

# Les changements climatiques en France au XX<sup>e</sup> siècle

## Étude des longues séries homogénéisées de données de température et de précipitations

Jean-Marc Moisselin<sup>(1)</sup>, Michel Schneider<sup>(1)</sup>, Claire Canellas<sup>(1)</sup> et Olivier Mestre<sup>(2)</sup>

(1) Météo-France

Direction de la climatologie  
42, avenue Gaspard-Coriolis  
31057 Toulouse Cedex

(2) Météo-France

École nationale de la météorologie  
Courrier électronique : jean-marc.moisselin@meteo.fr

### Résumé

L'effort de recherche de données anciennes et d'homogénéisation des longues séries de données climatologiques s'est accéléré depuis 1994 à Météo-France. On a pu ainsi constituer une base de séries mensuelles homogénéisées de températures (minimales et maximales) et de précipitations en France couvrant le XX<sup>e</sup> siècle. La hausse des températures moyennes au XX<sup>e</sup> siècle est sensiblement plus marquée sur la France que celle établie par le Giec au niveau planétaire. Des particularités régionales apparaissent : un réchauffement plus marqué pour les minimales sur l'ouest du territoire et un gradient nord-sud du réchauffement pour les maximales. Les précipitations présentent des tendances d'évolution plus contrastées, mais généralement à la hausse. Enfin, l'indice de sécheresse de De Martonne présente des hausses faibles, sauf au sud de la France où se dessine une accentuation de la sécheresse.

### Abstract

Climate change over France during the 20th century; a study of long-term homogenized data of temperature and rainfall

Since 1994, Meteo-France has put an extra effort into data rescue and homogenization of long series of climatological data. That allowed the construction of a database of homogeneous monthly series of temperature (minimum and maximum) and rainfall over France for the 20th century. The positive trend of mean temperature is significantly greater over France than the one established by IPCC for the whole planet. The regional pattern of warming reveals more marked rises in minimum temperatures in Western France and a North-South gradient for the increase of the maximum temperatures. Rainfall exhibits more contrasted but generally positive trends. The evolution of the De Martonne's dryness index shows a weak positive trend, save in Southern France where there appears to be an increase in drought conditions.

Le Groupe intergouvernemental d'experts sur l'évolution du climat (Giec, ou IPCC en anglais) a pour mission d'évaluer régulièrement l'état des connaissances scientifiques, techniques et économiques relatives à l'évolution du climat. Il constitue l'instance de référence en matière de changements climatiques. Son troisième rapport a été adopté à Shanghai en janvier 2001 ; parmi les conclusions, il apparaît que le réchauffement planétaire au cours du XX<sup>e</sup> siècle et son origine principalement anthropique sur les cinquante dernières années sont maintenant des faits avérés (Houghton et al., 2001). La tendance des températures moyennes annuelles planétaires à 2 mètres est estimée à  $0,6 \pm 0,2$  °C sur le siècle, avec une confiance supérieure à 99 %.

Ce réchauffement n'est pas uniforme, ni dans l'espace, ni dans le temps : il s'est principalement produit lors des périodes 1910-1945 (alors concentré sur l'Atlantique nord et ses environs) et 1976-2000 (surtout aux moyennes et hautes latitudes continentales de l'hémisphère nord en hiver et au printemps, excepté le nord-ouest de l'Atlantique). L'analyse des données paléoclimatiques montre que l'intensité du réchauffement au cours du  $xx^e$  siècle est sans précédent depuis mille ans, et sans doute au-delà. La période 1990-2000 constitue la décennie la plus chaude, le record ayant été atteint en 1998, lors du « El Niño du siècle ».

En ce qui concerne les précipitations, leur augmentation aux hautes et moyennes latitudes de l'hémisphère nord est comprise entre 5 et 10 %, avec une confiance comprise entre 90 et 99 %.

Ces diagnostics essentiels du Giec sont établis à partir d'une climatologie planétaire qui souffre d'une faible densité de stations et d'une résolution assez grossière, y compris sur l'Europe.

Depuis 1994, Météo-France a accéléré le vaste travail de collecte et d'homogénéisation de données anciennes qui permet d'obtenir des tendances climatiques à une échelle plus fine, et ainsi de mieux cerner l'aspect régional des évolutions du climat. De même que les données issues des climatologies mondiales permettent de valider les modèles planétaires de climat, les climatologies à une échelle plus fine permettent de valider les modèles régionaux de climat, comme Arpège-climat dans sa version à maille variable. La haute résolution de ce type de modèle (avec une maille de l'ordre de 50 kilomètres sur la zone d'intérêt) présente l'avantage de mieux décrire le relief et les effets régionaux. Autre intérêt des données climatologiques homogénéisées : des utilisateurs potentiels du monde économique se sont récemment révélés, comme les assureurs qui en ont besoin pour l'établissement des « dérivés climatiques ».

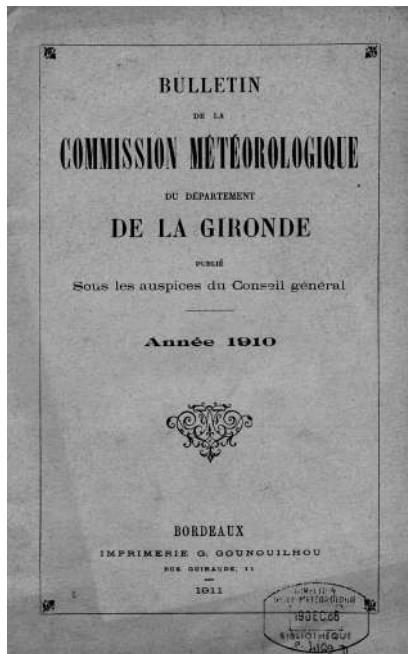
Dans cet article, après avoir rappelé l'effort de collecte et d'homogénéisation de données anciennes mené par Météo-France, on établit les principaux diagnostics climatiques à l'échelle du territoire français pour la température, pour les précipitations et enfin pour l'indice de sécheresse de De Martonne.

## La collecte et l'homogénéisation des longues séries climatologiques

Si les premières mesures météorologiques datent de la fin du  $xvii^e$  siècle, il a fallu attendre le milieu du  $xix^e$  siècle pour disposer en France d'un réseau correctement organisé et de mesures régulières dans l'espace et dans le temps. Pendant longtemps cependant, les observations antérieures à 1949 n'ont pas été disponibles sous forme numérisée. L'effort considérable de collecte et de numérisation s'est accéléré à Météo-France à partir de 1994 pour enrichir le patrimoine climatologique français. L'accent a été mis sur les moyennes mensuelles des températures minimales et maximales et sur les cumuls mensuels de précipitations, en privilégiant les données de la période 1880-1950. Le choix d'un pas de temps mensuel a visé à anticiper les problèmes d'homogénéité des séries, que l'on ne peut espérer résoudre qu'à cette échelle mensuelle.

