

Résumé de la thèse

Mots clés: changement climatique, analyse spectrale, analyse fréquentielle, ondelette, tendances, variance, chroniques climatiques, bruit rouge, homogénéisation, climat, niveaux de signification, modélisation statistique

Table des matières

Remerciements	3
1. Introduction	4
1.1. Le contexte général de la recherche – l’analyse statistique des données climatiques, ses frontières et des possibilités d’amélioration	6
1.2. L’hypothèse principale de la thèse – les analyses statistiques sont utiles dans l’étude du climat, mais pas autosuffisantes	11
1.3. Le projet de recherche. La méthode utilisée	15
1.4. Les techniques utilisées	16
2. Présentation des outils statistiques qu’on utilise dans l’analyse de l’évolution temporelle du climat d’un site	19
2.1. Les approches traditionnelles d’analyse : un état de l’art de la méthode	20
2.1.1. Reconstruction des séries	22
2.1.2. La détection des ruptures	23
2.1.3. L’homogénéisation des séries - approches	33
2.1.4. L’analyse des tendances. Contributions personnelles (I)	43
2.1.5. La détection traditionnelle des cycles - l’analyse Fourier	55
2.2. Les Ondelettes – un meilleur outil pour l’analyse des cycles dans les chroniques climatiques	67
2.2.1. Les ondelettes – moyen de contourner le principe d’incertitude de Heisenberg	67
2.2.2. Les ondelettes : une analyse temps-« échelle » plutôt que temps-« fréquence »	75
2.2.3. Comparaison entre Ondelette et Fourier : la supériorité de l’analyse ondelette	76
2.2.4. Apport de la méthodologie des ondelettes à l’analyse des chroniques climatiques	78
2.3. Contributions personnelles (II) à l’amélioration de l’analyse par ondelettes en climatologie : démonstration de l’applicabilité de la méthode sur des données journalières de température	83
2.3.1. Domaine original d’applicabilité de l’algorithme ondelette utilisé	85
2.3.2. Décomposition de l’algorithme ondelette utilisé	86
2.3.3. Conditions préalables d’application de cet algorithme aux chroniques journalières de température	91
2.3.4. Validation théorique des ondelettes appliquées aux données climatiques simulées	92
2.3.4.1. La signification statistique - concept et son application	93
2.3.4.2. Les tests de permutation	97
2.3.4.3. L’approche « Monte Carlo »	100

2.3.4.4. Les chaînes Markov	103
2.3.4.5. Validation de la méthode pour le cas des chroniques de température simulées	107
2.3.4.6. L'algorithme de génération « Metropolis-Hastings »	107
2.3.4.7. La validation appliquée de la méthode	108
2.4. Contributions personnelles (III): Recherche des "discontinuités fréquentielles" dans les données	135
2.4.1. Implémentation de l'algorithme de recherche des discontinuités fréquentielles	144
2.4.2. Exemple d'utilisation de ce algorithme sur une chronique réelle	147
2.4.3. Futurs pistes possibles de recherche	152
3. Application de la méthode aux données climatiques	154
3.1. Etat des connaissances climatiques : Europe	154
3.2. Données étudiées	155
3.3. Résultats détaillées pour la station Salamanca, Espagne	165
3.3.1. Analyse des chroniques de température et des indices dérivées	166
3.3.1.1. Analyse des ruptures et tendances	167
3.3.1.2. Analyse approfondie des ruptures. Ruptures en variance	180
3.3.1.3. Analyse des indices dérivés	184
3.3.1.4. Investigation des cycles	196
3.3.1.5. Conclusions synthétiques	200
3.3.2. Analyse des chroniques de précipitation et des indices dérivés	201
3.3.2.1. Analyse des ruptures et tendances	201
3.3.2.2. Analyse des indices dérivées	204
3.3.2.3. Investigation des cycles	208
3.3.2.4. Conclusion synthétiques	211
3.4. Résultats synthétiques pour le domaine temporel (tendances)	212
3.4.1. Indices concernant les températures	213
3.4.4. Indices concernant les précipitations	251
3.5. Résultats synthétiques pour le domaine fréquentiel (ondelette)	264
3.5.1. Analyses des températures	264
3.5.1. Analyses des précipitations	269
4. Conclusions générales	282
ANNEXE	285
A1.1. La régression linéaire	285
A1.2. Le bruit, le pouvoir d'un signal, différents types de bruit	293
Liste des figures	300
Liste des tableaux	306
Tableau des coefficients d'autocorrelation	307
Bibliographie	308

Structure de la thèse

Le mémoire de thèse est structuré dans 3 parties (et une Annexe), dont le premier présente en introduction le domaine de recherche, le contexte et le questionnement de lequel surgisse la motivation de ce travail, le projet de recherche et les techniques utilisées.

Le deuxième chapitre présente la méthodologie, donc la théorie en derrière des analyses statistiques appliquées dans l'étude de l'évolution climatique des chroniques des données de mesure instrumentales, « le pourquoi et le comment », c.à.d. le problème qu'on vise et comment on peut lui adresser. Une partie de ce chapitre détaille ma contribution personnelle sur l'amélioration des méthodes d'analyse.

Dans une troisième partie, j'applique des méthodes détaillées sur un set des données des chroniques climatiques des températures et précipitations mesurées aux 16 stations météorologiques européennes. Je présente les résultats et des approches critiques sur les méthodes utilisée.

Finalement ces résultats sont synthétisés et résultent dans une conclusion générale qui répond au questionnement de recherche initial.

1. Introduction dans le domaine de recherche

Motivation : Le sujet du changement climatique est l'un des thèmes les plus actuels au niveau global au début du 3^{ème} millénaire. L'importance des conclusions tirées à partir des résultats des analyses statistiques devient de plus en plus grande dans le contexte du débat sur le réchauffement climatique et de ses impacts. Pour compliquer les choses, il est connu qu'en statistique les résultats ne dépendent pas seulement des données mesurées mais aussi de la méthode d'analyse choisie. Dans le cadre scientifique de l'analyse des données climatiques, on trouve des problèmes de validation des données d'entrée – des chroniques qui ne sont pas homogènes, dues à divers facteurs non-climatiques – et des discussions sur la puissance et l'adaptabilité de diverses méthodes statistiques d'analyse. Dans ce contexte mon projet de recherche est de comprendre et d'essayer d'améliorer la

méthodologie, autant en perfectionnant des outils innovateurs (l'analyse par ondelettes), qu'en appliquant ces méthodes d'analyse statistique sur des mesures climatiques des divers paramètres en Europe.

Contexte : Dans le champ scientifique couvert dans ce mémoire, on se situe dans la statistique inférentielle, c.à.d. la construction et validation des modèles stochastiques induites des données climatiques expérimentales. La climatologie est dans le camp des sciences naturelles une science empirique, dont les informations étudiées sont obtenues par des observations, expériences ou expérimentations. Si le nombre des observations du climat devient de plus en plus grand, et ces observations sont accessibles et investiguées simultanément par plusieurs chercheurs au niveau mondial, un handicap majeur (par rapport aux autres sciences) est constitué par l'impossibilité d'expérimentation répétitive. On ne peut pas créer des contextes climatiques identiques afin d'expérimenter, donc pour chaque état du climat on peut avoir un seul ensemble (une seule série) d'observations instantanées.

Dans ce contexte l'expérimentation dans la climatologie s'applique dans des répliques virtuelles, des modèles des phénomènes climatiques, des plus simples (modèles linéaires des tendances – une fonction mathématique polynomiale de degré un) aux plus complexes, comme les modèles généraux de circulation, qui simulent le comportement de l'atmosphère, des courants océaniques et d'irradiation solaire au niveau global. L'étude statistique des observations climatiques, la comparaison entre les résultats des plusieurs observations, et la modélisation et la comparaison avec des états alternatifs simulés font le contenu du mémoire de thèse.

Questionnement / Hypothèses de recherche : La question scientifique abordée est de savoir si les diverses méthodes statistiques d'analyse sont assez puissantes, adaptées et capables de distinguer des données d'entrée correctes pour répondre aux questions posées par la société concernant le climat.

J'ai choisi d'étudier le domaine de la climatologie dans un contexte particulier du début de 3ème millénaire, où le mot du jour était réchauffement climatique. Depuis sa formation en 1988 le GIEC a élaboré quatre Rapports d'Evaluation en 1990, 1995, 2001

et 2007 accompagnés par des sommaires pour les acteurs politiques (*Summary for Policymakers*) mettant en évidence : l'existence d'un changement climatique, voir réchauffement; la connexion de ce réchauffement avec les activités anthropiques (émissions de CO₂ et autres gaz à effet de serre) ; et finalement des prévisions pour l'avenir proche (XXIème siècle) basées sur divers modèles de circulation globale.

Dans ce contexte, la motivation d'analyser / réanalyser des séries climatiques vise à répondre ou confirmer des questions sur la dynamique du climat. Cette motivation m'a dirigé vers mon projet de recherche présenté en ce mémoire.

Projet de recherche : Le mémoire présente un travail interdisciplinaire, qui réunisse des termes de la science de la statistique avec ceux de la climatologie. Pour être bien cadrées dans les deux sujets, il faut les présenter d'abord –d'un angle de vue correspondant aux développements qui sont présentées dans le mémoire – et après, présenter leur fusion – avec les enjeux que cette approche pose. On peut réfléchir sur une liste – qui n'est pas exhaustive – des questions qui sont apparues dans le domaine :

- Est-ce que les données analysées sont qualitativement aptes pour l'analyse ?
- Les données analysées sont-elles représentatives, du point de vue régional / temporel ?
- Est-ce que les formules de modélisation utilisées sont adaptées aux objectifs et aux données d'entrée ?
- Est-il possible d'améliorer les moyens d'analyse, voir rajouter une contribution personnelle dans le domaine ?

Techniques utilisées : La recherche dans le mémoire est fondée sur un acquis statistique et méthodologique existant dans le domaine de l'analyse des séries temporelles, la majorité des moyens statistiques d'analyse proviennent de l'économétrie et sont importés dans l'étude des séries des données climatiques. Considérant le choix de la problématique, dans le cadre des hypothèses de travail et de diverses questions que la problématique pose, je me suis concentré sur des objectifs de recherche tangibles, et ce sont :

- Détecter et mesurer des changements climatiques existants, dans la période instrumentale récente (1945-2008), pour un nombre (16) de stations de mesure

météorologique d'Europe, par des méthodes d'investigation consacrées en climatologie, en utilisant des données d'entrée journalières de température minimale, maximale, et des précipitations.

- Elaborer un algorithme et un logiciel correspondant pour l'analyse spectrale de ces séries en utilisant la décomposition ondelette continue (CWT), pour identifier la présence et l'absence des cycles dans ces séries.

2. Méthodologie - Présentation des outils statistiques qu'on utilise dans l'analyse de l'évolution temporelle du climat d'un site

Pour entrer en détail sur la méthodique d'analyse (le « comment »), je fais un état de l'art des méthodes « établies » (Chap. 2.1.), et pourquoi on applique ces méthodes :

- la reconstruction des séries (Chap. 2.1.1.)
- la détection des ruptures (Chap. 2.1.2.)
- l'homogénéisation des séries (Chap. 2.1.3.)
- l'analyse des tendances (Chap. 2.1.4.)
- l'analyse des cycles (Chap. 2.1.5.)

Dans le Chapitre 2.2 je présente les outils d'investigation fréquentielle des chroniques climatiques : l'analyse Fourier et l'analyse ondelette.

A partir de Chap. 2.3. je présente plus en détail ma contribution personnelle à l'amélioration de l'analyse statistique des chroniques climatiques basées sur l'approche ondelette, ou repose la plupart de mon travail (théorique).

Dans le Chap. 2.4. je développe sur un outil que j'ai créé afin de pouvoir identifier les discontinuités fréquentielles.

2.1. Les approches traditionnelles d'analyse : un état de l'art de la méthode

On va présenter l'état de l'art des approches de reconstruction des chroniques (Chap. 2.1.1.) et de la détection des anomalies ou « ruptures » (Chap. 2.1.2.) qu'on doit cataloguer comme « artificiels » ou « naturels ».

Afin de faire face à ce problème crucial de nombreuses procédures statistiques d'homogénéisation ont été mises au point pour la détection et la correction de ces inhomogénéités.

2.1.1. Reconstruction des séries

La reconstruction des données est une méthodologie développée par les climatologues et les météorologues afin de supprimer les incohérences dans une série temporelle dues aux facteurs indépendants de la météorologie, comme la modification de l'emplacement de la station, du changement de l'environnement de la station ou le changement dans l'instrumentation ou aussi le changement d'opérateur. Une fois la série reconstruite, cela se comporte comme si la station météo a fait ces observations tout au long de son histoire utilisant sa configuration actuelle. L'objectif atteint est la disponibilité, la fiabilité et l'homogénéité de la série historique des données météorologiques.

2.1.2. La détection des ruptures

Dans un sens élargi, des auteurs comme Hare & Mantua (2000), Rodionov S. (2006) ou Scheffer & Carpenter (2003) considèrent un « régime » comme un état *stable* d'un système (climatique), et un « changement de régime » (angl. *regime shift*) comme la transition (brusque) d'un régime à l'autre. On appelle ces points de transition « ruptures » (angl. *discontinuités*).

Une « rupture » peut être définie par un changement dans la loi de probabilité des variables aléatoires dont les réalisations successives définissent les séries chronologiques étudiées (Lubès-Niel, Masson, Paturel, & Servat, 1998) .

Les changements de la moyenne sont de type le plus commun examiné dans la littérature (Khodja, Lubès-Niel, Sabatier, Servat, & Paturel, 1998). La définition des changements

du régime climatiques, par exemple, est souvent fondée sur des "différences de niveaux climatiques moyennes sur une durée pluriannuelle" (Overland & Wang, 2005).

Plusieurs approches peuvent être distinguées:

- Méthodes paramétriques, comme le test t « classique ». Les méthodes nécessitent des assomptions sur la distribution des données (fonction de densité de probabilité)
- Méthodes non-paramétrique, telles que le Mann-Whitney U-test, somme des rangs de Wilcoxon, ou test de Mann-Kendall. Aucune hypothèse sur la distribution (*f.d.p.*) n'est nécessaire;
- Méthodes d'ajustement des courbes ;
- L'analyse bayésienne et ses variations, comme des méthodes « Monte Carlo » basées sur des chaînes de Markov;
- Méthodes à base de régression;
- Méthodes de la somme cumulée (CUSUM)
- Méthodes séquentielles.

Il y a beaucoup moins de méthodes capables de détecter des changements de régime dans des statistiques de deuxième rang, comme la variance et le spectre de puissance. Un groupe distinct de méthodes comprend les méthodes multi variées qui sont conçues pour détecter les changements dans l'ensemble de la structure d'un système complexe.

