

Société de Calcul Mathématique SA

Outils d'aide à la décision

depuis 1995



Evolution des températures terrestres au voisinage de Bure :

- Prospective sur 50 ans à venir
 - Analyse sur 50 ans passés
 - Comparaisons entre villes
 - Clarification des concepts probabilistes

Rapport présenté

A l'ANDRA

par la

Société de Calcul Mathématique SA

En application du contrat n°20086146, notifié le 11/02/2022

SCM SA, 23/04/2022

Rédaction : Bernard Beauzamy

Documentation : Antoine Vachon—Hartman

Siège social et bureaux : 111, Faubourg Saint Honoré, 75008 Paris. Tel : 01 42 89 10 89. Fax : 01 42 89 10 69. www.scmsa.eu
Société Anonyme au capital de 56 200 Euros. RCS : Paris B 399 991 041. SIRET : 399 991 041 00035. APE : 7219Z

Résumé Opérationnel

L'Andra souhaite disposer d'un document scientifique, aussi bien fait que possible, destiné à servir d'appui scientifique au projet CIGEO (stockage de déchets radioactifs en couche géologique profonde). Il s'agit de répondre à une inquiétude du public : les températures en surface sont-elles susceptibles de subir des modifications (en hausse ou en baisse) qui viendraient mettre en péril le bon fonctionnement des équipements et la sécurité des populations ?

L'argumentaire, destiné à la circulation auprès du grand public, auprès des spécialistes et auprès des politiques, devra n'utiliser que des données fiables qui feront consensus ; les raisonnements devront être purement factuels et ne contenir aucun présupposé idéologique.

Le présent rapport est divisé en quatre parties : prévisions sur les 50 ans à venir, observations sur les 50 ans passés, comparaisons entre villes à l'échelle de la France métropolitaine, clarification des concepts probabilistes.

La conclusion -assez étonnante dans le contexte de variabilité que l'on prête généralement au climat- est qu'il y a parfaite continuité entre le passé et le futur. Les séries chronologiques enregistrées, dont certaines sont issues de stations météo situées à 200 km de Bure, disent toutes la même chose : l'élévation moyenne des températures a été de 3°C de 1971 à 2021 ; elle sera de 3°C de 2021 à 2071. Nous voyons dans ces concordances des indices très forts de robustesse des résultats. De même, et ceci semblera très étonnant à beaucoup, l'évolution des températures, pour 7 villes très éloignées, de 1945 à nos jours, suit exactement le même graphique, qui montre une tendance au réchauffement à un rythme de 3°C par siècle, sans aucune accélération récente.

Sur un plan pratique, cela signifie qu'il n'y a pas lieu de s'inquiéter pour les installations de Bure : elles ne sont en rien menacées par une possible variation des températures de surface.

Sur un plan méthodologique, le présent rapport repose tout entier sur des méthodes purement probabilistes, utilisant toutes les données historiquement disponibles et sans aucune référence aux lois physiques relatives aux phénomènes concernés. Cela lui confère une très grande robustesse : très homogènes, les données numériques sont très convaincantes, alors que faire le lien avec des lois physiques exige toutes sortes d'hypothèses, très techniques et peu compréhensibles par le public.

Organisation du présent document

Il est divisé en quatre parties très distinctes :

- Première Partie : Prévisions pour Bure sur les 50 ans à venir ; c'est le cœur du sujet demandé par l'Andra dans son cahier des charges ;
- Seconde Partie : Analyse des données, pour Bure, sur les 50 ans écoulés. Nous montrons qu'il n'y a pas de "hiatus" entre le passé proche et le futur ;
- Troisième Partie : Comparaison entre villes. Nous choisissons arbitrairement 7 villes très distantes en France métropolitaine et montrons que, depuis 1945, le "trend" des températures moyennes annuelles est exactement le même pour toutes : les graphiques sont pratiquement superposables ;
- Quatrième Partie : Clarification des concepts probabilistes, à l'usage du grand public : durée de retour, probabilité d'occurrence, etc. Elle a été rédigée dans le cadre du rapport Andra, pour aider le public, mais ne contient rien qui soit spécifique au climat. Elle a vocation à circuler sous forme de document pédagogique dans les diverses communautés d'utilisateurs.

Première Partie

Prévisions sur les 50 ans à venir

I. Introduction

Nous avons reconstitué la température maximale journalière, par des méthodes probabilistes spécifiques, dans neuf villes autour de Bure (dont Bure elle-même), toutes sur la période du 29/05/1921 au 31/12/2021, soit 35 064 données, un peu plus de cent ans.

Nous introduisons, pour une série temporelle, la notion de Maximum To Date : à une date donnée, c'est le maximum jamais rencontré avant cette date. Elle est particulièrement bien adaptée à l'un des besoins exprimés par l'Andra qui est d'évaluer un « trend » d'évolution des températures (par exemple, évaluer la valeur maximale qui se pourrait rencontrer, à Bure, d'ici 2070, mais non en 2070 précisément).

Les résultats obtenus sont étonnants ; les 9 stations indiquent toutes la même chose :

	Dijon	Metz	Mulhouse	Nancy	Reims	Strasbourg	Troyes	Saint Dizier	Bure
1922-01-01	38,6	37,6	37,5	36,5	34,6	37,0	37,0	37,3	37,0
1972-01-01	38,6	37,7	37,9	36,5	34,6	37,4	37,0	38,0	37,0
2021-12-31	39,5	39,5	39,1	39,6	41,1	38,9	41,8	41,4	40,6
accrt1	0,0	0,1	0,4	0,0	0,0	0,4	0,0	0,7	0,0
accrt2	0,9	1,8	1,2	3,1	6,5	1,5	4,8	3,4	3,6
moyenne acc1	0,2								
moyenne acc2	3,0								

On a noté :

- accrt1 : accroissement pendant la période 1922-01-01 à 1972-01-01 ;
- accrt2 : accroissement pendant la période 1972-01-01 à 2021-12-31 ;
- moyenne acc1 : moyenne des accroissements pendant la première période,
- moyenne acc2 : moyenne des accroissements pendant la seconde période.

On constate une très faible élévation de température maximales pendant les 50 premières années, beaucoup plus forte ensuite.

Nous ne cherchons absolument pas à savoir si ces 8 villes (Bure elle-même exceptée) sont "représentatives" de Bure, quelles peuvent être leurs similarités ou différences ; nous ne faisons aucune analyse comparée du climat dans ces villes. Il nous suffit de constater que les séries reconstituées sont à peu près les mêmes partout. Nous y voyons une preuve très satisfaisante de la robustesse de la méthode : on trouve sensiblement la même chose si on s'éloigne de plusieurs centaines de km, quelle que soit la direction.

Les séries chronologiques ne donnent pas un pronostic pour une date fixe, mais de ce qui peut être observé sur un laps de temps donné. Si le maximum jamais enregistré à Bure est de 40°C, il pourrait être de 43°C dans 50 ans.

Notre recommandation à l'Andra est donc extrêmement simple : dimensionnez vos équipements et constructions pour qu'ils résistent à une élévation de température de +3°C sur 50 ans. D'ici là, on aura acquis de nouvelles données et on verra si la consigne peut être assouplie ou renforcée. En général, un équipement industriel (chauffage, climatisation, etc.) ne dure pas 50 ans : notre préconisation n'est donc pas une contrainte trop forte.

Dans la mesure où ces conclusions reposent sur l'exploitation de plus de 300 000 données (35 000 par station, 9 stations), dans la mesure où ces stations sont suffisamment éloignées de Bure pour détenir des informations spécifiques (Mulhouse : 190 km de Bure), dans la mesure où toutes ces stations disent la même chose, les conclusions présentées ici peuvent être considérées comme extrêmement robustes.

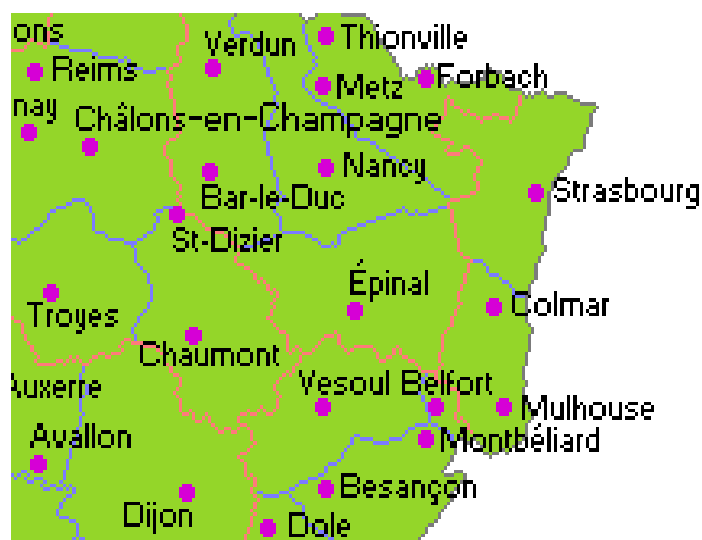
La SCM prend la responsabilité de ces conclusions et recommande à l'Andra de solliciter des critiques extérieures (Météo France, etc.) quant à leur validité. Ceci fait, nos conclusions pourront devenir une partie du dossier de sûreté établi par l'Andra à propos du site CIGEO. La SCM remercie Paul Deheuvels et Dominique Vignon pour leurs critiques et commentaires sur une version préliminaire de ce document.

II. Origine des données

Notre point de départ a été la liste des villes autour de Bure, munies d'une station météorologique. Les données proviennent de trois sources :

- Le site European Climate Assessment & Dataset project (<https://www.ecad.eu/>) pour la plupart des villes ;
- Météo France pour la ville de Saint Dizier ;
- L'Andra pour le site de Bure.

Nous disposons au total de onze stations (voir liste et carte plus bas), dont deux sont abandonnées, faute de données en nombre suffisant. Il n'y a pas d'homogénéité dans les séries chronologiques : certaines commencent tardivement, d'autres finissent prématurément, d'autres ont des "trous" plus ou moins importants. Il était donc nécessaire de reprendre chaque ville, afin de constituer une série chronologique complète.



Carte 1 : les stations de mesure de la température

Station	Dijon	Metz	Mulhouse	Nancy	Reims	Strasbourg	Troyes	Saint-Dizier
Distance à Bure (en km)	136	87	189	47	119	167	100	37

Tableau 2 : distances à Bure

Une fois complétées, toutes les séries chronologiques commencent le 29/05/1921 et se terminent le 31/12/2021, soit 35 064 données, un peu plus de cent ans, de température maximale journalière. C'est peu pour juger de l'évolution du climat sur une longue période, mais c'est suffisant pour évaluer l'homogénéité du territoire.

Dijon : à partir du 29/05/1921 (le plus ancien)

Metz : du 01/01/1946 au 01/01/2005

Mulhouse : à partir du 01/01/1947

Nancy : à partir du 01/11/1966

Reims : à partir du 08/05/2012

Strasbourg : à partir du 01/01/1924

Troyes : à partir du 01/05/1975

Saint-Dizier : à partir du 21/06/1953

Bure : à partir du 20/06/2001

Soulaines : à partir du 01/01/1992

Chaumont n'est mesurée que pendant l'année 2021 et est donc éliminée de cette étude.

Reims n'est mesuré qu'à partir de 2012 ; les relevés figurent dans les fichiers ECA, mais le temps d'observation est trop bref et Reims est donc éliminé ; il ne figure plus dans les tableaux ultérieurs.

III. Méthodes probabilistes

Les probabilités sont une science exacte, qui décrit les lois de la Nature, notamment en ce qui concerne les incertitudes. Typiquement, l'objet de travail est une liste de données (fichier Excel) ; on cherche à savoir s'il y a des données aberrantes, si tel paramètre a plus d'influence que telle autre sur telle variable de sortie, etc.

Un point essentiel est que, pour résoudre ce type de problème, il faut rester dans le cadre probabiliste. Vouloir se ramener à un problème physique, quel qu'il soit, échoue obligatoirement, parce que le lien entre les deux n'est pas clair. Prenons un exemple concret pour faire comprendre ceci : on étudie des séries chronologiques, qui sont les maxima journaliers entre différentes villes, et on veut les comparer. D'un point de vue probabiliste, la question est parfaitement claire. D'un point de vue physique, on se demande bien ce qu'il faut prendre en compte : la distance entre villes ? les différences de pluviosité ? d'ensoleillement ? On se retrouve avec des milliers de paramètres possibles, dont aucun n'est plus justifié qu'un autre, et entre lesquels il va falloir argumenter.

L'outil probabiliste le plus simple, qui permet de comparer deux séries chronologiques, est le coefficient de corrélation ; il est bien connu et Excel dispose de routines adaptées. Il présente cet inconvénient de ne détecter que les relations linéaires, mais c'est une bonne précaution que de le calculer de manière préliminaire. Voici les résultats.

		nb données communes	corrélation
Dijon	Metz	21 551	0,97
Dijon	Mulhouse	27 394	0,97
Dijon	Nancy	20 149	0,97
Dijon	Reims	3 526	0,96
Dijon	Strasbourg	33 450	0,96
Dijon	Troyes	17 047	0,97
Dijon	Saint Dizier	25 031	0,97
Dijon	Bure	7 462	0,96
Dijon	Soulaines	10 843	0,97
Metz	Mulhouse	21 186	0,96
Metz	Nancy	13 942	0,99
Metz	Reims	0	
Metz	Strasbourg	21 551	0,98
Metz	Troyes	10 839	0,97
Metz	Saint Dizier	18 823	0,98
Metz	Bure	1 267	0,97
Metz	Soulaines	4 711	0,98
Mulhouse	Nancy	20 149	0,97
Mulhouse	Reims	3 526	0,95
Mulhouse	Strasbourg	27 393	0,98
Mulhouse	Troyes	17 047	0,95
Mulhouse	Saint Dizier	25 031	0,95
Mulhouse	Bure	7 462	0,96
Mulhouse	Soulaines	10 843	0,96
Nancy	Reims	3 525	0,98
Nancy	Strasbourg	20 148	0,97
Nancy	Troyes	17 046	0,98
Nancy	Saint Dizier	20 149	0,99
Nancy	Bure	7 461	0,98
Nancy	Soulaines	10 842	0,98
Reims	Strasbourg	3 525	0,96
Reims	Troyes	3 526	0,99
Reims	Saint Dizier	3 526	0,98
Reims	Bure	3 517	0,98
Reims	Soulaines	3 450	0,98
Strasbourg	Troyes	17 046	0,95
Strasbourg	Saint Dizier	25 030	0,95
Strasbourg	Bure	7 461	0,95
Strasbourg	Soulaines	10 842	0,95
Troyes	Saint Dizier	17 047	0,99
Troyes	Bure	7 462	0,97
Troyes	Soulaines	10 843	0,99
Saint Dizier	Bure	7 462	0,98
Saint Dizier	Soulaines	10 843	1,00
Bure	Soulaines	7 386	0,98

Tableau 3 : coefficients de corrélation

Il s'agit des coefficients de corrélation, calculés sur l'ensemble des données brutes disponibles, communes aux deux stations, avant toute reconstitution. On constate que Metz et Reims n'ont jamais été mesurés en même temps : le coefficient de corrélation ne peut être calculé. Pour toutes les autres villes, le CC est extrêmement proche de 1, ce qui laisse à penser que toutes les séries vont avoir les mêmes propriétés statistiques.

IV. Méthode probabiliste pour la reconstruction des données manquantes

Nous suivons ici la méthode décrite dans notre livre de 2007, [RDM] Bernard Beauzamy, Olga Zeydina : Méthodes probabilistes pour la reconstruction de données manquantes. SCM SA, ISBN 2-9521458-2-2, ISSN 1767-1175. Le livre développe un exemple principal, à savoir la reconstruction des débits des fleuves en Vendée ; les choses sont un peu plus simples ici, dans la mesure où les stations sont plus homogènes.

A. Construction des histogrammes

Le premier travail est, pour chaque station, de constituer l'histogramme des données. Pour cela, les données sont rangées en classes ; toutes ont la même largeur (ici 1°C) et toutes commencent à -15°C (inférieur au minimum jamais enregistré) ; toutes vont jusqu'à 40°C.

Voici les valeurs maximales relevées, selon la station :

	Dijon	Metz	Mulhouse	Nancy	Reims	Strasbourg	Troyes
max	39,5	39,5	39,1	39,6	41,1	38,9	41,8

Tableau 4 : valeurs maximales relevées

Pour Reims, la valeur 40°C n'est dépassée qu'une seule fois dans tout l'historique ; pour Troyes, elle l'est trois fois. Ceci ne justifie pas l'introduction d'une classe 40°C-41°C dans les histogrammes, que nous arrêtons donc à 40°C.

A titre d'illustration, voici l'histogramme des données relatives à Dijon, sur toute la période de mesure :

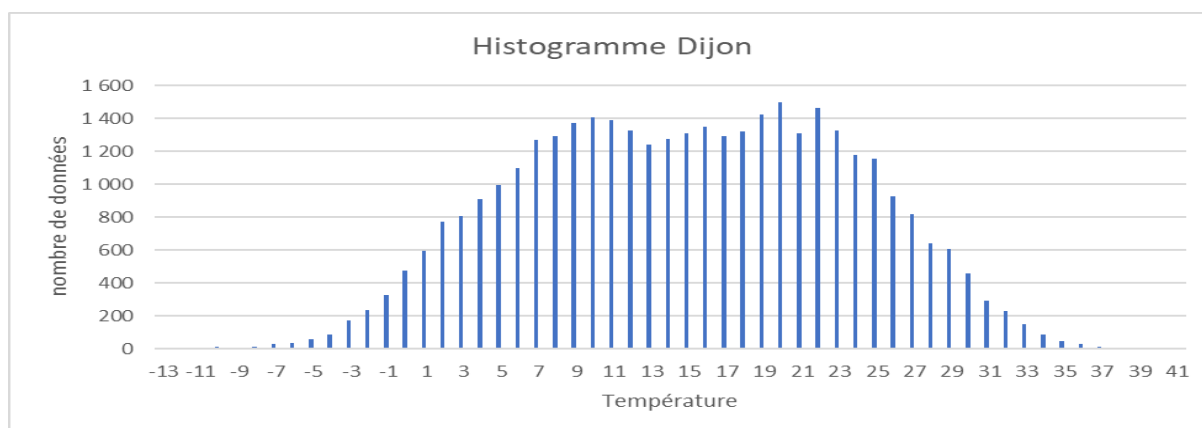


Fig. 5 : Histogramme Dijon

Cet histogramme n'est pas gaussien ; il est constitué de deux parties, correspondant respectivement aux régimes d'hiver et d'été. Une autre observation est que, pour les valeurs élevées de la température, la probabilité décroît lorsque la température augmente : cela se voit dès 23°C dans l'histogramme ci-dessus, mais est particulièrement vrai pour les températures extrêmes (disons supérieures à 30°C) ; cette remarque nous sera utile plus tard.

Pour les autres stations, l'aspect de l'histogramme est le même.

B. Histogramme conjoint pour deux villes

Le principe de l'histogramme consiste à compter, pour chaque classe, parmi les N données au total ($N=35\ 064$) combien tombent dans chaque classe. Le principe de l'histogramme conjoint, pour deux stations, est exactement le même. On dispose d'un tableau à double entrée, $(-15...40) \times (-15...40)$; la ville 1, notée V_1 , est disposée verticalement et la ville 2 horizontalement. Dans la cellule (i, j) ($i = -15, \dots, 40$, $j = -15, \dots, 40$), on met le nombre de fois, parmi N , où l'on a observé $i \leq V_1 < i+1$ et $j \leq V_2 < j+1$. On le note $n_{i,j}$. Bien entendu,

$$\sum n_{i,j} = N.$$

C. Loi conjointe pour deux villes

L'histogramme contient des nombres d'occurrences ; il nous faut maintenant les remplacer par des probabilités. Le principe est simple : nous voulons reconstituer V_2 à partir de V_1 , donc déterminer ce qu'on appelle "loi conditionnelle de V_2 sachant V_1 ". Celle-ci apparaît sur toutes les horizontales du tableau : si par exemple $i=12$, l'horizontale correspondante du tableau contient toutes les occurrences du couple qui se sont produites pour $i=12$. Par conséquent,

$$p_{12,j} = \frac{n_{12,j}}{\sum_{j=-15}^{40} n_{12,j}}$$

est la probabilité que $V_2 = j$ sachant $V_1 = 12$: c'est ce que nous cherchions. Plus généralement, on note :

$$p_{\bullet,j} = \frac{n_{\bullet,j}}{\sum_{j=-15}^{40} n_{\bullet,j}}$$

la loi de probabilité lue sur n'importe quelle horizontale du tableau.

D. Espérance conditionnelle

Le choix d'utiliser l'espérance conditionnelle, plutôt que tout autre concept (médiane, etc.) repose sur une propriété bien connue de l'espérance conditionnelle : elle minimise l'erreur commise. Voir par exemple <https://www.youtube.com/watch?v=7V170gTR1YE>

A partir du moment où l'on a une loi de probabilité, on peut calculer l'espérance associée. Avec les notations présentes, pour tout i :

$$E_i = \frac{\sum_{j=-15}^{40} j n_{i,j}}{\sum_{j=-15}^{40} n_{i,j}}$$

L'espérance conditionnelle de la loi de V_2 sachant $V_1 = i$ représente la moyenne des valeurs de V_2 qui se sont rencontrées lorsque $V_1 = i$. On peut donc l'utiliser pour reconstruire V_2 , lorsque $V_1 = i$.

Donc, dans ma liste d'observations d'origine, si je balaye le tableau de $n=1$ à $n=N$, si je rencontre une case vide pour V_2 avec la valeur 17 pour V_1 , je peux compléter la liste en mettant la valeur E_{17} dans la case vide et c'est ainsi, d'après les propriétés de l'espérance, que l'approximation sera la meilleure en moyenne, ce qui signifie que, en moyenne, ce procédé de reconstruction générera le moins d'erreurs.

La reconstruction des données manquantes pour les 10 villes aux alentours de Bure est donnée dans le fichier joint : SCM_Andra_R2_results.xlsm.

E. Qualité de la reconstruction

On peut calculer l'espérance conditionnelle pour tout couple de variables, mais la qualité du résultat dépend évidemment des circonstances. Si $V_2 = V_1$, la reconstruction sera parfaite ; si V_2 et V_1 sont très éloignées, elle sera de très mauvaise qualité. Le pire, en théorie, est lorsque V_1 et V_2 sont indépendantes (une information sur l'une ne donne aucune information sur l'autre), mais ce n'est pas possible pour des villes, parce que nous vivons sur une petite planète. Prenons Bahia et Novosibirsk : toute série chronologique de température montrera immédiatement qu'elles sont dans des hémisphère opposés, ce qui est une forme d'information conjointe.

