mesure le signal observé « ressemble » au signal issu de la modélisation numérique [11,14].

### 3.2. Les séries brutes d'insolation

La création des premiers héliographes date du milieu du XIX<sup>e</sup> siècle, mais les premiers postes équipés en héliographe Campbell dont les relevés aient été conservés ont été, chronologiquement, Lyon et Perpignan en 1881, Paris en 1893, Besançon en 1894, le mont Aigoual en 1896 et Strasbourg en 1901. Quatorze postes supplémentaires ont été équipés en héliographes au cours de la décennie 1921–1931. La majorité d'entre eux présente des discontinuités dans l'emplacement du poste (Lyon, Nantes, Orléans, Paris, Perpignan, Le Puy, Strasbourg, Toulouse, Tours), des changements de capteurs et des périodes dépourvues d'observations, en particulier pendant la seconde guerre mondiale.

### 3.3. L'homogénéisation des séries d'insolation

L'homogénéisation à l'échelle mensuelle de ces données a été menée à partir des vingt séries brutes. La répartition régulière des postes sur le territoire a permis de prendre en compte et de traiter tous les postes pour lesquels un historique de l'instrumentation en place a pu être reconstitué. Des études préliminaires [8] ont montré la faisabilité de l'homogénéisation de telles séries et jeté les premières bases méthodologiques.

Les procédures de détection des ruptures ne sont réellement efficaces que lorsque les séries sont relativement bien corrélées entre elles, et donc lorsque l'échelle de traitement est adaptée à la variabilité spatiale du paramètre étudié. Malgré quelques séries disposant de mesures d'insolation au début du XX<sup>e</sup> siècle, l'homogénéisation n'a porté que sur la période 1931–2000.

Le positionnement des ruptures est parfois délicat à valider : lorsque les postes sont peu nombreux ou trop éloignés, lorsque les ruptures vues par la procédure statistique sont différentes de celles issues de l'examen des métadonnées (historique de l'instrumentation, de l'implantation).

La correction des valeurs mensuelles s'effectue ensuite à partir de coefficients correcteurs calculés annuellement : les valeurs annuelles servent à estimer un coefficient unique appliqué à chaque mois. Les séries d'insolation présentent chacune de une à six ruptures. Les procédures d'homogénéisation fournissent un ordre de grandeur des ruptures résiduelles pouvant subsister dans chacune des séries. Ces ruptures résiduelles sont de l'ordre de 2 à 3 % du cumul annuel, à comparer à la variabilité interannuelle, de l'ordre de 8 %. Les séries du mont Aigoual (s'arrêtant en 1967) et de Strasbourg (mesure interrompue de 1920 à 1949) ont participé à la phase de détection de rupture, mais n'ont pas été homogénéisées.

## 4. Études des séries homogénéisées d'insolation

### 4.1. Valeurs moyennes annuelles de l'insolation en France

L'insolation présente un maximum sur le pourtour méditerranéen et en Provence, le cumul annuel moyen d'ensoleillement y dépassant les 2500 h. Un maximum secondaire apparaît de la Gironde au Poitou. L'insolation diminue à mesure que l'on se rapproche du Nord du territoire, les minimums se situant à l'intérieur de la Bretagne, en Normandie, dans le Nord et le Nord-Est.

### 4.2. Évolution de l'insolation en France

#### 4.2.1. Cartographie des tendances

Une interpolation à l'aide de la fonction *spline* des tendances annuelles (pente de la droite de régression linéaire), calculées sur la période 1931–2000, permet de mettre en évidence un gradient relativement marqué selon un axe nord–sud (Fig. 1). Les tendances individuelles sont présentées dans le Tableau 1. Celles au nord de la Loire sont très homogènes, de l'ordre de –0,6 à –1,0 % par décennie (Tableau 1). Une série comme celle de Nantes a été corrigée de cinq ruptures de plus de 5 % en valeur absolue sur la période 1931–

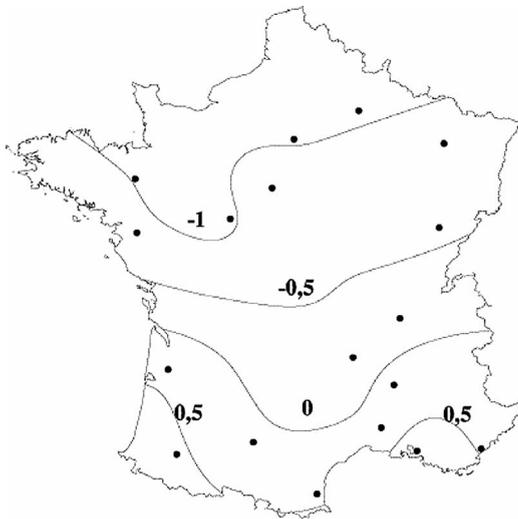


Fig. 1. Tendance de l'insolation en France sur la période 1931–2000 (% par décennie).