L'observation météorologique est à la base de toutes les études climatologiques. Ici, un observateur relève la température dans un abri météo. (Photo Météo-France, V. Paul)





L'étude des évolutions climatiques à partir de longues séries de données brutes est en effet impossible, que ce soit à cause des interruptions des mesures sur certains postes, des ruptures liées aux changements de capteur, de la modification de l'environnement du poste ou de celle des pratiques d'observation. L'homogénéisation des longues séries est donc une étape indispensable. Le climatologue finlandais Heino a établi pour chaque paramètre l'importance respective des différentes sources de ruptures (Heino, 1996). Le changement d'emplacement du poste est la principale source pour la plupart des paramètres : les ruptures sont alors qualifiées de « très importantes ». Or ce changement est pratiquement présent au moins une fois dans les séries centenaires, puisque la continuité de la mesure sur le XX<sup>e</sup> siècle est exceptionnelle en France (Paris-Montsouris et Marseille-observatoire constituent des exceptions) et qu'il a fallu le plus souvent agréger les données de postes voisins. Les changements de méthode de mesure, aux premiers temps du réseau surtout, sont potentiellement la cause de ruptures importantes. L'Organisation météorologique mondiale (OMM) et la Direction des systèmes d'observation (DSO) de Météo-France ont mené des campagnes ou des expériences de comparaison de capteurs et d'abris. Ainsi, la comparaison des abris effectuée par la DSO montre que l'abri en vigueur en 1896 présente pour la mesure de température un biais positif qui atteint 2 °C pour un vent inférieur à 1 m/s (Lefebvre, 1999). Ce biais est supérieur aux tendances que l'on met en évidence sur un siècle. Aussi, l'amplitude de cette rupture, si elle n'était pas corrigée, rendrait-elle impossible l'étude du signal climatique.

Le programme Prodiges<sup>(1)</sup>, dont la base statistique a été développée à la Direction de la climatologie de Météo-France (Mestre, 2000), est utilisé pour homogénéiser les longues séries de données climatiques. L'homogénéisation de chaque série est réalisée en considérant un voisinage glissant constitué d'une vingtaine de séries correspondant à des postes géographiquement proches. On travaille sur des séries de différences pour les températures et sur des séries de rapports pour les précipitations. L'homogénéisation s'appuie sur deux phases distinctes : l'identification des ruptures d'homogénéité dans les séries, d'une part, et l'homogénéisation de ces séries proprement dite, d'autre part. Les deux phases reposent chacune sur leur propre méthode statistique, la condition commune pour leur mise en application étant la disponibilité de séries « climatiquement » voisines.

Exemple de bulletin comportant des données climatologiques anciennes. Pour étudier des tendances climatiques sur de longues séries, il faut d'abord numériser ce genre de documents. (Document Météo-France)

Ainsi, la détection des ruptures n'est pas réalisée sur la série traitée elle-même, mais sur la comparaison (par différence ou par rapport) de celle-ci avec ses voisines (figure 1a). En pratique, il est extrêmement délicat de positionner d'emblée l'ensemble des ruptures, les plus marquées ayant parfois tendance à masquer les plus faibles. Aussi opère-t-on par cycles de détection-homogénéisation successifs : une fois les ruptures nettes validées, les séries sont homogénéisées, puis une nouvelle détection leur est appliquée, permettant de localiser les ruptures a priori moins évidentes. L'itération est interrompue une fois disparu tout doute de rupture (figure 1b). Les séries peuvent alors être considérées comme homogénéisées, cette dernière

notion restant toutefois relative puisque liée à la notion d'« amplitude minimale des ruptures détectables », un diagnostic estimé par la méthode. Les métadonnées<sup>(2)</sup> sont utilisées en cours de cycle pour préciser les dates de rupture série par série.

L'intérêt de la méthode utilisée à Météo-France est à la fois de ne pas faire appel à une série régionale ou à une série de référence – en général, une moyenne de séries – supposée sans rupture, et de pouvoir détecter et corriger un nombre a priori inconnu de ruptures. À l'inverse, la méthode d'Alexandersson (1986) s'appuie sur une série de

(1) Prodiges : Procédure de détection d'hétérogénéités glissées dans un échantillon.  
 (2) On appelle métadonnées les « données qui décrivent les données », c'est-à-dire les informations relatives à tous les changements ayant affecté les postes de mesure : implantation, modification de capteurs, etc.

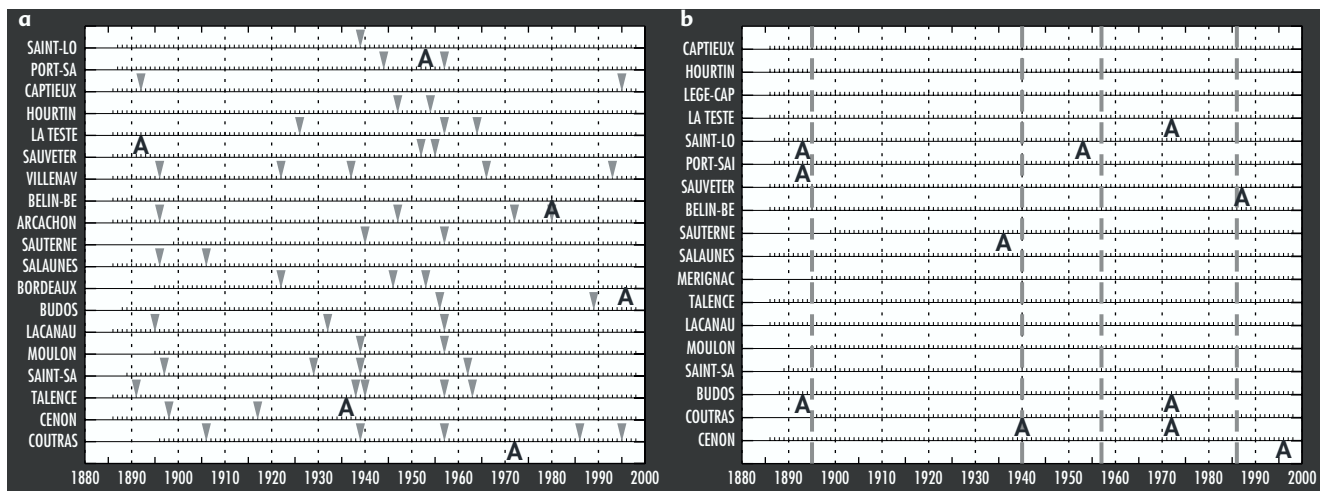


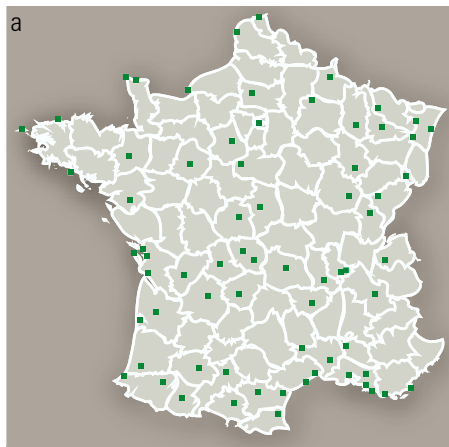
Figure 1 - Homogénéisation des séries climatiques : exemple des précipitations à Bayon-sur-Gironde.

Symboles utilisés :  $\nabla$  : rupture entre la série de Bayon-sur-Gironde et une série voisine. A : point aberrant (variation notable et isolée du comportement de la série des rapports).  $\mid$  : dates des ruptures validées par l'expert, puis corrigées par Prodigé.