Contribution personnelle (I) : un algorithme d'analyse des changements des tendances

Vu que, au moins pour les chroniques annuelles on trouve des fois (si la longueur de la chronique le permette : plus de 30 ou 40 ans !) plusieurs tendances apparentes, il faut décider comment (avec quelle « fenêtre » de temps) on applique la régression simple pour investiguer des tendances. Note: ce type d'approche ressemble au test Mann-Kendall (analyse de la série cumulative des statistiques de M.-K.) et du Farley & Hinich (1970). Par contre cette approche se base sur l'existence d'un (seul) changement radical (inversion de tendance), qui est bien plus évident et plus facile à repérer qu'un changement climatique détecté par un sommet/bas de M.-K. ou bien une subtile altération de la pente d'une tendance (globalement positive ou négative). J'ai aussi programmé ce algorithme en MATLAB, et applique le logiciel résultant sur les divers chroniques. Pour exemple, en appliquant donc ce à la chronique des températures anuelles minimales à

Salamanca (1948-2008), on observe beaucoup de tendances de diminution et d'augmentation (8 ↓, 11↑) pour des intervalles de 22 ans ou plus, comme dans la figure suivante (Fig. 3.), ou l'année 1974 est identifiée comme moment de changement de tendance:

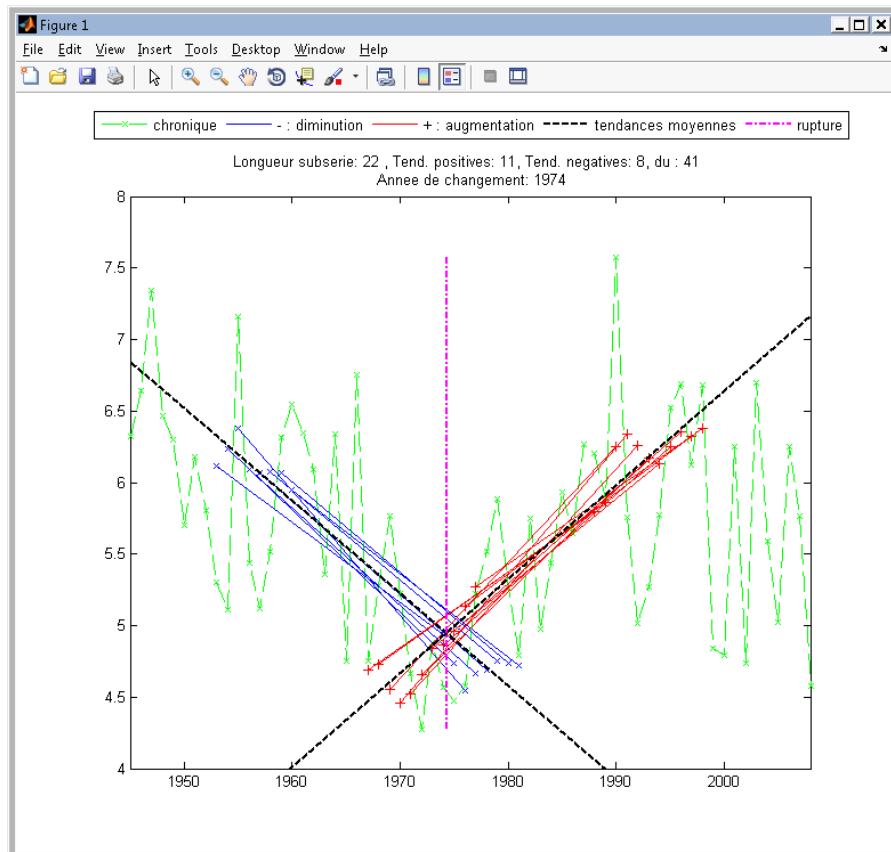


Figure 1. Exemple (Salamanca, températures minimales annuelles 1945-2008; fenêtre de 22 ans pour la régression) d'application de l'algorithme: on observe les tendances descendantes dans la première moitié de la chronique, suivis par des tendances ascendantes dans la seconde moitié. L'année 1974 est identifiée comme année de changement

2.1.5. La détection traditionnelle des cycles - l'analyse Fourier

Du point de vue de l'analyse et l'identification des cycles, on distingue des approches fréquentielles et linéaires, voir l'analyse des cycles d'auto-corrélations dans des séries. L'analyse Fourier, du nom de Joseph Fourier (auteur de la série Fourier), est la décomposition d'une fonction en termes des fonctions sinusoïdales (appelées fonctions de base) de différentes fréquences qui peuvent être recombinaées pour obtenir la fonction d'origine.

La transformée Fourier à fenêtre (STFT¹)

Mathématiquement, il y a deux types de transformée Fourier à fenêtre : la continue et la discrète. Parce qu'on utilise en climatologie que la discrète je vais présenter juste cela, d'un point de vue théorique et puis m'appuyant sur un exemple.

Dans le cas de la transformée discrète, les données à analyser sont divisées en « intervalles » ou « fenêtres ». On applique la transformée Fourier à chaque fenêtre, et on rajoute le résultat (domaine complexe) à une matrice qui stocke l'amplitude (m) et la phase (ω) pour chaque point dans l'espace temps/fréquence.

Un désavantage majeur de la STFT est sa précision déterminée. La largeur de la fenêtre est directement liée à la précision fréquentielle : une fenêtre plus large donne une bonne précision en fréquence (et inversement, faible précision de localisation d'un signal transitoire en temps), au tant qu'une fenêtre plus courte donne une meilleure précision temporelle mais une faible précision fréquentielle (Fig. 4.).

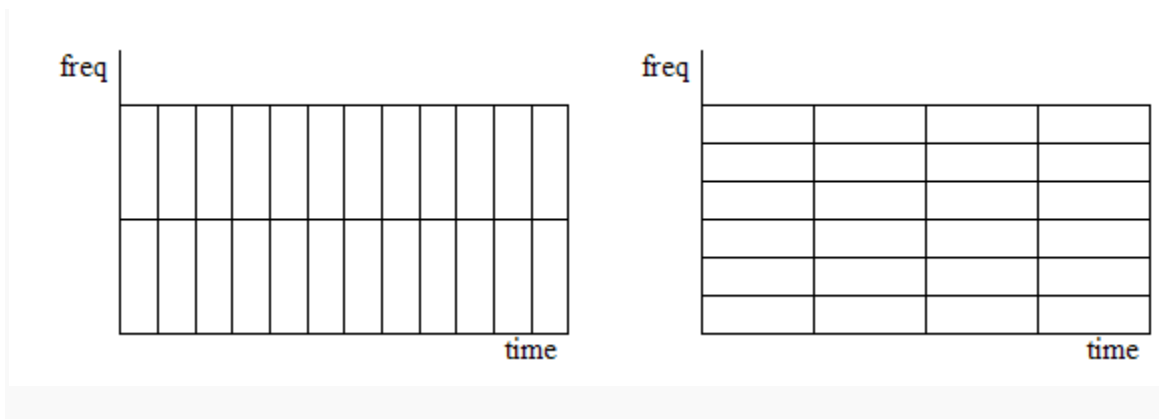


Figure 2. Comparaison de la précision de la STFT. A gauche: meilleure précision temporelle; à droite: meilleure précision fréquentielle

(http://en.wikipedia.org/wiki/Short-time_Fourier_transform#Resolution_issues)

L'incertitude de la localisation simultanée en temps et fréquence

Ce désavantage est une conséquence directe du Principe d'incertitude de Heisenberg que je présente en suite, qui postule qu'une localisation précise en temps et en même temps en fréquence est mutuellement exclusive.

¹ STFT : *Short Time Fourier Transform* (anglais) ou transformée Fourier à fenêtre

Exemple²

Prenons le signal d'exemple $x(t)$ qui est composé d'un ensemble des quatre signaux des fréquences différentes, un après l'autre. Les fréquences sont de 10, 25, 50 et 100 Hz :

$$x(t) = \begin{cases} \cos(2\pi 10t/s) & 0 \text{ s} \leq t < 5 \text{ s} \\ \cos(2\pi 25t/s) & 5 \text{ s} \leq t < 10 \text{ s} \\ \cos(2\pi 50t/s) & 10 \text{ s} \leq t < 15 \text{ s} \\ \cos(2\pi 100t/s) & 15 \text{ s} \leq t < 20 \text{ s} \end{cases}$$

Appliquant la STFT avec des fenêtres de 25, 125, 375 et puis 1000 ms (Fig. 6. a, b, c, d)

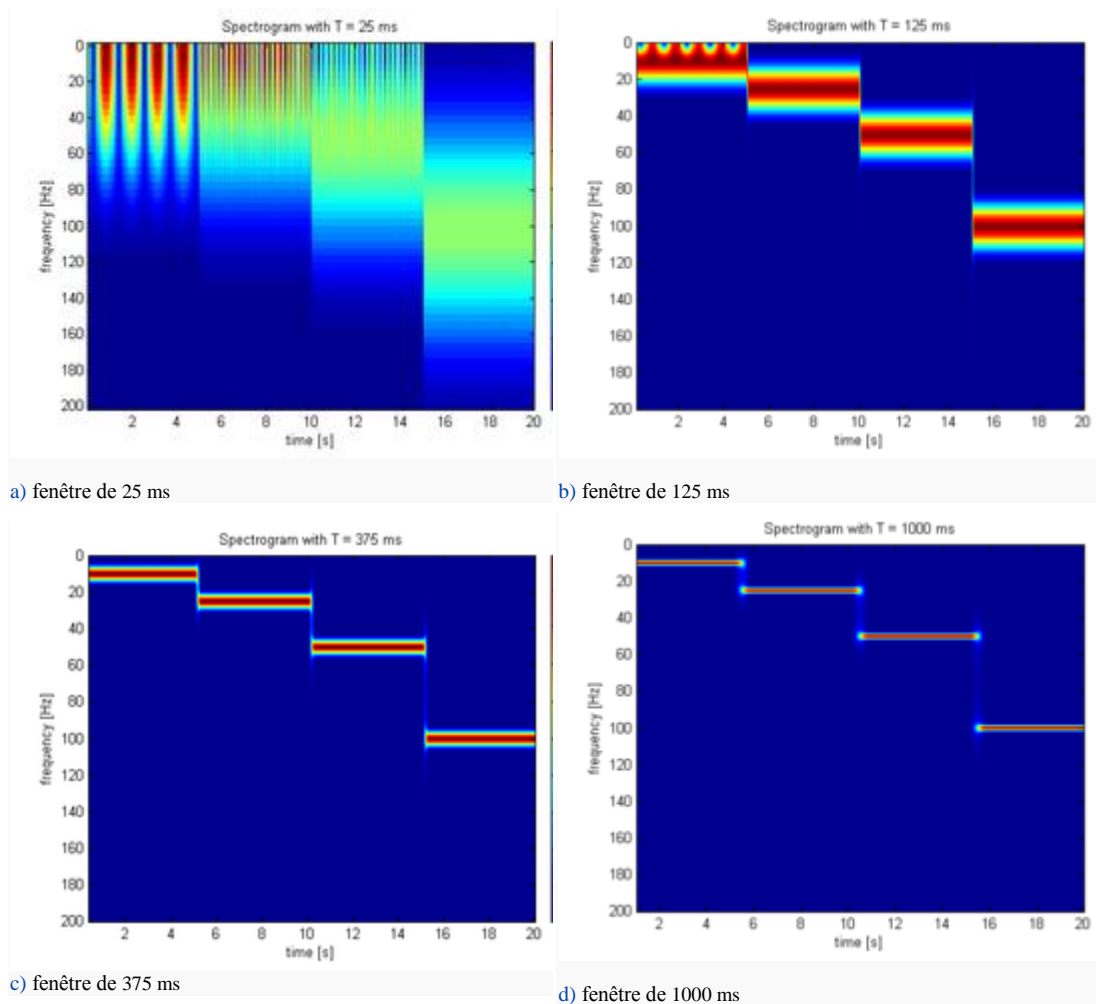


Figure 3. Spectrogrammes STFT du signal-exemple aux largeurs diverses des fenêtres:

a) 25 ms; b) 125 ms; c) 375 ms; d) 1000 ms

² De http://en.wikipedia.org/wiki/Short-time_Fourier_transform#Example

2.2. Les Ondelettes – un meilleur outil pour l'analyse des cycles dans les chroniques climatiques

Permettant de représenter des signaux en montrant en même temps l'information temporelle et fréquentielle, la transformée ondelette est un progrès vis-à-vis de l'approche plus ancienne de SFTF car les ondelettes permettent de contourner le principe d'incertitude de Heisenberg.

2.2.1. Les ondelettes – moyen de contourner le principe d'incertitude de Heisenberg

L'avantage de la méthode ondelette est de mettre en évidence des processus non stationnaires et de localiser des perturbations à l'échelle temporelle et fréquentielle.

La transformation ondelette (*wavelet*³) utilise la décomposition d'une série temporelle en des combinaisons de l'ondelette mère (ou prototype). L'apparition de cette méthode représente un saut qualitatif dans l'interprétation des résultats dans le domaine temps – fréquence. (Meyer, Ondelettes et opérateurs, 1990) considère qu'« à l'inverse de ce qui se passe pour les séries de Fourier, les coefficients d'une série d'ondelettes traduisent de façon simple, précise et fidèle les propriétés des fonctions, du moins les propriétés qui correspondent à une discontinuité, un événement imprévu. » La Fig. 8. montre l'exemple d'une ondelette possible, connue sous le nom d'ondelette de Morlet. Pour la transformation continue ondelette, plusieurs types de fonctions d'ondelettes (Haar, chapeau mexicain etc.) sont développés, aux propriétés spécifiques et adaptées aux analyses diverses.

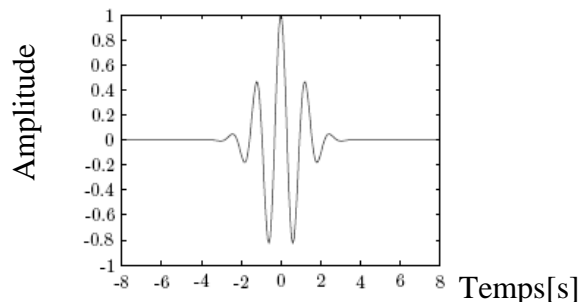


Figure 4. L'ondelette de Morlet (définie réelle, c.à.d. sans composante complexe)

³ Le terme anglais « wavelet » provient du français « ondelette » introduit par Jean Morlet (Morlet, 1982) dans les années '80 (<http://en.wikipedia.org/wiki/Wavelet#Overview>).

Le concept innovateur d'échelle, introduit par l'approche ondelette par rapport à l'approche « classique » d'analyse Fourier est peu différent de celui de fréquence. Si l'analyse Fourier à fenêtre utilise une sinusoïde limitée temporellement à une fenêtre que l'on fait glisser au long de l'intervalle d'étude, les ondelettes sont des formes d'onde de durée limitée temporellement, et qui ont une forme identique et différente par leur taille.

2.2.2. Les ondelettes : une analyse temps-« échelle » plutôt que temps-« fréquence »

Par rapport à l'analyse Fourier, qui ne demande pas d'information a priori connue (au prix de l'incertitude de Heisenberg), l'analyse ondelette « contourne » cette incertitude en rajoutant de l'information déjà connue du début : l'assomption que les phénomènes étudiés, qui en somme forment le signal analysé, ont une forme transitoire, d'impulse symétrique, d'une forme choisie par l'analyste afin de mieux la plier sur les caractéristiques du processus analysé.