Fig. 1. Sunshine duration trends established for the 1931–2000 period (% by decade).

Tableau 1  
Tendances des 18 séries homogénéisées sur la période 1931–2000  
Table 1  
Trends of the 18 homogenised series for the 1931–2000 period

Série	Tendance annuelle (période 1931–2000, % par décennie)
Besançon	−0,6
Bordeaux	0,4
Lyon	−0,2
Marseille–Marignane	0,7
Montélimar	0,2
Nancy	−0,8
Nantes	−0,9
Nîmes	0,2
Orléans	−0,7
Paris	−1,1
Pau	0,6
Perpignan	0,4
Le Puy	−0,2
Reims	−1,1
Rennes	−1,0
Saint-Raphaël	0,5
Toulouse	0,1
Tours	−1,0

2000 ; la tendance sur la série brute serait de  $-2,0\%$  par décennie ( $-0,9\%$  sur la série homogénéisée).

Dans la moitié sud de la France, les tendances s'échelonnent de  $-0,2$  à  $+0,7\%$  par décennie entre

le centre de la France et l'extrême Sud. Sur la seconde moitié du XX<sup>e</sup> siècle, la baisse de l'insolation à La Rochelle a déjà été signalée [13]. À Marignane, la tendance est de  $+0,7\%$  par décennie. Avec un cumul annuel de l'ordre de 2800 h d'ensoleillement, cela représente une hausse de l'ordre de 140 h sur la période 1931–2000.

Le test de Spearman (corrélation des rangs) utilisé avec un seuil de confiance de 95 % permet d'évaluer la significativité des évolutions et montre que :

- les séries printanières font pratiquement toutes apparaître une baisse significative, excepté dans le Sud-Est de la France ;
- les séries estivales présentent un gradient nord-ouest à sud-est, de valeurs en baisse non significative sur le Nord et l'Ouest du pays, pour atteindre des valeurs en hausse non significative sur le Sud-Est du pays ;
- les séries hivernales présentent une évolution plus marquée, avec des valeurs en hausse sur tout le Sud de la France, dont six en hausse significative, le Nord du pays alternant en hausse ou en baisse non significative ;
- les séries automnales sont majoritairement en hausse non significative, excepté pour quatre d'entre elles, éparpillées sur le territoire, en baisse non significative.

#### 4.2.2. Insolation et température

Les travaux d'homogénéisation déjà effectués de manière totalement indépendante sur d'autres paramètres, en particulier sur les températures, ont permis de contrôler les séries d'insolation de différentes façons. La comparaison des séries homogénéisées peut être menée poste par poste ou moyennée sur l'ensemble des postes. Cette seconde solution est ici présentée et les séries d'amplitude diurne de température et d'insolation ont été élaborées de manière identique à partir des 18 postes homogénéisés, en considérant chaque année de la période 1931–2000.

La corrélation entre les deux séries de température minimale et d'insolation est quasi nulle ; elle est de  $+0,5$  entre les séries de température maximale et d'insolation et de  $+0,86$  entre les séries d'amplitude diurne et d'insolation. La Fig. 2 présente l'évolution des cumuls d'insolation annuelle comparée à celle d'amplitude diurne des températures.

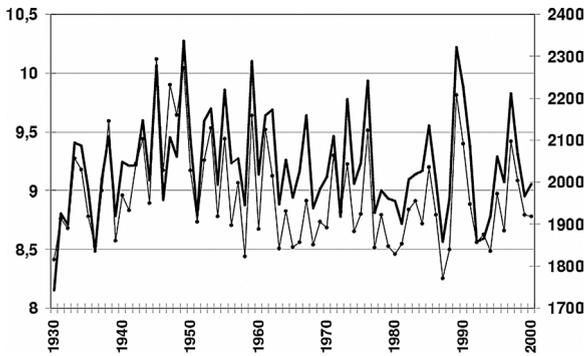


Fig. 2. Évolution annuelle de la moyenne de l'amplitude diurne de température ( $^{\circ}\text{C}$ ) et du cumul de durée d'insolation (heures) en France (insolation en gras, axe de droite).

Fig. 2. Evolution of mean diurnal temperature range ( $^{\circ}\text{C}$ ) annual amount of sunshine duration (hours) in France (sunshine duration in heavy line, right axis).