Le mieux, pour valider la méthode, est donc de tester la qualité de la reconstruction. Pour cela, on met de côté 20% des données de V_2 , pour lesquelles on n'a pas de trous, et on reconstitue ces données-là à partir de V_1 . L'idée de base est simple : on reconstitue quelque chose que l'on connaît déjà et on compare. Mais ici, nous n'avons pas besoin d'évaluer de

manière précise la qualité de la reconstruction : il nous suffit de savoir que, après reconstruction, toutes les séries ont la même apparence.

L'une des forces de la méthode RDM est que, pour la reconstruction de V2, on peut utiliser V1, mais aussi V3, V4, etc. On peut même utiliser V1 pour une partie, V3 pour une autre, etc. Mais alors, la reconstruction va devenir une opération très fine et très complexe et il va falloir justifier les choix qui seront faits. Nous n'entrerons pas dans ces détails techniques ici. Nous renvoyons au livre [RDM] pour les détails de la méthode.

Voici un exemple, de nature complètement différente, qui montre que la reconstruction par méthodes probabilistes peut donner d'excellents résultats.

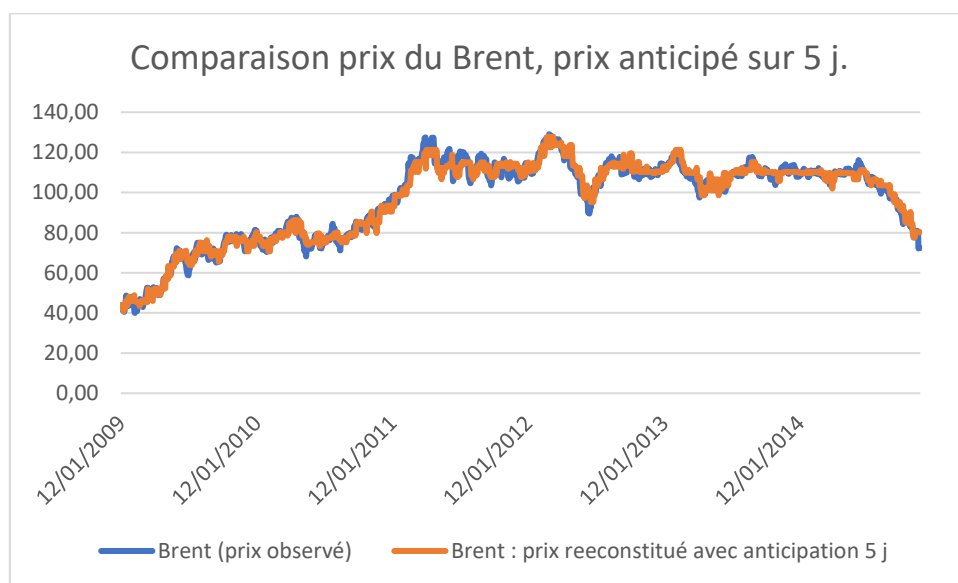


Fig. 6 : Comparaison entre le prix du Brent (pétrole de la mer du Nord) et sa reconstitution par la méthode d'espérance conditionnelle, à partir de deux indicateurs (prix de deux dérivés du pétrole), avec anticipation de 5 j.

F. Discussion : mise en œuvre de la méthode

Les § 1 à 4 ci-dessus sont conceptuellement très simples et peuvent être complètement automatisés. Ils requièrent cependant une certaine familiarité avec les probabilités, que tous les ingénieurs ne possèdent pas. Le §5 (choix de l'échantillon d'appui) exige patience et méticulosité.

La méthode la plus couramment utilisée par les ingénieurs consiste à représenter V_2 sous la forme d'une fonction affine de V_1 , c'est-à-dire de rechercher a, b tels que $aV_1 + b$ représente la meilleure approximation de V_2 (en général au sens de la norme quadratique). Excel possède les routines permettant de calculer ces coefficients de manière automatique. Après quoi, V_2 est remplacé par la valeur correspondante tirée de V_1 . Mais l'erreur fondamentale que commet cette méthode est que, de manière générale, V_2 n'est pas une fonction affine de V_1 . En procédant ainsi, on fait une hypothèse de modèle (modèle linéaire), ce que ne demande pas la méthode probabiliste à base d'espérance conditionnelle.

Voici un exemple. V_1 et V_2 comportent chacun 32 points ; un couple (v_1, v_2) peut être considéré comme un point du plan :

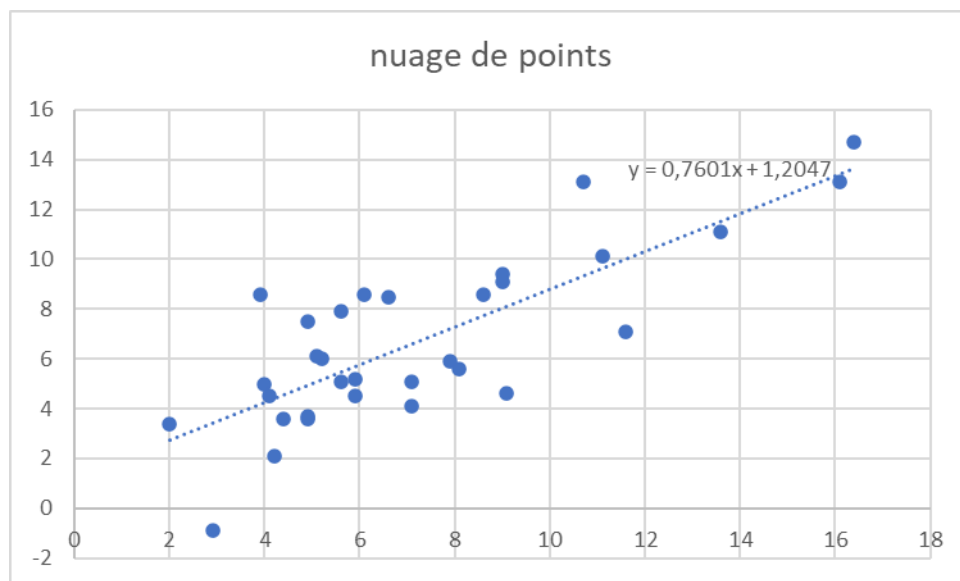


Fig. 7 : représentation de deux séries de données au moyen d'un nuage de points

Une fois cette représentation réalisée, Excel permet le calcul de la "courbe de tendance" (ici une droite) donnant la meilleure approximation du nuage par la courbe (au sens des moindres carrés). Ici, l'équation de cette droite est $y = 0,7601x + 1,2047$. Si maintenant on rencontre un x pour lequel y n'est pas connu (point qui ne figure pas dans le nuage), il suffit de se reporter à l'équation de la droite ; par exemple $x = 10$ donnera $y = 8.81$. Bien

sûr, on peut rechercher une approximation autre que linéaire : polynomiale, logarithmique, exponentielle, etc. : Excel en possède une grande quantité. Mais toutes résultent d'un choix empirique.

Remarque importante. – Il y a une différence essentielle entre l'approximation par courbe de tendance et l'approximation par espérance conditionnelle : la première est une méthode globale, la seconde est une méthode locale. Expliquons ceci en détail.

Il est complètement évident que les coefficients de la droite de régression dépendent de l'ensemble des points du tableau, puisque cette droite cherche à approximer l'ensemble de ces points et non quelques-uns pris isolément.

A l'inverse, si on cherche une approximation au moyen de la méthode d'espérance conditionnelle, on fait le calcul séparément pour tout intervalle issu d'un découpage de l'axe des x .



Fig. 8 : traitement des points dont l'abscisse est entre 5 et 7

Par exemple, s'il s'agit des points dont l'abscisse est entre 5 et 7 (graphe ci-dessus), tous les autres points sont éliminés et l'espérance conditionnelle est la moyenne des ordonnées des points conservés : c'est une construction locale.

Or, en toute logique, si on cherche à reconstituer V_2 sachant $V_1 = 6$, seules les valeurs de V_1 autour de 6 peuvent nous intéresser. Ce que fait V_2 lorsque $V_1 = 36$ n'a pas lieu d'intervenir dans la reconstruction.

Ce défaut de la courbe de tendance, pourtant majeur sur le plan méthodologique, n'est pratiquement jamais mentionné dans la littérature.

En résumé, nous ne recommandons pas l'utilisation des courbes de tendance pour la reconstitution des données manquantes : elles reposent sur trop d'hypothèses académiques et commettent trop d'erreurs conceptuelles. Pour un probabiliste, la reconstruction de données manquantes est un problème bien posé, qui relève des lois de la Nature.

V. La notion de "Maximum To Date" (MTD)

Elle est tout à fait essentielle dans le présent contexte. Etant donné une série chronologique x_n indexée par le temps (compté en jours, orienté dans le sens croissant), la série y_n est la série MTD associée si : $y_0 = x_0$, $y_1 = \max(y_0, x_1)$, ..., $y_n = \max(y_{n-1}, x_n)$, etc. Autrement dit, chaque terme y_n est le maximum du précédent et du terme x_n de la série de départ.

Les MTD associés aux stations retenues sont disponibles en sheets(2) du fichier SCM_Andra_R2_results.xlsm.

Il faut un certain temps (de l'ordre d'une année) pour que le MTD soit correctement capté. Ceci peut paraître étonnant, mais pendant la première année, la série chronologique est pratiquement sans passé ; il en va donc de même du MTD. Pour se représenter ceci, imaginons une série pratiquement plate, mais une fois tous les 50 ans, elle fait un bond en température. Celui qui n'enregistre que depuis 40 ans risque de ne pas voir ce bond.

Bien entendu, par définition même, le MTD est croissant et cette croissance tient au fait que l'on attend assez longtemps pour que le phénomène se manifeste ; elle n'a rien à voir avec un possible "réchauffement climatique".

Illustrons ceci par un premier exemple, très simple. Considérons une gaussienne, centrée réduite, de densité :

$$h(x) = \frac{\exp(-x^2 / 2)}{\sqrt{2\pi}}$$

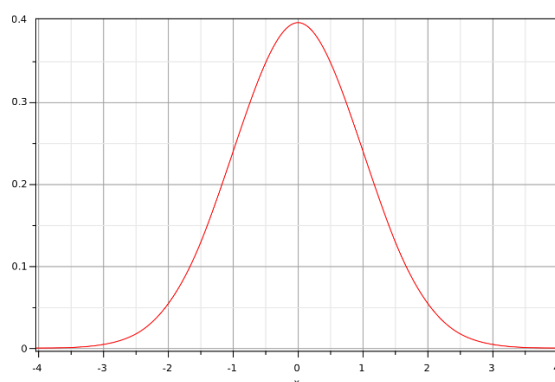


Fig. 9 : une gaussienne centrée réduite

Tout le monde sait que si l'on procède à des tirages à partir de cette loi, ces tirages sont le plus souvent entre -2 et 2. Mais si l'on augmente suffisamment le nombre de tirages, on rencontrera des tirages qui donneront les valeurs -30 et +40 ; la gaussienne n'est pas "détraquée" pour autant.

La notion de MTD est particulièrement bien adaptée au besoin exprimé par l'Andra. En effet, elle caractérise la température maximale atteinte en un endroit donné, à une date

quelconque, sans avoir à se soucier de modèles ou hypothèses liés au réchauffement climatique.

Récapitulons les résultats obtenus (voir fichier SCM_Andra_R2_results.xlsm)

	Dijon	Metz	Mulhouse	Nancy	Reims	Strasbourg	Troyes	Saint Dizier	Bure
1922-01-01	38,6	37,6	37,5	36,5	34,6	37,0	37,0	37,3	37,0
1972-01-01	38,6	37,7	37,9	36,5	34,6	37,4	37,0	38,0	37,0
2021-12-31	39,5	39,5	39,1	39,6	41,1	38,9	41,8	41,4	40,6
accrt1	0,0	0,1	0,4	0,0	0,0	0,4	0,0	0,7	0,0
accrt2	0,9	1,8	1,2	3,1	6,5	1,5	4,8	3,4	3,6
moyenne acc1	0,2								
moyenne acc2	3,0								

Tableau 10 : le MTD pour la période récente

accrt1 : accroissement sur la première période

accrt2 : accroissement sur la seconde période

moyenne : moyenne sur toutes les stations.

Les 9 stations disent la même chose : très faible élévation de température pendant les 50 premières années, beaucoup plus forte ensuite. Il ne s'agit pas d'un pronostic pour une date fixe, mais de ce qui peut être observé sur un laps de temps donné. Si le maximum jamais enregistré est de 40°C, il pourrait être de 43°C dans 50 ans.

Seconde Partie

Analyse sur les 50 ans passés

I. Coefficients de corrélation

Nous voulons maintenant comparer nos pronostics sur 50 ans avec ce que l'on a pu observer sur la période qui vient de s'achever : 1971-2021. Faut-il s'attendre à quelque chose de fondamentalement différent, ou bien à un simple prolongement du passé ?

Nous reprenons tout d'abord le calcul des coefficients de corrélation sur la période 1971-2021. Il y a beaucoup de trous et de données manquantes, et nous travaillons sur données brutes, c'est-à-dire sans aucune reconstitution. Si une donnée est manquante pour la station S_1 , nous supprimons la ligne correspondante pour S_2 dans le calcul de $\text{corr}(S_1, S_2)$. Il en résulte que moins de résultats sont disponibles que pour la période 1921-2021, pour laquelle nous procédions d'abord à une reconstruction. Voici les résultats :

Coefficient de corrélation entre les stations sur la période 1971-2021					
CC sur 50 ans	Dijon	Mulhouse	Nancy	Strasbourg	Saint Dizier
Dijon	1,00	0,97	0,97	0,96	0,97
Mulhouse	0,97	1,00	0,97	0,98	0,95
Nancy	0,97	0,97	1,00	0,97	0,99
Strasbourg	0,96	0,98	0,97	1,00	0,95
Saint Dizier	0,97	0,95	0,99	0,95	1,00

Tableau 11 : Calcul des coefficients de corrélation

Ils suffisent à montrer que, d'un point de vue des propriétés statistiques, ces stations sont extrêmement proches, ce qui justifiera a posteriori l'emploi des méthodes à base d'espérance conditionnelle.

Ces calculs sont différents de ceux faits au début de la Première Partie, qui exploitaient tout l'historique disponible, alors qu'ici nous n'utilisons que l'historique récent.

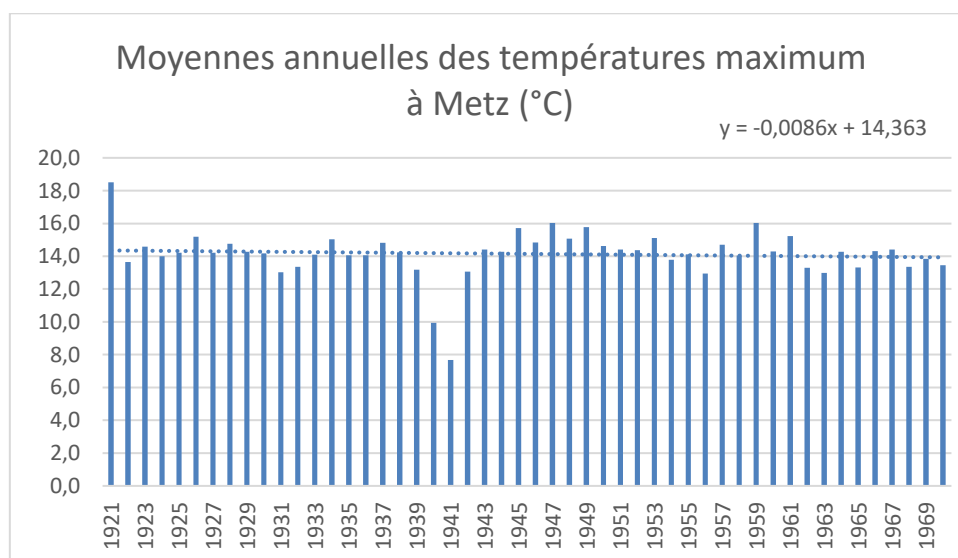
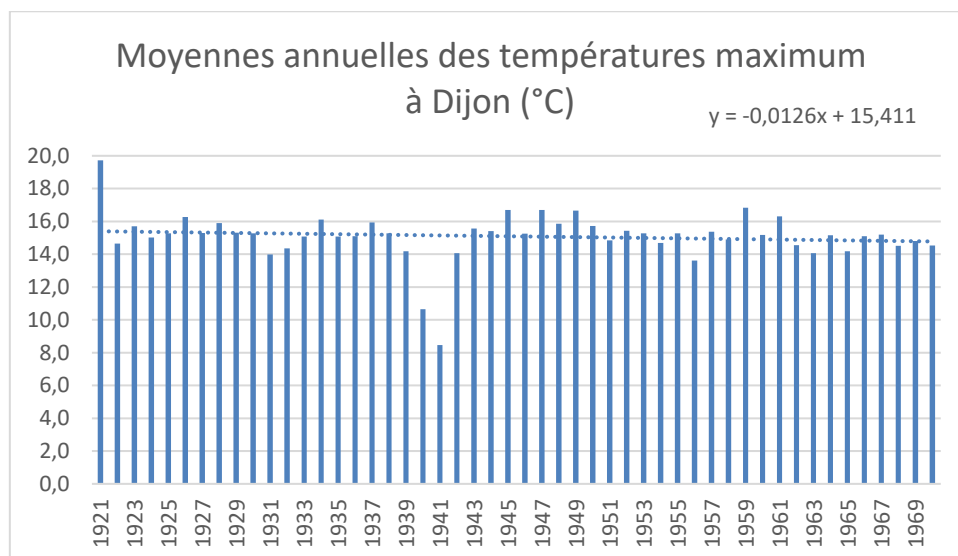
II. Baisse des températures sur 50 ans, de 1921 à 1970

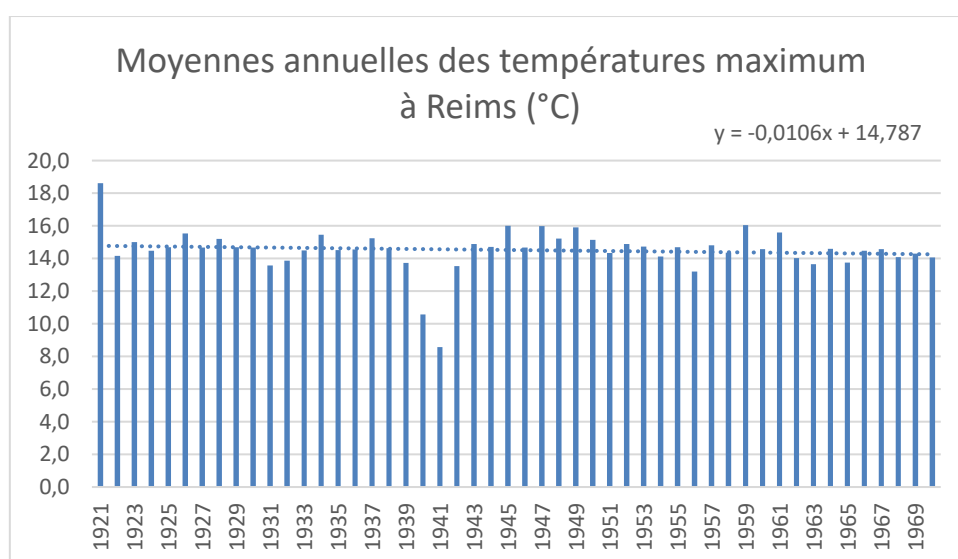
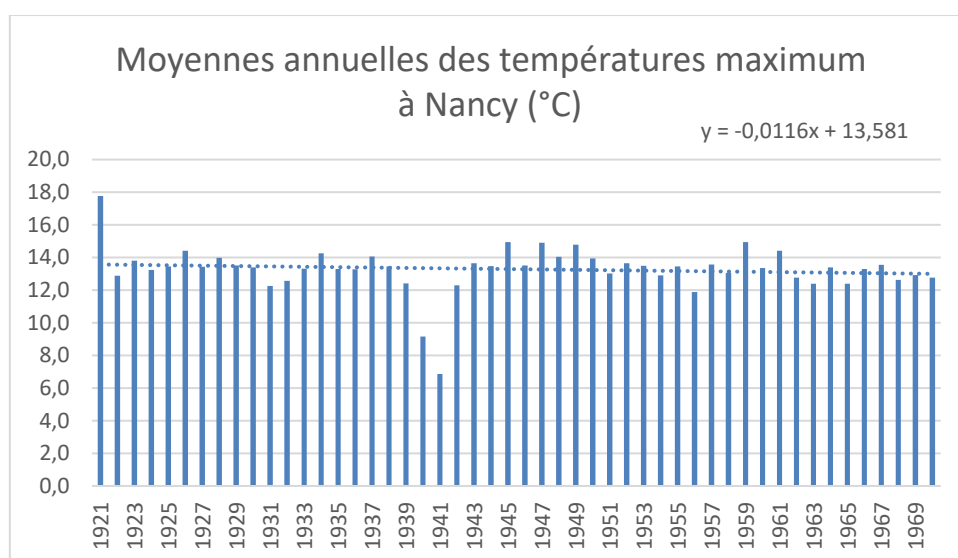
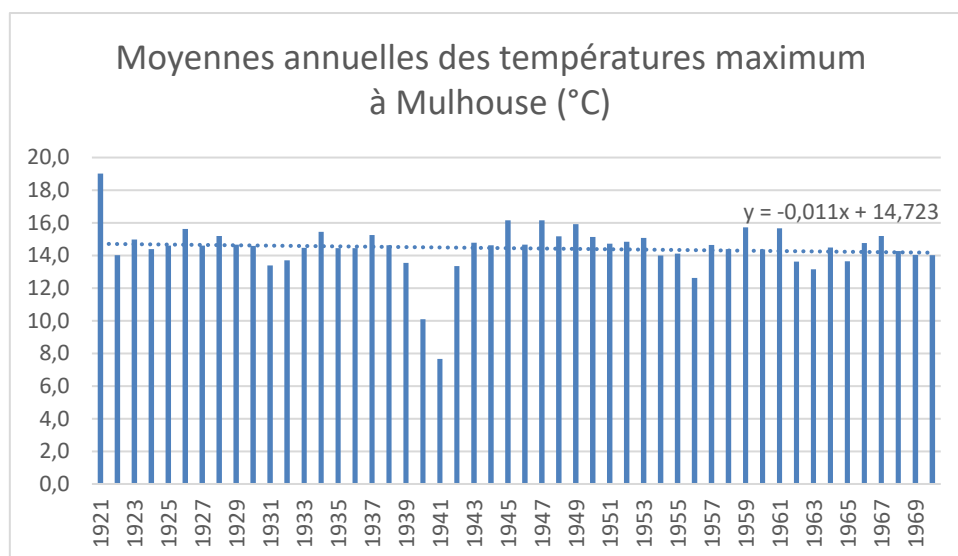
De 1921 à 1970, les températures maximales ont baissé, en moyenne annuelle :