2.2.3. Comparaison entre Ondelette et Fourier : la supériorité de l'analyse ondelette

Physiquement, une série temporelle est un *signal* ou une composition de *signaux*. Un signal peut être *stationnaire* (Fig. 10./1.a.γ) (aux propriétés statistiquement invariantes au cours du temps, ex : le bruit blanc), ou *transitoire* (Fig. 10./1.a. α, β) (probabilité aléatoire d'apparition au cours du temps), (Meyer, Ondelettes et algorithmes concurrents, 1992). Différemment de la décomposition Fourier (Fig. 10./1.b) (en fréquence), l'algorithme *ondelette* fonctionne dans l'espace temps - échelle. Pour une interprétation plus intuitive, les résultats du processus peuvent être (et sont) représentés aussi bien en temps – fréquence qu'en temps- échelle (Fig. 10./1.c).

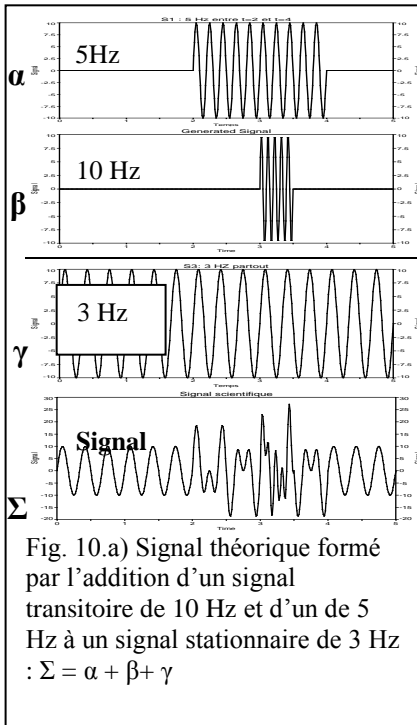


Fig.10. le traitement d'un signal théorique (a) par deux méthodes fréquentielles (b) et (c)

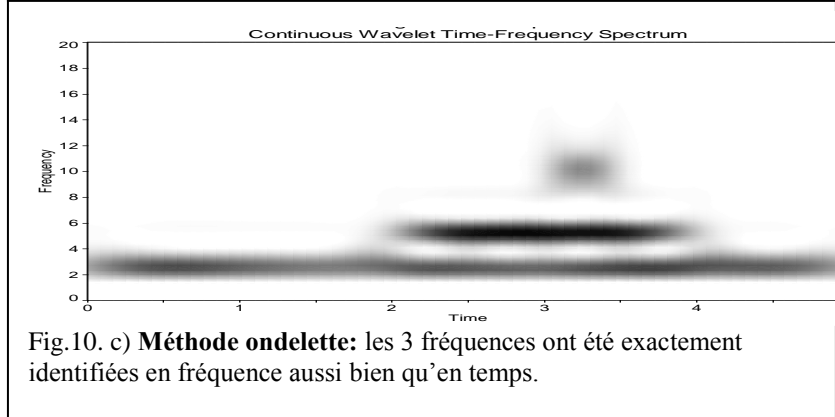
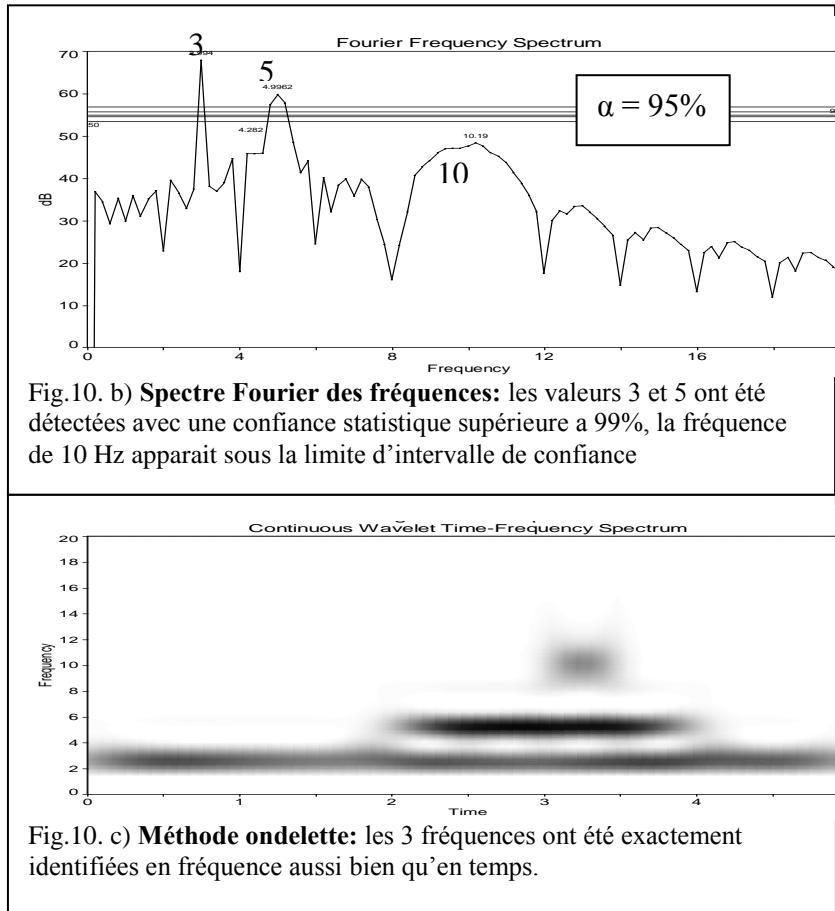


Figure 5. Comparaison entre les méthodes Ondelette et Fourier

Dans la figure ci-dessus, des transformations Fourier et Ondelettes sont appliquées à la même chronique, ce qui permet de comparer les deux.

Techniquement, l'algorithme *ondelette* fonctionne dans l'espace temps – échelle et pas exactement comme la décomposition Fourier (Fig. 10.) en fréquence. Pour une interprétation plus intuitive, les résultats du processus sont représentés comme périodicités ($1 / f$). Les valeurs de maximum d'amplitude révélées par l'analyse ondelette situées dans l'espace temps – fréquence sont (du point de vue climatique) des harmoniques (signaux stationnaires - Fourier) – dont les phénomènes ont lieu au long de la série (ex : la saisonnalité) – où des *perturbations* (signaux transitoires) - des phénomènes individuels, qui apparaissent n'importe quand autour de la série (Mateescu & Haidu, 2006). La transformation ondelette (*wavelet*) utilise la décomposition d'une

série temporelle en combinaison de l'ondelette – prototype ; l'apparition de la méthode représente un saut qualitatif dans l'interprétation des résultats dans le domaine temps – fréquence (l'analyse équivalente STFT : *Short Time Fourier Transform* qui à une mauvaise résolution temporelle par rapport à la résolution fréquentielle (Torrence & Compo, 1998)).

2.2.4. Apport de la méthodologie des ondelettes à l'analyse des chroniques climatiques

Actuellement, les travaux basés sur l'analyse des séries chronologiques conduisent à des résultats importants, Anderson et Woodhouse (2005) considérant la transformée ondelettes comme «élégante et appropriée» pour l'analyse des séries chronologiques climatiques. L'analyse des séries climatiques par la méthode d'ondelettes a atteint un degré élevé de maturité, permettant des analyses compétentes dans divers domaines. Les études déjà réalisées par des méthodes plus établies (identification des tendances, des ruptures dans la moyenne ou variante, auto-régression) peuvent être complétées par la méthode d'analyse ondelette, un point fort de cela étant la découverte de problèmes "cachés", visible seulement dans un spectre de fréquences.

2.3. Contributions personnelles (II) à l'amélioration de l'analyse par ondelettes en climatologie : démonstration de l'applicabilité de la méthode sur des données journalières de température

Le chapitre 2.3. présente ma contribution personnelle à l'amélioration de l'analyse par ondelettes en climatologie. Cela consiste en beaucoup de programmation des logiciels statistiques, outils que j'utilise d'abord pour porter un outil existant et appliqué en climatologie sur un type différent des données: les données de mesure journalière de température. Je développe de plus ces outils, afin de les utiliser pour des analyses climatiques des données expérimentales (en Chap. 3.).

À l'heure actuelle, il y a trois types de contributions potentielles de ce mémoire à la méthode de recherche en vue d'une application en climatologie:

- Méthodologique, par le développement d'algorithmes de travail, par la présentation de la méthode pour les applications climatiques, et surtout par sa validation en utilisation avec des données climatologiques, qui diffèrent largement des données pour

lesquelles la méthode avait été imaginée. Une validation empirique des assomptions de la méthode était conduite (Chap. 2.3.4.)

- D'innovation, car l'utilitaire publié par les chercheurs (Grinsted, Moore, & Jevrejeva, 2004) montre l'inconvénient de résultats incompréhensibles. Les graphiques qui résultent sont facilement accessibles à l'interprétation humaine, mais ils ne sont pas du tout pratiques pour une analyse automatique (des résultats qualitatifs plutôt que des résultats quantitatifs). Une deuxième contribution originale de la présente recherche serait l'extension de ce logiciel pour ajouter une sortie sous la forme de tableaux synthétiques, ce qui permettrait à l'algorithme d'être utilisé dans un environnement automatisé. (Chap. 2.4.)

- Appliquée, car les études de cas menées jusqu'ici (Haidu 1987) (Haidu 2002) et (Mares 2005) peuvent être répétées par la méthode d'ondelettes, pour ensuite procéder à une analyse comparative des résultats. La recherche proprement dite vise à étudier par cette méthode des séries de paramètres hydro-climatiques en Europe pour permettre d'identifier les aspects anormaux (Mateescu, 2006). (Chap. 3.)

Le test des perturbations en fréquences que j'ai introduit est basé sur l'analyse ondelette s'appuie fortement sur le calcul des valeurs de la signification statistique. Les auteurs du logiciel d'analyse (Torrence & Compo, 1998) utilisent l'outil sur une série de temps climatique (NINO3) qui a approximativement une distribution normale. La méthode d'analyse des chroniques climatiques basée sur l'approche par ondelettes présentée par Torrence & Compo (1998) implique donc une distribution gaussienne des données. Les données journalières de température qu'on va investiguer n'ont pas une distribution normale et donc on ne se situe pas dans le cadre des « assomptions initiales requises » pour appliquer la méthode. Pour pouvoir quand même traiter ce type des données par la méthode ondelette je vais démontrer en suite l'applicabilité de la méthode par une approche empirique.

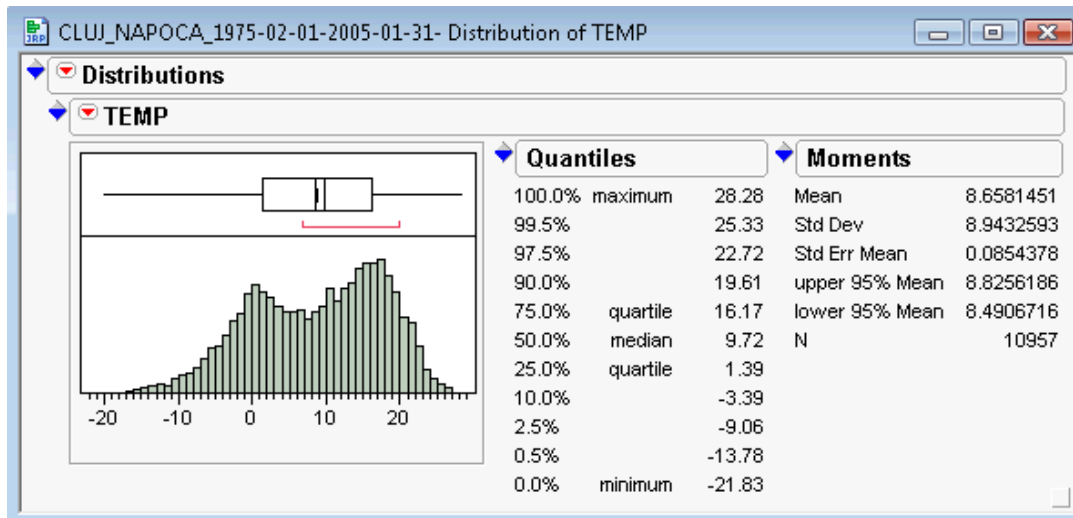


Figure 13. Exemple de distribution bimodale typique pour les chroniques de températures quotidiennes:

Cluj-Napoca, température moyenne quotidienne, entre 1975 et 2005

La distribution statistique des précipitations (Fig. 14.) n'est jamais gaussienne, des distributions gamma ou de Weibull (Buishand R. A., 1978), (Wilks, 1999) sont plutôt utilisées pour approximer la fonction de densité de probabilité.

La validation empirique de la signifiante statistique est faite par l'application d'une batterie de plus de 10000 simulations – méthode « Monte Carlo » des chroniques climatiques autocorrelées (AR1), générées par l'algorithme « Metropolis-Hastings ». Pour générer les séries de température j'ai intentionnellement omis l'onde porteuse et je n'ai pas choisi la méthode « bootstrapping » (trop gourmande en calculs) mais la génération par « Monte Carlo » des chaînes Markov (MCMC). Cette approche est aussi utilisée dans l'approche bayésienne de détection des ruptures, et s'appuie sur la génération des séries répliques aléatoires, et la comparaison de la chronique-témoin (réelle) avec ces répliques. Pour un nombre de 10000 échantillons aléatoires générés par la méthode MCMC, j'ai calculé le spectre ondelette et sa puissance (le carré complexe du spectre ondelette) afin de valider, comme (Torrence & Compo, 1998) la distribution de chaque cellule octave/temps comme Chi-carré.

Spectre Ondelette 3D d'un échantillon aléatoire (1)

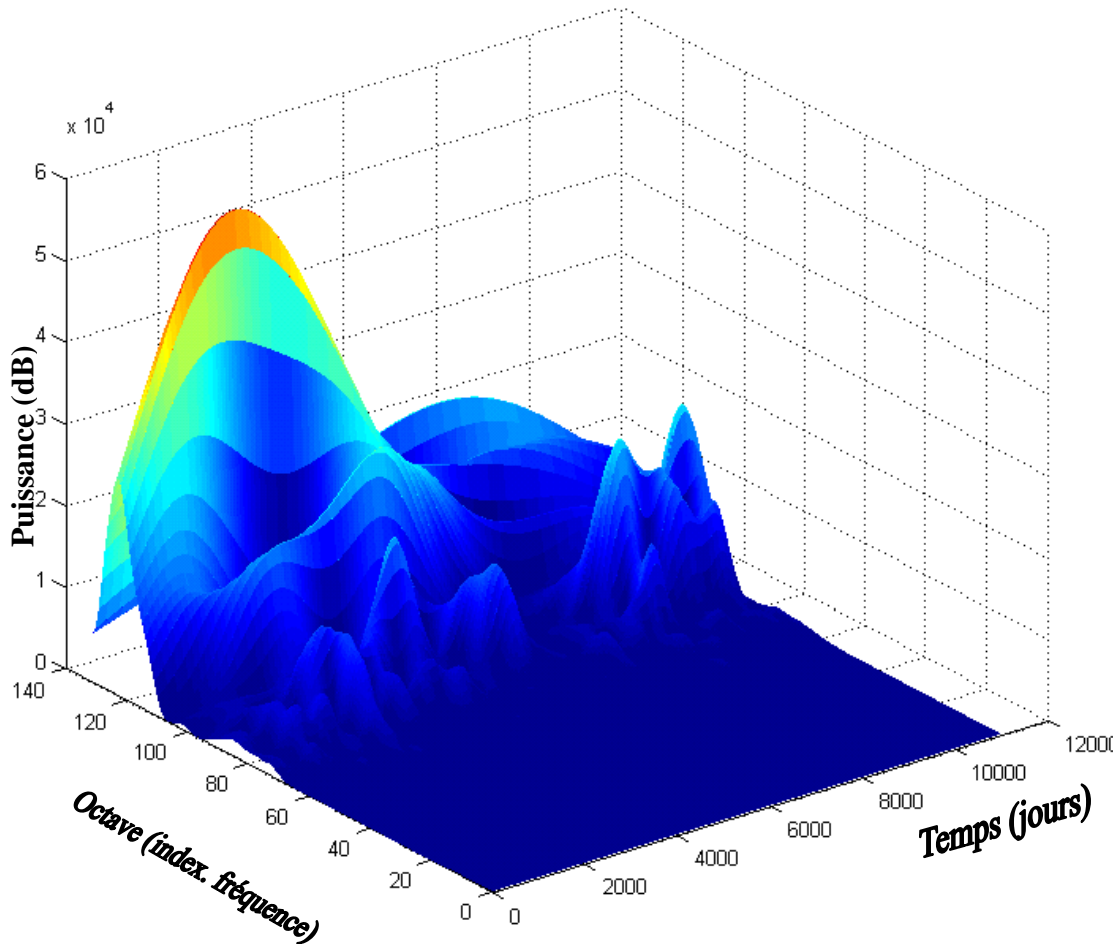


Figure 29. Spectre Ondelette 3D d'un échantillon aléatoire

La distribution de spectre de puissance fréquentiel : En suivant la recommandation de Torrence & Compo (1998) le spectre de puissance de la transformée ondelette pour tous les 10000 échantillons, pour des cellules des plusieurs octaves pas affectées par le cône d'influence, la distribution de puissance était vraiment distribuée Chi-carré. Donc la méthode s'applique aussi pour les chroniques climatiques au type non-gaussien des distributions.