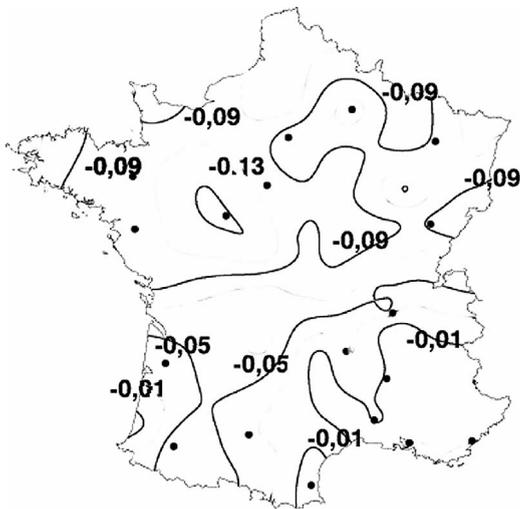


Fig. 3. Tendence de l'amplitude diurne de température en France sur la période 1931–2000 ( $^{\circ}\text{C}$  par décennie).

Fig. 3. Diurnal temperature range trends established for the 1931–2000 period ( $^{\circ}\text{C}$  by decade).

Les tendances annuelles d'insolation calculées sur la période 1931–2000 présentent un gradient nord–sud analogue à celui de l'amplitude diurne de température. Sur la moitié nord de la France, on relève sur la Fig. 3 une tendance à la diminution de l'amplitude diurne de la température (les températures minimales ayant plus augmenté que les maximales [9]) et, par ailleurs, une tendance à la baisse du cumul annuel de l'insolation (Fig. 1). Dans la moitié sud, on constate une hausse

relativement faible du cumul annuel d'insolation en chaque poste situé au sud du Puy, en Haute-Loire, et l'amplitude diurne de température est en très légère hausse, mais uniquement dans le Sud-Est de la France.

Sur le plan saisonnier, on peut aussi remarquer que les séries homogénéisées d'amplitude diurne de température sur une même période font également apparaître, au printemps, une baisse sensible lorsqu'elles sont traitées sur la période 1931–2000. Enfin, on notera également, sur la Fig. 2, la baisse de l'insolation et donc du rayonnement direct [3] au cours des deux années, 1992 et 1993, qui ont suivi l'éruption du Pinatubo.

## 5. Discussion et conclusion

L'opération d'homogénéisation des séries d'insolation menée sur la période 1931–2000 permet de disposer aujourd'hui de 18 séries, assez bien réparties sur tout le territoire métropolitain. Les séries homogénéisées mettent en évidence l'évolution de l'insolation sur le territoire selon un gradient nord–sud : valeurs en baisse dans la moitié nord de la France, évoluant progressivement vers des valeurs à la hausse dans le Sud de la France. L'homogénéisation des séries d'insolation pourra éventuellement être améliorée dans les années à venir, trois facteurs pouvant susciter cette démarche : les résultats de la recherche de données anciennes, la nécessité de prolonger les séries avec les données récentes, les progrès des méthodes d'homogénéisation (voir, par exemple, [4]).

L'étude de l'insolation est intéressante, car les variations du rayonnement solaire en surface peuvent être reliées à différents phénomènes, dont certains peuvent avoir une origine anthropique, comme, par exemple [7] :

- (1) la variation de la couverture nuageuse en liaison avec le réchauffement global : le GIEC présente comme probable une hausse de 2 % de la nébulosité totale au-dessus des terres émergées durant le XX<sup>e</sup> siècle ;
- (2) le pouvoir réfléchissant de certains aérosols, comme les sulfates ;
- (3) l'interaction aérosols/nuage, les aérosols agissant comme des noyaux de condensation et pouvant également modifier la durée de vie et les propriétés optiques des nuages.

Le lien entre amplitude diurne de température et couverture nuageuse est bien connu : les nuages limitent le refroidissement nocturne et, en journée, le rayonnement solaire reçu, contribuant ainsi à l'effet parasol [6]. Le dernier rapport du GIEC [5] indique une hausse de la couverture nuageuse en Europe au cours du XX<sup>e</sup> siècle, associée, de manière cohérente, à une baisse de l'amplitude diurne de température. Le lien entre rayonnement et amplitude diurne de température est également fort, à tel point que l'amplitude diurne de température a pu être utilisée pour l'estimation du rayonnement solaire reçu [2]. Très logiquement, les corrélations entre les séries moyennes d'insolation et d'amplitude diurne de température sont élevées (0,86).