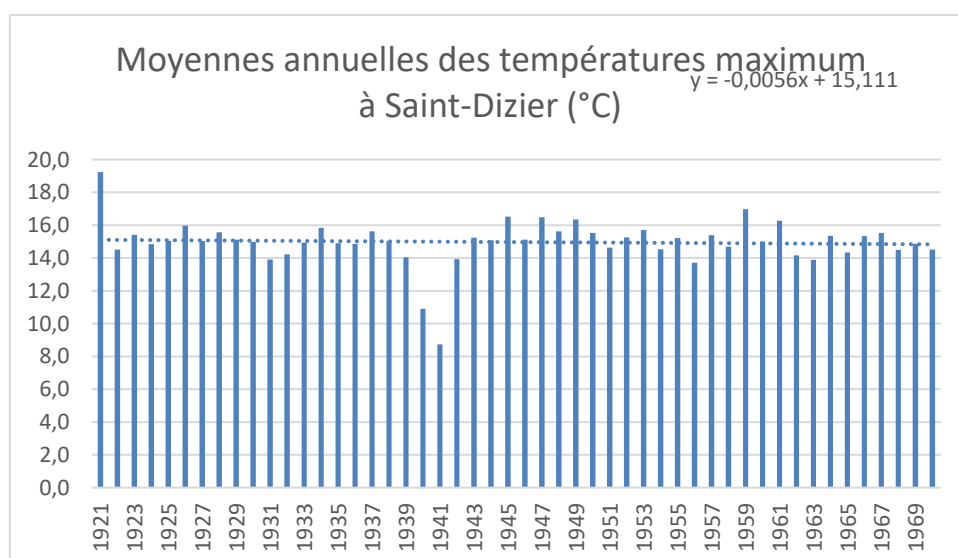
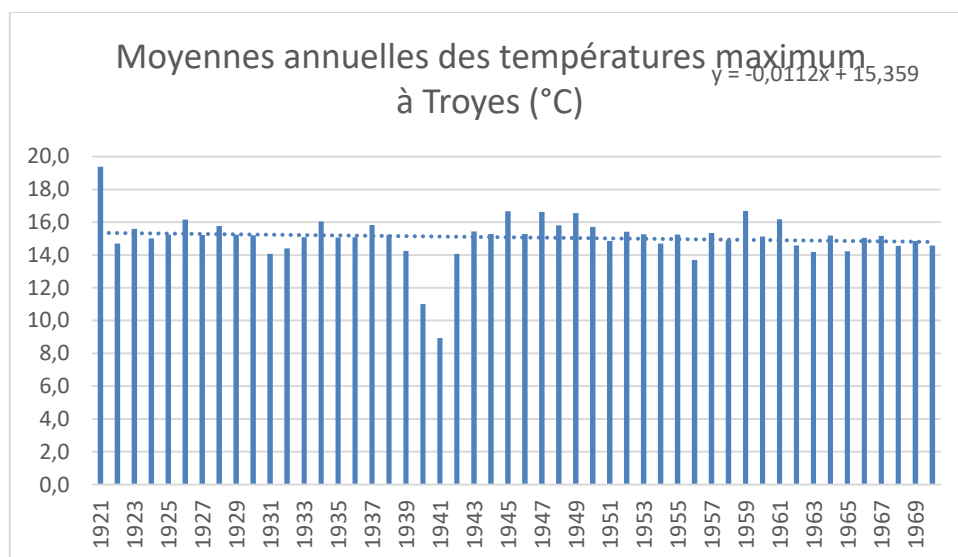
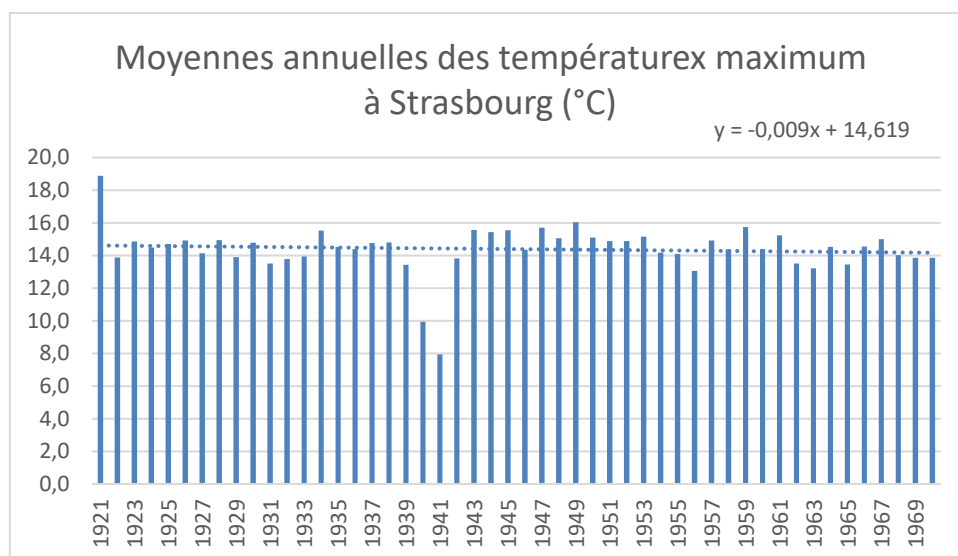
Année	Dijon	Metz	Mulhouse	Nancy	Reims	Strasbourg	Troyes	Saint-Dizier	Bure	Soulaines
1921	19,7	18,5	19,0	17,8	18,6	18,9	19,4	19,2	18,2	19,2
1922	14,6	13,7	14,0	12,9	14,2	13,9	14,7	14,5	13,3	14,5
1923	15,7	14,6	15,0	13,8	15,0	14,9	15,6	15,4	14,2	15,4
1924	15,0	14,0	14,4	13,2	14,5	14,5	15,0	14,8	13,6	14,8
1925	15,3	14,2	14,6	13,4	14,7	14,7	15,2	15,0	13,8	15,1
1926	16,3	15,2	15,6	14,4	15,5	14,9	16,2	16,0	14,8	16,0
1927	15,3	14,2	14,6	13,4	14,7	14,1	15,2	15,0	13,8	15,0
1928	15,9	14,8	15,2	14,0	15,2	14,9	15,8	15,6	14,4	15,6
1929	15,3	14,3	14,7	13,5	14,7	13,9	15,2	15,1	14,0	15,1
1930	15,3	14,2	14,6	13,4	14,7	14,8	15,2	15,0	13,8	15,0
1931	14,0	13,0	13,4	12,3	13,6	13,5	14,1	13,9	12,7	13,9
1932	14,4	13,4	13,7	12,6	13,9	13,8	14,4	14,2	13,0	14,2
1933	15,1	14,1	14,5	13,3	14,5	13,9	15,1	14,9	13,8	15,0
1934	16,1	15,0	15,5	14,3	15,5	15,5	16,0	15,8	14,7	15,9
1935	15,1	14,1	14,5	13,3	14,5	14,5	15,1	14,9	13,7	14,9
1936	15,1	14,1	14,5	13,3	14,6	14,4	15,1	14,9	13,7	14,9
1937	15,9	14,8	15,3	14,1	15,2	14,8	15,8	15,6	14,4	15,6
1938	15,3	14,2	14,6	13,5	14,6	14,8	15,2	15,0	13,9	15,1
1939	14,2	13,2	13,5	12,4	13,7	13,4	14,2	14,0	12,8	14,0
1940	10,7	9,9	10,1	9,2	10,6	9,9	11,0	10,9	9,7	10,9
1941	8,5	7,7	7,7	6,9	8,6	7,9	8,9	8,7	7,3	8,8
1942	14,1	13,1	13,3	12,3	13,5	13,8	14,1	13,9	12,7	14,0
1943	15,6	14,4	14,8	13,6	14,9	15,6	15,4	15,2	14,0	15,2
1944	15,4	14,3	14,6	13,5	14,7	15,4	15,3	15,1	13,8	15,1
1945	16,7	15,7	16,1	14,9	16,0	15,5	16,7	16,5	15,4	16,5
1946	15,3	14,8	14,7	13,5	14,7	14,4	15,3	15,1	13,9	15,1
1947	16,7	16,0	16,2	14,9	16,0	15,7	16,6	16,5	15,3	16,5
1948	15,9	15,1	15,2	14,0	15,2	15,1	15,8	15,6	14,4	15,6
1949	16,7	15,8	15,9	14,8	15,9	16,0	16,6	16,4	15,2	16,4
1950	15,7	14,6	15,1	13,9	15,1	15,1	15,7	15,5	14,4	15,6
1951	14,8	14,4	14,7	13,0	14,3	14,9	14,8	14,6	13,4	14,6
1952	15,4	14,4	14,8	13,7	14,9	14,9	15,4	15,3	14,1	15,3
1953	15,3	15,1	15,1	13,5	14,7	15,1	15,3	15,7	13,9	15,1
1954	14,7	13,8	14,0	12,9	14,1	14,2	14,7	14,5	13,3	14,5
1955	15,3	14,1	14,1	13,4	14,7	14,1	15,2	15,2	13,8	15,0
1956	13,6	12,9	12,6	11,9	13,2	13,1	13,7	13,7	12,4	13,5
1957	15,4	14,7	14,6	13,6	14,8	14,9	15,3	15,4	14,0	15,2
1958	14,9	14,0	14,4	13,1	14,3	14,4	14,9	14,7	13,5	14,7
1959	16,8	16,0	15,7	14,9	16,1	15,7	16,7	17,0	15,3	16,5
1960	15,2	14,3	14,4	13,4	14,6	14,4	15,1	15,0	13,7	15,0
1961	16,3	15,2	15,7	14,4	15,6	15,2	16,2	16,3	14,8	16,0
1962	14,6	13,3	13,6	12,8	14,0	13,5	14,6	14,2	13,2	14,4
1963	14,1	13,0	13,2	12,4	13,7	13,2	14,2	13,9	12,9	14,1
1964	15,2	14,3	14,5	13,4	14,6	14,5	15,2	15,4	13,8	15,0
1965	14,2	13,3	13,6	12,4	13,7	13,4	14,2	14,3	12,8	14,0
1966	15,1	14,3	14,8	13,3	14,5	14,5	15,1	15,3	13,6	14,9
1967	15,2	14,4	15,2	13,5	14,6	15,0	15,2	15,5	13,8	15,0
1968	14,5	13,4	14,3	12,6	14,1	14,0	14,6	14,5	13,2	14,4
1969	14,8	13,9	14,0	12,9	14,3	13,9	14,8	14,9	13,5	14,7
1970	14,5	13,4	14,0	12,8	14,1	13,9	14,6	14,5	13,2	14,4

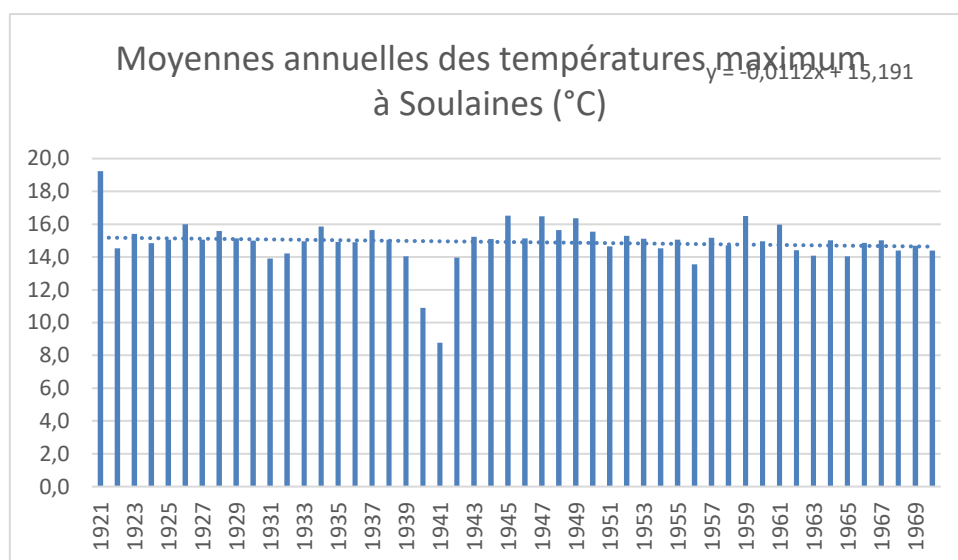
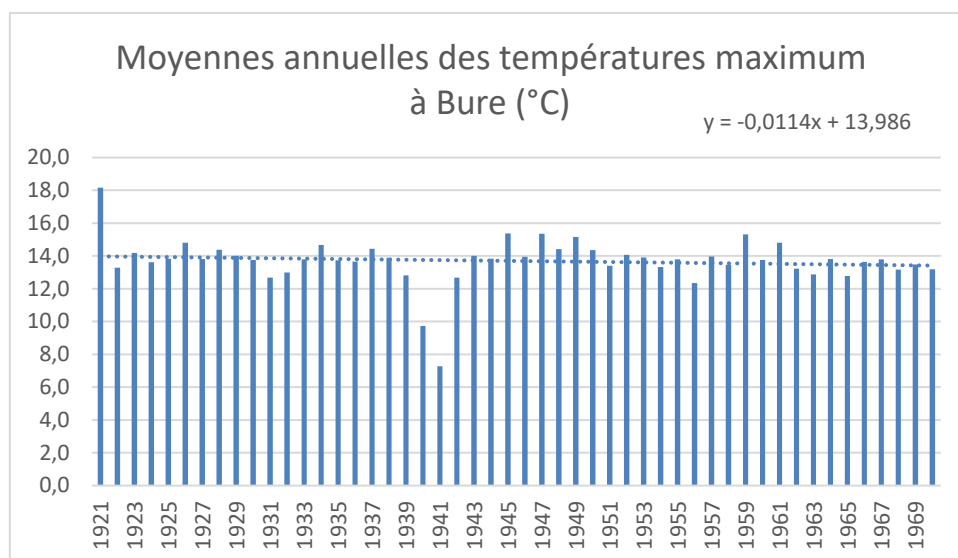
et ce pour toutes les stations.

Attention : ceci ne contredit pas les résultats précédents : il s'agit de moyennes annuelles de maxima, et non de pics de maxima. Il peut se faire qu'une journée, de temps en temps, soit extrêmement chaude, alors que, en moyenne, les températures décroissent. Il y a tellement d'indicateurs liés au climat que chacun peut y trouver ce qui l'arrange.









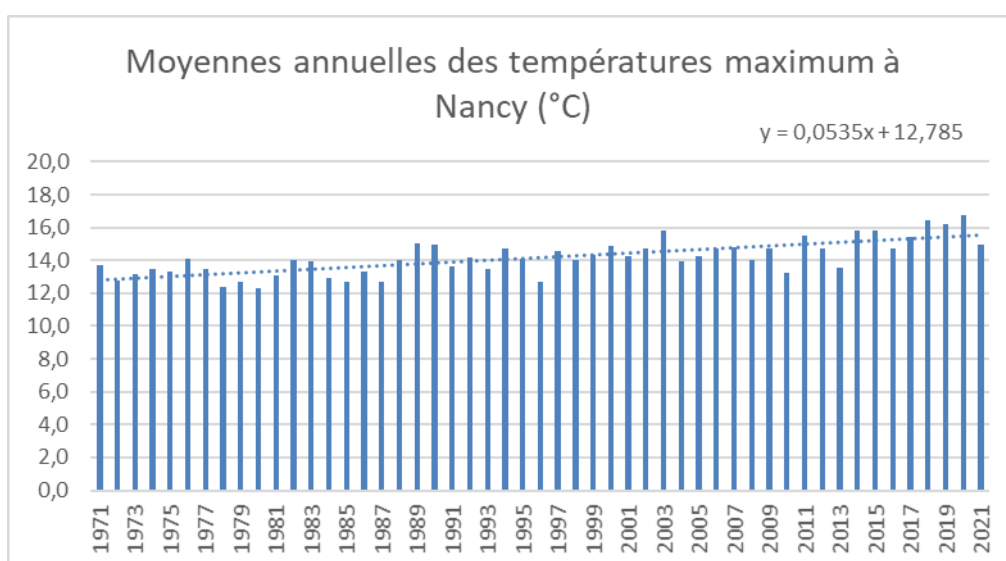
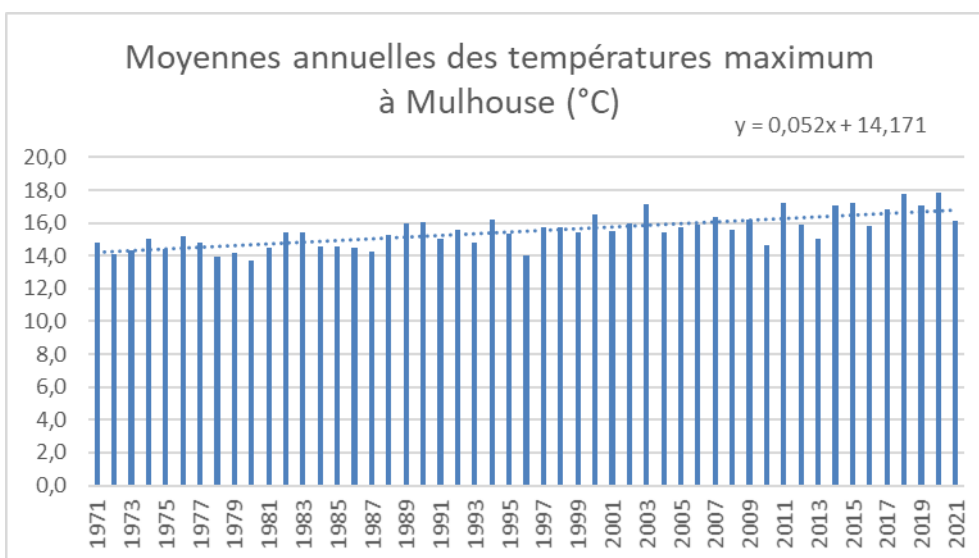
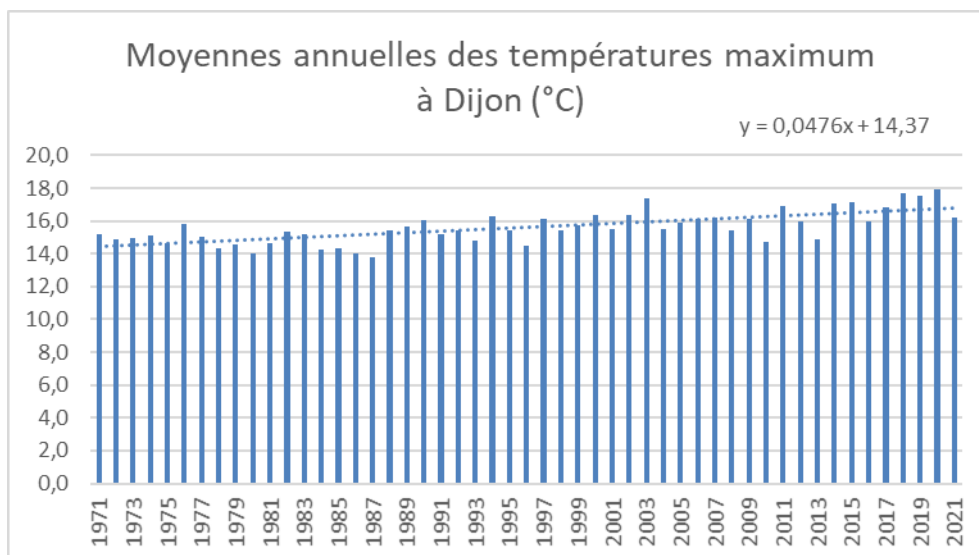
La décroissance est d'environ 1.2°C sur cent ans, la même pour toutes les stations. Plus précisément :

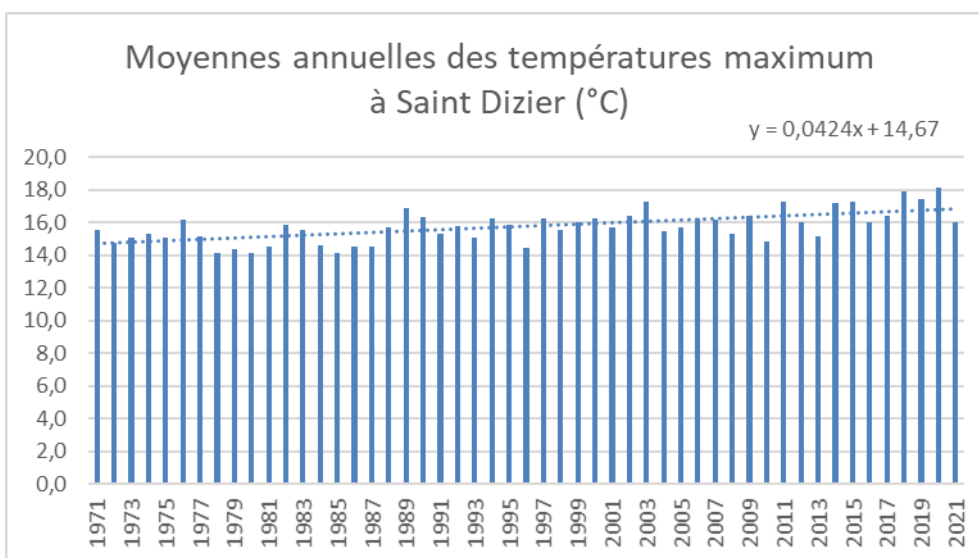
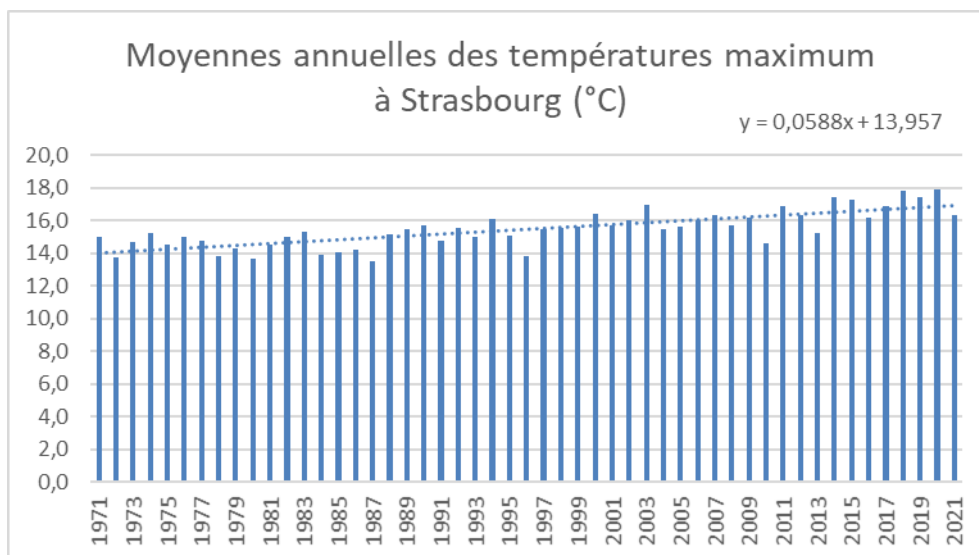
Station	Augmentation sur 50 ans en °C
Dijon	-0,63
Metz	-0,43
Mulhouse	-0,55
Nancy	-0,58
Reims	-0,53
Strasbourg	-0,45
Troyes	-0,56
Saint-Dizier	-0,28
Bure	-0,57
Soulaines	-0,56