2.4. Contributions personnelles (III): Recherche des "discontinuités fréquentielles" dans les données

La sensibilité des essais est bien moins élevée dans le cas des séries des moyennes, où une potentielle erreur de mesure est cachée par l'addition aux vraies mesures, qui atténuent cette erreur et la rendent moins visible aux essais divers – ce qui ne corrige pas forcément une série, mais plutôt diminue les erreurs aux niveaux tolérables ou insaisissables. Vu que l'avantage de la méthode ondelette est de mettre en évidence des processus non stationnaires et de localiser des perturbations à l'échelle temporelle et fréquentielle, on développe un algorithme de détection des aberrations dans l'espace fréquentiel. Autant empiriquement que théoriquement, il s'avère que l'algorithme peut détecter des aberrations que d'autres tests ne réussissent pas à identifier.

La série théorique présentée en sera donc brouillée avec un bruit rouge d'amplitude comparable et avec un coefficient d'auto-régression de $2/3$.

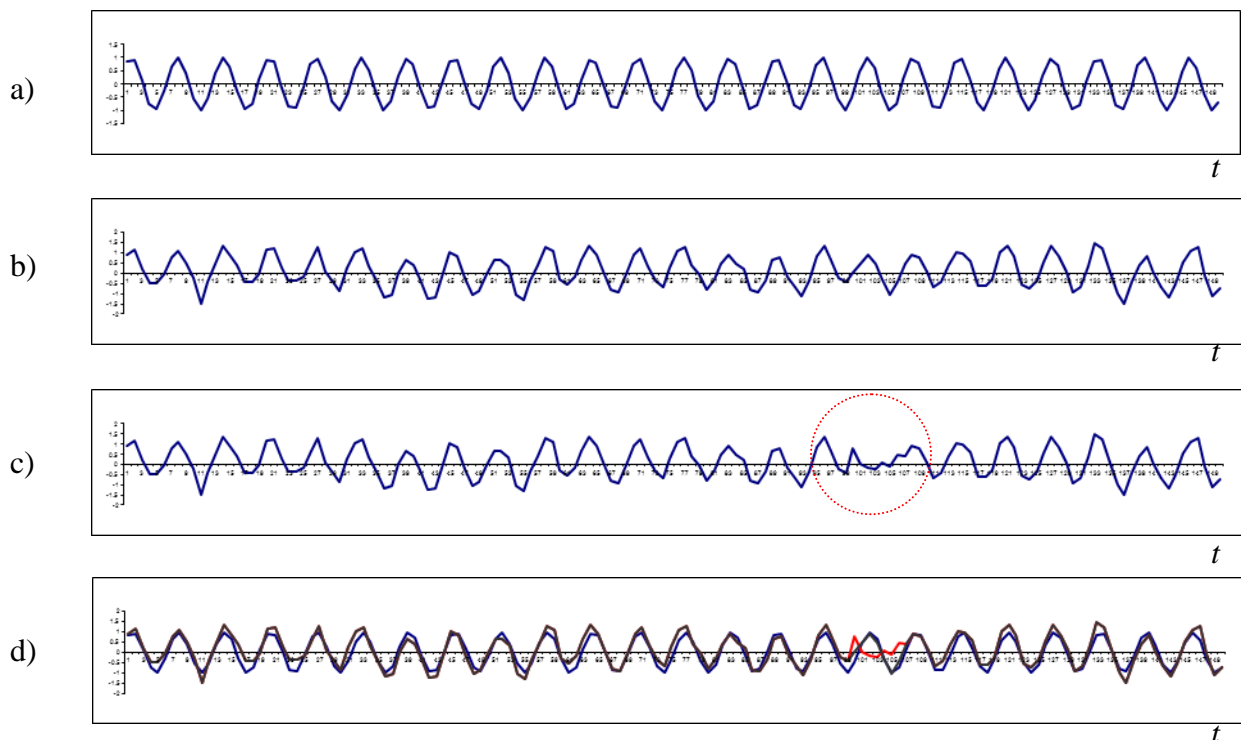


Figure 36. Réalisation de la série bruitée et perturbée: a) sinusoïde originale; b) sinusoïde bruitée; c) rajout d'une perturbation à la sinusoïde bruitée (zone démarquée par le cercle rouge); d) superposition de a) (bleu), b) (gris) et c) (rouge) pour mettre en évidence les différences

Vu qu'on prend, à la zone de la perturbation artificielle, des valeurs d'une distribution normale de même moyenne que le signal original (égale à 0), il n'y a pas de ruptures dans la moyenne. Pour continuer on teste la série perturbée et brouillée (Fig. 36.) par la méthode ondelette, en obtenant (Fig. 37.):

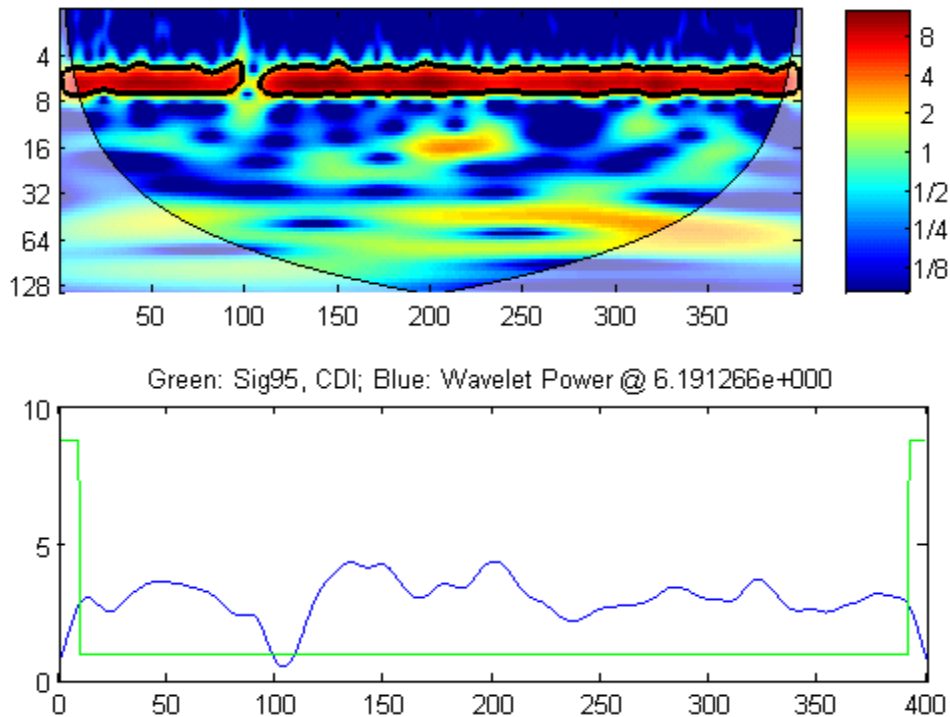


Figure 37. La perturbation a été détectée même dans la présence du bruit rouge

3. Application de la méthode aux données climatiques

3.1. Etat des connaissances climatiques : Europe

En essayant d'appliquer la méthode aux données climatiques en provenance de l'Europe, j'ai parcouru les études de référence sur l'évolution du climat en Europe en général ou à quelques échelles régionales ou ponctuelles (stations météorologiques). Les conclusions de ces études sont en partie liées au débat actuel sur la susceptibilité et la magnitude du changement climatique dans la période actuelle.

3.2. Données étudiées

Il faut mentionner que les chroniques journalières ne sont pas la règle dans le monde d'analyse des séries de temps climatiques; la plupart des études traitent des valeurs moyennes mensuelles ou annuelles. La sensibilité des essais est bien moins élevée dans le cas des séries des moyennes, où une potentielle erreur de mesure est cachée par l'addition aux vraies mesures qui atténuent cette erreur et la rendent moins visible aux essais divers – ce que ne corrige pas forcément une série, mais plutôt diminue les erreurs aux niveaux tolérables ou insaisissables. Les données proviennent de la base de données publiques (journalières) ECA&D (European Climate Assessment and Dataset, <http://eca.knmi.nl/dailydata/index.php>), qui regroupe des séries de températures et de précipitations, autant à l'état « brut » qu'homogénéisé, les séquences manquantes étant remplies à partir des observations synoptiques. Les 16 stations étudiées sont (Fig. 43.): SARAJEVO (Bosnie et Herzégovine), ZÜRICH (Suisse), PRAGUE (Tchéquie), DRESDEN (Allemagne), HALLE (Allemagne), SALAMANCA (Espagne), BEAUVAIS-TILLE (France), CHATEAUROUX-DÉOLS (France), RENNES (France), TOULOUSE (France), SIAULIAI (Lituanie), DE BILT (Hollande), OSLO (Norvège), LUBNY (Ukraine), BELGRADE (Serbie), et CLUJ-NAPOCA (Roumanie).

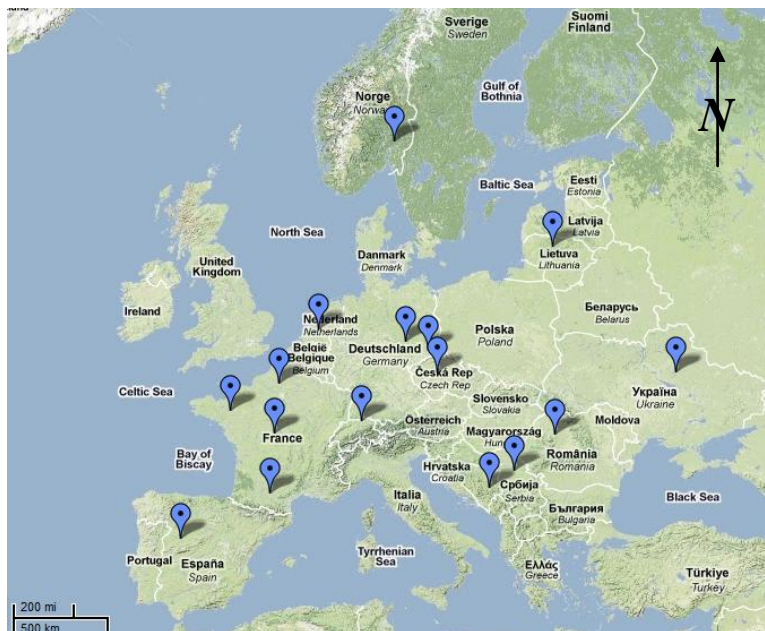


Figure 43. Carte des stations sélectionnées

J'étudie ces stations par des diverses méthodes statistiques afin de identifier des ruptures, tendances et cycles dans des chroniques de précipitations et températures, et aussi dans des chroniques des indices dérivées. Les indices poursuivis sont les suivants: FD0 (Journées de gel), ID0 (Journées gelées), TN10% (Nuits froides), SU25 (Journées d'été), TX90% (Journées chaudes), GSL (Durée de la saison de végétation), DTR (Amplitude thermique quotidienne), TR20 (Nuits tropicaux), TXx (Max Tmax), TNx (Max Tmin), TXn (Min Tmax), TNn (Min Tmin), TN10p (Nuits froides), TX10p (Journées froides), TN90p (Nuits chaudes), TX90p (Journées chaudes), WSDI (Indice de fréquence des épisodes chauds), CSDI (Indice de fréquence des épisodes froides), RX1day (Quantité maximale de précipitation dans une journée), Rx5day (Quantité maximale de précipitation cumulée pendant cinq jours), R95p (Précipitation des journées très humides), SDII (Indice simple d'intensité de précipitation), R10 (Nombre des journées aux précipitations fortes), R20 (Nombre des journées aux précipitations très fortes), CDD (Journées secs consécutives), CWD (Journées humides consécutives), R99p (Journées extrêmement humides), PRCPTOT (Précipitation annuelle totale).

Ces indices (et des autres) ont été investigués par (Klein 2004) pour ECA&D, et des résultats issus de ces études il ressort qu'il y a un changement significatif du comportement général de la moyenne climatique en Europe, notamment des tendances (augmentation des températures, diminution des journées de gel, etc.).

La méthodologie d'étude : De la myriade des tests et méthodes statistiques développés pour identifier les changements du régime, tendances, cycles et autres aspects climatiques, seulement quatre tests (Standard Normal Homogeneity Test, Buishand Range test, Pettitt Test et le test de von Neumann) ont été utilisés pour la détection des inhomogénéités et/ou des changements du régime. Le travail que j'ai mené reprend les tests SNHT et Pettitt ; les tests de Worsley et le test T sont aussi appliqués afin d'observer des changements dans le régime, suivi par des tests de tendance de cas à cas et des tests des cycles par la méthode ondelette. J'ai analysé par la méthode présentée les 16 stations mentionnées, et je présente un exemple d'analyse en détail (Salamanca), suivi par une synthèse comparative des résultats des analyses des autres stations.

3.3. Résultats détaillées pour la station Salamanca, Espagne

Je présente ensuite un exemple d'analyse détaillé pour la station de Salamanca (Fig. 46.), ou, pour la période 1945-2008 j'étudie l'évolution des chroniques de températures (minimale, maximale, et des indices dérivés) et précipitations (et ses indices dérivés), par les approches traditionnelles et aussi en appliquant les outils développés par moi-même et présentés en Chapitre 2.



L'emplacement de la station de mesure est à la base aérienne de Matacán, à 16 km de la ville de Salamanca, dans une zone rurale, entourée des terrains agricoles dédiés aux cultures irrigables (Fig. 47.). (Alonso, Labajo, & Fidalgo, 2003)

Ruptures (Salamanca, TN 1945-2008)

Les chroniques n'ont pas de lacunes et ont été vérifiées du point de vue des erreurs humaines pendant le processus d'insertion dans la base des données ECA&D.