La similitude des gradients d'amplitude diurne de température et d'insolation permet de conforter le diagnostic porté sur le paramètre amplitude diurne de la température dans la mesure où :

- les tendances d'amplitude diurne présentent sur la période 1931–2000 le même gradient nord–sud ;
- les résultats ont été, aux méthodes d'homogénéisation près, établis de manière indépendante.

Il est difficile, à ce stade, de privilégier tel ou tel mécanisme, et encore plus d'attribuer une origine anthropique aux évolutions constatées de l'insolation. Compte tenu des mécanismes précédemment décrits, les résultats montrent l'intérêt de l'étude d'une hypothèse de modification de la couverture nuageuse, en relation avec les gradients d'amplitude diurne de température : la baisse de l'insolation sur les deux tiers nord du pays pourrait être liée à une augmentation de la couverture nuageuse.

Les évolutions des paramètres ne se ressemblent pas systématiquement, en particulier à l'échelle saisonnière ou régionale : ainsi, le Sud-Ouest du pays présente une augmentation de l'insolation et une baisse de l'amplitude diurne de température. La comparaison des résultats sur l'insolation à d'autres jeux de séries homogénéisées que les températures est plus délicate. Si on remarque que les précipitations annuelles sont en hausse, excepté vers le sud [9], on peut également objecter que la saison des hausses de précipitations (l'hiver) est celle où l'insolation présente le plus de séries à la hausse.

Les mécanismes en jeu expliquant les évolutions régionales au cours du XX<sup>e</sup> siècle sont à la fois multiples et complexes, et n'agissent sans doute pas de manière uniforme selon la période ou la saison considérée. Une étude récente [12] a montré que, lorsque l'on cherche à expliquer les gradients de températures minimales estivales, d'autres types d'hypothèses que celles relatives aux nuages pouvaient aussi être avancées (évapotranspiration réduite et assèchement des sols). Elle montrait également l'intérêt de la modélisation numérique pour la compréhension des mécanismes en jeu et de leurs contributions respectives.

## Références

- [1] H. Alexandersson, A homogeneity test applied to precipitation data, *J. Climatol.* 6 (1986) 661–675.
- [2] K.L. Bristow, G.S. Campbell, On the relationship between incoming solar radiation and daily maximum and minimum temperature, *Agric. For. Meteorol.* 31 (1984) 159–166.
- [3] L. Gu, D.D. Baldocchi, S.C. Wofsy, J.W. Munger, J.J. Michalsky, S.P. Urbanski, T.A. Boden, Response of a Deciduous Forest to the Mount Pinatubo Eruption: Enhanced Photosynthesis, *Science* 299 (2003) 2035–2038.
- [4] H. Caussinus, O. Mestre, Detection and correction of artificial shifts in climate series, *Appl. Stat.* 53 (3) (2004) 405–425.
- [5] J.T. Houghton, Y. Ding, D.J. Griggs, M. Noguer, P.J. Van der Linden, D. Xiaosu, *Climate Change 2001: The Scientific Basis, Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of IPCC*, Cambridge University Press, Cambridge, 2001.
- [6] R. Kandel, *Les eaux du ciel*, Hachette Sciences, 1998.
- [7] B.G. Liepert, Observed reductions of surface solar radiation at sites in the United States and worldwide from 1961 to 1990, *Geophys. Res. Lett.* 29 (10) (2002).
- [8] O. Mestre, *Méthodes statistiques pour l'homogénéisation de longues séries climatiques*, thèse, université Paul-Sabatier (Toulouse-3), 2000.
- [9] J.-M. Moisselin, M. Schneider, C. Canellas, O. Mestre, Changements climatiques en France au XX<sup>e</sup> siècle. Étude de longues séries de données homogénéisées françaises de précipitations et températures, *La Météorologie* 38 (2002) 45–56.
- [10] C. Perrin de Brichambaut, *Rayonnement solaire et échanges radiatifs naturels*, Gauthier-Villars, Paris, 1963.
- [11] S. Planton, La régionalisation des changements climatiques, *Lettre PIGB-PMRC* 14 (2002) 23–28.
- [12] S. Planton, B. Spagnoli, Quand la simulation numérique reproduit et explique le réchauffement des nuits d'été, *La Météorologie* 42 (2003) 4–5.
- [13] E. Soletchnik, Impact du changement climatique sur un écosystème estuarien: le bassin de Marennes Oléron, *Lettre PIGB* 12 (2001) 37–41.
- [14] B. Spagnoli, S. Planton, M. Déqué, O. Mestre, J.-M. Moisselin, Detecting climate change at a regional scale, 2002: the case of France, *Geophys. Res. Lett.* 29 (10) (2002).