III. Hausse des températures, de 1971 à 2021

Depuis 1971, par contraste, les moyennes annuelles maximales des températures ont monté, et ce pour toutes les stations :

Année	Dijon	Mulhouse	Nancy	Strasbourg	Saint Dizier
1971	15,2	14,8	13,7	15,0	15,5
1972	14,9	14,1	12,8	13,8	14,8
1973	15,0	14,4	13,2	14,7	15,1
1974	15,1	15,0	13,5	15,2	15,3
1975	14,7	14,4	13,3	14,5	15,1
1976	15,9	15,2	14,1	15,0	16,2
1977	15,0	14,8	13,5	14,8	15,2
1978	14,3	13,9	12,4	13,8	14,2
1979	14,6	14,2	12,7	14,3	14,4
1980	14,0	13,7	12,3	13,6	14,2
1981	14,6	14,5	13,1	14,5	14,6
1982	15,3	15,4	14,0	15,0	15,8
1983	15,2	15,4	14,0	15,3	15,6
1984	14,3	14,6	12,9	13,9	14,7
1985	14,3	14,6	12,7	14,1	14,1
1986	14,0	14,5	13,3	14,2	14,5
1987	13,8	14,2	12,7	13,5	14,5
1988	15,4	15,3	14,0	15,1	15,7
1989	15,7	15,9	15,0	15,5	16,9
1990	16,0	16,1	14,9	15,7	16,4
1991	15,2	15,1	13,6	14,7	15,4
1992	15,4	15,6	14,2	15,6	15,8
1993	14,8	14,8	13,5	15,0	15,1
1994	16,3	16,2	14,7	16,1	16,3
1995	15,5	15,3	14,1	15,1	15,9
1996	14,4	14,0	12,7	13,8	14,5
1997	16,1	15,7	14,6	15,5	16,3
1998	15,4	15,7	14,0	15,5	15,5
1999	15,8	15,5	14,3	15,7	16,0
2000	16,4	16,5	14,9	16,4	16,3
2001	15,5	15,5	14,2	15,7	15,7
2002	16,4	16,0	14,8	16,0	16,4
2003	17,4	17,1	15,8	17,0	17,3
2004	15,5	15,4	14,0	15,5	15,4
2005	15,9	15,7	14,3	15,6	15,7
2006	16,2	15,9	14,7	16,0	16,3
2007	16,2	16,3	14,8	16,4	16,2
2008	15,5	15,6	14,1	15,7	15,3
2009	16,1	16,2	14,7	16,2	16,4
2010	14,7	14,6	13,2	14,6	14,8
2011	16,9	17,2	15,5	16,9	17,3
2012	16,0	15,9	14,7	16,3	16,0
2013	14,9	15,0	13,6	15,2	15,2
2014	17,1	17,0	15,8	17,4	17,2
2015	17,2	17,3	15,8	17,3	17,3
2016	16,0	15,8	14,7	16,2	16,0
2017	16,8	16,8	15,4	16,9	16,4
2018	17,7	17,8	16,4	17,8	17,9
2019	17,5	17,1	16,2	17,5	17,4
2020	17,9	17,9	16,8	17,9	18,2
2021	16,2	16,1	15,0	16,3	16,1





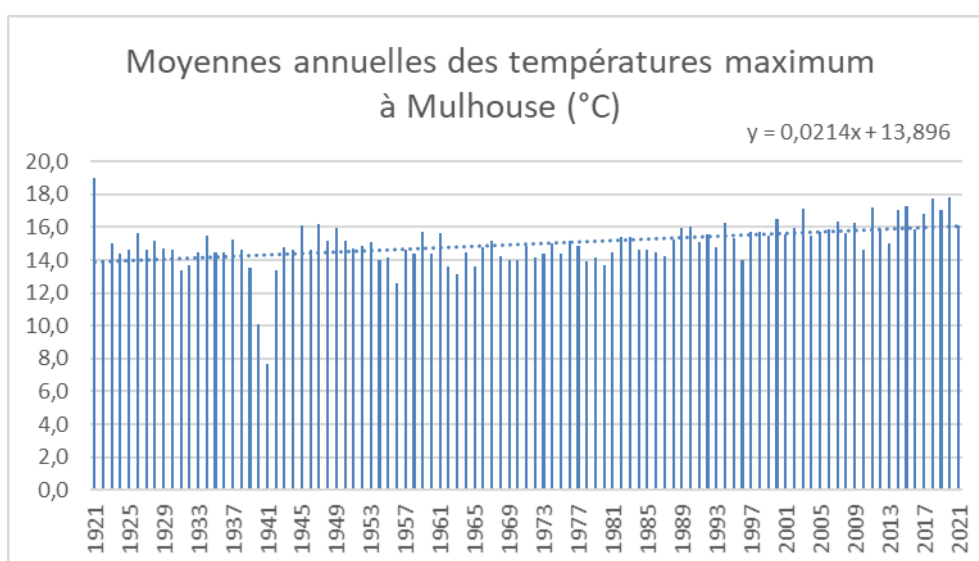
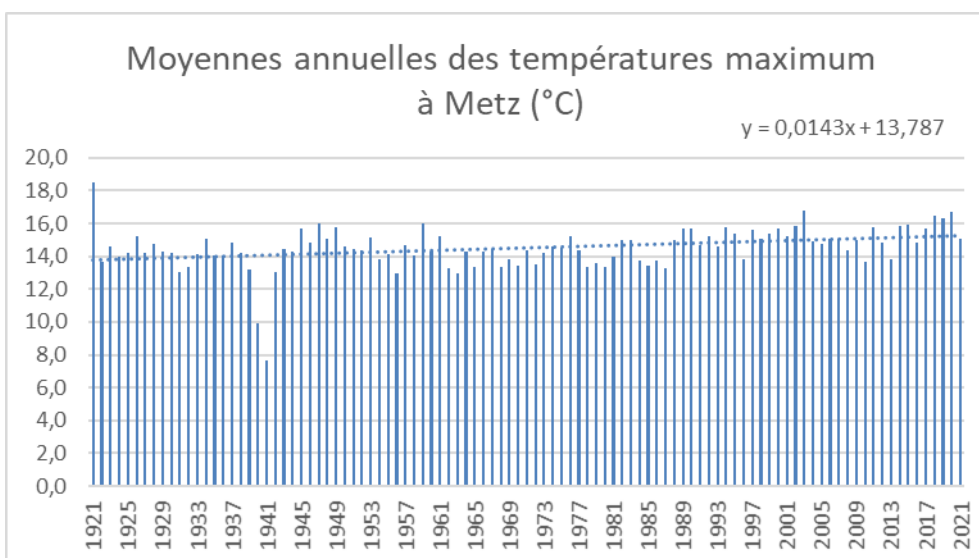
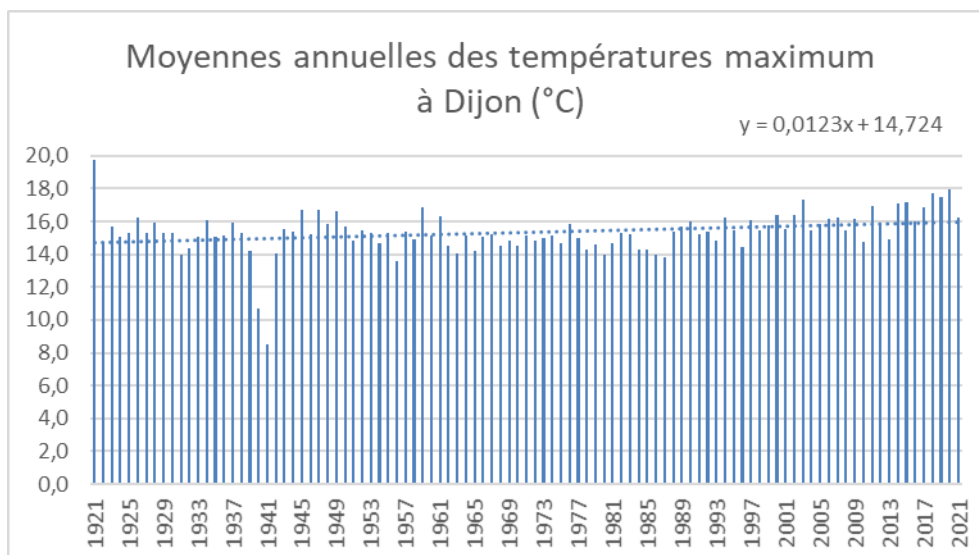
L'augmentation est d'environ 2.4°C sur 50 ans :

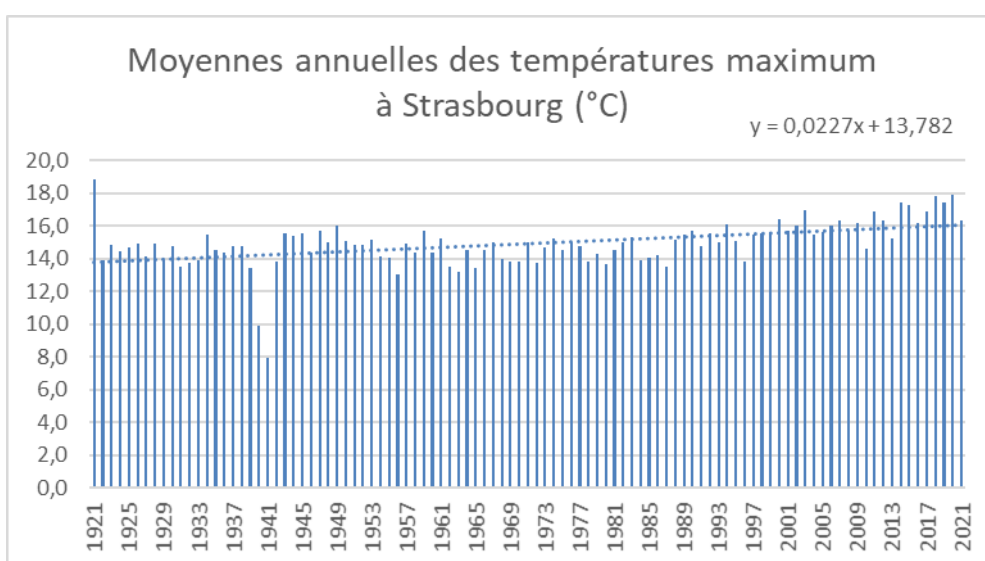
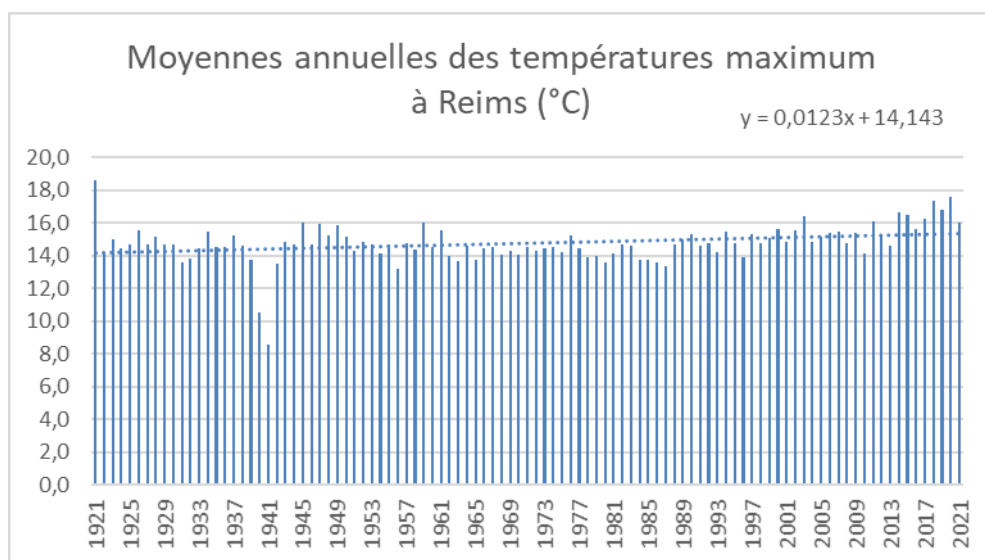
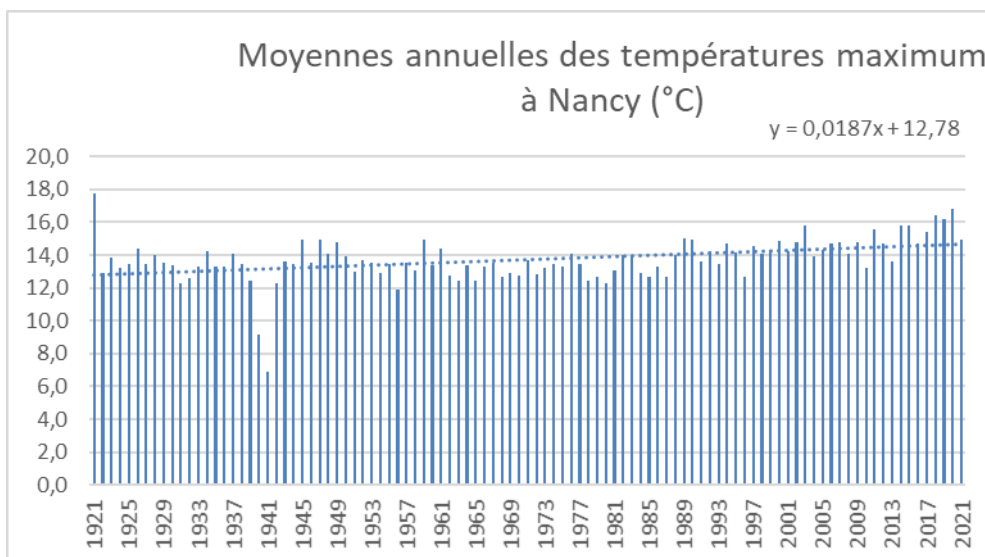
Station	Augmentation sur 50 ans en °C
Dijon	2,38
Mulhouse	2,6
Nancy	2,675
Strasbourg	2,94
Saint Dizier	2,12

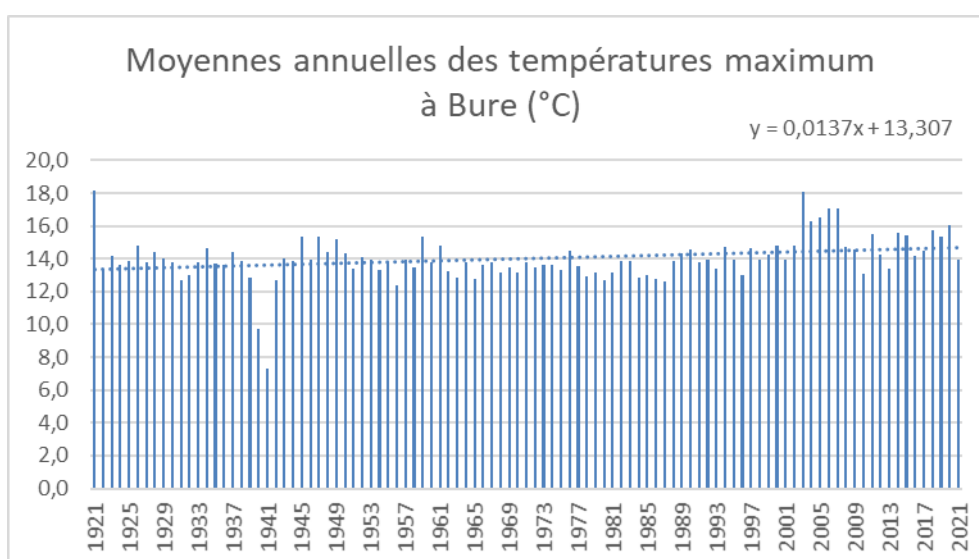
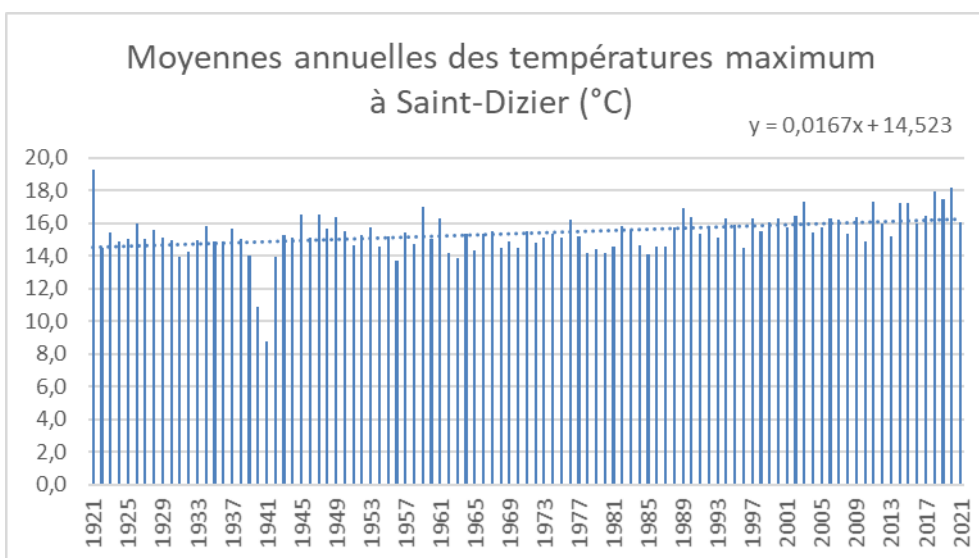
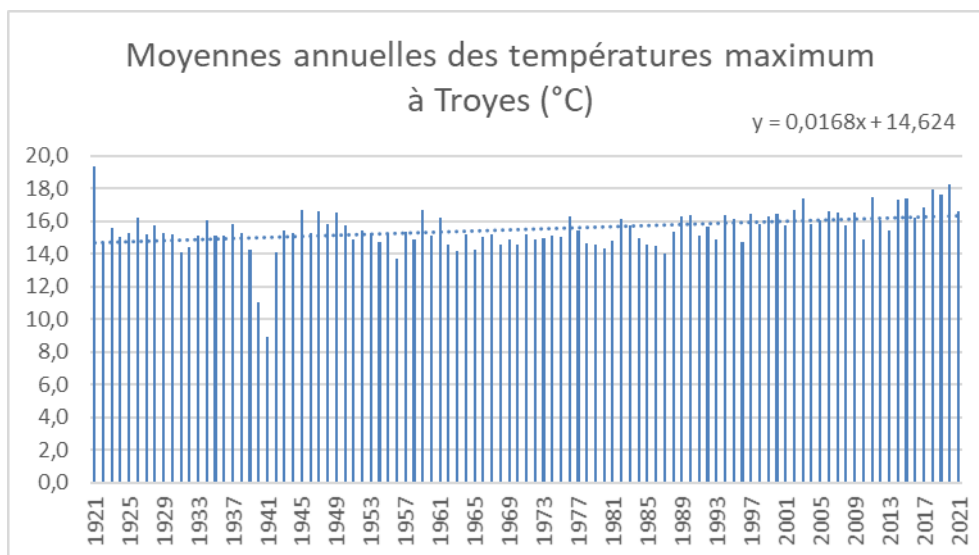
IV. Hausse des températures, sur cent ans, de 1921 à 2021

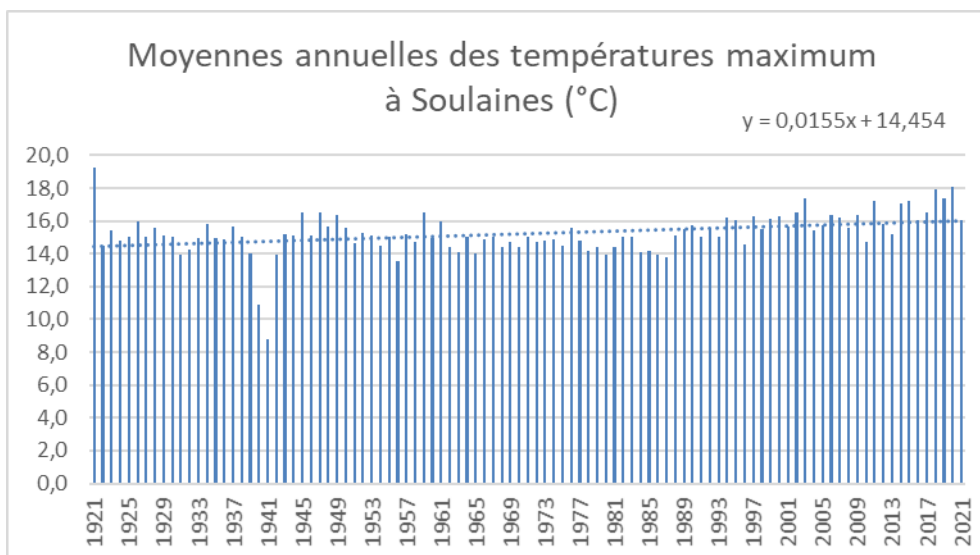
Sur cent ans, on observe une hausse modérée, la même pour toutes les stations.

