

## COMPARAISON DES SÉCHERESSES ESTIVALES DE 1976 ET 2003 EN EUROPE OCCIDENTALE À L'AIDE D'INDICES CLIMATIQUES

Tommy KLEIN

### Résumé

Selon le dernier rapport du GIEC, de plus en plus de régions du monde sont touchées par des problèmes de sécheresse. Cette tendance pourrait se confirmer dans le futur, menaçant ainsi davantage la sécurité alimentaire.

L'objectif de cet article est d'analyser et de comparer de manière détaillée deux épisodes de sécheresse estivale qui ont particulièrement marqué les esprits en Europe Occidentale en raison de leur intensité : août 1976 et août 2003. La méthode de comparaison utilisée dans ce travail est basée sur l'utilisation d'indices climatiques de sécheresse. Ils font office d'outils quantitatifs pertinents afin de comparer ces deux événements extrêmes entre eux.

Les résultats obtenus nous indiquent que, contrairement à ce que l'on pourrait penser a priori, les deux vagues de sécheresse présentent d'importantes dissemblances. L'été 1976 fut caractérisé par une sécheresse météorologique intense à la suite d'un déficit important de précipitations. À l'inverse, l'été 2003 fut davantage chaud que sec, établissant de nouveaux records de température et menaçant la santé humaine.

### Mots-clés

climatologie, Europe, sécheresse, événements extrêmes, indices climatiques, *Standardized Precipitation Index*

### Abstract

*According to the last IPCC report, several regions of the world are increasingly affected by drought problems. It seems that this trend could be confirmed in the future, further threatening world food security.*

*The aim of this paper is to analyze and compare in details two summer drought waves which particularly left a deep impression in Western Europe because of their intensity: August 1976 and August 2003. The comparison method we applied is based on the use of drought indices. They are relevant quantitative tools in order to compare these two extreme events between them.*

*Results indicate that, contrary to what we might expect, there are important differences between summers 1976 and 2003. Indeed, 1976 was characterized by a severe meteorological drought resulting from a significant rainfall deficit. Conversely, summer 2003 was rather hot than dry, setting new temperature records and threatening human health.*

### Keywords

*climatology, Europe, drought, extreme events, climate indices, Standardized Precipitation Index*

## I. INTRODUCTION

À l'heure où les changements climatiques sont au cœur des préoccupations majeures, il subsiste de nombreuses inconnues quant à l'évolution future de certains processus. Néanmoins, le quatrième rapport du GIEC (2007), également appelé « AR4 » (*Fourth Assessment Report*), est très clair sur certains points, notamment en ce qui concerne les affirmations relatives au réchauffement climatique. D'ailleurs, ce dernier commence avec ces mots : « *Le réchauffement du système climatique est sans équivoque. On note déjà, à l'échelle du globe, une hausse des températures moyennes de l'atmosphère et de l'océan, une*

*fonte massive de la neige et de la glace et une élévation du niveau moyen de la mer.* »

En revanche, les affirmations concernant les événements extrêmes tels que les tempêtes ou les sécheresses sont nettement plus nuancées. Cela est principalement dû au manque de séries de données de qualité suffisamment longues en vue d'extraire d'éventuelles tendances, au caractère très rare et donc difficilement quantifiable de certains événements, et au manque d'observations liées aux phénomènes locaux tels que les tornades ou les tempêtes. Malgré cet obstacle relatif aux données, certaines tendances ont été décelées voire même confirmées, principalement en ce qui concerne les extrêmes de température et de

précipitations. Ainsi, il est très probable (probabilité de réalisation supérieure à 90%) que les journées froides, les nuits froides et le gel ont été moins fréquents pour la plus grande partie des régions du monde ces 50 dernières années et que le nombre de journées chaudes et de nuits chaudes a, au contraire, augmenté (GIEC, 2007). Il est également probable (>66%) que la sécheresse ait progressé à l'échelle du globe depuis les années 1970, malgré que la fréquence des épisodes de fortes précipitations ait augmenté dans la plupart des régions (GIEC, 2007).

Il est fort probable que ces tendances observées se confirment dans le futur, et même que bon nombre de ces changements climatiques s'amplifient dans les années à venir. Ce travail est consacré à l'analyse de deux épisodes climatiques extrêmes et marquants en Europe, à savoir les sécheresses estivales de 1976 et 2003. *A priori*, ces deux vagues de sécheresse présentent de nombreuses similitudes. Elles ont toutes deux atteint leur paroxysme durant le mois d'août et ont provoqué d'importants dégâts, tant au niveau des cultures que sur la santé humaine. Il est primordial, afin de pouvoir comparer ces deux années entre elles, d'avoir à disposition des outils quantitatifs efficaces. C'est la raison pour laquelle l'utilisation d'indices climatiques est spécialement pertinente. Au-delà de l'aspect quantitatif, les indices climatiques améliorent la connaissance des mécanismes régissant divers processus car ils ont l'avantage de synthétiser l'information, en isolant le phénomène étudié. En outre, cela permet également aux décideurs et au grand public d'avoir une idée claire sur le sujet.

Toutefois, au préalable, il convient de définir quelque peu ce que l'on entend par sécheresse et indice climatique afin de faciliter la compréhension de nos analyses.