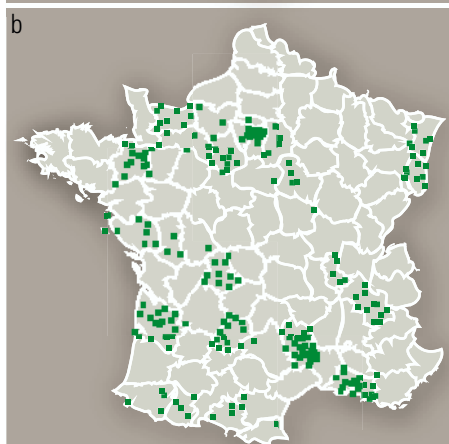
Figure 1a - Recherche des ruptures d'homogénéité dans la série pluviométrique de Bayon-sur-Gironde par comparaison aux séries voisines. Un alignement vertical de  $\nabla$  localise une rupture dans la série considérée. Figure 1b - La détection appliquée aux séries homogénéisées ne fait plus apparaître aucune rupture dans les séries de comparaison, la série de Bayon-sur-Gironde peut être considérée comme homogénéisée.

référence régionale constituée par la moyenne pondérée de trois à cinq séries proches et bien corrélées à la série à étudier. La pondération est fournie par le carré du coefficient de corrélation linéaire entre la série à étudier et chacune des séries constituant la référence. Les anomalies présentes dans cette série ont alors un effet limité, mais le classement en fonction du coefficient de corrélation peut être perturbé par la présence de ruptures (Mestre, 2000). Le test d'Alexandersson repose sur la procédure d'Hawkins (1977) ; il est très utilisé en climatologie, parce qu'il est d'usage relativement simple et que la méthode de correction des ruptures d'homogénéité est assez rapide et bien adaptée à la détection de plusieurs ruptures sur une base empirique (Alexandersson et Moberg, 1997). La méthode de correction appliquée ensuite repose, elle aussi, sur l'existence d'une série de référence.

Figure 2 - Répartition géographique des 70 séries centenaires homogénéisées de température (2a)...



... et des 226 séries centenaires homogénéisées de précipitations (2b).



À Météo-France, les séries homogènes sont disponibles depuis le printemps 2001. On dispose maintenant d'une couverture acceptable du territoire en séries thermométriques centenaires (figure 2a) :  
 - 70 séries de températures minimales sur 52 départements, pour lesquelles 382 ruptures ont été détectées et corrigées sur le XX<sup>e</sup> siècle ;  
 - 70 séries de températures maximales sur 52 départements, pour lesquelles 369 ruptures ont été détectées et corrigées sur le XX<sup>e</sup> siècle.

Pour les précipitations, la disponibilité et la qualité des données brutes limitent la répartition à 40 départements (figure 2b). Cela représente 226 séries centenaires pour lesquelles 977 ruptures ont été détectées et corrigées sur le XX<sup>e</sup> siècle.

Pour certaines périodes critiques (années 1920, guerres) présentant beaucoup de données manquantes, une reconstitution des données a été nécessaire. Pour la correction

et la reconstitution des données, on utilise un modèle linéaire à deux facteurs avec pondération, très similaire à un modèle d'analyse de la variance. Ce modèle permet, une fois connues les dates de rupture sur les différentes séries, d'estimer les contributions respectives de l'effet du facteur climatique et de celui des changements ayant pu affecter chaque série. La formulation employée permet d'estimer ces différents facteurs, même en présence de données manquantes. L'estimation du signal climatique ainsi réalisée est ensuite employée pour reconstituer les données manquantes.

## L'évolution de la température

### Comparaison à une climatologie planétaire

On examine tout d'abord l'évolution de la température en France au  $xx^e$  siècle, à l'aide des 70 séries homogénéisées de moyennes mensuelles de température minimale et de température maximale.

Avant d'étudier les tendances du climat à l'échelle régionale, il convient de vérifier que l'on retrouve, en utilisant les séries françaises homogénéisées, une partie des tendances climatiques détectées à plus grande échelle. Malgré le besoin et l'utilité reconnus de climatologies planétaires, peu d'organismes se sont consacrés à leur élaboration. La température de surface au-dessus des continents a été notamment étudiée par la Climatic Research Unit de l'université d'East Anglia (Norwich, Royaume-Uni). D'autres climatologies terrestres existent et ces données ont été associées à des données marines pour établir les diagnostics du Giec.

Nous prenons comme climatologie planétaire de référence celle de Jones et al. (2001), qui repose à la fois sur des données climatologiques terrestres et marines<sup>(1)</sup>. L'avantage de cette climatologie est de présenter moins de données mensuelles manquantes sur la

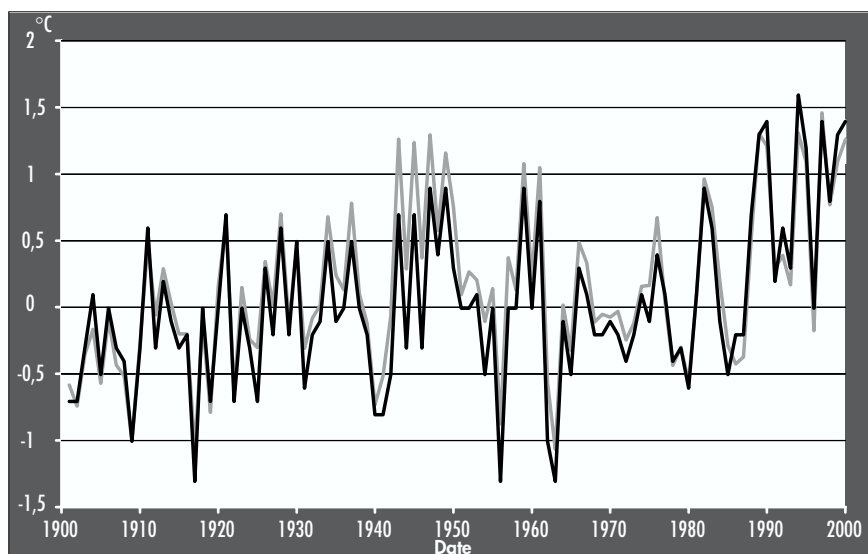


Figure 3 - Évolution de 1901 à 2000 des anomalies par rapport à la période 1961-1990 de la température moyenne annuelle (en °C) au point considéré. Comparaison des anomalies de Jones et al. (2001), en gris, et de Météo-France, en noir.

zone d'intérêt que la climatologie purement terrestre établie par les mêmes auteurs. La climatologie mixte est obtenue sur une grille planétaire de 5 degrés de latitude par 5 degrés de longitude. On répertorie ci-après quelques-unes des différentes étapes qui ont permis à Jones et al. d'éliminer ou de lisser les ruptures et de rejeter les données aberrantes :

- un contrôle subjectif local des valeurs des séries (Jones et al., 1999) ;
- des opérations de moyenne lors du passage en points de grille ;
- un contrôle spatial du point de grille avec les points de grille qui l'entourent ;
- un contrôle de la valeur du point de grille mois par mois (écart à la moyenne) ;
- l'étude des anomalies de température par rapport à une période donnée (1961-1990), plutôt que des valeurs brutes.

Une méthode originale de correction a été également appliquée pour limiter les variations artificielles de variance liées aux variations du nombre de stations utilisées pour calculer la valeur aux différents points de grille.