Année	Dijon	Metz	Mulhouse	Nancy	Reims	Strasbourg	Troyes	Saint-Dizier	Bure	Soulaines
1921	19,7	18,5	19,0	17,8	18,6	18,9	19,4	19,2	18,2	19,2
1922	14,6	13,7	14,0	12,9	14,2	13,9	14,7	14,5	13,3	14,5
1923	15,7	14,6	15,0	13,8	15,0	14,9	15,6	15,4	14,2	15,4
1924	15,0	14,0	14,4	13,2	14,5	14,5	15,0	14,8	13,6	14,8
1925	15,3	14,2	14,6	13,4	14,7	14,7	15,2	15,0	13,8	15,1
1926	16,3	15,2	15,6	14,4	15,5	14,9	16,2	16,0	14,8	16,0
1927	15,3	14,2	14,6	13,4	14,7	14,1	15,2	15,0	13,8	15,0
1928	15,9	14,8	15,2	14,0	15,2	14,9	15,8	15,6	14,4	15,6
1929	15,3	14,3	14,7	13,5	14,7	13,9	15,2	15,1	14,0	15,1
1930	15,3	14,2	14,6	13,4	14,7	14,8	15,2	15,0	13,8	15,0
1931	14,0	13,0	13,4	12,3	13,6	13,5	14,1	13,9	12,7	13,9
1932	14,4	13,4	13,7	12,6	13,9	13,8	14,4	14,2	13,0	14,2
1933	15,1	14,1	14,5	13,3	14,5	13,9	15,1	14,9	13,8	15,0
1934	16,1	15,0	15,5	14,3	15,5	15,5	16,0	15,8	14,7	15,9
1935	15,1	14,1	14,5	13,3	14,5	14,5	15,1	14,9	13,7	14,9
1936	15,1	14,1	14,5	13,3	14,6	14,4	15,1	14,9	13,7	14,9
1937	15,9	14,8	15,3	14,1	15,2	14,8	15,8	15,6	14,4	15,6
1938	15,3	14,2	14,6	13,5	14,6	14,8	15,2	15,0	13,9	15,1
1939	14,2	13,2	13,5	12,4	13,7	13,4	14,2	14,0	12,8	14,0
1940	10,7	9,9	10,1	9,2	10,6	9,9	11,0	10,9	9,7	10,9
1941	8,5	7,7	7,7	6,9	8,6	7,9	8,9	8,7	7,3	8,8
1942	14,1	13,1	13,3	12,3	13,5	13,8	14,1	13,9	12,7	14,0
1943	15,6	14,4	14,8	13,6	14,9	15,6	15,4	15,2	14,0	15,2
1944	15,4	14,3	14,6	13,5	14,7	15,4	15,3	15,1	13,8	15,1
1945	16,7	15,7	16,1	14,9	16,0	15,5	16,7	16,5	15,4	16,5
1946	15,3	14,8	14,7	13,5	14,7	14,4	15,3	15,1	13,9	15,1
1947	16,7	16,0	16,2	14,9	16,0	15,7	16,6	16,5	15,3	16,5
1948	15,9	15,1	15,2	14,0	15,2	15,1	15,8	15,6	14,4	15,6
1949	16,7	15,8	15,9	14,8	15,9	16,0	16,6	16,4	15,2	16,4
1950	15,7	14,6	15,1	13,9	15,1	15,1	15,7	15,5	14,4	15,6
1951	14,8	14,4	14,7	13,0	14,3	14,9	14,8	14,6	13,4	14,6
1952	15,4	14,4	14,8	13,7	14,9	14,9	15,4	15,3	14,1	15,3
1953	15,3	15,1	15,1	13,5	14,7	15,1	15,3	15,7	13,9	15,1
1954	14,7	13,8	14,0	12,9	14,1	14,2	14,7	14,5	13,3	14,5
1955	15,3	14,1	14,1	13,4	14,7	14,1	15,2	15,2	13,8	15,0
1956	13,6	12,9	12,6	11,9	13,2	13,1	13,7	13,7	12,4	13,5
1957	15,4	14,7	14,6	13,6	14,8	14,9	15,3	15,4	14,0	15,2
1958	14,9	14,0	14,4	13,1	14,3	14,4	14,9	14,7	13,5	14,7
1959	16,8	16,0	15,7	14,9	16,1	15,7	16,7	17,0	15,3	16,5
1960	15,2	14,3	14,4	13,4	14,6	14,4	15,1	15,0	13,7	15,0
1961	16,3	15,2	15,7	14,4	15,6	15,2	16,2	16,3	14,8	16,0
1962	14,6	13,3	13,6	12,8	14,0	13,5	14,6	14,2	13,2	14,4
1963	14,1	13,0	13,2	12,4	13,7	13,2	14,2	13,9	12,9	14,1
1964	15,2	14,3	14,5	13,4	14,6	14,5	15,2	15,4	13,8	15,0
1965	14,2	13,3	13,6	12,4	13,7	13,4	14,2	14,3	12,8	14,0
1966	15,1	14,3	14,8	13,3	14,5	14,5	15,1	15,3	13,6	14,9
1967	15,2	14,4	15,2	13,5	14,6	15,0	15,2	15,5	13,8	15,0
1968	14,5	13,4	14,3	12,6	14,1	14,0	14,6	14,5	13,2	14,4
1969	14,8	13,9	14,0	12,9	14,3	13,9	14,8	14,9	13,5	14,7
1970	14,5	13,4	14,0	12,8	14,1	13,9	14,6	14,5	13,2	14,4
1971	15,2	14,3	14,8	13,7	14,6	15,0	15,2	15,5	13,8	15,0
1972	14,9	13,5	14,1	12,8	14,3	13,8	14,9	14,8	13,5	14,7
1973	15,0	14,2	14,4	13,2	14,4	14,7	15,0	15,1	13,6	14,8
1974	15,1	14,6	15,0	13,5	14,5	15,2	15,1	15,3	13,6	14,9
1975	14,7	14,5	14,4	13,3	14,2	14,5	15,0	15,1	13,3	14,5
1976	15,9	15,2	15,2	14,1	15,2	15,0	16,3	16,2	14,4	15,6
1977	15,0	14,3	14,8	13,5	14,4	14,8	15,4	15,2	13,5	14,8
1978	14,3	13,4	13,9	12,4	13,9	13,8	14,6	14,2	12,9	14,2
1979	14,6	13,6	14,2	12,7	14,0	14,3	14,6	14,4	13,2	14,4
1980	14,0	13,3	13,7	12,3	13,6	13,6	14,3	14,2	12,7	13,9
1981	14,6	14,0	14,5	13,1	14,1	14,5	14,8	14,6	13,2	14,4
1982	15,3	15,0	15,4	14,0	14,7	15,0	16,2	15,8	13,8	15,1
1983	15,2	15,0	15,4	14,0	14,6	15,3	15,8	15,6	13,8	15,0
1984	14,3	13,7	14,6	12,9	13,8	13,9	15,0	14,7	12,8	14,1
1985	14,3	13,5	14,6	12,7	13,8	14,1	14,6	14,1	13,0	14,2
1986	14,0	13,8	14,5	13,3	13,6	14,2	14,5	14,5	12,7	13,9
1987	13,8	13,3	14,2	12,7	13,4	13,5	14,0	14,5	12,6	13,8
1988	15,4	15,0	15,3	14,0	14,7	15,1	15,3	15,7	13,8	15,1
1989	15,7	15,7	15,9	15,0	15,1	15,5	16,3	16,9	14,3	15,5
1990	16,0	15,7	16,1	14,9	15,3	15,7	16,3	16,4	14,5	15,7
1991	15,2	14,7	15,1	13,6	14,6	14,7	15,1	15,4	13,8	15,0
1992	15,4	15,3	15,6	14,2	14,8	15,6	15,7	15,8	14,0	15,6
1993	14,8	14,6	14,8	13,5	14,2	15,0	14,9	15,1	13,4	15,0
1994	16,3	15,8	16,2	14,7	15,5	16,1	16,4	16,3	14,7	16,2
1995	15,5	15,4	15,3	14,1	14,8	15,1	16,1	15,9	13,9	16,0
1996	14,4	13,8	14,0	12,7	13,9	13,8	14,7	14,5	13,0	14,6
1997	16,1	15,6	15,7	14,6	15,3	15,5	16,4	16,3	14,6	16,3
1998	15,4	15,1	15,7	14,0	14,8	15,5	15,8	15,5	14,0	15,5
1999	15,8	15,4	15,5	14,3	15,1	15,7	16,3	16,0	14,2	16,1
2000	16,4	15,7	16,5	14,9	15,6	16,4	16,5	16,3	14,8	16,3
2001	15,5	15,2	15,5	14,2	14,8	15,7	15,7	15,7	14,0	15,7
2002	16,4	15,8	16,0	14,8	15,6	16,0	16,7	16,4	14,8	16,5
2003	17,4	16,7	17,1	15,8	16,4	17,0	17,4	17,3	18,1	17,4
2004	15,5	14,9	15,4	14,0	14,8	15,5	15,8	15,4	16,3	15,5
2005	15,9	14,8	15,7	14,3	15,2	15,6	16,1	15,7	16,5	15,7
2006	16,2	15,0	15,9	14,7	15,4	16,0	16,6	16,3	17,1	16,4
2007	16,2	15,1	16,3	14,8	15,5	16,4	16,5	16,2	17,1	16,2
2008	15,5	14,3	15,6	14,1	14,8	15,7	15,8	15,3	14,7	15,6
2009	16,1	15,0	16,2	14,7	15,4	16,2	16,5	16,4	14,6	16,3
2010	14,7	13,7	14,6	13,2	14,2	14,6	14,8	14,8	13,1	14,7
2011	16,9	15,8	17,2	15,5	16,1	16,9	17,4	17,3	15,5	17,2
2012	16,0	14,9	15,9	14,7	15,4	16,3	16,1	16,0	14,3	15,8
2013	14,9	13,8	15,0	13,6	14,7	15,2	15,4	15,2	13,4	15,2
2014	17,1	15,9	17,0	15,8	16,7	17,4	17,3	17,2	15,5	17,1
2015	17,2	16,0	17,3	15,8	16,5	17,3	17,4	17,3	15,4	17,2
2016	16,0	14,8	15,8	14,7	15,6	16,2	16,2	16,0	14,2	16,0
2017	16,8	15,7	16,8	15,4	16,3	16,9	16,8	16,4	14,5	16,5
2018	17,7	16,5	17,8	16,4	17,4	17,8	17,9	17,9	15,7	17,9
2019	17,5	16,3	17,1	16,2	16,8	17,5	17,6	17,4	15,3	17,4
2020	17,9	16,7	17,9	16,8	17,6	17,9	18,3	18,2	16,0	18,1
2021	16,2	15,1	16,1	15,0	16,0	16,3	16,6	16,1	13,9	16,1









Station	Augmentation sur 100 ans en °C
Dijon	1,23
Metz	1,43
Mulhouse	2,14
Nancy	1,87
Reims	1,23
Strasbourg	2,27
Troyes	1,68
Saint-Dizier	1,67
Bure	1,37
Soulaines	1,55

L'augmentation moyenne est de 1.3°C sur 100 ans.

Troisième Partie

Variations locales

I. Introduction

Dans cette Partie, nous avons voulu savoir si des études semblables à la nôtre avaient été faites pour d'autres zones. Il s'agit de zones de 100 km x 100 km approximativement, étudiées sur 100 ou 200 ans. Emmanuel Leroy-Ladurie mentionne que des évolutions sont perceptibles à cette échelle.

Bien sûr, l'immense majorité des études portant sur l'évolution du climat se font à l'échelle de la planète tout entière : c'est typiquement le cas des documents produits par le GIEC. Parvenir à des résultats concrets sur une petite zone exige un très gros effort de documentation, surtout si l'on cherche à remonter à des époques où les relevés systématiques de température n'existaient pas encore.

Météo France mentionne le DRIAS, un site du Ministère de la Transition Écologique ; il fait des prévisions sur l'évolution du climat en France. Les régions concernées sont les Alpes, les Pyrénées et la Métropole dans l'ensemble. Il n'y a pas d'étude pour la région de Bure, ni pour l'Est en général.

Nous avons trouvé très peu d'études à cette échelle, si bien que nous avons voulu en rendre compte de manière détaillée, y compris lorsqu'elles comportent des erreurs. Nous faisons ensuite figurer les relevés de température pris sur le site ECA pour un certain nombre de villes : cela caractérise seulement le passé récent (1945-2020) mais présente cependant un certain intérêt.

II. Variations locales documentées

A. Bordeaux

1. Les températures

L'évolution du climat à Bordeaux entre 1921 et 2018.
Michel Dobrijevic et Morgane Lendrin

Résumé : Grâce aux données Météo-France de la station de Mérignac, nous avons vérifié de manière objective que le réchauffement climatique observé globalement au niveau mondial est aussi une réalité en Gironde. Par exemple, l'augmentation de la température moyenne annuelle mesurée à Mérignac est de 1,3°C entre la période avant 1960 et celle après 2008, donc plus importante que celle observée au niveau mondial. Nous avons aussi

mis en évidence la variation d'autres paramètres climatiques comme le régime des vents, les précipitations, l'humidité relative et la durée d'insolation

https://www.researchgate.net/publication/334317985_L'evolution_du_climat_a_Bordeaux_entre_1921_et_2018

La SCM est en désaccord avec le résultat obtenu et conteste la pertinence de la méthode adoptée par ces auteurs.

Voici les données de température moyenne annuelle à Bordeaux, depuis 1945 (source ECA) ; colonne du milieu : nombre de jours de mesure effective.

année	nb jours	t moy		année	nb jours	t moy
1945	183	14,72		1982	362	13,64
1946	364	12,11		1983	362	13,44
1947	365	13,55		1984	364	12,67
1948	366	13,08		1985	361	12,30
1949	365	13,43		1986	362	12,64
1950	365	12,92		1987	361	12,95
1951	365	12,33		1988	364	13,64
1952	366	12,84		1989	362	14,52
1953	365	12,50		1990	363	14,51
1954	365	12,13		1991	365	13,37
1955	365	12,77		1992	364	13,44
1956	366	11,18		1993	364	13,35
1957	365	12,41		1994	365	14,58
1958	365	12,58		1995	364	14,48
1959	365	13,41		1996	366	13,62
1960	366	12,66		1997	365	14,92
1961	365	13,50		1998	365	13,98
1962	365	11,97		1999	365	14,35
1963	365	11,65		2000	366	14,40
1964	366	12,29		2001	365	13,91
1965	365	12,29		2002	365	14,42
1966	365	12,95		2003	364	14,90
1967	365	12,54		2004	366	13,79
1968	366	12,75		2005	365	13,84
1969	365	12,39		2006	365	14,59
1970	365	12,49		2007	365	13,86
1971	365	12,31		2008	366	13,65
1972	366	12,07		2009	363	14,28
1973	365	12,28		2010	363	13,24
1974	365	12,65		2011	365	15,02
1975	365	12,76		2012	366	13,89
1976	366	13,07		2013	364	13,67
1977	365	12,78		2014	365	14,99
1978	365	12,57		2015	365	14,68
1979	365	12,64		2016	366	14,39
1980	366	12,23		2017	365	14,45
1981	365	13,28		2018	345	14,61

Tableau 1 : températures moyennes Bordeaux

Il faut faire très attention à ne pas inclure une année trop incomplète, comme 1945 : les mois éliminés sont des mois d'hiver et l'année est considérée comme plus chaude qu'elle ne l'est en réalité.

Voici la représentation graphique, avec droite de tendance :

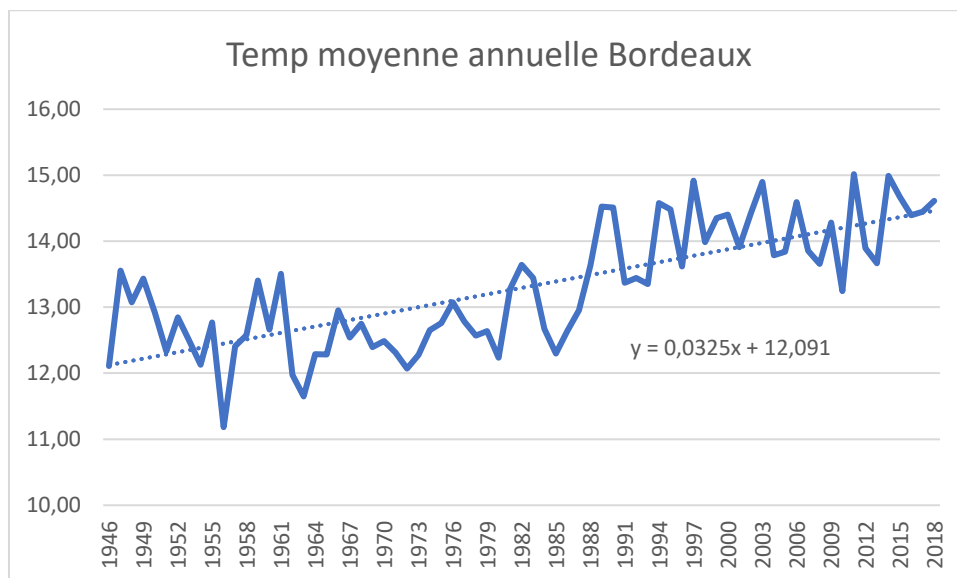


Fig. 2 : température moyenne annuelle Bordeaux

Selon la droite de tendance, l'accroissement moyen serait de 3°C en 100 ans. Il est plus faible si on se limite aux 30 dernières années :

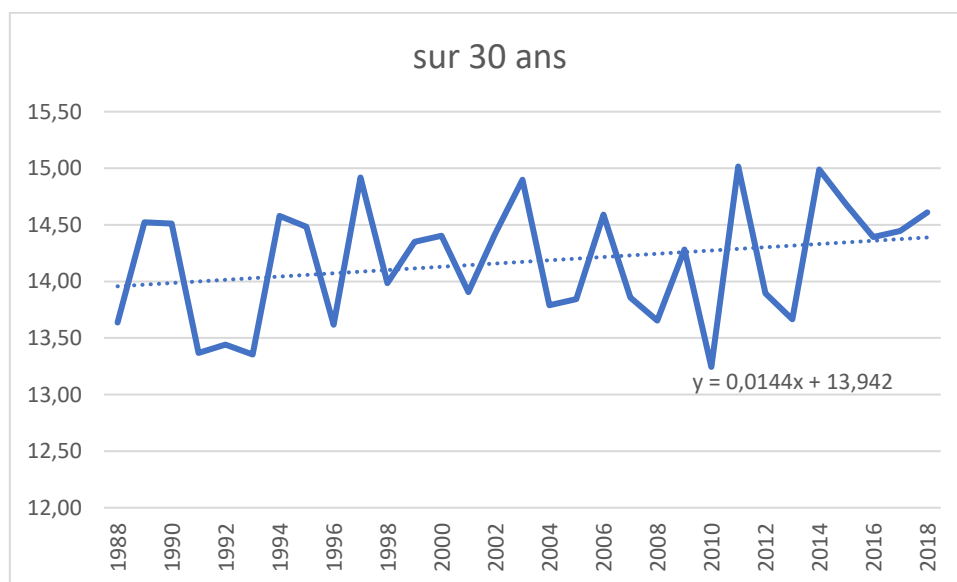


Fig. 3 : température moyenne annuelle Bordeaux sur 30 ans

Il ne serait plus que de 1.4°C sur 100 ans.

La moyenne pour la période 1945-1960 s'établit à 13.69°C et pour la période 2008-2018 à 14.26°C. La différence entre les deux périodes est donc 0.57°C, très inférieure aux 1.3°C mentionné par les auteurs.

La méthode consistant à faire un "trou" dans les données, c'est-à-dire retirer tout un intervalle et regarder les moyennes avant et après n'est pas correcte. Les variations d'une année sur l'autre sont telles que les résultats peuvent s'en trouver profondément modifiés. Il aurait fallu au moins faire une analyse de sensibilité, par exemple regarder ce qui se passe si 1960 est remplacé par 1961 et 2008 par 2009. Les indicateurs climatiques sont si nombreux qu'on en trouve toujours un pour aller dans le sens désiré ; s'il n'existe pas, on le fabrique. Nous retenons que, en fait, l'élévation de température à Bordeaux ralentit sur les 30 dernières années, comparativement à la période post 1945.

2. Le Vin

Variabilité climatique dans la zone de production des vins de Bordeaux

Benjamin BOIS et Cornelis VAN LEEUWEN

Centre de recherches de climatologie, UMR 5210 (CNRS - Université de Bourgogne),

Faculté des sciences Gabriel, Université de Bourgogne, 6 bd Gabriel, 21000 Dijon

ENITA de Bordeaux, ISVV, UMR EGFV, 1 cours du Général de Gaulle, CS 40201, 33175

Gradignan cedex

<https://hal.inrae.fr/hal-02817769>

Résumé : Parmi les composantes de l'environnement naturel de la vigne, le climat joue un rôle essentiel. Il détermine les conditions de développement et de maturation du raisin, la pression phytosanitaire et la mise en œuvre des travaux viticoles. Les différences climatiques entre les grandes régions viticoles sont bien connues, mais peu de travaux s'intéressent à la variabilité spatio-temporelle du climat au sein d'une même région. Des recherches visant à mieux caractériser les variations climatiques au sein de la zone de production des vins de Bordeaux ont été récemment menées. Les principales conclusions de ces travaux sont présentées ici. Elles soulignent notamment que le climat bordelais présente des écarts de température non-négligeables et récurrents entre les aires d'appellations de Gironde viticole, induisant potentiellement des différences de précocité de maturation pouvant excéder trois semaines pour un même cépage. En ce sens, le climat participe considérablement à la diversité des terroirs bordelais.

SCM : Il est en effet bien évident, et Emmanuel Leroy-Ladurie le souligne, que la date des vendanges ne peut à soi seule caractériser la température ambiante. Les vendanges se font en effet à partir de bien d'autres critères, comme le besoin en argent des exploitants, la météo, la disponibilité des ouvriers, etc.

B. Région PACA

Source :

<https://occitanie.ademe.fr/sites/default/files/changement-climatique-20e-siecle-languedoc-roussillon.pdf>

LE SIGNAL DU CHANGEMENT CLIMATIQUE EST-IL DÉJÀ OBSERVÉ EN PACA ?

Pour témoigner de l'évolution récente du climat présent en Provence-Alpes-Côte d'Azur, des indicateurs relatifs à la température de l'air, aux précipitations et au vent sont commentés.

Températures de l'air

Les séries homogénéisées de températures en Provence-Alpes-Côte d'Azur (23 séries sur les températures minimales et 28 séries sur les températures maximales) permettent d'évaluer de façon précise les tendances au cours des cinquante dernières années.

La Figure 9 illustre l'évolution annuelle de l'écart de la température moyenne à la normale 1961-1990 (moyenne des températures moyennes sur la période de 30 ans) pour trois stations représentatives de la région.

Ces diagrammes montrent que la température moyenne annuelle est globalement en augmentation, même si une forte variabilité d'une année à l'autre est constatée. Pourtant, l'augmentation n'est pas uniformément répartie sur l'année. Certaines saisons ont une hausse moindre :

- la tendance observée des températures moyennes hivernales est de l'ordre de $+0,2^{\circ}\text{C}$ par décennie ;
- la saison d'été est celle qui présente le réchauffement le plus fort sur les cinquante dernières années. Sur la période 1959-2009, la tendance observée des températures moyennes estivales est d'environ $+0,5^{\circ}\text{C}$ par décennie. Les trois étés les plus frais depuis 1959 ont été observés avant les années 1980. Les plus chauds se sont produits après l'année 2000. Le caractère hors-norme de l'été 2003 est bien visible.