Comme décrit dans la méthode de travail (Cap. 2), je commence l'investigation des ruptures dans la chronique de températures minimales TN entre 1945 et 2008. L'analyse des ruptures était effectuée par les tests T, SNHT, Wilcoxon et Mann-Whitney-Petitt en utilisant le logiciel AnClim. Les résultats de ces tests sont: **Le test T** : indique une rupture significative en moyenne en 1950. (62 degrés de liberté, $t = 2.993$, $F=2.948$). On observe aussi un minima local évident vers l'année 1975. L'année 1950 est aussi indiquée

par le test **Worsley** ($W = 2.967$, significatif à 95% confiance statistique). Ce test présente aussi un minimum local en 1975. Le test **SNHT** indique la même année de rupture : 1950, ($t = 7.956$) et une rupture successive en 1967. On voit ici aussi le minimum local au milieu de la chronique, en 1975. Le test **Mann-Whitney-Pettitt** indique une seule rupture en 1967 ($K=390$, significatif à 95%), et le minima local en 1975 est présent dans son graphique aussi. La valeur indiquée de 1950 par les tests Worsley, T et SNHT est très (trop !) proche du début de la série (situé à 5 ans après le début de la chronique et suivie par 57 autres) pour être sérieusement considérée comme un moment de rupture.

Tendances (Salamanca, TN 1945-2008)

Si on regarde que la tendance générale de la chronique sur l'intervalle (Fig. 49.), c.à.d. appliquant la régression sur tout l'intervalle 1945-2008, on n'obtient qu'une faible tendance de diminution ($0,05^{\circ}\text{C}/\text{décennie}$) qui est significative seulement à 85% confiance statistique.

La méthode que j'ai utilisée implique le bouclage et itérativement l'augmentation de la longueur de l'intervalle sur lequel on estime la tendance, et le glissement de cet intervalle le long de la chronique. Dès qu'une tendance (d'augmentation – positive, ou de diminution – négative) est identifiée, elle est classée – et dessinée –, et pour une classe d'intervalles de longueur N on calcule une «tendance moyenne». À l'intersection de ces «tendances moyennes» on trouve l'année de changement du régime – ou de rupture. Seules les tendances statistiquement significatives sont retenues.

La sortie graphique (Fig. 50.) montre que pour des intervalles plus longs on constate que la période couverte par la tendance positive croît – dont le niveau d'informations croît, mais le nombre cumulé des intervalles avec tendance décroît. Pour un intervalle glissant de 39 ans le nombre des intervalles avec tendance est de ($4\downarrow, 5\uparrow$), et après une période de 45 ans de l'intervalle glissant on ne rencontre plus de tendance.

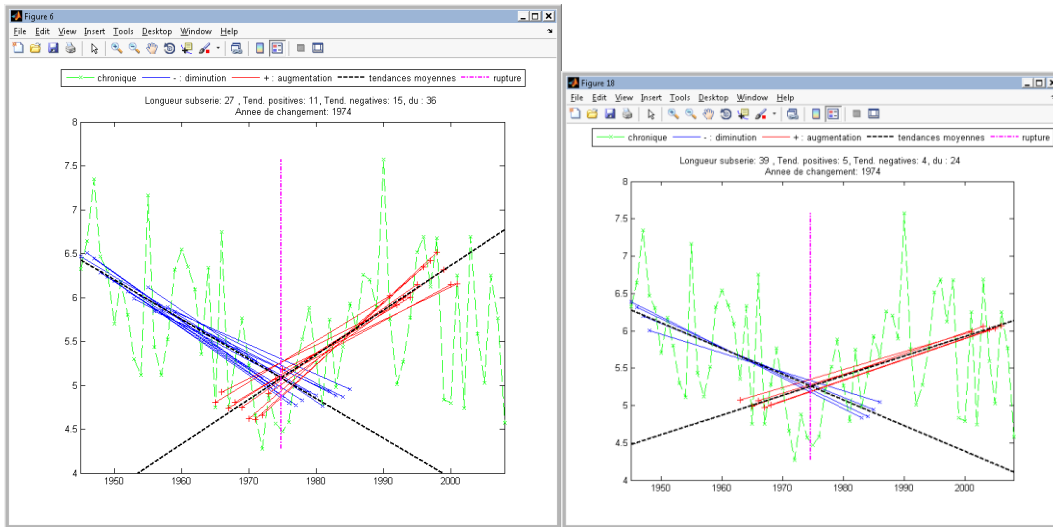


Figure 50. Exemples des tendances identifiées avec mon logiciel d'investigation des tendances pour des fenêtres de 27 et 39 ans

Une sortie plus détaillée des résultats de l'algorithme se retrouve dans le tableau suivant, où on observe que l'intervalle glissant de 32 ans (la moitié de la longueur de la chronique, et proche de valeur de 30 ans recommandée par la O.M.M.⁴) caractérise bien le comportement de la chronique (les résultats se ressemblent avec la moyenne), et on réalise que l'année évidente du changement de régime est 1974.

Tableau 4. Analyse des tendances pour la chronique de Salamanca, TN 1945-2008

Longueur (ans) / No. Tendances	No. Tend. ↓	Tendance négative de (min)	à (max)	par ... °C/Décennie	No. Tend. ↑	Tendance positive de (min)	à (max)	par ... °C/Décennie	Année de changement du régime	
22	19	8	1953	1981	-0,65	11	1967	1998	0,66	1974,29
23	20	10	1951	1982	-0,56	10	1967	1998	0,66	1974,76
24	21	11	1950	1983	-0,52	10	1967	1999	0,63	1975,02
25	26	16	1945	1984	-0,47	10	1966	1999	0,60	1975,13
26	25	15	1945	1984	-0,47	10	1965	1999	0,56	1974,72
27	26	15	1945	1985	-0,45	11	1965	2001	0,51	1974,80
28	23	13	1945	1984	-0,46	10	1964	2001	0,49	1974,29
29	21	12	1945	1984	-0,45	9	1965	2001	0,48	1974,38
30	21	11	1945	1984	-0,45	10	1965	2003	0,44	1974,29
31	21	11	1945	1985	-0,42	10	1965	2004	0,42	1974,62
32	21	11	1945	1986	-0,39	10	1964	2004	0,40	1974,71
33	19	8	1945	1984	-0,41	11	1963	2005	0,36	1973,81
34	19	8	1945	1985	-0,38	11	1963	2006	0,34	1974,30
35	18	7	1945	1985	-0,37	11	1962	2006	0,32	1974,03
36	17	7	1945	1986	-0,35	10	1962	2006	0,31	1974,31
37	15	6	1945	1986	-0,34	9	1962	2006	0,29	1974,16

⁴ O.I.M. – Organisation météorologique mondiale

38	14	5	1945	1986	-0,34	9	1961	2006	0,26	1973,64
39	9	4	1945	1986	-0,34	5	1963	2006	0,26	1974,60
40	8	4	1945	1987	-0,31	4	1964	2006	0,25	1975,29
41	7	3	1945	1987	-0,31	4	1963	2006	0,22	1974,91
42	5	3	1945	1988	-0,27	2	1963	2006	0,22	1976,07
43	4	3	1945	1989	-0,24	1	1964	2006	0,19	1976,77
44	3	2	1945	1989	-0,23	1	1963	2006	0,19	1977,10
45	1	1	1945	1989	-0,22					
<i>Moyenne</i>			1946	1985	-0,39		1964	2003	0,39	1974,78

Une question se pose quand même au niveau de la superposition des tendances (de hausse et de baisse) : voir le cas des intervalles glissants de 32 ans, si on est en 1965, est-on en plein milieu (à la moitié) d'une tendance de baisse ou au début d'une tendance de hausse ? On doit « attendre » 20 ans jusqu'en 1985 pour y répondre... La grande variance présente dans ce type des séries pousse les analyses statistiques à délivrer des fois des résultats contradictoires. En conclusion on observe que même si les tests de rupture délivrent des dates comme 1950 ou 1967 comme années de potentielle rupture, on étudiant l'évolution graphique de leurs fonctions-support, on retrouve l'année 1975 comme minimum local. Cette année marque un moment de changement du régime, c.à.d. le moment où il est évident que la tendance de « refroidissement » change en une tendance de « réchauffement » jusqu'à la fin de la chronique. Il est utile de se rappeler que c'est seulement en comparant les résultats des divers outils statistiques, que l'on peut obtenir une image plus claire sur les vraies évolutions ou caractéristiques des chroniques étudiées.

Analyse approfondie des ruptures. Ruptures en variance

Les tests suivants ne sont pas encore assez largement utilisés. Ca n'empêche pas de recourir à eux dans les cas où les résultats d'autre testes ne concordent. Je commence par l'application du test CUSUM (test de déviation cumulative) qui dérive du test Buishand (des ruptures en moyenne). En utilisant le test CUSUM (Chap. 2.1.2) on obtient l'année **1971** (Fig. 56.) comme point principal de changement, ce qui nous rapproche aux conclusions partielles de l'analyse des ruptures en moyenne, qui suggéré aussi 1971 comme point d'intérêt.

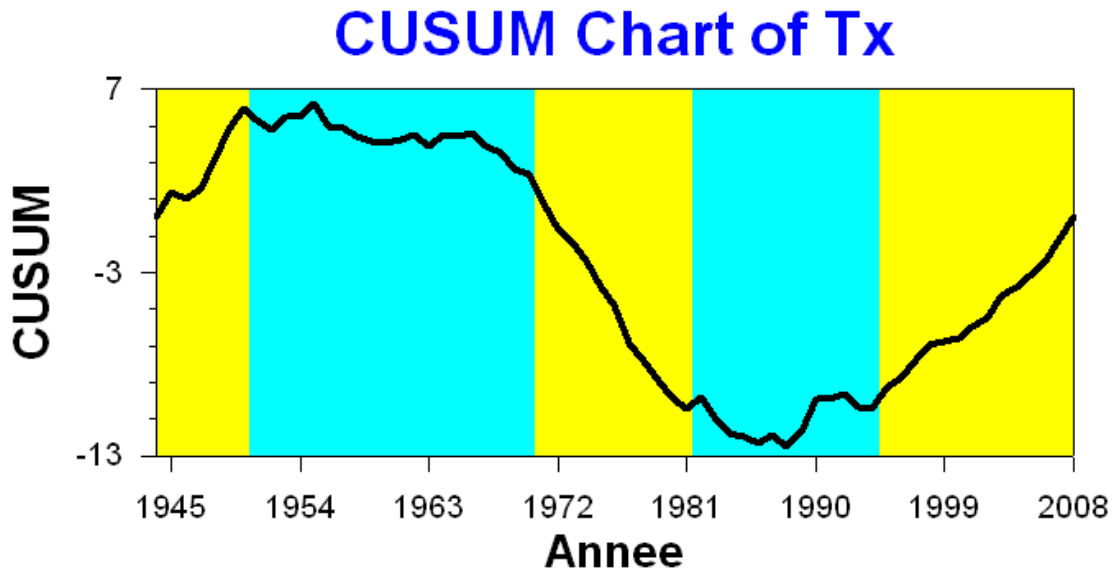


Figure 56. Représentation graphique de l'indice CUSUM, et les périodes séparées par années de changement, colorées alternativement (TX, Salamanca, 1945-2008)

La valeur 1971, identifiée à 100% confiance statistique, est aussi accompagnée des années 1951, 1982 et 1995 comme points de changement identifiés.

Un autre type de test, qui s'adresse cette fois aux changements dans la variance des chroniques, est le test de Rodionov (Chap. 2.1.2), qui peut relever des points de changement d'une autre manière que les tests utilisés jusqu'ici.

Le test de Rodionov nous indique les années **1971, 1981, 1995** et **1956** (Fig. 57.) comme moments de changement de régime. (Voir figure en bas – la valeur 2007 est à un an de distance de la fin de la série donc pas pertinente.)

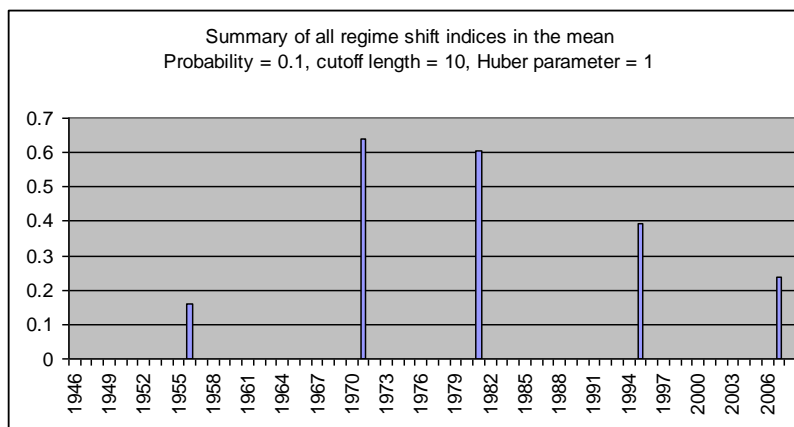


Figure 57. Les résultats de teste de variance de Rodionov pour la chronique de TX 1945-2008, Salamanca

Comme dans le cas des tests de ruptures dans la moyenne, l'année 1971 est aussi identifiée comme le point majeur de changement de la variance dans la chronique. Comparant les résultats assez différents de ces méthodes diverses, synthétisons (Tab. 7.) pour l'investigation de la chronique de TX de Salamanca (1945-2008) les résultats obtenus en appliquant de divers tests statistiques:

Tableau 7. Résultats comparatifs des diverses approches statistiques pour identifier un point de changement dans la chronique de températures maximales de Salamanca, 1945-2008

Méthode	Aspect investigué	Ruptures ou points de changement des régimes identifiés
test T	moyenne	1989 max (1970 min)
Worsley	moyenne	1989 max (1971 min)
SNHT	moyenne	1989 max (1971 min)
Mann-Whitney-Pettitt	moyenne	1989 max (1970 min)
CUSUM	écarts de la moyenne	1971, 1982, 1995, 1951
Rodionov	variance	1971, 1981, 1995, 1956
Régression : changement de tendance	tendance	1974

Mon opinion est que la valeur de 1974 est plus pertinente comme moment bien identifié de changement du régime, que la valeur de 1989 (vue par 4 tests) qui implique un régime plus ou moins stationnaire qui fait des sauts brusques. On peut observer que des tests qui ne s'adressent pas seulement à la moyenne mais aussi aux tendances ou à l'évolution de la variance ou de l'écart-type, produisent des résultats proches (1971 est plus proches de 1974 que de 1989).

Analyse des chroniques de précipitation et des indices dérivés

On continue par analyser le spectrogramme issu de l'analyse Fourier de la chronique journalière des précipitations (Fig. 82.).