Nous prenons comme référence la série de Jones et al. (2001) des anomalies par rapport à la période 1961-1990 des températures moyennes (demi-somme des températures minimale et maximale) au point de coordonnées 47° 30' N et 2° 30' E. Parallèlement, on moyenne l'ensemble des 19 séries homogénéisées de Météo-France disponibles à l'intérieur du carré de 5 degrés de côté englobant ce point. Le barycentre de ces séries est situé au point de coordonnées 47° 9' N et 2° 7' E, qui est très proche du point de grille de Jones et al. On compare les deux anomalies sur la période 1901-2000 (figure 3).



(1) La climatologie utilisée comme référence est disponible à l'adresse Internet : [\[www.cru.uea.ac.uk/cru/data/\]](http://www.cru.uea.ac.uk/cru/data/) (fichier HadCRUT).

L'accord entre les deux séries d'anomalies est très bon, le coefficient de corrélation étant de 0,95. On remarque cependant que les anomalies de la climatologie de Jones et al. sont souvent plus chaudes, surtout pendant la période 1940-1950 qui présente généralement de nombreuses reconstitutions de données.

## Cartographie des tendances annuelles

On considère maintenant les **tendances** des 70 séries centenaires de température de Météo-France, la tendance étant définie comme la pente de la droite de régression de la température tracée en fonction du temps. La cartographie des tendances des températures moyennes montre des tendances plus élevées que celles calculées au niveau planétaire (Houghton et al., 2001) ; en outre, ces tendances sont plus marquées sur le sud-ouest du territoire (figure 4).

Cependant, cette cartographie apparaît comme la superposition de deux signaux présentant des caractéristiques distinctes, ce dont on s'aperçoit en dressant la cartographie des tendances des températures minimales (figure 5a) et maximales (figure 5b). Les températures minimales sont plus en hausse (de 0,7 à 1,7 °C/siècle) que les maximales (de 0 à 1,3 °C/siècle). Cette différence de comportement entre températures minimales et maximales est cohérente avec les conclusions du Giec, qui évoquent une hausse deux fois plus grande des températures minimales continentales lors de la seconde moitié du xx<sup>e</sup> siècle (Houghton et al., 2001).

La hausse des températures minimales présente un gradient est-ouest, tandis que celle des maximales présente un gradient nord-sud. Bien que l'interprétation de ces résultats soit délicate, une explication généralement avancée pour le gradient des tendances des minimales est l'accroissement de la nébulosité sur les façades océaniques – conduisant à une augmentation plus nette des minimales sur l'ouest de la France –, une caractéristique que présentent les modèles numériques de climat. Une première étude menée à Météo-France (Spagnoli, 2001 ; Spagnoli et al., 2002) a permis de mettre en évidence une similitude de comportement entre l'évolution des températures minimales estivales en France et celle obtenue par les simulations du modèle Arpège-climat du Centre national de recherches météorologiques.

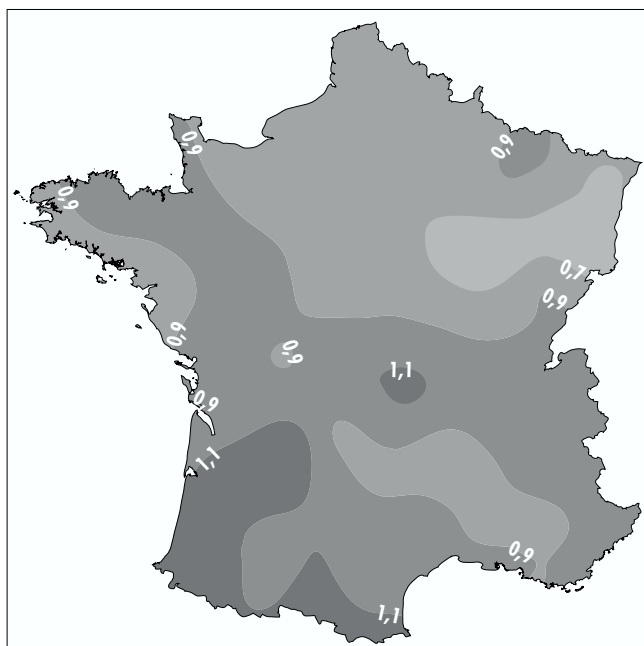


Figure 4 - Cartographie des tendances 1901-2000 (en °C/siècle) de la température moyenne (à partir de 70 séries).

Figure 5a - Cartographie des tendances 1901-2000 (en °C/siècle) de la température minimale (à partir de 70 séries homogénéisées de températures minimales).

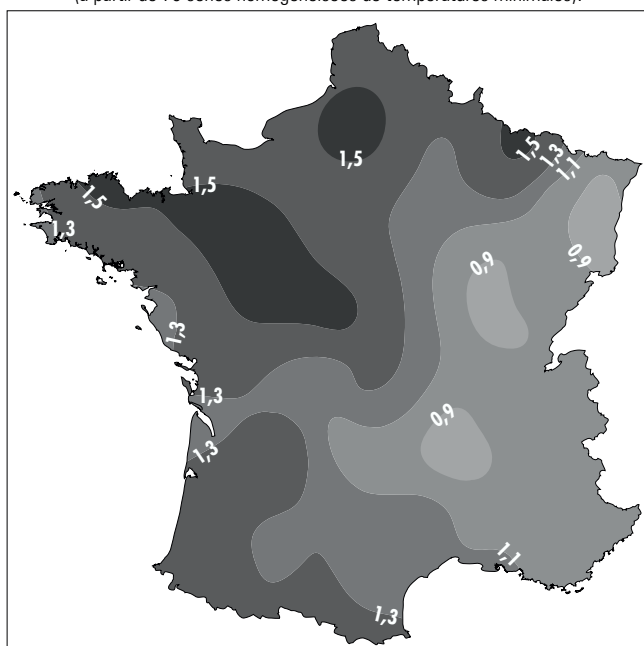
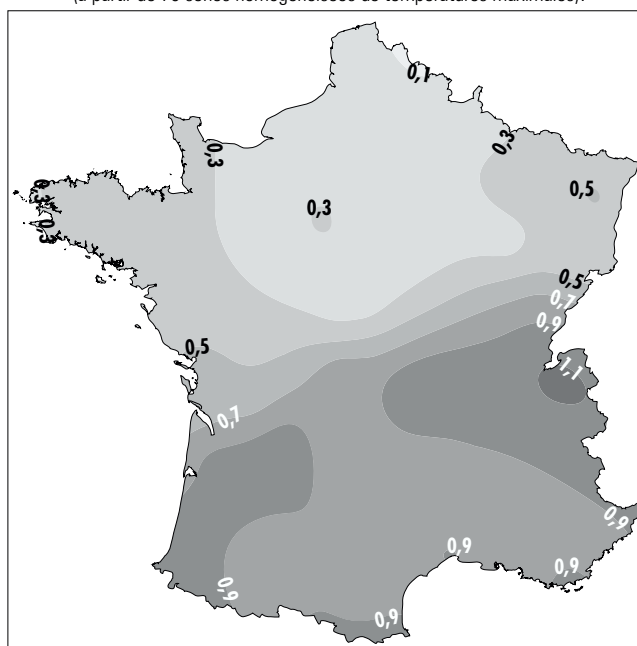


Figure 5b - Cartographie des tendances 1901-2000 (en °C/siècle) de la température maximale (à partir de 70 séries homogénéisées de températures maximales).