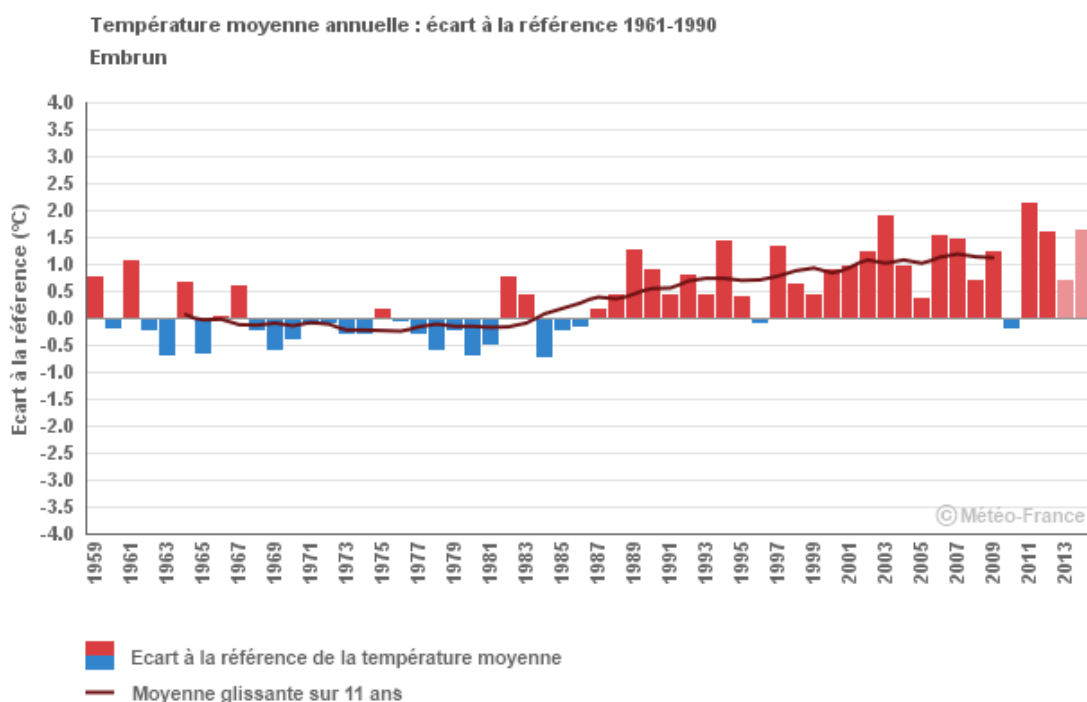
La hausse globale observée sur les températures en PACA a des répercussions sur le nombre de jours de gel et le nombre de journées chaudes :

- le nombre annuel de jours de gel est très variable d'une année à l'autre, mais aussi selon les territoires : les gelées sont rares sur le littoral et plus fréquentes à l'intérieur des terres. En cohérence avec l'augmentation des températures moyennes, le nombre annuel de jours de gel est plutôt en diminution, mais celui-ci varie fortement d'un point de mesure à l'autre. Les années 2014 et 2015 sont parmi les moins gélives en PACA. A Cannes, le nombre de jours de gel moyen par année est de 14. Il a gelé 3 jours en 2014

et 4 jours en 2015. A Saint-Auban-sur-Durance, au lieu de 59 jours de gel en moyenne, on en a observé seulement 27 en 2014 et 38 en 2015 ;

- le nombre annuel de journées chaudes (températures maximales supérieures à 25°C) est également très variable d'une année à l'autre et selon la localisation géographique : les journées chaudes sont plus fréquentes lorsqu'on s'éloigne du relief et de la mer Méditerranée. Sur la période 1959-2009, on observe une augmentation forte du nombre de journées chaudes, entre 6 à 7 jours par décennie. 2003, 2009 et 2011 sont les années qui ont connu le plus grand nombre de journées chaudes.

A l'instar du niveau national, la température minimale en PACA augmente plus vite que la température maximale.



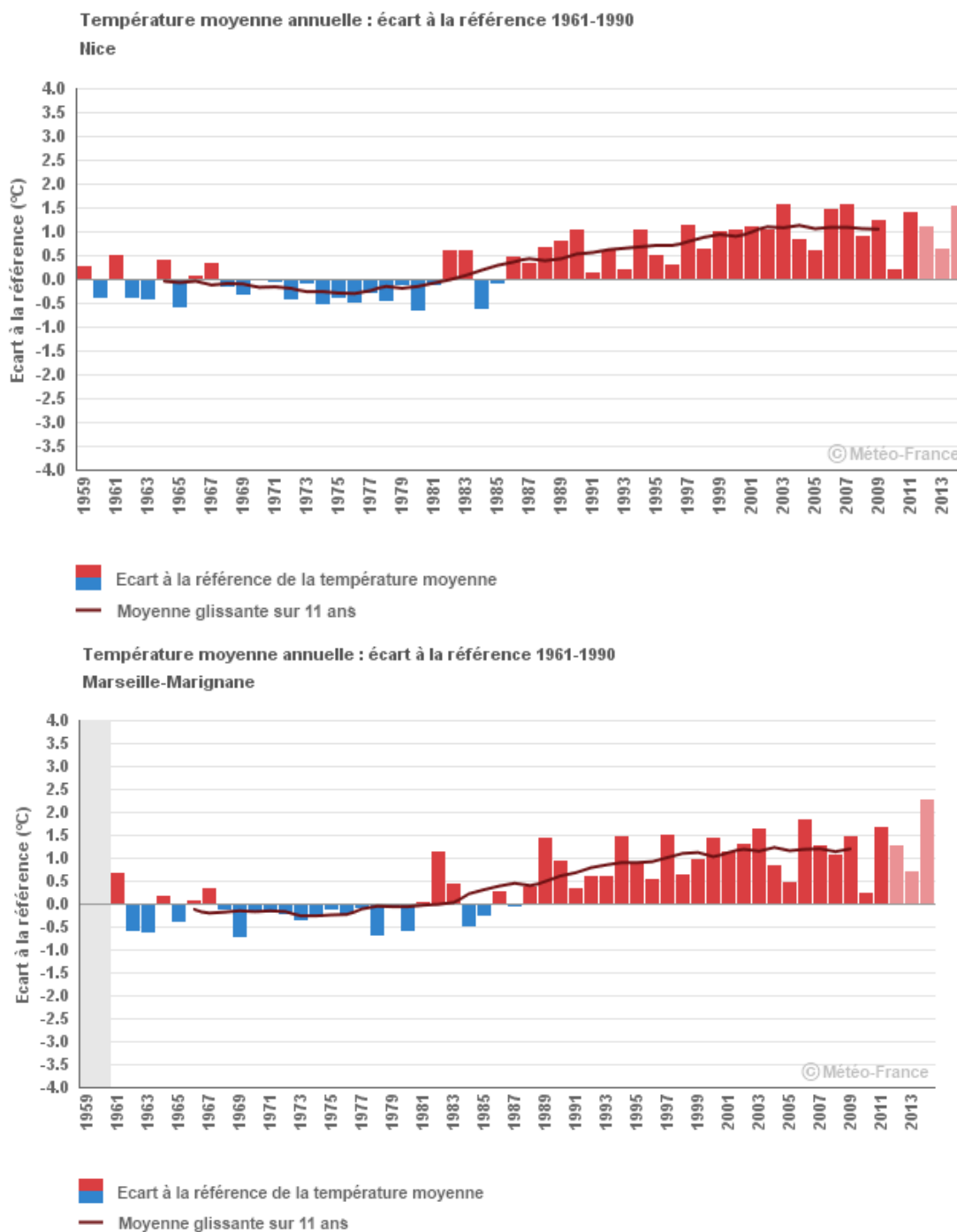


Figure 9. Ecart des températures moyennes annuelles par rapport à la référence 1961-1990
(Météo-France / ClimatHD, www.meteofrance.fr/climat-passe-et-futur/climathd)

<http://www.grec-sud.fr/cahier-thematique/le-cahier-climat/#art-119>

Températures. - Plusieurs types de données de température ont été étudiés pour chacune des stations sur les longueurs de chroniques précisées dans le tableau 2 ci-dessus : - température moyenne annuelle (T_{moy}) - moyenne mensuelle des maximums journaliers (T_{max}) - moyenne mensuelle des minimums journaliers (T_{min}).

L'intérêt d'un paramètre comme la température moyenne est d'être représentatif de l'ambiance thermique générale d'une période donnée (année, saison, mois, ...). C'est le paramètre qui est fréquemment utilisé pour les modélisations des évolutions des écosystèmes ou des cultures sous l'influence du changement climatique. La température maximale est un indicateur adapté pour suivre les fortes chaleurs. Il est plutôt représentatif des débuts d'après-midi. La température minimale, caractéristique, en général, des fins de nuit, trouve notamment sa pleine importance en été où l'on sait qu'un repos physiologique pas trop perturbé nécessite une baisse suffisante des températures nocturnes. Toutes ces températures peuvent être représentées sous forme de la variation de leur valeur absolue au cours du temps ou en faisant ressortir l'évolution d'un écart par rapport à une période de référence.

Habituellement, la période retenue par Météo France est la dernière période trentenaire pleine, pour notre étude : 1971 – 2000. Le graphe ainsi constitué retrace la progression de l'anomalie annuelle au regard d'une valeur de référence. Les années les plus chaudes, l'anomalie est positive. Elle devient négative pour les années les plus froides. Ce mode de présentation, fréquemment utilisé par Météo France, complémentaire des courbes de températures, offre l'avantage de faciliter la visualisation des tendances. Dans ce premier type de représentation, pour Montpellier (Mauguio), on distingue sans difficulté sur la figure 4, une rupture de profil à partir des années 1980. La régression linéaire, calculée entre 1980 et 2009, se cale sur une augmentation de 0,34°C tous les 10 ans. Ce profil avec cent années de quasi-constance des températures moyennes annuelles, suivie d'une hausse sur les trente dernières années, se retrouve sur toutes les stations étudiées (cf. les différentes courbes de température moyenne annuelle en annexe). Une régression linéaire de la portion de courbe des températures annuelles moyennes, des années 1980 à nos jours, a été réalisée sur chaque station. Elle permet de déterminer un coefficient d'augmentation des températures qui varie de 0,34°C/10 ans pour Montpellier à 0,51°C/10 ans pour Narbonne.

Le tableau ci-dessous regroupe ces différents coefficients.

	Carcassonne	Mont Aigoual	Montpellier	Narbonne	Nîmes	Perpignan	Sète
Variation de température en °C/10 ans	0,44	0,40	0,34	0,51	0,40	0,39 ^a	0,44

Tableau 3 : Coefficient d'augmentation linéaire des températures sur les 30 dernières années

On retrouve un ordre de grandeur similaire (1,5°C sur 35 ans) dans le projet Vulcain (Vulnerability of Mediterranean hydrosystems to climate changes and human activities) qui a élargi la réflexion climatique sur la presque totalité du département des Pyrénées-Orientales avec une prospective du changement climatique à échéance 2060.

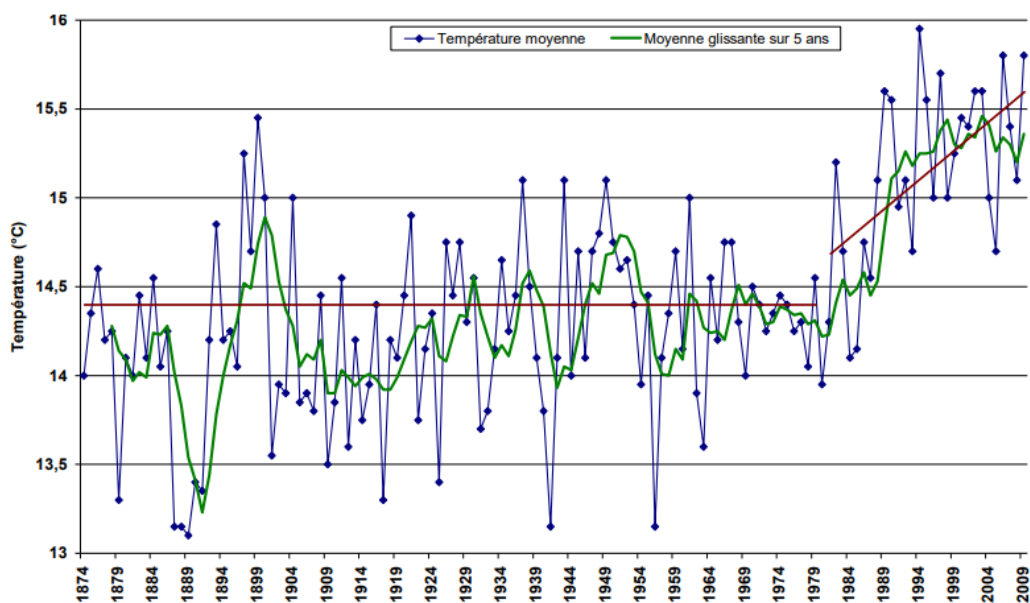


Figure 4 : Evolution de la température moyenne annuelle à Montpellier. Période 1874 – 2009
(Données Météo France)

La courbe en vert représente la moyenne glissante sur 5 ans de la température moyenne annuelle. Ce type de lissage est communément pratiqué de façon à tenter de mettre en évidence des tendances qui seraient masquées par des variations de courte fréquence du signal étudié. Sur toutes les stations étudiées, le lissage des températures sur 5 ans permet de retrouver un profil analogue avec une brusque montée des températures dans les années 1980, puis une quasi-stagnation à partir du début 2000. Le suivi des températures au cours des prochaines années permettra de confirmer, ou non, le prolongement dans le temps de la présence de ce palier.

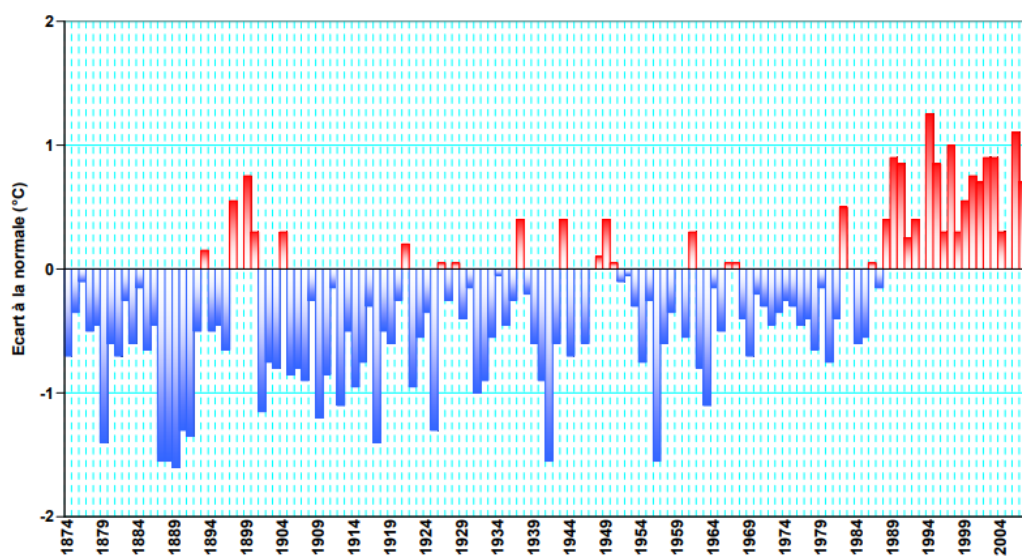


Figure 5 : Anomalie de température à Montpellier. Période 1874 – 2009

Les tests statistiques utilisés ont validé l'hypothèse, pour toutes les stations, de la présence d'une rupture d'homogénéité dans les températures moyennes annuelles, soit en 1980, soit en 1981. On notera que, pour Carcassonne et Nîmes, certains tests proposent plutôt une rupture en 1987. Cette modification de profil peut également être visualisée en représentant l'évolution de l'écart par rapport à la normale 1971 - 2000. Dans ce cas, sur Montpellier (figure 5) comme pour les six autres stations (cf. annexe), la période contemporaine se distingue clairement et les trente dernières années sont ainsi presque toutes plus chaudes que la normale. Ce continuum d'années chaudes est également mis en évidence, de façon tout aussi nette, si on choisit de comparer, non à la normale 1971 – 2000, mais à la moyenne sur toute la période disponible (cf. figure 6 ci-dessous). En tout état de cause, le contexte climatique étant en constante évolution, les présentations en mode de comparaison avec des moyennes sur les périodes contemporaines fortement évolutives doivent être considérées avec précaution.

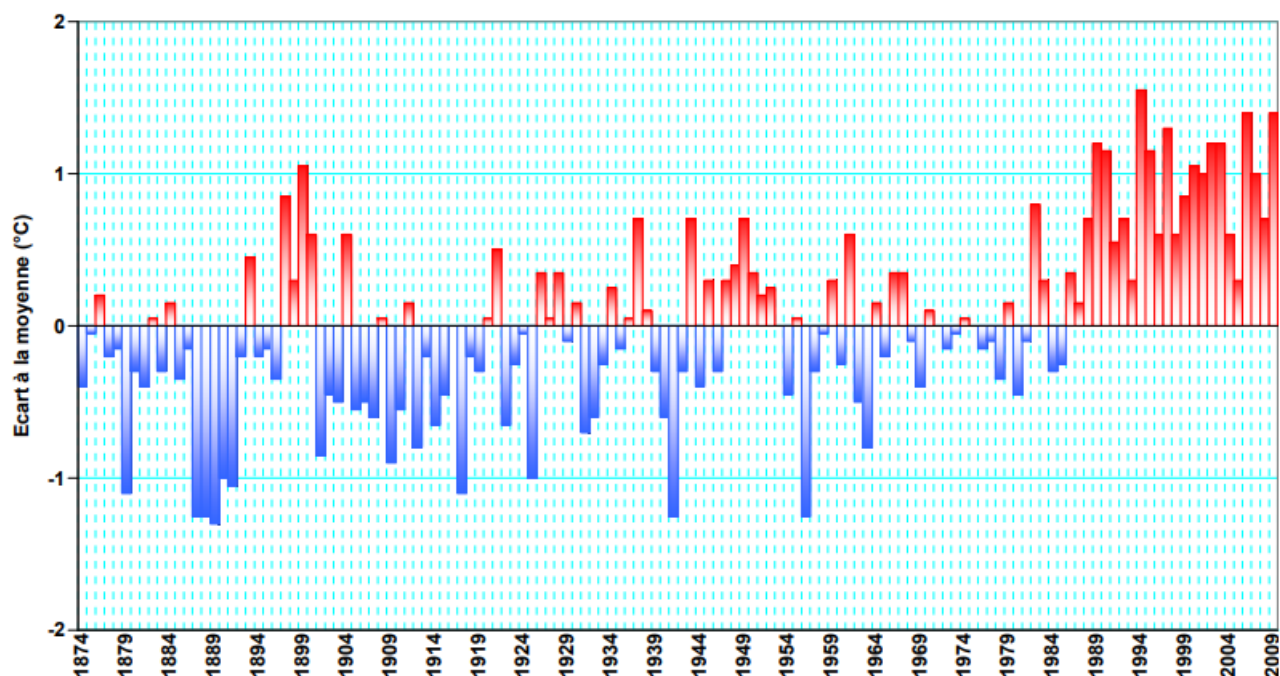


Figure 6 : Anomalie de température à Montpellier. Période 1874 – 2009
Ecart à la moyenne 1874 – 2009 (14,4°C) (Données Météo France)

Ainsi, sur toutes les stations étudiées, l'augmentation des températures au cours des trente dernières années ne fait aucun doute et le tableau ci-dessous détaille ces différentes hausses. Les écarts de température moyenne entre la période ante 1980 et la période de 1980 à nos jours sont de l'ordre de 1,0°C, similaires aux 0,9°C annoncés par Météo France pour la moyenne française métropolitaine.

	Carcassonne	Mont Aigoual	Montpellier	Narbonne	Nîmes	Perpignan	Sète
Ecart de température moyenne annuelle en °C ante 1980 – post 1980	0,9	0,8	1,0	1,0	0,9	1,0	1,0

Tableau 4 : Ecart de température moyenne annuelle entre la période ante 1980 et la période de 1980 à nos jours

Une analyse des températures uniquement au travers de leur moyenne annuelle peut masquer des phénomènes interannuels typiques d'une saison particulière. En détaillant au niveau saisonnier les séries de données dont on dispose, on relève que le réchauffement climatique n'est pas homogène sur toutes les saisons. Pour le printemps et l'été, il apparaît sans ambiguïté avec des écarts de température entre les deux périodes (ante et post 1980) plus importants que ceux relevés pour la température moyenne annuelle. L'augmentation de température est en revanche moins marquée en automne. Concernant l'hiver, lorsqu'une rupture d'homogénéité est retrouvée avec l'outil statistique, elle est moins franche que dans le cas des autres saisons et porte sur l'année 1987, ce qui confirme la première impression visuelle donnée à l'examen des courbes des écarts hivernaux à la moyenne que l'on trouve en annexe.

	Carcassonne	Mont Aigoual	Montpellier	Narbonne	Nîmes	Perpignan	Sète
Ecart de température moyenne hivernale en °C ante 80' – post 80'	Stationnaire	1,1	Stationnaire	Stationnaire	0,8	0,9	1,0
Ecart de température moyenne printanière en °C ante 80' – post 80'	0,8	1,4	1,3	1,2	1,2	1,2	1,3
Ecart de température moyenne estivale en °C ante 80' – post 80'	1,4	1,3	1,4	1,4	1,3	1,4	1,4
Ecart de température moyenne automnale en °C ante 80' – post 80'	0,8	Stationnaire	0,8	0,8	0,7	0,9	0,9

Tableau 5 : Ecart des températures moyennes saisonnières entre la période ante 1980 et la période de 1980 à nos jours,

Sur toutes les stations étudiées et sur les trois mois de l'été, la température moyenne peut varier de plusieurs degrés Celsius d'une année sur l'autre. Cette variabilité interannuelle est quantifiée par un paramètre que l'on nomme l'écart type qui caractérise la dispersion autour d'une moyenne. Alors que pour la France métropolitaine, cet écart type moyen est de 0,9°C, il varie entre 1,0 et 1,2°C sur nos sept stations.

Cette variabilité, typique du climat méditerranéen, est un peu plus marquée pour une grandeur comme la température maximale journalière (Tmax) en été (1,4°C au Mont Aigoual ou 1,3°C à Carcassonne). Concrètement cela se traduit par des périodes estivales manifestement plus chaudes mais aussi certains étés notablement plus froids que d'habitude. L'augmentation des températures estivales est plus importante sur chacune des stations que celle de la température moyenne. La plus importante hausse relevée concerne la température maximale estivale de Perpignan avec 1,6°C. L'évolution des températures minimales témoigne de la réalité du réchauffement des nuits d'été.

	Carcassonne	Mont Aigoual	Montpellier	Narbonne	Nîmes	Perpignan	Sète
Ecart de Tmin moyenne estivale en °C ante 80' – post 80'	1,4	1,3	1,4	1,3	1,2	1,4	1,4
Ecart de Tmax moyenne estivale en °C ante 80' – post 80'	1,4	1,2	1,3	1,5	1,2	1,6	1,3

Tableau 6 : Ecart des températures minimales et maximales estivales entre la période ante 1980 et la période de 1980 à nos jours,

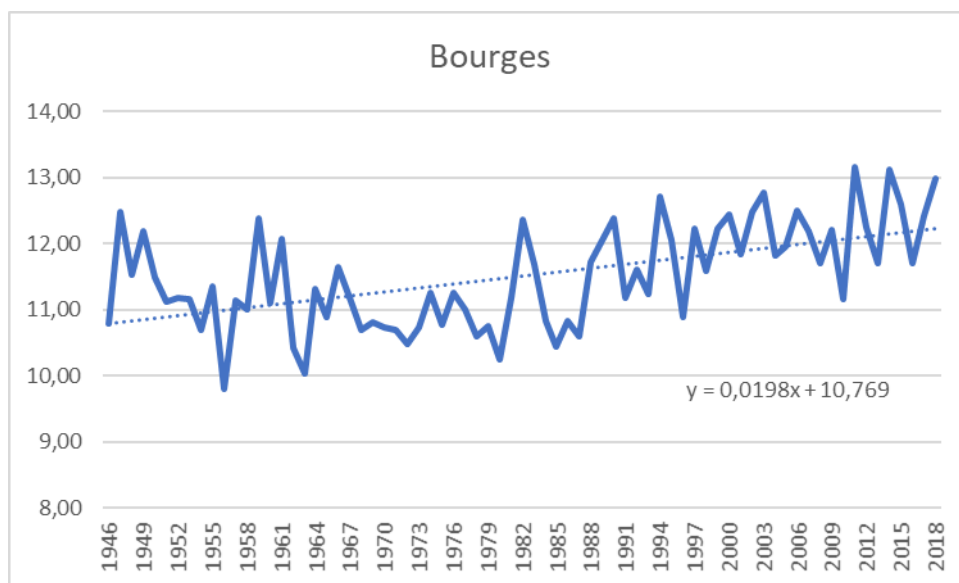
<https://occitanie.ademe.fr/sites/default/files/changement-climatique-20e-siecle-languedoc-roussillon.pdf>

Note SCM : l'analyse des températures que nous avons faite pour Montpellier, à partir des données ECA pour la période 1945-2018, ne montre aucun accroissement particulier : voir plus bas.