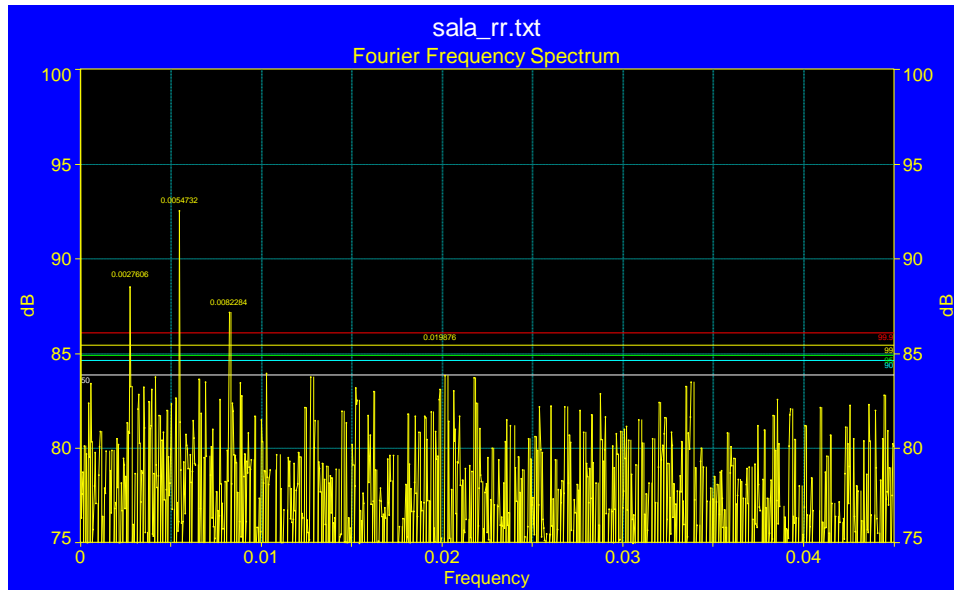


Figure 82. *Le spectrogramme de la chronique des précipitations quotidiennes. Ligne rouge: niveau minimal de puissance pour être significatif à 99% confiance statistique*

On se rend compte de la présence de trois pics, c.à.d. fréquences qui sont significatives à 99% : celle du cycle saisonnier à 0,002606 , celle de 0,0054732 qui correspond à un cycle biannuel, et une troisième fréquence observable à 0,0082284 – correspondant à un cycle de périodicité de 121 jours . Si on essaye de « cartographier » la présence de ces cycles dans le temps, on observe qu’on identifie dans la série brute une faible présence du cycle saisonnier (1an) et, à côté, du cycle de 6 mois, accompagnés par des périodicités de 4 ans sur quelques périodes et dans les résultats dans le spectre fréquentiel de l’analyse ondelette beaucoup de variabilité dans les bandes inférieures (niveaux des jours).

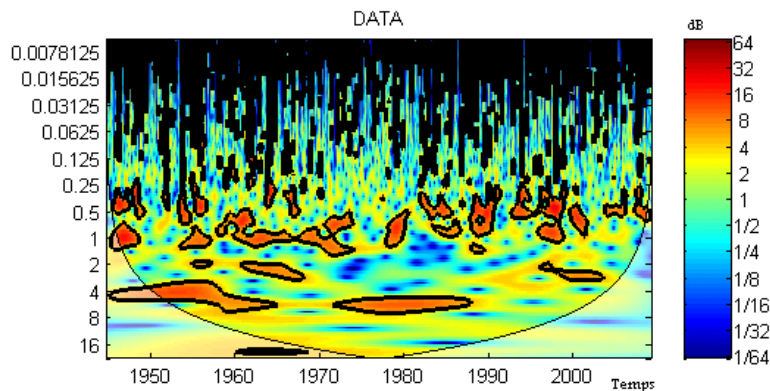


Figure 83. *Graphique de la transformée ondelette de la chronique des précipitations quotidiennes, Salamanca, 1945-2008*

Ces résultats sont bien différents de ceux obtenus par l'analyse ondelette des chroniques de température. La présence du cycle saisonnier est très faible et rare ; on observe (Fig. 84. a.) b.)) plutôt la présence du cycle biannuel, qu'on compare – du point de vue des moments d'apparence – avec celui saisonnier.

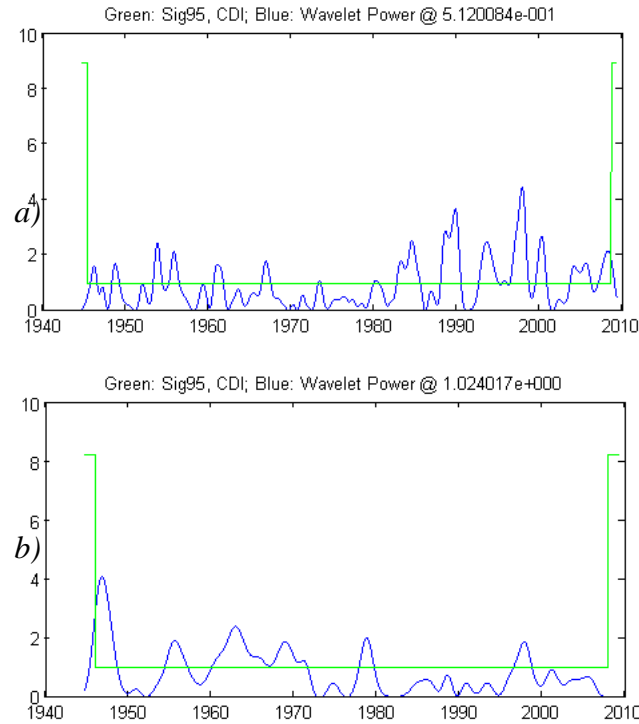


Figure 84. a) Puissance (dB) du cycle biannuel dans le spectre ondelette; b) Puissance (dB) du cycle saisonnier dans le spectre ondelette

En étudiant une corrélation possible (Fig. 85.) entre les valeurs des maximas dans la bande de 6 mois – du cycle biannuel (ou la puissance dans le spectre ondelette est maximal) et les valeurs respectives dans la bande de 1 an (cycle saisonnier) on observe une indépendance absolue, la régression entre les deux montre une absence totale de corrélation ($r^2=0,001$).

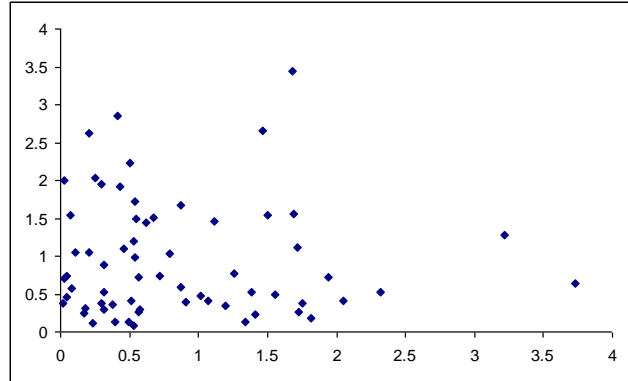


Figure 85. Nuage de points: absence de corrélation entre le pouvoir dans les bandes ondelettes de 6 mois et de 1 an

On peut déduire de l'analyse des cycles que l'absence du cycle saisonnier (ou plutôt sa présence assez faible) montre que, à Salamanca, dans la période étudiée, les précipitations ne sont pas liées à ce type de cycle. Le fait que les précipitations ont un rythme différent, indépendant du cycle saisonnier (qui caractérise l'évolution des températures) peut nous indiquer l'importance réduite de l'effet climatique local vis-à-vis de l'influence de la circulation générale sur les sites comme Salamanca, soumis directe à l'influence des vents de l'Atlantique.

3.4. Résultats synthétiques pour le domaine temporel (tendances)

J'ai analysé les 16 stations suivant une méthodologie similaire au cas (Salamanca) présenté au Chapitre 3.3. Ensuite je discute du point de vue spatial l'évolution par station de quelques indices. J'ai groupé les indices par rapport à leur origine (températures minimales, maximales, précipitations) et par rapport aux phénomènes qu'ils reflètent (par exemple épisodes chauds ou froides).

3.4.1. Indices concernant les températures

Je présente ensuite le groupe des indices: TNn, TNx, FD0, ID0, TN10P, TX10P et CSDI, liées au « froid ».

TNn / TNx – Minima / Maxima annuelle des températures minimales



Figure 88. Carte des tendances de

a) TNn (en haut) et de

b) TNx (en bas)

Légende



croissance significative à 95% confiance statistique



croissance significative à 75% confiance statistique



Pas de tendance significative



décroissance significative à 75% confiance statistique



décroissance significative à 95% confiance statistique

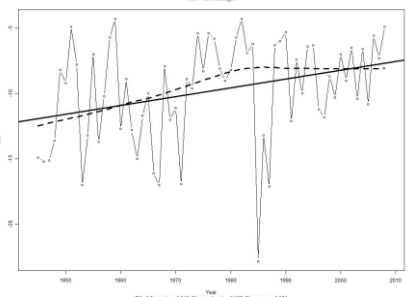
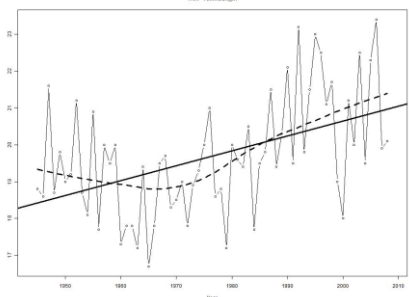
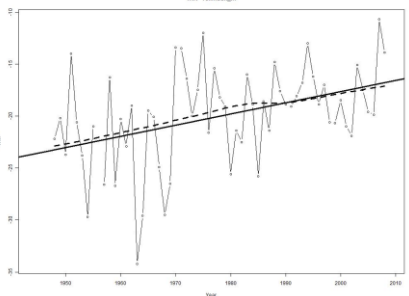
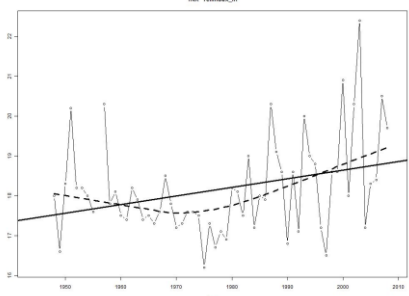
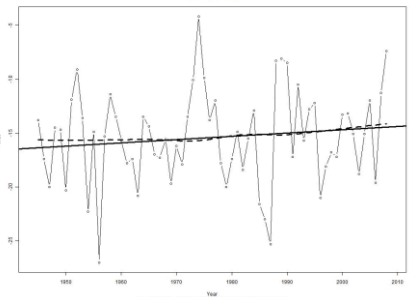
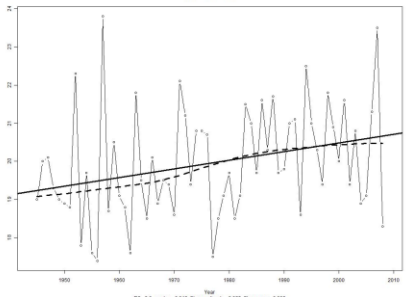
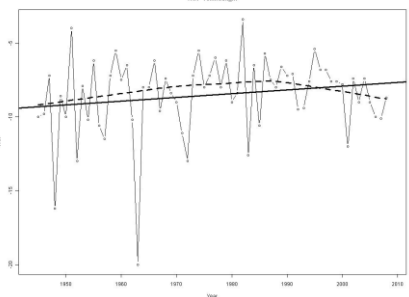
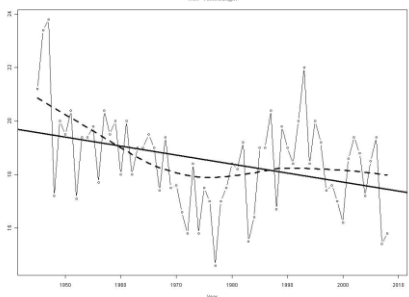
Commençant par les indices « froids », il est intéressant d’analyser l’évolution des températures minimales, pratiquement ces deux indices reflétant l’hiver - TNn : minima des minimas, et pour l’été, TNx – maxima des minimas. On remarque le fait que, dans le cas de TNn (Fig. 88. a.), on observe uniquement des tendances de croissance, et aucune de décroissance ; pour la majorité des stations investiguées, ces tendances sont significatives. On arrive à distinguer deux groupes, où ces tendances sont significatives : une en France, et l’autre dans l’Europe Continentale (Serbie, Roumanie, Ukraine). Aussi pour TNx (Fig. 88. b.)), on se rend compte que pour la grande majorité des stations on trouve des tendances significatives de croissance. Par exception, à Salamanca la tendance identifiée est inverse. Du point de vue quantitatif, on remarque (Tab. 8.) que la TNn augmente en général de près de la valeur 0,5 °C par décennie, pour la TNx la valeur moyenne est plutôt de 0,2 à 0,3 °C par décennie.

Tableau 8. Valeurs des tendances de TNn et TNx (en italiques valeurs non significatives à 95%)

Station / Tendance (°C /décennie)	Beauvais	Belgrade	Châteauroux	Cluj	De Bilt	Dresde	Halle	Lubny	Oslo	Prague	Rennes	Salamanca	Sarajevo	Šiauliai	Toulouse	Zurich
TNn	0.6	0.5	0.7	1	<i>0.4</i>	<i>0</i>	<i>0</i>	0.7	<i>0.4</i>	<i>0.4</i>	0.5	<i>0.2</i>	<i>0.3</i>	<i>0.5</i>	0.7	<i>0.4</i>
TNx	0.2	<i>0</i>	0.4	0.2	0.2	0.2	<i>0</i>	0.2	<i>0.2</i>	<i>0.2</i>	0.3	-0.3	0.3	0.2	0.3	<i>0</i>

Pour comparer (Tab. 9.) aussi du point de vue temporel l’évolution de ces indices, on examine les stations de Salamanca, Cluj Napoca, Dresde et Châteauroux.

Tableau 9. Comparaisons entre les évolutions de TNn et TNx

Statio n	Evolution TNn	Evolution TNx	Correlatio n
Châteauroux - Deols	 <p>+0,7 °C /décennie (significative à 95%)</p>	 <p>+0,4 °C /décennie (significative à 95%)</p>	0,25
Cluj	 <p>+1 °C /décennie (significative à 95%)</p>	 <p>+0,2 °C /décennie (significative à 95%)</p>	0,91
Dresde	 <p>Tendance non significative</p>	 <p>+0,2 °C /décennie (significative à 95%)</p>	0,12
Salamanca			0,11

	+0,2 °C /déc. (significative à 83%)	-0,3 °C /décennie (significative à 99%)	
--	-------------------------------------	---	--

On observe donc, dans les graphiques de ces indices, qu'il n'y a des fois pas de similarités entre leurs évolutions (on trouve des fois des corrélations, comme à Cluj, et des fois aucune). Pour le cas de Salamanca, on observe même des tendances différentes.

3.4.2. Indices concernant les précipitations

PRCPTOT – Précipitations annuelles totales

On remarque le fait que, dans le cas de PRCPTOT (Fig. 100), on observe que des tendances de croissance, et aucune de décroissance ; pour la majorité des stations investiguées, ces tendances ne sont pas significatives. On arrive à distinguer que dans l'Est de l'Europe les tendances sont significatives (Lituanie, Roumanie, Ukraine).



Figure 100. Carte des tendances de la précipitation annuelle totale (PRCPTOT) pour les stations d'étude

Du point de vue des précipitations, on se rend compte d'une augmentation des précipitations (PRCPTOT), notamment des épisodes de pluies plus intenses (R95p). Sans généraliser à partir de moins de 16 stations pour l'entier espace européen, les résultats observés sont en concordance avec des études (Zolina 2011) récentes, et montrent autant une augmentation dans la quantité totale de précipitations annuelles, qu'une augmentation des épisodes des fortes pluies dans les dernières décennies.