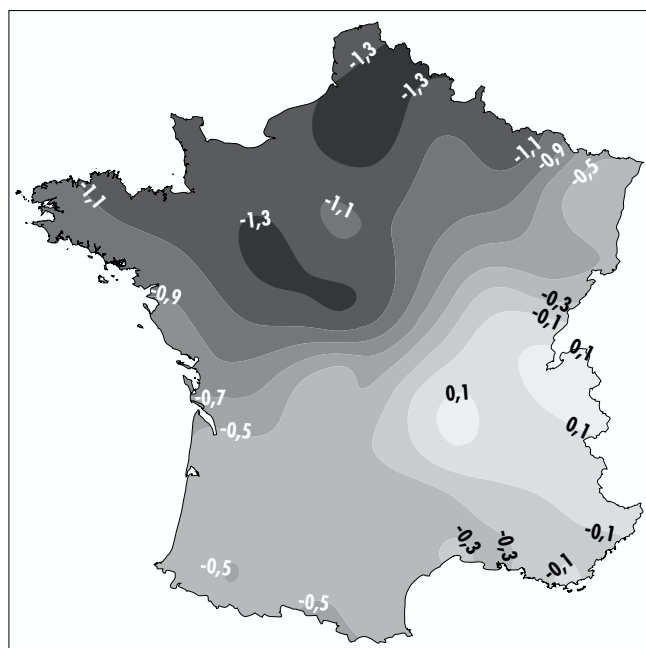


Figure 6 - Cartographie des tendances 1901-2000 (en °C/siècle) de l'amplitude diurne de la température (à partir de 70 séries).

On doit aussi noter que les tendances séculaires obtenues sur la température sont presque partout supérieures aux amplitudes des ruptures pouvant subsister dans les séries, amplitudes qui sont de l'ordre de 0,2 °C.

Pour mieux situer l'ampleur du réchauffement séculaire en France, on peut faire l'analogie avec ce que donnerait un déplacement en latitude du climat. Si, par exemple, le réchauffement obtenu sur un siècle à Limoges équivaut à la différence moyenne de température entre Limoges et Toulouse, on peut comparer ce réchauffement à Limoges à un déplacement du climat toulousain vers le nord, déplacement dont l'amplitude correspond à la différence de latitude entre Toulouse et Limoges. Considérant les gradients latitudinaux moyens de la température en France, on indique dans le tableau 1 les distances caractéristiques de déplacement du climat à associer au réchauffement des

températures minimales, maximales et moyennes. On retiendra l'ordre de grandeur de 200 kilomètres pour le déplacement du climat vers le nord au cours du XX<sup>e</sup> siècle en France.

En liaison avec ce qui précède, l'évolution de l'**amplitude diurne de la température** (différence entre la température maximale et la température minimale) montre une baisse spectaculaire, surtout sur le nord et le nord-ouest du territoire (figure 6). Le contraste diurne tend donc à diminuer en France au cours du XX<sup>e</sup> siècle, hormis quelques noyaux de hausse sur la région Rhône-Alpes.

Tableau 1 - Analogie entre l'ordre de grandeur des tendances séculaires moyennes de la température minimale Tn, de la température maximale Tx et de la température moyenne Tm et les gradients latitudinaux de température.

	Tn	Tx	Tm
Réchauffement moyen (°C/siècle) en France, calculé d'après les cartes précédentes	1,2	0,6	0,9
Gradient nord-sud de la température (°C/100 km) en France <sup>(*)</sup>	0,33	0,65	0,49
Déplacement équivalent du climat vers le nord (km/siècle)	360	90	180

(\*) Ce gradient est calculé à l'aide de 10 571 points de mesure d'altitude inférieure à 500 mètres, reconstitués par la méthode Aurelhy (Bénichou et Le Breton, 1987) à partir de 660 séries de température sur la période 1961-1990.

### Significativité statistique des évolutions

On s'intéresse maintenant à la significativité statistique (pour une confiance de 95 %) des hausses de température, en examinant les valeurs du coefficient de Spearman (corrélation des rangs). Pour le calcul de ce coefficient, les températures originales  $x_i$  sont remplacées par le rang  $y_i$  qui leur est attribué lorsqu'on les range par ordre croissant. Le coefficient de Spearman, coefficient de corrélation  $\rho$  entre les séries  $y_i$  et  $i$ , peut se calculer au moyen de la formule :

$$\rho = 1 - \frac{6 \sum_{i=1, n} (y_i - i)^2}{n(n^2 - 1)}$$

Un coefficient de +1 signifie que chaque valeur est supérieure à la précédente et un coefficient de -1 que chaque valeur est inférieure à la précédente. À la différence de la tendance, on ne cherche pas à imposer la droite comme modèle d'évolution. Un test de Student permet de décider si la valeur de  $\rho$  est significative ou pas au seuil de confiance de 95 %. Le tableau 2 donne la répartition entre hausses et baisses, significatives ou pas au sens du coefficient de Spearman au seuil de 95 %, pour les divers paramètres liés à la température sur la période 1901-2000.



Tableau 2 - Répartition des coefficients de Spearman sur les 70 séries de températures homogénéisées. Pourcentages exprimés par rapport au nombre total de séries pour les séries de température minimale Tn, de température maximale Tx, de température moyenne Tm et d'amplitude diurne Ad.

	Tn	Tx	Tm	Ad
Hausse significative (%)	100	61	100	0
Hausse non significative (%)	0	39	0	9
Baisse non significative (%)	0	0	0	21
Baisse significative (%)	0	0	0	70

Le réchauffement en France au XX<sup>e</sup> siècle est bien un signal fort. Les températures minimales sont en hausse significative partout, les températures moyennes également. Les maximales sont toutes en hausse, une majorité de ces hausses étant significatives. L'amplitude diurne sur le territoire est en baisse significative sur plus de deux tiers des séries.

## Répartition saisonnière des évolutions

Tableau 3 - Répartition des coefficients de Spearman saison par saison sur les 70 séries homogénéisées de température minimale.

	Printemps	Été	Automne	Hiver
Hausse significative (%)	87	100	94	66
Hausse non significative (%)	13	0	6	34
Baisse non significative (%)	0	0	0	0
Baisse significative (%)	0	0	0	0

Pour les températures minimales (tableau 3), il n'y a aucune saison où l'on trouve des séries à la baisse, ce qui illustre à nouveau la vigueur de l'accroissement des minimales au cours du XX<sup>e</sup> siècle en France. En été, il n'y a que des hausses significatives, alors qu'en automne et au printemps les hausses significatives sont largement majoritaires. L'hiver se distingue par un pourcentage plus faible de hausses significatives. Ces évolutions saisonnières traduisent une accentuation des contrastes saisonniers, la saison chaude se réchauffant plus que la saison froide.

Tableau 4 - Répartition des coefficients de Spearman saison par saison sur les 70 séries homogénéisées de température maximale.

	Printemps	Été	Automne	Hiver
Hausse significative (%)	14	49	70	23
Hausse non significative (%)	57	50	30	77
Baisse non significative (%)	29	1	0	0
Baisse significative (%)	0	0	0	0

Pour les maximales (tableau 4), aucune saison ne présente de série en baisse significative. C'est en automne que les hausses significatives sont les plus nombreuses et c'est au printemps que l'on trouve le plus de baisses. La différence de comportement entre minimales et maximales a déjà été notée en termes d'amplitude et de répartition géographique du réchauffement. On constate également que les saisons caractéristiques du réchauffement ne sont pas les mêmes : l'été est la saison du réchauffement maximal pour les températures de fin de nuit, tandis que l'automne est la saison du réchauffement maximal pour les températures de l'après-midi.