III. Variations par ville

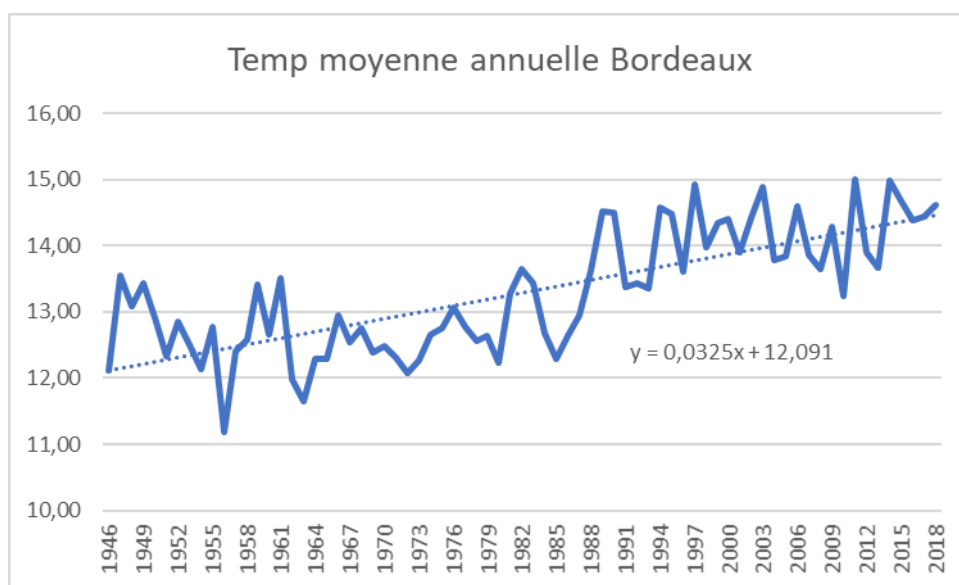
Nous avons simplement utilisé les données ECA pour un certain nombre de villes, pour la période 1945-2018.

A. Bourges

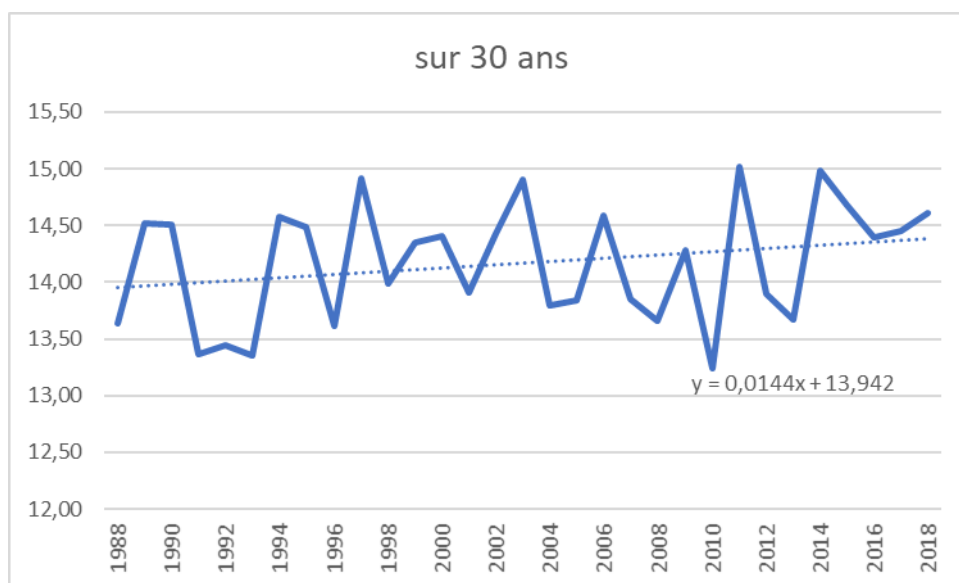


Augmentation moyenne de 2°C sur 100 ans.

B. Bordeaux

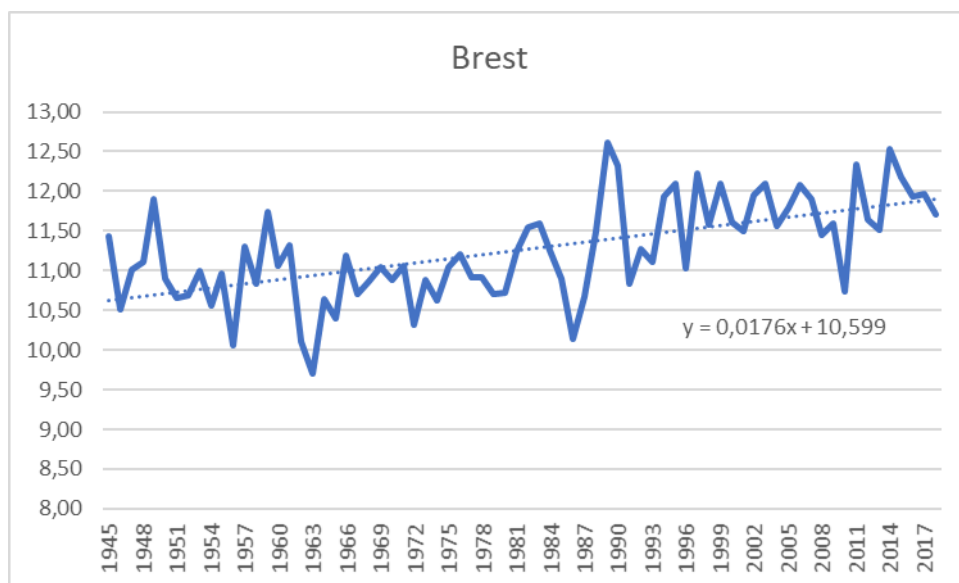


Augmentation de 3.2°C sur 100 ans, mais ralentissement récent :



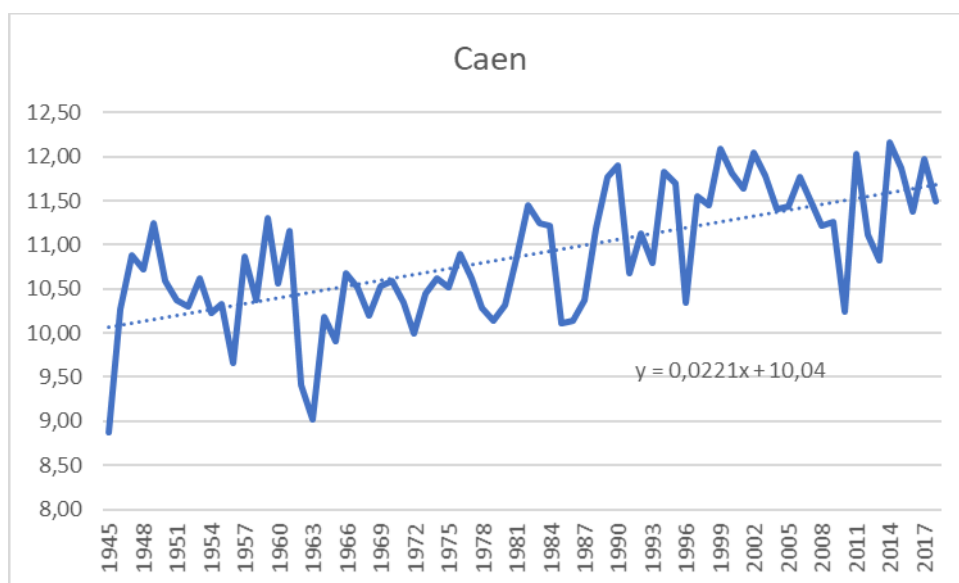
Sur les 30 dernières années, ralentissement de l'accroissement ; il n'est plus que de 1.4°C pour cent ans.

C. Brest



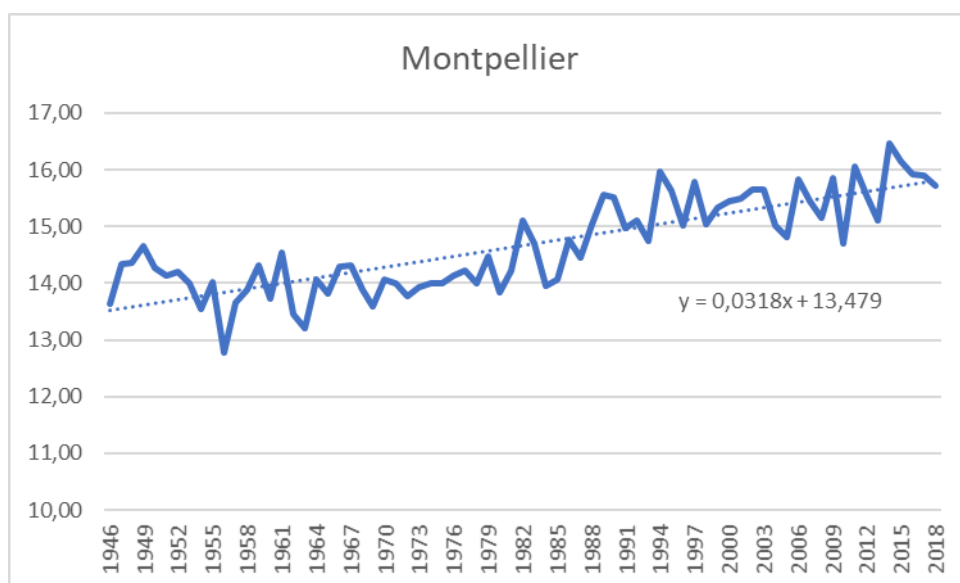
Augmentation au rythme de 1.8°C sur cent ans ; rien de significatif récemment.

D. Caen



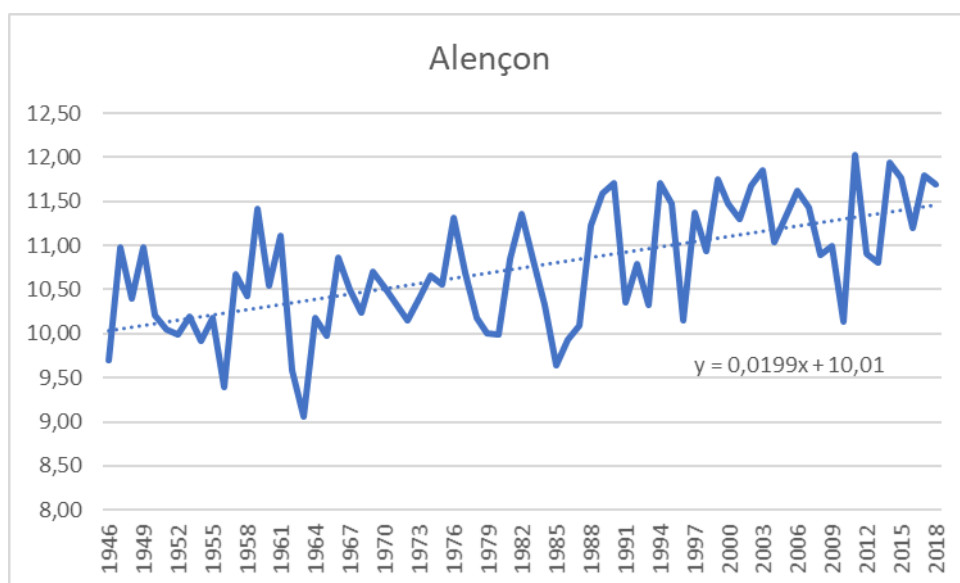
Augmentation au rythme de 2.2°C sur 100 ans ; rien de significatif récemment.

E. Montpellier



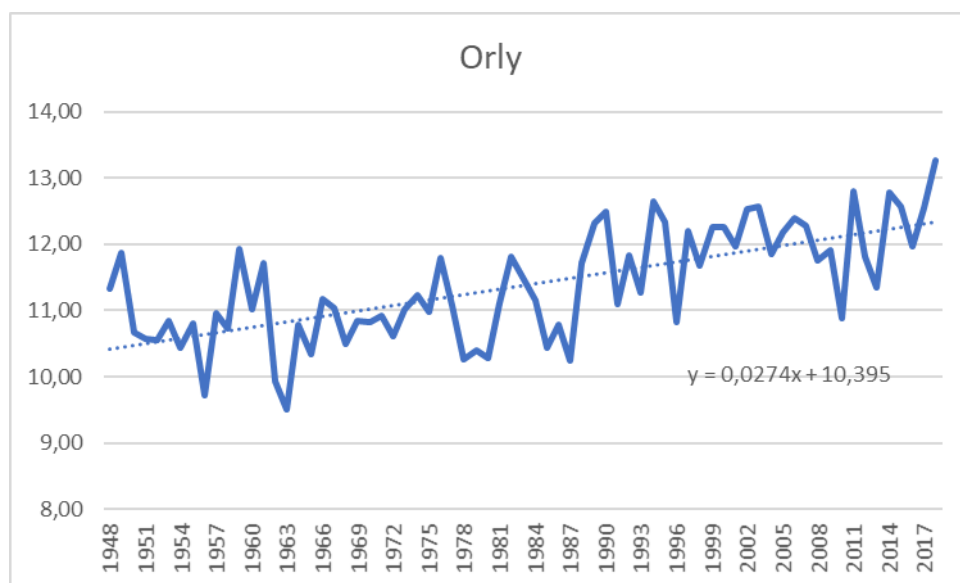
Augmentation au rythme de 3.2°C sur cent ans ; rien de significatif récemment.

F. Alençon



Augmentation au rythme de 2°C sur 100 ans ; rien de significatif récemment.

G. Orly



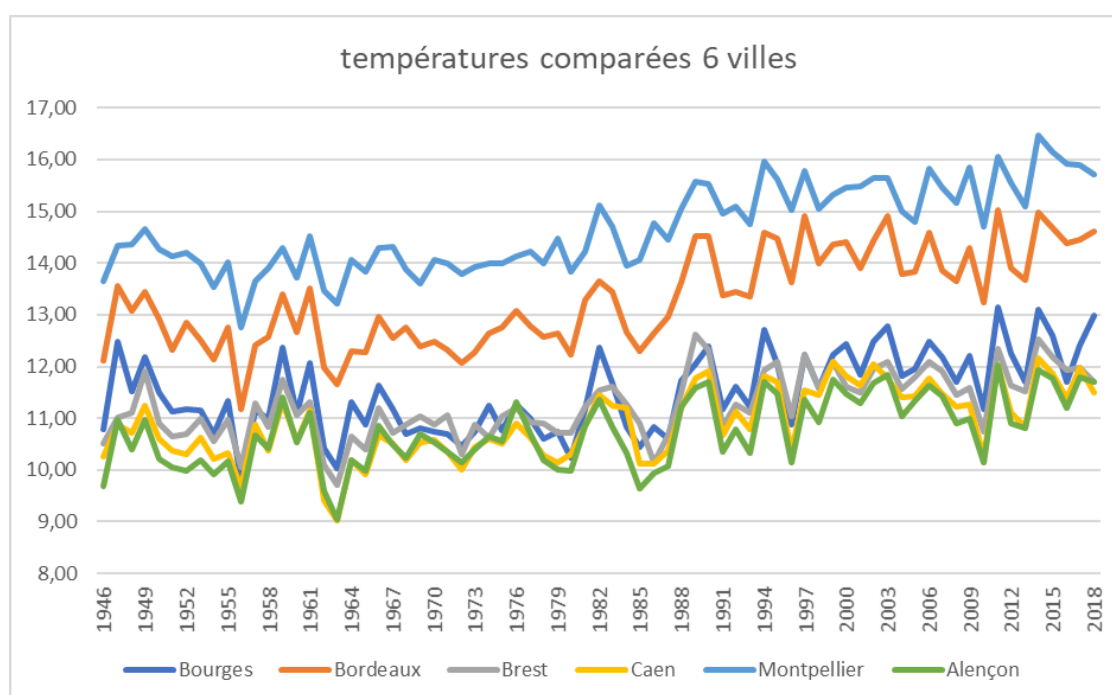
Augmentation au rythme de 2,7°C sur 100 ans ; rien de significatif récemment.

IV. Comparaison entre villes

Voici les données brutes :

	Bourges	Bordeaux	Brest	Caen	Montpellier	Alençon	Orly
1946	10,80	12,11	10,52	10,26	13,64	9,70	
1947	12,49	13,55	11,02	10,88	14,34	10,97	
1948	11,52	13,08	11,10	10,72	14,35	10,39	11,32
1949	12,18	13,43	11,90	11,24	14,65	10,98	11,87
1950	11,49	12,92	10,90	10,60	14,27	10,22	10,67
1951	11,13	12,33	10,65	10,38	14,14	10,05	10,58
1952	11,17	12,84	10,69	10,30	14,21	9,98	10,55
1953	11,16	12,50	11,00	10,62	13,99	10,20	10,84
1954	10,69	12,13	10,55	10,22	13,54	9,92	10,43
1955	11,35	12,77	10,97	10,32	14,03	10,17	10,80
1956	9,80	11,18	10,05	9,66	12,76	9,39	9,72
1957	11,14	12,41	11,30	10,87	13,66	10,68	10,97
1958	11,00	12,58	10,83	10,37	13,89	10,42	10,73
1959	12,38	13,41	11,74	11,30	14,30	11,42	11,93
1960	11,09	12,66	11,05	10,56	13,72	10,54	11,01
1961	12,07	13,50	11,32	11,16	14,53	11,11	11,72
1962	10,41	11,97	10,11	9,41	13,46	9,59	9,93
1963	10,03	11,65	9,70	9,01	13,21	9,06	9,51
1964	11,32	12,29	10,64	10,19	14,06	10,19	10,79
1965	10,89	12,29	10,40	9,91	13,83	9,98	10,34
1966	11,64	12,95	11,20	10,68	14,28	10,86	11,18
1967	11,17	12,54	10,71	10,52	14,31	10,50	11,05
1968	10,70	12,75	10,87	10,20	13,88	10,24	10,49
1969	10,81	12,39	11,04	10,53	13,60	10,71	10,85
1970	10,73	12,49	10,89	10,58	14,06	10,53	10,83
1971	10,69	12,31	11,06	10,35	14,01	10,34	10,91
1972	10,48	12,07	10,32	10,00	13,78	10,15	10,60
1973	10,74	12,28	10,88	10,45	13,92	10,40	11,02
1974	11,25	12,65	10,62	10,61	14,00	10,65	11,24
1975	10,77	12,76	11,05	10,52	13,99	10,56	10,99
1976	11,26	13,07	11,21	10,90	14,13	11,31	11,79
1977	10,99	12,78	10,92	10,62	14,22	10,69	11,08
1978	10,60	12,57	10,91	10,28	14,00	10,19	10,27
1979	10,74	12,64	10,71	10,14	14,48	10,00	10,40
1980	10,24	12,23	10,72	10,31	13,84	9,98	10,27
1981	11,18	13,28	11,23	10,85	14,23	10,85	11,11
1982	12,36	13,64	11,54	11,44	15,11	11,36	11,81
1983	11,69	13,44	11,60	11,25	14,71	10,84	11,50
1984	10,83	12,67	11,26	11,21	13,95	10,33	11,16
1985	10,45	12,30	10,90	10,12	14,05	9,64	10,43
1986	10,84	12,64	10,14	10,13	14,76	9,93	10,79
1987	10,60	12,95	10,67	10,37	14,46	10,09	10,24
1988	11,72	13,64	11,49	11,19	15,04	11,23	11,71
1989	12,05	14,52	12,61	11,76	15,57	11,59	12,32
1990	12,38	14,51	12,32	11,90	15,52	11,71	12,50
1991	11,17	13,37	10,84	10,68	14,96	10,35	11,09
1992	11,61	13,44	11,27	11,13	15,10	10,79	11,83
1993	11,23	13,35	11,11	10,79	14,74	10,33	11,27
1994	12,72	14,58	11,94	11,82	15,96	11,71	12,64
1995	12,05	14,48	12,09	11,70	15,63	11,47	12,35
1996	10,88	13,62	11,03	10,35	15,02	10,14	10,82
1997	12,23	14,92	12,22	11,55	15,77	11,37	12,19
1998	11,59	13,98	11,58	11,45	15,05	10,93	11,68
1999	12,23	14,35	12,09	12,09	15,32	11,76	12,27
2000	12,44	14,40	11,60	11,81	15,46	11,48	12,26
2001	11,84	13,91	11,50	11,63	15,48	11,29	11,97
2002	12,48	14,42	11,95	12,05	15,65	11,68	12,54
2003	12,77	14,90	12,10	11,78	15,64	11,85	12,56
2004	11,81	13,79	11,56	11,40	15,01	11,04	11,86
2005	11,95	13,84	11,79	11,44	14,80	11,33	12,19
2006	12,49	14,59	12,09	11,77	15,84	11,63	12,39
2007	12,18	13,86	11,90	11,48	15,45	11,43	12,28
2008	11,69	13,65	11,45	11,21	15,15	10,90	11,76
2009	12,21	14,28	11,59	11,27	15,86	11,00	11,91
2010	11,17	13,24	10,73	10,25	14,71	10,14	10,87
2011	13,16	15,02	12,34	12,03	16,06	12,02	12,80
2012	12,24	13,89	11,64	11,12	15,55	10,90	11,82
2013	11,71	13,67	11,51	10,83	15,10	10,80	11,35
2014	13,11	14,99	12,53	12,16	16,47	11,94	12,79
2015	12,59	14,68	12,18	11,86	16,16	11,77	12,57
2016	11,71	14,39	11,94	11,38	15,92	11,20	11,98
2017	12,41	14,45	11,97	11,97	15,90	11,79	12,55
2018	12,98	14,61	11,70	11,49	15,72	11,70	13,28

et le graphique associé :



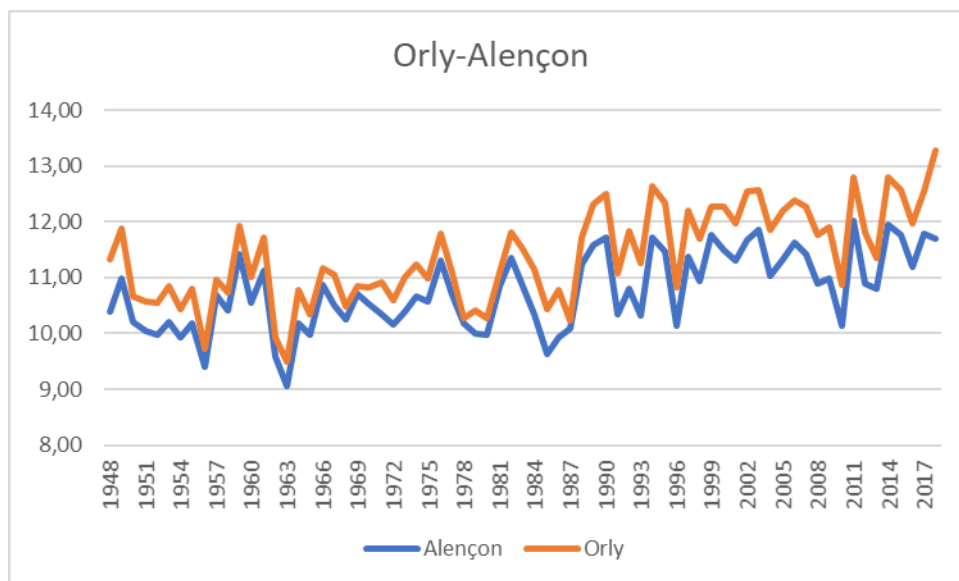
Orly est traité à part : il lui manque deux années de données.