Sous la forme d'un tableau (Tab. 40) synthétique, je présente les résultats des analyses de tous les indices calculés par station. Analysant ces résultats, on se rend compte que les stations évoluent d'habitude de la même manière, ou qu'on parle des précipitations ou des températures. Cela nous conduit à la conclusion que, du point de vue des tendances du climat, l'échelle européenne est assez homogène.

Tableau 40. Présentation synthétique des tendances, par indice et station:

Station / Indice	Beauvais	Belgrade	Châteauroux	Cluj	De Bilt	Dresde	Halle	Lubny	Oslo	Prague	Rennes	Salamanca	Sarajevo	Šiauliai	Toulouse	Zurich
TNn	++	++	++	++	+			++	+	+	++	+	+	+	++	+
TNx	++		++	++	++	++		++	+	+	++	--	++	++	++	
FD0	--	--	-	-	--			--	--	--	--	+	-	--	--	--
ID0	--	-	-		--	--		--	--	--	-	--	--	--	--	
TN10P	--	--	--	--	--	--		--	--	--	--	+	--	--	--	--
TX10P	--	-	--		--	--		--	-	--	--		-	--	--	
CSDI	--	--	--	-	--	--	-	-	-	--	--			-	--	-
TXn	+	+	++		+	+	+	++	+	+	++	++	+	+	++	
TXx	+				+	+					+			+	+	--
SU25	+		++	-	++	++				+	++		+	++	++	--
TR20		++	++	+	++			++		++	++	--	+	++	++	
TN90P	++	++	++	++	++	++		++	++	++	++		++	++	++	++
TX90P	++	++	+	-	++	++		++	++	++	++	++	++	++	++	--
WSDI	++	+			++	++		+	++	++	+			++	+	--
GSL	++	+	+	-	++	++	+	++	+	++	+			+	++	++
DTR	--	-	-	--		+		--	--	--	--	++		-	--	--
PRCPTOT			+	++	++			++	+		+		+	++		
R10mm		+	++	++	++			++		-	++		+	++	+	+
R20mm			++	+	+			++	++		+		+	++	+	+
R25mm			++	+				+	++	-	+	-		++		+
R95p			++	+	++			++	+	-	++			++		
R99p						-		+		-	+	-		++		
RX1day					-		-			-		-	+	+		

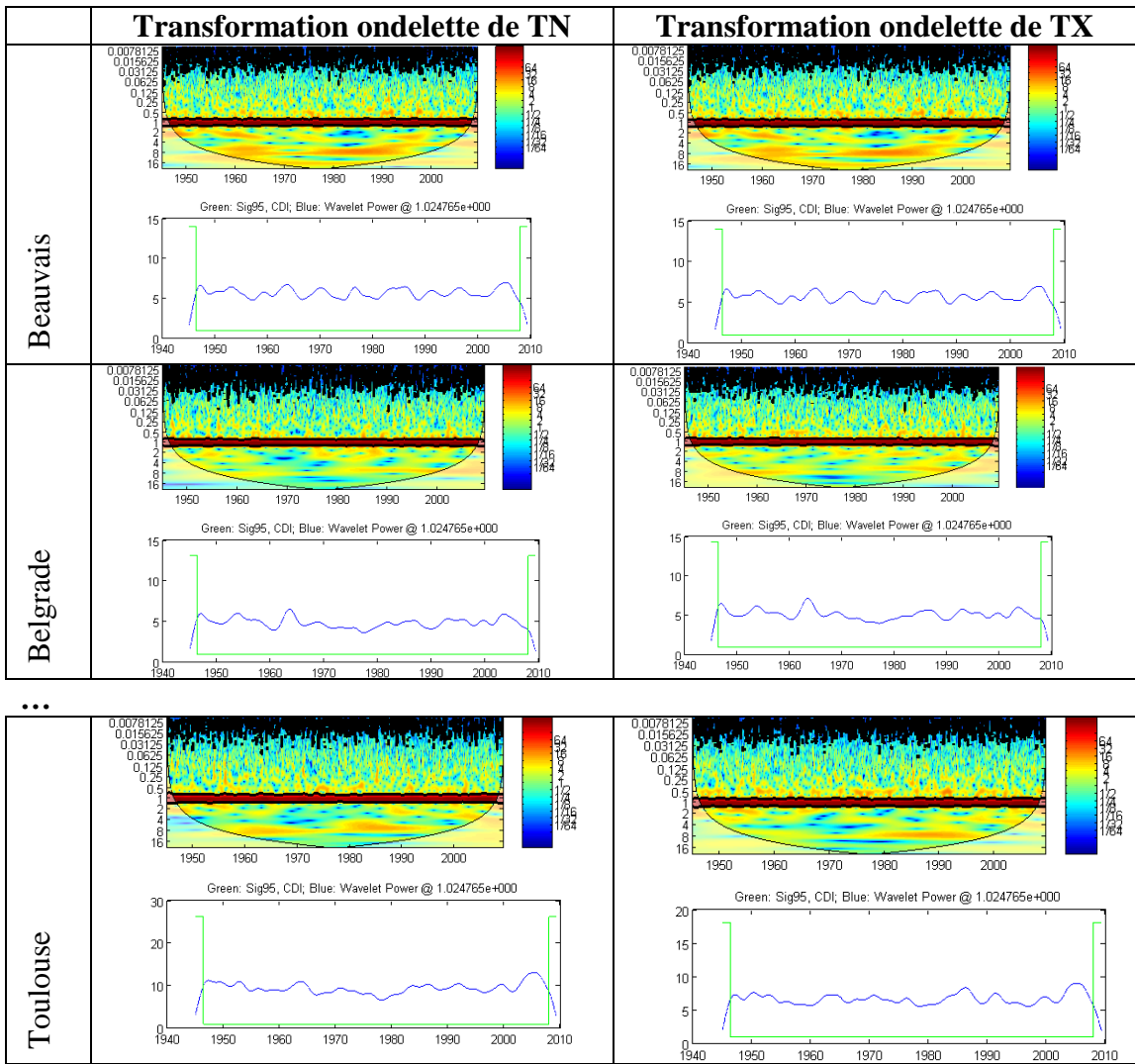
RX5day			+	+				+		--	+	-				+
SDII			+	+	++			++	+	--	++		+	++		++
CDD															+	
CWD					+											

3.5. Résultats synthétiques pour le domaine fréquentiel

Legende des tendances : « ++ » ascendante, 95% confiance statistique, « + » ascendante, 75% confiance statistique, « □ » aucune tendance, « - » descendante, 75% confiance statistique, « - - » descendante, 95% confiance statistique

3.5.1. Analyses des températures

Pour les chroniques de températures minimales et maximales, des données journalières non-dessaisonnalisées (pour ne pas affecter la transformée ondelette), on observe que seul le cycle saisonnier a une signification statistique (Tab. 41).



3.5.1. Analyses des précipitations

On continue ensuite par l'analyse fréquentielle des chroniques des précipitations. Une première étape consiste dans le « screening » par l'analyse de Fourier, afin d'identifier quels cycles se manifestent dans la période couverte par la chronique. Une fois les cycles identifiés, ils sont « cartographiés » dans l'espace temps-fréquence ondelette afin de trouver les moments et le poids de la présence du cycle dans la chronique. La méthode de décomposition Fourier est adaptée pour donner des résultats précis en fréquence aux signaux manifestes stationnaires. Comme dans le cas des chroniques de précipitations on trouve beaucoup des signaux transitoires, qu'on essaye d'identifier, les résultats sont des fois surprenantes : on trouve une localisation ambiguë en fréquence des divers épisodes.

Tableau 42. Transformation fréquentielle ondelette des chroniques journalières de précipitation : on identifie des cycles (classées par périodicités) et on identifie leur présence temporelle

Sta-tion	Analyse ondelette	Cycles identifiées
Beauvais		Saisonnier (1 an) : 10% 3-4 ans : 30% 7-8 ans : 50% 16 ans : 78%
Belgrade		Saisonnier (1 an) : 33% 16 ans : 33%

...

Le cycle de 1 an (annuel)

Le cycle saisonnier, dominant dans les chroniques des températures, joue un rôle moins important dans celles de précipitations. Les précipitations sont plutôt liées à la circulation générale et surtout leur lien avec le cycle annuel est du à l'orographie (Maraun & al,

2009), voir dans les lieux (dépressions etc.) protégées par les montagnes la circulation générale est moins influente. Le cycle annuel est plus présent là où les conditions permettent la formation d'un climat local, qui permet aux pluies d'être liées à un processus local d'évaporation / condensation journalière, lié donc à l'apport énergétique du soleil et donc des températures. Sous forme synthétique (Tab. 43) je présente les valeurs obtenues, et leur carte en Fig. 106. On observe le manque de liaison spatiale entre les valeurs trouvées.

Tableau 43. Pourcentage de la présence du cycle annuel dans les chroniques de précipitation

Station / présence du cycle (%)	Beauvais	Belgrade	Châteauroux	Cluj	De Bilt	Dresde	Halle	Lubny	Oslo	Prague	Rennes	Salamanca	Sarajevo	Šiauliai	Toulouse	Zurich
Saisonnier	10	33	11	94	27	45	78	35	91	98	38	44	10	85	27	71

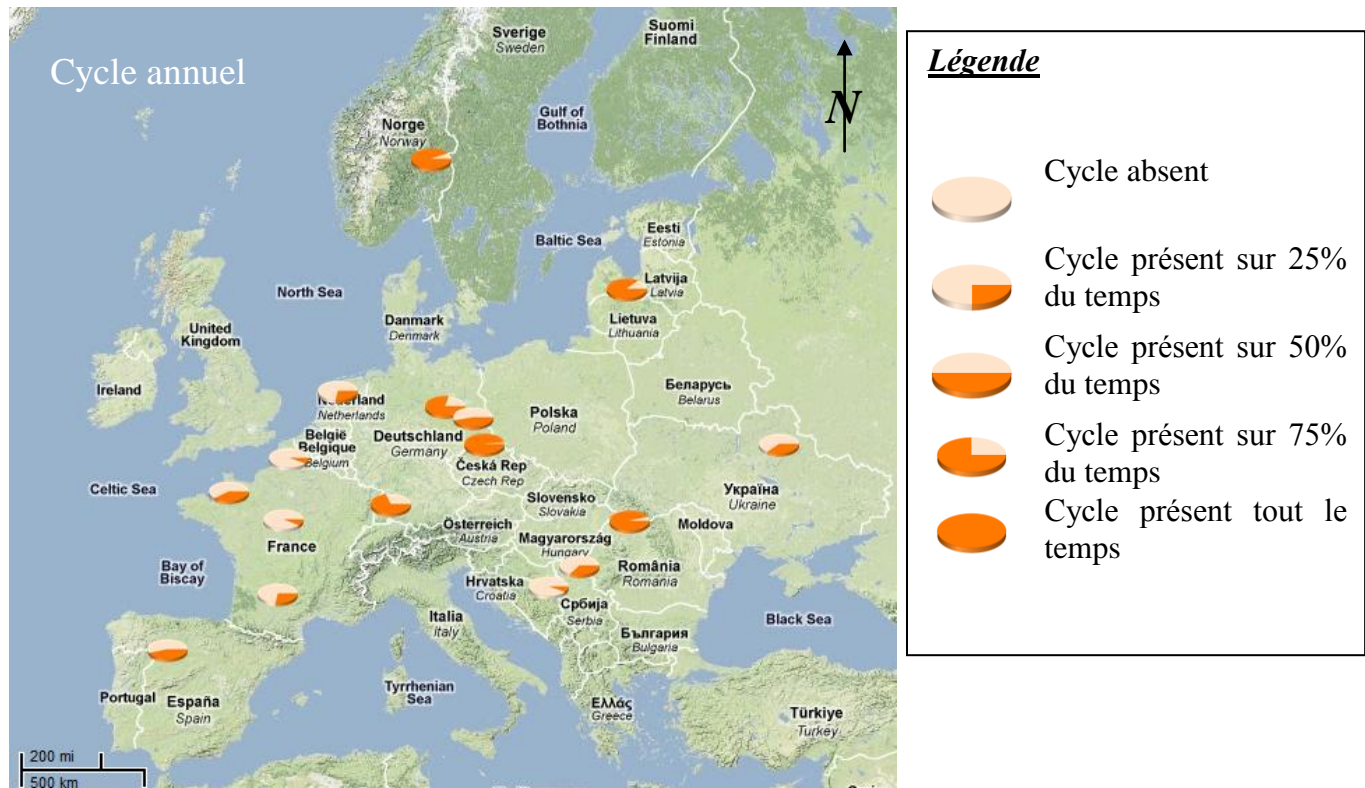


Fig. 106 : Représentation spatiale de la présence temporelle du cycle annuel dans les chroniques de précipitations

4. Conclusions générales

Dans le projet de recherche je me suis proposé d'essayer d'appliquer et éventuellement améliorer des méthodes qui s'adressent à la détection et à la quantification du type et de la grandeur des changements du climat, là où ils existent. Les séries des données journalières de températures (minimas et maximas) et des précipitations se prêtent bien aux analyses statistiques par des méthodes modernes. Du point de vue de la qualité des données, aujourd'hui les méthodes d'homogénéisation sont assez robustes pour pouvoir fonctionner aussi dans le contexte d'une disponibilité réduite des métadonnées. Pour cela, à cause du nombre réduit et de la répartition des stations analysées en Europe, même si je suis bien arrivé à quelques résultats, ceux-ci ne nous permettent pas de tirer des fortes conclusions sur les évolutions climatiques. Ces résultats confirment ou sont en concordance avec des résultats des autres chercheurs acquis aux méthodes déjà consacrées. D'un autre côté, les résultats nouveaux, obtenus par la méthode ondelette et son application, sont plutôt des améliorations méthodologiques ; les sorties quantitatives des paramètres analysés peuvent sembler des fois peu intéressants ; l'approche est quand même nouvelle et peut résulter dans l'identification des aspects nouveaux avec son utilisation.

Les stations européennes choisies appartiennent quand même à un espace assez réduit du point de vue global ; on observe l'évolution simultanée des stations, en tout cas, l'existence des tendances communes présentes dans la grande majorité de stations examinées, permet de confirmer les connaissances générales, en leur actualisant jusqu'en 2008 :

- on observe une tendance claire de réchauffement en Europe, due à l'augmentation des minimas, et prouvée (Chap. 3.4.1.) par les évolutions des indices assez divers
- après l'année 1975 généralement les tendances identifiées deviennent plus prononcées. Cela peut nous conduire à l'idée d'un moment du changement climatique – mais en tout regret, on ne peut pas généraliser à partir d'un nombre assez réduit des stations.

- on observe une augmentation dans les précipitations, aussi dans les fortes précipitations (c'est un peu logique vu le comportement statistique de la distribution des extrêmes).
- On observe l'influence d'un cycle non classifié de 7-8 ans, partout en Europe, mais plus influent dans l'ouest exposé à l'océan.