## Le cas de Paris-Montsouris



On dispose pour la station de Paris-Montsouris d'une série relativement longue (données disponibles depuis 1873) et d'assez bonne qualité concernant l'amplitude minimale des ruptures détectables (0,22 °C pour les températures minimales et 0,19 °C pour les maximales) et le nombre de ruptures corrigées (6 pour les températures minimales et 5 pour les maximales). De plus, cette série climatologique est aussi disponible pour le paramètre « cumul de précipitations » (voir plus loin).



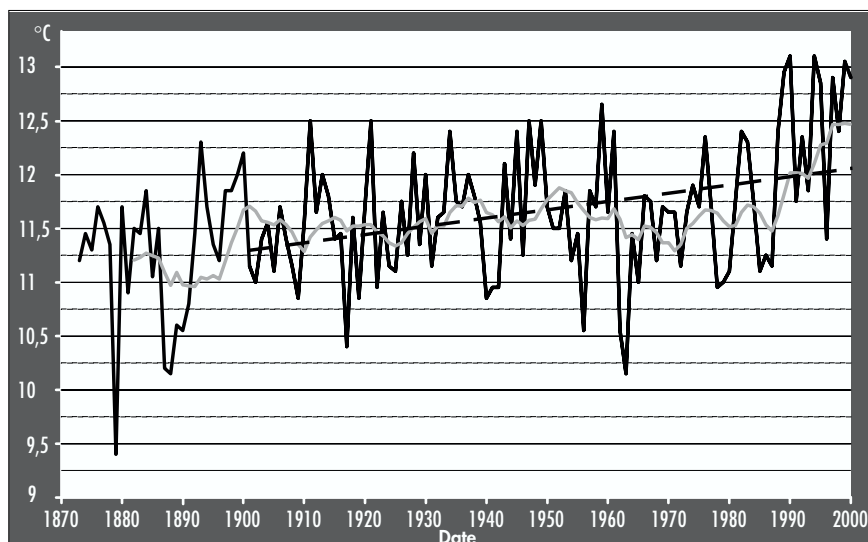


Figure 7 - Évolution de 1873 à 2000 des températures moyennes annuelles (en °C) à Paris-Montsouris, en noir. (Moyenne glissante sur 15 points en gris, tendance 1901-2000 en traits discontinus).

La figure 7 montre qu'à Paris-Montsouris, les années les plus chaudes se situent dans la période la plus récente : trois valeurs de température moyenne annuelle au-dessus de 13 °C depuis 1990 contre aucune auparavant. L'année 1996 y est la plus froide de la dernière décennie, un événement limité à la moitié nord de la France, pour laquelle le printemps, l'automne et l'hiver ont été déficitaires en température cette année-là (Coudert, 1997). La tendance à Paris-Montsouris sur la période 1901-2000 est de 0,77 °C par siècle, tandis que le coefficient de Spearman vaut 0,33 et est significatif à 95 %.

On ne peut attribuer le réchauffement observé à Paris-Montsouris à la seule urbanisation, puisque les résultats obtenus sur la température sont comparables avec ceux des séries voisines (figure 4).

En effet, on n'observe pas de noyaux de tendance plus importante à proximité des zones de forte urbanisation dans la cartographie des tendances, les îlots de chaleur que représentent les villes ne se renforçant pas. Ces résultats sont conformes avec ceux du Giec, qui estime à environ 10 % la part du réchauffement due à l'urbanisation dans le réchauffement planétaire (Houghton et al., 2001).

## L'évolution des précipitations

### Significativité des évolutions

On examine maintenant l'évolution des précipitations en France au XX<sup>e</sup> siècle, à l'aide des 226 séries homogénéisées de cumuls mensuels de précipitations.

L'hétérogénéité de la répartition des séries pluviométriques disponibles n'autorisant pas la cartographie, on examine directement le pointage des hausses et des baisses et de leur significativité calculée à l'aide des coefficients de Spearman pour les 226 séries pluviométriques disponibles (figure 8).

On observe qu'aucune baisse n'est significative, la plupart des séries montrant un accroissement au cours du XX<sup>e</sup> siècle. Ces résultats présentent cependant peu de cohérence d'une région à l'autre. On sait aussi qu'il peut subsister dans les séries corrigées des ruptures de l'ordre de 10 % du cumul annuel. C'est l'ordre de grandeur des tendances rencontrées et cela limite les possibilités d'exploitation individuelle de chaque série, sans empêcher cependant d'interpréter l'ensemble des résultats.

La plus forte concentration de hausses significatives se situe sur une bande méridienne allant de l'Ariège à la région parisienne, tandis que les deux tiers nord du territoire ne contiennent que des séries présentant une hausse des cumuls. Seule la partie sud de la France présente des cumuls en baisse (par exemple, le sud de la Lozère, la Gironde, les Hautes-Pyrénées). Les Bouches-du-Rhône présentent un ensemble remarquable de baisses (non significatives), mais il manque des séries voisines venant corroborer ce résultat.

Si l'ensemble du territoire n'est pas couvert en séries homogénéisées, les départements où existent des séries sont assez bien répartis. En revanche, le nombre de séries peut varier beaucoup

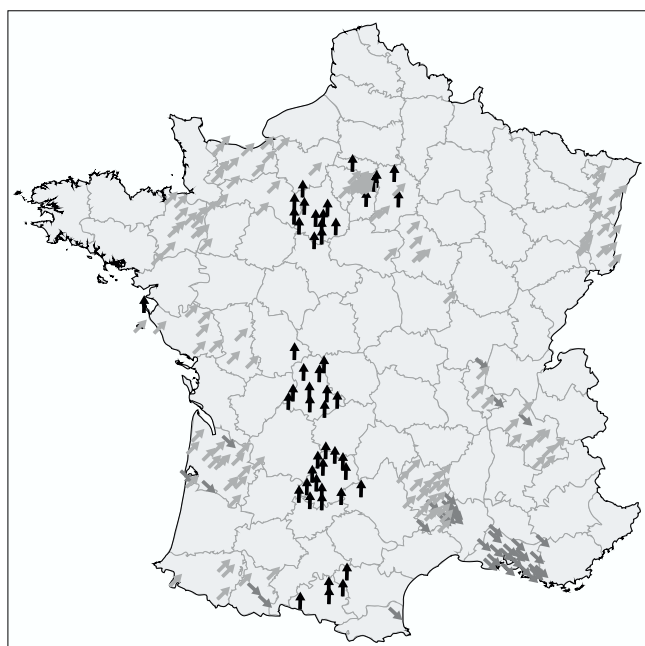


Figure 8 - Pointage du coefficient de Spearman pour le cumul annuel de précipitations sur la période 1901-2000. (↓ : baisse significative, ↘ : baisse non significative, ↗ : hausse non significative, ↑ : hausse significative ; significativité à 95 % de confiance).

	Pourcentage de séries de précipitations
Hausse significative	35
Hausse non significative	55
Baisse non significative	10
Baisse significative	0

Tableau 5 - Répartition des coefficients de Spearman pour les 40 séries départementales de cumuls de précipitations (en %).