Voici les coefficients de corrélation associés :

	Bourges	Bordeaux	Brest	Caen	Montpellier	Alençon
Bourges	1,00	0,91	0,86	0,89	0,85	0,91
Bordeaux	0,91	1,00	0,91	0,91	0,96	0,90
Brest	0,86	0,91	1,00	0,95	0,84	0,92
Caen	0,89	0,91	0,95	1,00	0,86	0,95
Montpellier	0,85	0,96	0,84	0,86	1,00	0,82
Alençon	0,91	0,90	0,92	0,95	0,82	1,00

Ils ne sont pas très proches de 1, parce que les villes sont distantes géographiquement.

Le coefficient de corrélation (Orly, Alençon) est de 0.96. Voici l'évolution comparée des températures pour les deux villes :



Deux conclusions peuvent être tirées :

Pour les sept villes, l'aspect du graphiques est le même, bien que les villes soient très distantes les unes des autres. Il n'y a donc pas lieu de faire une étude différenciée pour chaque petite zone. C'est la France entière qui est concernée (et peut-être l'Europe de l'Ouest).

La seconde conclusion est que les balises fonctionnent correctement, ce qui n'était pas une évidence a priori.

V. Les conclusions d'Emmanuel Leroy-Ladurie

Les données que nous avons pu recueillir confortent les conclusions auxquelles Emmanuel Leroy-Ladurie est parvenu ; voici le résumé qu'en tire Alain Préat :

Emmanuel Le Roy Ladurie ne fait appel qu'à des processus naturels ("climatologie dynamique") pour décrire (du moins essayer d'expliquer) les cycles climatiques aux différentes échelles. Ensuite il montre :

- Que les phénomènes climatiques depuis près de 4 000 ans sont les mêmes et présentent des "cyclicités à court terme" ("*intra-séculaire*") de même ordre de grandeur tout au long de ces millénaires, mais qu'elles ne sont pas parfaitement périodiques ;
- Que les périodes de refroidissement et de réchauffement sont de longue durée à l'échelle humaine, à savoir plusieurs siècles ;
- Que les écarts thermiques entre ces périodes sont faibles, voisins de 1°C ;
- Que ces fluctuations ne sont pas synchrones à l'échelle pluridécennale et que l'évolution du climat présente un aspect local indéniable ;

- Que les effets négatifs pour nos activités sont plus importants en périodes de refroidissement important ;
- Que nous sommes dans une période de réchauffement depuis 1860 et qu'elle pourrait durer plusieurs siècles (à moins que le hiatus actuel ne corresponde à un maximum sur la courbe de cyclicité comme suggéré par Mao et al, 2019).

Au vu de ces caractéristiques (valables *a minima* pour nos régions, sinon pour l'hémisphère nord), on peut conclure sur le caractère local ou régional des fluctuations climatiques (échelle pluri-décennale) qui furent la règle sur plusieurs milliers d'années et qui devraient continuer à être la règle aujourd'hui.

Un point intéressant est que les constatations d'Emmanuel Leroy Ladurie (qui paraissent factuellement indiscutables) ne s'accommodent d'aucune des quatre explications que nous privilégions aujourd'hui :

- L'action d'un gaz à effet de serre : un gaz a vocation à être diffus ; son action peut difficilement privilégier telle zone à telle époque ;
- Nous sommes sortis voici 10 000 ans d'une période glaciaire qui a duré 100 000 ans (ce qui est un fait), et le réchauffement devrait être global ;
- Des variations dans le rayonnement solaire concernent la terre entière et non certaines zones en particulier ;
- La géothermie est trop mal connue pour qu'on puisse comprendre son influence sur des zones particulières.

VI. Prévision à long terme

Peut-on prévoir la température qu'il fera à Bure dans 300 ans, soit le "Maximum to Date" défini plus haut, soit la température maximale moyenne cette année-là ? La réponse est que c'est impossible : nous ne disposons que de 100 années de données, et cet historique est insuffisant pour prévoir à 300 ans. Si on se réfère à ce que dit Emmanuel Leroy-Ladurie, les températures à Bure devraient être proches de celles que nous connaissons aujourd'hui, avec peut-être des variations de 2°C en plus ou en moins. En pratique, le sujet présente peu d'intérêt.

VII. Le GIEC

Il élabore un certain nombre de "scénarios" concernant l'évolution globale des températures à long terme ; ils sont très pessimistes et très politiques (par exemple : il faut cesser de manger de la viande). Le GIEC ne reconnaît pas l'existence d'un débat : pourtant, pour bon nombre de scientifiques de renom, les variations de la concentration en CO2 font suite aux variations de température (et non l'inverse) ; voir en particulier [Deheuvels].

Les travaux du GIEC croient pouvoir s'affranchir des règles de base de la démarche scientifique. Comme ils ne concernent pas la région de Bure, nous n'en dirons pas davantage ici.

Quatrième Partie

Clarification des concepts probabilistes

Il en va des probabilités comme de bon nombre d'activités humaines : très vite, les concepts et le vocabulaire deviennent flous ; les mots n'ont pas la même signification pour tout le monde. Les exemples les plus évidents sont le Droit et la Médecine. Les probabilités constituent une branche des mathématiques, et, à ce titre, ont vocation à recevoir des définitions précises.

En cas de litige, par exemple avec une association de riverains, l'Andra aura tout intérêt à réunir un collège d'experts, chargé de s'assurer que les deux camps parlent bien de la même chose. On ne peut trancher sur le fond que s'il y a accord sur le vocabulaire.

I. Durée de retour d'un phénomène

Il s'agit d'un concept très simple, qui n'a rien de probabiliste en soi. On désigne ainsi le temps moyen qui s'écoule entre deux occurrences du phénomène. Si celui-ci s'est produit aux instants $t_1, \dots, t_N$, la durée de retour est :

$$dr = \frac{1}{N-1}((t_2 - t_1) + (t_3 - t_2) + \dots + (t_N - t_{N-1})) = \frac{t_N - t_1}{N-1}. \quad (1)$$

Le mot "durée" est impropre : il vaudrait mieux dire "intervalle de temps moyen", mais il est consacré par l'usage. Le concept n'a rien de probabiliste : la durée de retour de la Comète de Halley est de 76 ans. On peut limiter la durée d'observation si on le souhaite, et dire par exemple : la durée de retour du phénomène au 13^{ème} siècle est de tant.

A l'évidence, la condition nécessaire et suffisante pour que la durée de retour puisse être définie est que le phénomène se soit produit au moins deux fois. D'où la règle :

Règle : on s'interdira de parler de durée de retour pour un phénomène s'il ne s'est jamais produit, ou bien s'il s'est produit une seule fois.

II. Loi de probabilité

Il s'agit là d'un concept beaucoup moins simple qu'on ne l'imagine habituellement. Considérons un magasin de vêtements, et notons l'âge des visiteurs, par classe de 10 ans (0-10, 10-20, ..., 90-100). Nous ne savons pas quel sera l'âge du prochain visiteur ; Dieu le sait

mais ne nous le dira pas. Nous pouvons nous en faire une idée si le magasin fonctionne depuis suffisamment longtemps et si nous avons consciencieusement enregistré les âges.

Nous notons p_1 la proportion de visiteurs de la première tranche (0-10) : $p_1 = \frac{n_1}{N}$, où n_1 est le nombre total de visiteurs ayant leur âge dans la première tranche et N le nombre total de visiteurs, et ainsi de suite pour les autres tranches. Si à chaque tranche on associe son âge moyen (entre 10 et 20 : 15), nous avons 10 valeurs, notées x_i , $i=1,...,10$ (à savoir 5, 15,..., 95) et 10 probabilités, notées p_i , avec $p_i \geq 0$, $\sum_{i=1}^{10} p_i = 1$. A ce stade, l'information n_i, N s'est perdue.

Les valeurs que peut prendre l'âge (à savoir 5, ..., 95) s'appellent une "variable aléatoire" et les p_i constituent la loi de probabilité de cette v.a. Cette information ne remplace pas celle que Dieu refuse de nous fournir (âge du prochain visiteur), mais c'est tout ce dont nous disposons et il va falloir s'en contenter. Elle est tout de même porteuse d'enseignement, en particulier elle permet de savoir quelles sont les tranches d'âge les plus représentées et de disposer des stocks en conséquence. En langage standard, on peut regarder p_i comme la proportion de la $i^{\text{ème}}$ tranche d'âge au sein de la population constituée de tous les visiteurs.

La loi de probabilité ne sait pas faire de différence entre un magasin récent et un magasin ancien, puisque seuls les quotients $\frac{n_i}{N}$ sont conservés. En pratique, ceci est source de difficultés : les enseignements portés par un magasin récent sont beaucoup moins fiables, en particulier si le magasin vient juste d'ouvrir.

La loi de probabilité est dite "stationnaire" si les p_i restent toujours les mêmes au cours du temps. La clientèle ne vieillit pas, ne rajeunit pas. Les exemples pratiques de lois stationnaires sont très rares : dans la pratique, les répartitions évoluent. Un exemple évident de loi stationnaire est donné par le jeu de Pile ou Face : la probabilité de chaque résultat est 1/2 quelles que soient les circonstances. Pour le reste, les lois ne sont pas stationnaires : les populations vieillissent ou rajeunissent, les appareils s'usent, etc.

Prenons un exemple concret, quoiqu'académique, lié à la température d'un système. Un système physique (où l'on mesure la température) aura une loi stationnaire s'il enferme une grosse sphère, à l'intérieur de laquelle se trouvent de petits bulletins. Sur chaque bulletin, on a inscrit une température. Chaque jour, un robot ouvre la sphère, prend un bulletin au hasard, règle la température selon l'indication du bulletin et remet le bulletin dans la sphère. Cette loi est stationnaire, parce que la sphère est constamment la même, de même que le protocole de lecture. Naturellement, la température n'est pas constante. On note p la probabilité d'une température donnée, un jour donné.

Notons K le nombre de températures différentes. Supposons qu'un jour donné, la température 34°C soit apparue. Quelle est la probabilité de la revoir au bout de k jours, mais

non avant ? C'est $(1-p)^{k-1} p$. Quelle est l'espérance de ce temps d'attente ? C'est

$$E = p \sum_{k=1}^{+\infty} k (1-p)^{k-1} = 1/p. \text{ On a démontré un théorème : la durée de retour (durée moyenne}$$

du temps d'attente avant de revoir une étiquette) est égale à l'inverse de la probabilité de la température considérée.

III. Deux concepts différents : source de confusion

Dans le cas de notre magasin de vêtements, nous mettons en évidence deux concepts de probabilité, absolument différents :

- Une loi de probabilité, qui caractérise la proportion de chaque tranche d'âge parmi tous les visiteurs. On dira par exemple que les 0-10 ans (représentés par leur valeur médiane 5 ans) représentent 6% des visiteurs. Nous avons donc un concept clair et bien défini : une liste d'âges et une liste de proportions. Ces proportions ont vocation à être fixes, si le système est stationnaire, ce que l'on peut supposer (du moins sur une période de quelques années).
- On peut parler de durée de retour pour chaque tranche d'âge : ce sera l'intervalle de temps moyen (il faut préciser l'unité) séparant la visite de deux personnes de même âge. Si les âges des visiteurs sont enregistrés tous les jours, l'unité sera la journée. Dans le cas du magasin pris pour exemple, pour les 5 ans, nous avons 16 visites sur un total de 82 jours : la durée de retour moyenne est donc de 5.125 jours (en langage imagé, on voit un bambin de 5 ans tous les 5 jours, ou un peu plus). La probabilité, par jour, de voir un bambin de 5 ans est donc $p = \frac{1}{5.125} \approx 0.195$.

Cette seconde probabilité :

- N'a rien à voir avec la première ;
- Suppose que le système soit stationnaire ;
- Fait nécessairement référence à un intervalle de temps (ici la journée).

Elle est d'usage fréquent dans l'industrie ; on peut l'appeler "probabilité d'occurrence d'un événement redouté". Un industriel se demandera par exemple : quelle est la probabilité que mon usine tombe en panne au cours de l'année qui vient (période de 12 mois) ?

La probabilité d'occurrence d'un événement redouté se ramène au cadre classique des probabilités par l'introduction (factice) de la loi des grands nombres. On imaginera 1 000 usines, toutes du même modèle, fonctionnant indépendamment, et on se demandera : combien auront manifesté une panne dans les 12 mois à venir ? Si cette introduction de la loi des grands nombres ne peut être faite ou n'a pas de sens, c'est que le problème ne peut être traité de manière probabiliste.

IV. Très faible probabilité

Fixons-nous un seuil, mettons 10^{-6} par an, et posons-nous la question : pouvons-nous parler d'événements climatiques, à Bure, ayant cette probabilité ? Tout d'abord, il est évident qu'il n'y a qu'un seul Bure, et on ne peut pas multiplier les Bure comme on multiplie les usines. En revanche, on peut étendre (de manière factice) l'intervalle d'étude : convenir que notre surveillance dure un milliard d'années. Dans ces conditions, la question a un sens : un événement de probabilité 10^{-6} par an se rencontrera environ 1 000 fois en un milliard d'années.

En pratique, ce qu'on enregistre est une température moyenne par jour (on conserve le maxima de ces températures). Si l'événement est "dépasser 41°C ", ou ce que l'on voudra, il faut que cette température ait été dépassée pendant toute une journée : une durée de 20 minutes ne suffira pas, et la station de mesure n'indiquera rien. Si on travaille sur une année seulement, la probabilité la plus faible que l'on peut détecter est $\frac{1}{365}$, si on travaille

sur 20 ans, la probabilité la plus faible est $\frac{1}{365^{20}}$ etc.

Peut-on apporter une réponse mathématique, même grossière, à la question : quelle est la probabilité que la température atteinte à Bure, pendant l'année 2025, soit $45,3^{\circ}\text{C}$? Il s'agit d'un futur proche et d'une valeur limite proche de celle qui a déjà été rencontrée.

Une première possibilité est d'utiliser :

A. La formule de Laplace

Elle s'écrit sous la forme (voir le livre [MPPR]) :

$$P(n_1) = \frac{N+1}{N+N_1+1} \frac{\binom{N_1}{n_1} \binom{N}{n}}{\binom{N+N_1}{n+n_1}}. \quad (2)$$

Sachant qu'on a enregistré n accidents sur N essais, la formule donne la probabilité d'enregistrer, dans le futur, n_1 accidents sur N_1 essais. Ici, on a fait $N = 7\,463$ mesures de la température (depuis 2001/06/21, il y a des trous) et on a $n = 0$ accidents, en comptant comme "accident" le fait de dépasser la température limite de 40.6°C . La probabilité de ne pas dépasser la température limite en $N_1 = 1\,000$ jours d'observations sera donc :

$$p(0) \approx 0.88$$

Le résultat serait le même pour toute température limite, par exemple si l'on fixait 45°C, ce qui est peu satisfaisant.

B. L'Hypersurface Probabiliste

On peut aussi utiliser la théorie dite "EPH" (Expérimental Probabilistic Hypersurface), due à Olga Zeydina et Bernard Beauzamy (voir le livre [PIT]). Etant donné un ensemble d'observations (les relevés de température dans le passé), l'EPH les "propage" sous forme d'une loi de probabilité en tout point de l'avenir ; l'EPH dira par exemple : voici la densité de probabilité, pour la température, attendue pour le 23 février 2025. Mais l'EPH travaille sur un concept totalement abstrait d'information, et n'incorpore aucune spécificité qui peut être liée au fait qu'il s'agit ici de températures.

V. Du mauvais usage des probabilités

La langue de tous les jours fait un usage abusif des probabilités "il est probable que", mais il faut se montrer tolérant. Dans les articles scientifiques, en revanche, on s'efforcera de vérifier que le cadre est bien celui que les définitions autorisent.

En l'absence de définition claire de la loi de probabilité sur laquelle on souhaite travailler, les éléments de langage les plus simples deviennent source de confusion et de querelles. Il est donc préférable de bien clarifier les données, les hypothèses et les concepts.

Pour beaucoup de gens, cependant, l'utilisation d'un vocabulaire probabiliste inapproprié est une façon de masquer la faiblesse des raisonnements. Ceci n'est pas nouveau, et le meilleur exemple en est donné par l'Affaire Dreyfus (1894), où Bertillon a monté de toute pièce un "système probabiliste" destiné à montrer que Dreyfus avait écrit le bordereau. Lorsque, en 1903, la Chambre Criminelle de la Cour de Cassation a demandé à Henri Poincaré de porter un jugement critique sur le "système Bertillon", celui-ci a rédigé un rapport cinglant, où il écrit notamment "le calcul des probabilités ne devrait pas empêcher les savants d'avoir du bon sens" [Dreyfus].

Même si l'erreur Dreyfus est de loin la pire de toutes, des erreurs semblables sont encore commises de nos jours. En 1999, en Angleterre, une femme a été condamnée à la prison à vie, sur la base d'une erreur commise par un statisticien dans un raisonnement de nature probabiliste [https://fr.wikipedia.org/wiki/Sally_Clark]. A l'époque, l'Institut de Recherche Criminelle de la Gendarmerie Nationale avait consulté la SCM : que faire pour que ceci ne se produise pas en France ? Notre recommandation n'a pas varié : le raisonnement probabiliste doit, par sa nature même, être banni des affaires criminelles.

Références

European Climate Assessment & Dataset project (<https://www.ecad.eu/>)

[MPPR] Bernard Beauzamy : Méthodes Probabilistes pour l'étude des phénomènes réels. SCM SA, ISBN 2-9521458-0-6. ISSN 1767-1175, broché, 369 pages. Mars 2004. Seconde Edition, juin 2016.

[RDM] Bernard Beauzamy, Olga Zeydina : Méthodes probabilistes pour la reconstruction de données manquantes. SCM SA, ISBN 2-9521458-2-2, ISSN 1767-1175.

[PIT] Olga Zeydina - Bernard Beauzamy : Probabilistic Information Transfer. SCM SA, ISBN 978-2-9521458-6-2, ISSN 1767-1175, relié, 208 pages. Avril 2013.

Alain Prétat : Emmanuel Le Roy Ladurie A (re)lire absolument...Science, climat et énergie, 3 octobre 2019

Emmanuel Le Roy Ladurie : Histoire du climat depuis l'an mil. Champs Histoire, août 2009.

Paul Deheuvels, Membre de l'Académie des Sciences : Le réchauffement climatique – Mythes et réalité
http://www.scmsa.eu/archives/Deheuvels_Climat.pdf

Michel Dobrijevic et Morgane Lendrin :
https://www.researchgate.net/publication/334317985_L'evolution_du_climat_a_Bordeaux_entre_1921_et_2018

Benjamin BOIS et Cornelis VAN LEEUWEN
Variabilité climatique dans la zone de production des vins de Bordeaux
<https://hal.inrae.fr/hal-02817769>

ADEME :
<https://occitanie.ademe.fr/sites/default/files/changement-climatique-20e-siecle-languedoc-roussillon.pdf>

Météo-France/ClimatHD :
www.meteofrance.fr/climat-passe-et-futur/climathd

[Dreyfus] <http://images.math.cnrs.fr/Des-mathematiciens-dans-l-affaire-Dreyfus.html>

Affaire Sally Clark : https://fr.wikipedia.org/wiki/Sally_Clark

Fichiers de données

SCM_Andra_temp_brutes.xlsx

Concerne les villes de Dijon, Metz, Mulhouse, Nancy, Reims, Strasbourg, Troyes, Saint Dizier, Bure, Soulaines, de 1921 à 2021

SCM_Andra_temp_reconstituees.xlsx

Reconstitution pour les mêmes villes des temp_max pour les mêmes dates, par la méthode des espérances conditionnelles.

Table des matières

Organisation du présent document	3
Première Partie.....	4
Prévisions sur les 50 ans à venir	4
I. Introduction	4
II. Origine des données.....	5
III. Méthodes probabilistes.....	7
A. Construction des histogrammes.....	9
B. Histogramme conjoint pour deux villes	10
C. Loi conjointe pour deux villes	10
D. Espérance conditionnelle	11
E. Qualité de la reconstruction.....	11
F. Discussion : mise en œuvre de la méthode	14
Seconde Partie	18
Analyse sur les 50 ans passés.....	18
II. Baisse des températures sur 50 ans, de 1921 à 1970	19
III. Hausse des températures, de 1971 à 2021	24
IV. Hausse des températures, sur cent ans, de 1921 à 2021.....	27
Troisième Partie.....	32
Variations locales.....	32
II. Variations locales documentées.....	32
A. Bordeaux.....	32
1. Les températures.....	32
2. Le Vin.....	35
B. Région PACA.....	36
III. Variations par ville.....	43
A. Bourges.....	43
B. Bordeaux.....	44
C. Brest	45
D. Caen.....	45
E. Montpellier	46
F. Alençon	46
G. Orly.....	47
IV. Comparaison entre villes	48
V. Les conclusions d'Emmanuel Leroy-Ladurie	50
	60

VI.	Prévision à long terme	51
VII.	Le GIEC.....	51
	Quatrième Partie	53
II.	Loi de probabilité	53
III.	Deux concepts différents : source de confusion.....	55
IV.	Très faible probabilité	56
A.	La formule de Laplace.....	56
B.	L'Hypersurface Probabiliste.....	57
V.	Du mauvais usage des probabilités	57
	Références	58
	Fichiers de données.....	59