D'autre côté, les méthodes d'analyse utilisées sont robustes et permettent l'interprétation aussi quantitative (ex. nombre de jours par décennie, ou degrés par an, année de saut etc.) que qualitative, en présentant des intervalles de confiance statistique et des méthodologies consacrées dans la littérature.

J'ai posé la question de savoir si les formules de modélisation utilisées sont adaptées aux objectifs et aux données d'entrée. Je peux dire que les nombreuses approches consacrées (Chap. 2.1.) sont bien adaptées depuis des années et avec une intense utilisation, à leurs objectifs : détecter des ruptures, sauts, et tendances. Par contre dans l'analyse des cycles, les approches « traditionnelles » comme la STFT n'arrivent pas à la puissance de modélisation de la méthode ondelette, que j'ai étendue et appliquée avec succès sur des chroniques diverses des températures et précipitations. Comme présenté et montré, je considère que la méthode ondelette est un outil assez puissant pour l'analyse du point de vue fréquentiel des séries climatiques. L'échantillonnage journalier permet l'analyse à l'échelle fine des séries. Cela est un prérequis pour une analyse fréquentielle puissante ; les données de moyenne mensuelle ou journalière ne suffisent pas pour identifier des cycles à un niveau significatif. Je peux affirmer, là, que les algorithmes qui font ma contribution personnelle, et leur implémentation informatique, permettent l'analyse quantitative des tendances et du spectre ondelette aux diverses bandes de fréquence. Je considère que l'algorithme étendu de décomposition ondelette peut être complémentaire des tests qui ignorent l'aspect fréquentiel des chroniques.

Du point de vue climatique, les résultats sont en concordance avec la littérature, c'est à dire la confirmation de la croissance des températures minimales et des indices associés en Europe entre 1945-2008, l'existence des croissances (pas aussi fortes) des indices liés aux températures maximales, et peu de tendances significatives dans les précipitations.

Bibliographie selective

- Aguilar, E. (2008). Homogenization of daily Spanish temperatures using SNHT and HOM methods. *Geophysical Research Abstracts, Vol. 11*.
- Alexandersson, H. (1986). A homogeneity test applied to precipitation data. *Journal of Climatology, 661–675.*, 661–675.
- Alexandersson, H. M. (1997). Homogenisation of Swedish temperature data. Part I: Homogeneity test for linear trends. *International Journal of Climatology, 17(1)*, 25–34.
- Auer, I., Böhm, R., Jurkovic, A., Orlik, A., Potzmann, R., Schöner. (2005). A new instrumental precipitation dataset for the greater alpine region for the period 1800–2002. *International Journal of Climatology, 25*, 139–166. doi: 10.1002/joc.1135.
- Boroneant, C., Tomozeiu, R. (2007). On the Homogenization of Long Series of Annual and Seasonal Temperature Means in Romania. *Proceedings of the Third Seminar for Homogenization of Surface Climatological Data*.
- Box, G. E. P.; Jenkins, G. M.; Reinsel, G. C. (1994). *Time Series Analysis, Forecasting and Control* (éd. 3rd). Prentice Hall: Englewood Cliffs.
- Briggs, W., Levine, R. (1997). Wavelets and field forecast verification. *Monthly Weather Review, 125*, 1329-1341.
- Brockwell, P. J., Davis, R. A. (1991). *Time Series: Theory and Methods* (éd. 2 ed.). Springer-Verlag.
- Brunetti, M., Buffoni, L., Maugeri, M., Nanni, T. (2000). Precipitation intensity trends in northern Italy. *International Journal of Climatology, 20(9)*, 1017–1031.
- Buishand, T. A. (1993). Rainfall depth-duration-frequency curves; a problem of dependent extremes. Dans V. Barnett, K. Turkman, J. Wiley, Sons, *Statistics for the Environment* (pp. 183-197). Chichester.
- Camuffo, D., Jones, P. (2002). Improved Understanding of Past Climatic Variability from Early Daily European Instrumental Sources. *Climatic Change, 53(1-3)*, 1-4.
- Carrega, P. (1994). Les tendances actuelles du climat de la Côte d'Azur (France). *Publications de l'Association Internationale de Climatologie, Aix-en-Provence, pp. 173-182.*, pp. 173-182.
- Carrega, P., Dubreuil, V., Richard, Y. (2004). Climatologie et développement durable. *Historiens et Géographes, n° 387*
- Caussinus, H., Lyazrhi, F. (1997). Choosing a Linear Model with a Random Number of Change-Points and Outliers. *Annals of the Institute of Statistical Mathematics, 49(4)*, 761-775.
- Caussinus, H., Mestre, O. (2004). Detection and correction of artificial shifts in climate series. *Journal of the Royal Statistical Society: Series C (Applied Statistics)*, 53(3), 405–425.
- Cheval, S., Szentimrey, T. (2007). Long-term temperature variability in Romania (1901-2005) based on homogenized data. Vienna, Austria.
- Crowley, T., Lowery, T. (2000). How Warm Was the Medieval Warm Period? *AMBIO: A Journal of the Human Environment, 29*, 51–54.

- de Castro, M., Martín-Vide, J., Alonso, S. (2005). *The Climate Of Spain: Past, Present And Scenarios For The 21St Century*. Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, Spain.
- Domonokos, P. (2008). Testing of homogenisation methods: reproduction of trend-slopes caused by climatic changes in linear regression. *Geophysical Research Abstracts*, 10.
- Ducré-Robitaille, J.-F., Vincent, L., G. . (2003). Comparison of techniques for detection of discontinuities in temperature series. *International Journal of Climatology*, 10.1002/joc.924, pp 1087–1101; DOI10.1002/joc.924.
- Easterling, D. R., Peterson, T. C. (1995). A new method for detecting undocumented discontinuities in climatological time series. *International Journal of Climatology*, 10.1002/joc.3370150403.
- Gambis, D. (1992). Wavelet transform analysis of the length of the day and the El-Nino Southern Oscillation variations at intraseasonal and interannual time scales. Dans *Annales Geophysicae* (Vol. 10, pp. 429-437).
- Gerstengarbe, F.-W., Werner, P. (1999). Estimation of the beginning and end of recurrent events within a climate regime. *Climate Research*, 11, 97–107.
- Gilks, W. R. (2005). Markov Chain Monte Carlo. Dans *, *Encyclopedia of Biostatistics*. John Wiley Sons, Ltd.
- Grinsted, A., Moore, J. C., Jevrejeva, S. (2004). Application of the cross wavelet transform and wavelet coherence to geophysical time series. *Nonlinear Processes in Geophysics*, 11(5/6), 561-566.
- Grossmann, A., Toresan, B., Holschneider, M., Flornes, K. (1994). Wavelets on discrete fields. *J. Appl. Harm. Anal.*, 1, 137-146.
- Haidu, I., Magyari-Saska, Z. (2009). Drought and extreme moisture evaluation and prediction with GIS software module. *Information Technology Interfaces*, 553-558.
- Haylock, M. R., Hofstra, N., Klein Tank, A., Klok, E. J., Jones, P. D., New, D. M. (2008). A European daily high-resolution gridded data set of surface temperature and precipitation for 1950–2006. *J. Geophys. Res.*, 113, D20119, doi:10.1029/2008JD010201.
- Ioana, R., Seaman, C., Lindvall, M. (2003). Process diversity. *Journal of Software Maintenance and Evolution: Research and Practice*, 15(1), 1-8.
- Jevrejeva, S., Moore, J. C., Grinsted, A. (2003). Influence of the arctic oscillation and El Nino-Southern Oscillation (ENSO) on ice conditions in the Baltic Sea: the wavelet approach. *Journal of Geophysical Research*, 108(D21)(4677).
- Kendall, M. G. (1973). *Time-series analysis*. London: Griffin.
- Kenney, J. F., Keeping, E. S. (1962). The k-Statistics. In V. Nostrand, *Mathematics of Statistics* (pg. 99-100). New Jersey: Princeton.
- Klein Tank, A. M., Können, G. P. (2003). Trends in Indices of Daily Temperature and Precipitation Extremes in Europe. *Journal of Climate*(16), 3665–3680.
- Klein Tank, A., Wijngaard, J., Können, G., Böhm. (2002). Daily dataset of 20th-century surface air temperature and precipitation series for the European Climate Assessment. *International Journal of Climatology*, 10.1002/joc., 1441–1453. doi: 10.1002/joc.773.
- Laplace, P. S. (1812). *Théorie analytique des probabilités*. Paris: Courcier Imprimeur.

- Lau, K., Weng, H. (1995). Climate signal detection using wavelet transform: How to make a time series sing. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 76(12), 2391-2402.
- Lucio, P. S., Conde, F. C., Ramos, A. M., al. (2006). A Bayesian Approach for Recovering and Homogenising Meteorological Time Series. *Proceedings of 8 ICSHMO Foz do Iguaçu Brazil April 24-28/2006*, pp. 29-36.
- Lund, R. R. (2002). Detection of undocumented changepoints: A revision of the twophase. *J. Climate*, 15, 2547-2554.
- Mann, M. E. (1996). Robust estimation of background noise and signal detection in climatic time series. *Climatic Change*, 33(3), 409-445.
- Mann, M., Jones, P. (2003). Global surface temperatures over the past two millennia. *Geophysical Research Letters*, 30(15).
- Maraun, D., Kurths, J. (2004). Cross wavelet analysis: significance testing and pitfalls. *Nonlinear Processes in Geophysics*, 11(4), 505-514.
- Mateescu, M. (2007). La methode ondelettes comme outil de test d'homogeneité. *Actes de XX Colloque de l'Association Internationale de Climatologie*, 369-374.
- Mateescu, M., Haidu, I. (2006). Comparaison entre la variabilité de la nao et du soi selon l'approche des ondelettes. (A. I. Climatologie, Éd.) *Les risques liés au temps et au climat, Actes du colloque d'Épernay*, 19, 421.
- Mestre, O., al. (2010). Homogeneisation De Series Climatiques. *Journées de Statistique*, 42.
- Mestre, O., Hallegatte, S., Patmore, N., Dumas, P., Corfee Morlot, J., Herweijer, C.. (2008). Assessing climate change impacts, sea level rise and storm surge risk in port cities: a case study on. *OECD Environment Working Paper*, 3.
- Metropolis, N., Rosenbluth, A. W., Rosenbluth, M. N., Teller, A. H., Teller, E. (1953). Equation of State Calculations by Fast Computing Machines. *The Journal of Chemical Physics*, 21(6), 1087-1092.
- Meyer, Y. (1992). *Ondelettes et algorithmes concurrents* (Vol. 1435). Paris: Hermann.
- Minobe, S. (1998). Bidecadal and Pentadecadal Climatic Oscillations over the. *Journal of the Faculty of Science, Hokkaido University*, 11(2), 393-409.
- Moberg, A., Sonechkin, D. M., Holmgren, K., Datsenko, N. M., Karlen, W. (2005). Highly variable Northern Hemisphere temperatures reconstructed. *Nature*, 433, 613-617.
- Moore, J. C., Jevrejeva, S., Grinsted, A. (2003). *Influence of the arctic oscillation and El Nino-Southern Oscillation (ENSO) on ice conditions in the Baltic Sea: The wavelet approach*. Japan: Sapporo.
- Morlet, J. (1983). *Sampling theory and wave propagation, Issues in Acoustics signals/Image* (éd. NATO ASI Series, Vol. 1). (Springer-Verlag, Éd.) C.H. Chen.
- Percival, D. B., Rothrock, D. A. (2005). "Eyeballing" Trends in Climate Time Series: A Cautionary Note. *Journal of Climate*, 18, 886-891.
- Percival, W. J., Sanchez, A. G., Baugh, C. M., Peacock, J. A., Padilla, N. D., Cole, S., et al. (2005). Cosmological parameters from cosmic microwave background measurements and the final 2dF galaxy redshift survey power spectrum. *Monthly notices of the Royal Astronomical Society*, 366(1), 189-207.
- Perreault, L. B. (2000). Bayesian change-point analysis in hydrometeorological time series. Part 1. The normal model revisited. *Journal of Hydrology*, 235, 221-241.

- Peterson. (2008). Improvements to NOAA's Historical Merged Land–Ocean Surface Temperature Analysis (1880–2006). *J. Climate*, 21, 2283–2296.
- Peterson, T. C., Easterling, D. R., Karl, T. R., Groisman, P., Nicholls, N., Plummer, N., et al. (1998). Homogeneity adjustments of in situ atmospheric climate data: a review. *International Journal of Climatology*, 13, 1493–1517. doi: 10.1002/(SICI)1097-0088(19981115).
- Pettitt, A. (1979, 0 0). A Non-Parametric Approach to the Change-Point Problem. *Applied Statistics*, 28, 126--135.
- Răducanu, M., Mateescu, M. L. (2002). ECG signals compression and analysis using wavelet analysis. *Telecomunicații Revue*, 2, 47-52.
- Rodionov, S. (2005). A Brief Overview of the regime shift detection methods. *Joint Institute for the Study of the Atmosphere and Ocean University of Washington.*, http://www.beringclimate.noaa.gov/regimes/rodionov_overview.pdf.
- Schöner, W., Auer, I., Böhm, R. (2000). Climate variability and. *Ann Glaciol*, 31, 31–38.
- Sneyers, R. (1975). Sur l'analyse statistique des series d'observations. *WMO Technical Note*, 194, p. 9–12.
- Szentimrey, T., Auer, I., Böhm, R., Jurkovic, A., Orlik, A., Potzmann, R., et al. (2005). A new instrumental precipitation dataset for the greater alpine region for the period 1800–2002. *International Journal of Climatology*, 25(2), 139–166.
- Tank, A. M., Können, G. P., Selten, F. M. (2004). Signals of Anthropogenic Influence on European Warming as seen in the Trend Patterns of Daily Temperature Variance. *International Journal of Climatology*, 25, 1-16.
- Tank, K., Wijngaard, J. B., Engeln, A. F. (2002). Daily dataset of 20th-century surface air temperature and precipitation series for the European Climate Assessment. *International Journal of Climatology*, 22(12), 1441–1453.
- Tomozeiu, R., Busuioc, A., Stefan, S. (2002). Changes in seasonal mean of maximum air temperature in Romania and their connection with large-scale circulation. *International Journal of Climatology*, 22, 1181–1196.
- Torrence, C., Compo, G. (1998). A Practical Guide to Wavelet Analysis. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 79(1), pp. 61-78.
- Vincent, C., Le Meur, E., Six, D., Funk, M. (2005). Solving the paradox of the end of the Little Ice Age in the Alps. *Geophys. Res. Lett.*, 32, doi:10.1029/2005GL022552.
- von Storch, H. (2006). *Statement to the U.S. House of Representatives Committee on Energy and Commerce, July 19, 2006 Hearing "Questions Surrounding the 'Hockey Stick' Temperature Studies: Implications for Climate Change Assessments.*
- Wijngaard, J. B., Klein Tank, A. M., Können, G. P. (2003). Homogeneity of 20th century European daily temperature and precipitation series. *International Journal of Climatology*, 23(6), 679–692.
- Wilks, D. (1999). Multisite downscaling of daily precipitation with a stochastic weather generator. *Climate Research*, 11, 125-136.
- Yue, S., Pilon, P., Cavadias, G. (2002, 3 1). Power of the Mann-Kendall and Spearman's rho tests for detecting monotonic trends in hydrological series. *Journal of Hydrology*, 259, 254--271.