## Répartition saisonnière des évolutions

Tableau 6 - Répartition par saison des coefficients de Spearman sur les 40 séries départementales de cumuls de précipitations.

d'un département à l'autre. En calculant pour chaque département où existent des séries pluviométriques homogénéisées (on en dénombre 40) une série dite « départementale » qui en représente la moyenne, on obtient une synthèse qui s'affranchit du problème de la forte disparité du nombre de séries d'un département à l'autre (tableau 5).

On note, sur l'ensemble des 40 séries départementales, 20 séries dont les tendances séculaires sont comprises entre 5 et 15 % du cumul annuel, 9 dont les tendances sont supérieures à 15 % du cumul annuel et 11 dont les tendances sont inférieures à 5 % du cumul annuel. Ces résultats sont cohérents avec ceux du Giec, à savoir une augmentation de 0,5 à 1 % par décennie du cumul annuel sur le xx<sup>e</sup> siècle aux moyennes et hautes latitudes continentales de l'hémisphère nord (Houghton et al., 2001). On relève cependant qu'au sud du territoire les hausses sont moins marquées et qu'il y a même quelques baisses non significatives.

Le Giec attribue l'augmentation dans le temps des cumuls pluviométriques annuels à un accroissement de 2 à 4 % de la fréquence des épisodes de fortes précipitations. Les séries homogénéisées portant au mieux sur des cumuls mensuels, il ne nous est pas possible de vérifier directement cette évolution des événements extrêmes.

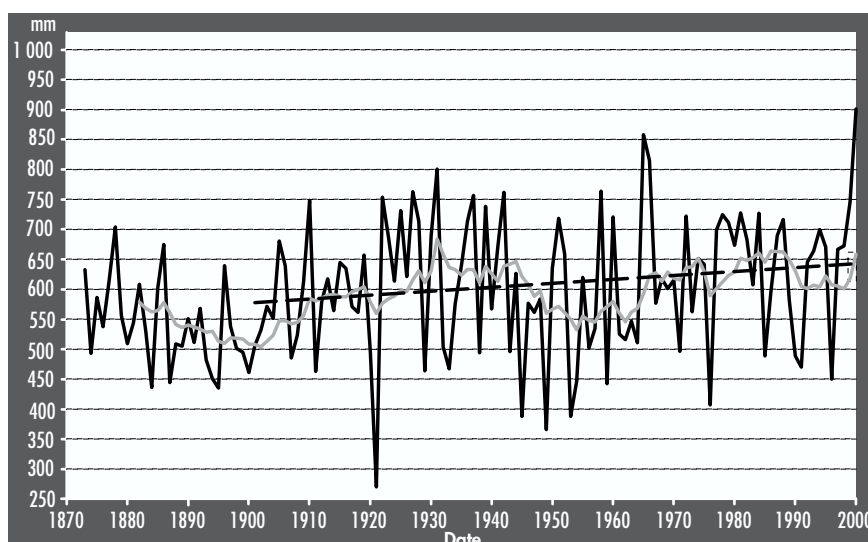
Comme pour la température, on étudie la répartition par saison des hausses et des baisses sur les séries de précipitations, ainsi que leur significativité statistique au sens du coefficient de Spearman (tableau 6).

	Printemps	Été	Automne	Hiver
Hausse significative (%)	5	3	10	35
Hausse non significative (%)	62	32	80	65
Baisse non significative (%)	33	65	10	0
Baisse significative (%)	0	0	0	0

On observe de fortes disparités selon la saison et on peut isoler deux saisons caractéristiques, l'hiver et l'été. En hiver, on ne trouve que des séries de précipitations à la hausse, un tiers de ces hausses étant significatives. En été, on note une majorité de baisses, dont aucune cependant n'est significative. L'automne et le printemps présentent des résultats intermédiaires, la répartition obtenue pour l'automne le rapprochant plutôt de l'hiver (majorité de hausses), celle obtenue pour le printemps le rapprochant plutôt de l'été (un tiers de baisses). Ces évolutions conduisent à une accentuation des contrastes saisonniers du point de vue pluviométrique.

## Le cas de Paris-Montsouris

Comme pour la série de températures, cette série de cumuls de précipitations est de bonne qualité, puisqu'elle ne présente que 5 ruptures depuis 1873 et que l'amplitude minimale des ruptures détectables est de 5 % du cumul annuel



moyen. La figure 9 montre l'évolution des cumuls annuels de précipitations sur la période 1873-2000.

On note la forte variabilité des précipitations d'une année à l'autre, mais également la difficulté de décider « à l'œil nu » d'une tendance, opération que l'intensité du réchauffement rend pratiquement possible pour les courbes de température. La tendance calculée sur la période 1901-2000 représente environ 11 % du cumul

Figure 9 - Évolution de 1873 à 2000 du cumul annuel des précipitations (en mm) à Paris-Montsouris, en noir. (Moyenne glissante sur 15 points en gris, tendance 1901-2000 en traits discontinus).

annuel moyen, alors qu'il arrive de constater une différence du simple au double entre deux années consécutives (années 1920 et 1921, par exemple). À noter aussi que l'année 2000 est la plus pluvieuse du siècle à Paris-Montsouris avec un cumul annuel de plus de 900 mm.

Valeur de l'indice	Type de climat
0 < I < 5	hyperaride
5 < I < 10	aride
10 < I < 20	semi-aride
20 < I < 30	semi-humide
30 < I < 55	humide

Tableau 7 - Caractérisation du climat par l'indice de De Martonne.

Le coefficient de Spearman vaut 0,17 et n'est pas significatif. Cette série de Paris-Montsouris se situe donc dans la lignée de la majorité des séries départementales françaises (hausse non significative).

Comme pour la température, il existe également des climatologies mondiales de précipitations. Nous avons vérifié la cohérence de nos résultats pour les précipitations à Paris avec ceux établis à partir de la climatologie de 5 degrés de résolution décrite par Hulme et al. (1998)<sup>(1)</sup>. La corrélation entre la série des cumuls de Hulme au point de grille de coordonnées 47° 30' N et 2° 30' E et la série homogénéisée de Paris-Montsouris est de 0,85 sur la période commune 1900-1998. On ne peut isoler, comme cela a été fait pour la température, de périodes présentant un biais répété.

## L'évolution de la sécheresse

En joignant les évolutions obtenues précédemment, il semblerait que l'on se dirige nettement vers la sécheresse si l'on s'en tient à la tendance des températures, mais plutôt vers l'humidification si l'on s'en tient à la tendance des précipitations. Il est donc naturel de s'intéresser à l'évolution des indices de sécheresse qui reposent sur ces deux paramètres.



Figure 10 - Pointage du coefficient de Spearman pour l'indice annuel de De Martonne sur la période 1901-2000.

(↓ : baisse significative, ↘ : baisse non significative, ◻ : hausse non significative, ↑ : hausse significative ; significativité à 95 % de confiance).

Le plus populaire des indices de sécheresse est celui de De Martonne, dont la valeur annuelle s'écrit :

$$I = P/(T+10)$$

où P est le cumul annuel des précipitations en mm et T la température moyenne annuelle en °C. I s'exprime en mm/°C. Plus cet indice est élevé, plus le climat est humide. De Martonne a proposé la classification donnée dans le tableau 7.

On calcule donc l'évolution de cet indice I pour les postes français qui disposent à la fois de longues séries de précipitations et de température. Ces postes sont au nombre de 17, répartis sur 15 départements.

Comme pour les précipitations, on a pointé sur une carte les séries à la hausse ou à la baisse en distinguant les évolutions significatives des autres (figure 10). Le résultat le plus notable est la répartition nord-sud des évolutions, avec une sécheresse accrue au sud du territoire (8 séries de la moitié sud présentent une baisse de l'indice I) et une humidification au nord. La faible densité géographique des postes utilisés limite cependant les interprétations possibles. L'ordre de grandeur des tendances sur le siècle est une unité de l'indice de De Martonne. Les séries ne changent pas de classe en général, sauf celle de Rennes qui passe de la classe semi-humide à la classe humide.

## Conclusion

L'identification de la signature des changements climatiques au xx<sup>e</sup> siècle en France a eu pour préalable un long effort de collecte, de contrôle et de correction des données climatologiques. Les résultats sont obtenus à partir des séries homogénéisées de températures extrêmes et de cumuls de précipitations. Les premières sont bien réparties sur le territoire français et présentent un ensemble de tendances significatives. Les secondes souffrent d'une répartition inégale et présentent un signal moins organisé et des tendances bien souvent en limite de significativité. Ces résultats viennent préciser, sans les contredire, ceux établis à une échelle géographique plus grande.

(1) Cette climatologie est consultable à l'adresse Internet [[www.cru.uea.ac.uk/cru/data/](http://www.cru.uea.ac.uk/cru/data/)] (fichier g55wld0098.dat).

L'accroissement sur un siècle des températures moyennes en France est important (de 0,7 °C à plus de 1 °C). Celui des températures minimales se distingue de celui des températures maximales par son amplitude, sa répartition géographique et sa répartition saisonnière. Les minimales ont plus augmenté que les maximales et l'amplitude diurne est en baisse sur la majorité du territoire. Les minimales ont le plus augmenté à l'ouest et les maximales au sud, ce qui fait que l'augmentation de la température moyenne est maximale sur le sud-ouest du territoire. L'accroissement des minimales trouve ses extrema lors des saisons marquées (avec un maximum l'été), tandis que celui des maximales les trouve lors des saisons intermédiaires (avec un maximum l'automne).

Les séries homogénéisées de précipitations dessinent une pluviométrie plutôt en hausse sur le xx<sup>e</sup> siècle et un changement de sa répartition saisonnière : moins de précipitations en été et davantage en hiver. Des contrastes nord-sud apparaissent : on trouve quelques cumuls annuels de précipitations en baisse sur le sud du territoire français. L'étude de l'indice de sécheresse de De Martonne montre des noyaux de sécheresse accrue sur les régions les plus méridionales. Au nord du territoire, au contraire, l'augmentation conjuguée des précipitations et des températures conduit à un climat plus humide, ce qui traduit un cycle hydrologique qui s'accélère.

Ces séries climatiques homogénéisées constituent la base d'une climatologie vivante, qui devra s'enrichir au cours des années à venir, au gré des progrès des techniques d'homogénéisation et des recherches de données anciennes. Les périodes ayant donné lieu à de fortes reconstitutions de données constituent les cibles préférentielles de ces prochaines recherches de données anciennes. Il faudra aussi relancer régulièrement l'ensemble des processus de détection et d'homogénéisation, au fur et à mesure que seront intégrées les nouvelles données des années les plus récentes.

Ce travail de collecte et d'homogénéisation de données climatiques se poursuit également pour d'autres paramètres : l'insolation (qui pourrait expliquer une partie des comportements des séries de température), la pression (pour pouvoir éventuellement lier les comportements observés avec des modifications de circulation à l'échelle synoptique), la vitesse du vent et les mesures en altitude fournies par les radiosondages.

Enfin, l'évolution des valeurs extrêmes (par exemple, l'évolution du nombre annuel de jours avec fortes précipitations) est un problème important et délicat à régler. Les séries homogénéisées peuvent contribuer à ce type d'étude de deux façons : soit en dégagant des périodes homogènes et donc privilégiées pour l'étude des valeurs extrêmes, soit via une méthode analytique permettant d'examiner l'impact d'une modification de la moyenne du paramètre sur l'évolution de ses fonctions de distribution.

## Bibliographie

- **Alexandersson H.**, 1986 : A homogeneity test applied to precipitation data. *J. Climatol.*, 6, 661-675.
- **Alexandersson H.** et **A. Moberg**, 1997 : Homogenization of Swedish temperature data. Part I: Homogeneity test for linear trends. *International Journal of Climatology*, 14, 25-34.
- **Beltrando G.** et **C. Chémery**, 1995 : Dictionnaire du Climat. Larousse-Références, 329 p.
- **Bénichou P.** et **O. Le Breton**, 1987 : Prise en compte de la topographie pour la cartographie des champs pluviométriques statistiques. *La Météorologie 7<sup>e</sup> série*, 19, 23-34.
- **Coudert O.**, 1997 : *Bulletin climatique annuel 1996*. Météo-France, Toulouse.
- **Hawkins D. M.**, 1977 : Testing a sequence of observation for a shift in location. *Journal of American Statistics Association*, 72, 180-186.
- **Heino R.**, 1996 : Metadata and their role in homogenization. Proceedings of the Seminar on homogenization of surface climatological data, séminaire du Hungarian Meteorological office, Budapest, Hongrie, 5-8.
- **Houghton J. T., Y. Ding, D. J. Griggs, M. Noguer, P. J. Van der Linden et D. Xiaosu** (eds.), 2001 : *Climate Change 2001: The scientific basis. Contribution of working group I to the third assessment report of IPCC*. Cambridge University Press, Royaume-Uni, 944 p.
- **Hulme M., T. J. Osborn et T. C. Johns**, 1998 : Precipitation sensitivity to global warming: Comparison of observations with HadCM2 simulation. *Geophys. Res. Lett.*, 17, 3379-3382.
- **Jones P. D., M. New, D. E. Parker, S. Martin et I. Rigor**, 1999 : Surface air temperature and its change over the past 150 years. *Rev. Geophys.*, 2, 173-199.
- **Jones P. D., T. J. Osborn, K. R. Briffa, C. K. Folland, E. B. Horton, L. V. Alexander, D. E. Parker et N. A. Rayner**, 2001 : Adjusting for sampling density in grid box land and ocean surface temperature time series. *J. Geophys. Res.*, 106, D4, 3371-3380.
- **Lefebvre G.**, 1999 : Rapport d'essai PBBGB017 - Comparaison d'abris météorologiques, abri modèle 1896. Météo-France, Trappes.
- **Mestre O.**, 2000 : Méthodes statistiques pour l'homogénéisation de longues séries climatiques. Thèse de doctorat de l'université Paul-Sabatier (Toulouse III).
- **Spagnoli B.**, 2001 : Méthodes de détection du changement climatique par la méthode de « fingerprint ». Rapport de stage de DEA « Océan, atmosphère, environnement » de l'université Paul-Sabatier (Toulouse III).
- **Spagnoli B., S. Planton, O. Mestre, M. Déqué et J.-M. Moisselin**, 2002 : Detecting climate change at a regional scale: The case of France. *Accepted par Geophys. Res. Lett.*