## II. DÉFINITIONS

### A. Sécheresse

Il n'existe toujours pas à l'heure actuelle de définition précise et reconnue par tous concernant la sécheresse. Toutefois, la communauté scientifique, et notamment l'*American Meteorological Society*, s'accorde sur le fait qu'une sécheresse est caractérisée par une absence prolongée ou un déficit marqué en eau par rapport à la normale (Boken, 2005 ; Heim, 2002 ; Palmer, 1965). Dans la littérature, la distinction est souvent faite selon le point de vue envisagé. Si seul le déficit de précipitations est considéré, on parle de sécheresse météorologique (Boken, 2005 ; Keyantash & Dracup, 2002). Il serait plus rigoureux de qualifier ce type de sécheresse de *climatique* puisque résultant de la persistance de conditions météorologiques sèches, à l'échelle du mois ou de l'année. Cependant, cette dénomination étant peu répandue dans la littérature, seul le terme *sécheresse météorologique* est utilisé dans la suite de nos analyses. Si une attention particulière est portée à l'eau disponible dans le sol pour les végétaux, on parle de sécheresse agricole (Boken, 2005 ; Keyantash & Dracup, 2002). Tandis que lorsque l'accent est mis sur le déficit du stock en eau de surface ou de subsurface (cours d'eau,

réservoirs, nappes, *etc.*), on parle de sécheresse hydrologique (Boken, 2005 ; Keyantash & Dracup, 2002). Dans la suite de ce travail, nous nous sommes limités à l'analyse de la sécheresse météorologique, moins complexe et plus proche des préoccupations du géographe - climatologue. Pour des raisons de simplification terminologique, le mot *sécheresse* est parfois utilisé sans qualificatif mais il est sous-entendu que c'est bien de la sécheresse météorologique qu'il est question.

## B. Indice climatique

### 1. Généralités

À l'origine, un indice climatique est une combinaison d'au moins deux variables décrivant l'état de l'atmosphère pour caractériser le climat d'un lieu (Beltrando, 1995). Les variables les plus utilisées sont les précipitations, la température, la pression atmosphérique et l'évapotranspiration. Progressivement, les indices ont incorporé des informations de plus en plus nombreuses et complexes, résultant de traitements antérieurs et provenant même parfois de disciplines connexes. Aujourd'hui, les indices climatiques sont utilisés dans de multiples domaines différents, dont la sécheresse.

### 2. Domaines d'application

On peut distinguer trois types d'indices principaux : (a) les indices d'aridité qui sont les plus anciens et dont la finalité est de classer les différents climats du monde selon des classes d'aridité, (b) les indices agroclimatiques qui mesurent le potentiel climatique d'un lieu donné afin de maximiser les rendements agricoles, et (c) tous les autres indices que l'on pourrait qualifier de *thématiques*. Cette troisième catégorie englobe les indices les plus récents, notamment les indices de changements climatiques, de sécheresse et autres événements extrêmes, et enfin les indices mesurant les impacts du climat sur l'homme.

## III. HYPOTHÈSES ET ENVIRONNEMENT DE TRAVAIL

### A. Source des données

Les données météorologiques utilisées dans ce travail sont celles collectées, puis contrôlées par le *European Climate Assessment and Dataset*, souvent abrégé *ECA&D* (Klein Tank *et al.*, 2002 ; Wijngaard *et al.*, 2003). L'objectif de l'*ECA&D* est d'analyser les températures et les précipitations de la région VI de l'Organisation Météorologique Mondiale (Europe), avec un accent particulier sur les tendances des extrêmes du climat observées (Klein Tank & KNMI, 2008). À cet effet, une importante base de données a été compilée puis testée en matière d'homogénéité. À ce jour, déjà plus de 40 pays participent à ce projet, ce qui représente pas moins de 1 000 stations. Les données de ces stations sont disponibles gratuitement en ligne sur le site de

l'*ECA&D* (<http://eca.knmi.nl/dailydata/index.php>) géré en collaboration avec l'Institut Royal Météorologique Néerlandais (*KNMI*). Ces données consistent en des observations quotidiennes pour un certain nombre de variables, qui sont : (a) la couverture neigeuse moyenne, (b) le total des précipitations, (c) l'éclairement solaire moyen, (d) la pression atmosphérique moyenne, (e) l'humidité relative moyenne, (f) la couverture nuageuse moyenne, (g) la température maximale, (h) la température minimale et (i) la température moyenne.

### B. Stations météorologiques sélectionnées

Afin de comparer les mois d'août 1976 et 2003, quelques 165 stations réparties en Europe ont été sélectionnées selon trois critères : (a) disponibilité des données de précipitations, (b) moins de 10 % de données manquantes sur toute la série et (c) pas de données manquantes pour les années 1976 et 2003.

L'*ECA&D* ne disposant pas de séries actualisées pour l'ensemble des stations, nous avons donc dû effectuer un choix afin de délimiter une période commune à toutes les stations en vue de réaliser une calibration cohérente des indices utilisés. La période sélectionnée est celle maximisant le nombre de stations retenues, à savoir 1964-2004. Toutes les stations sélectionnées sont localisées à la figure 1. On peut remarquer que la densité de stations n'est pas homogène, soit parce que certains pays n'adhèrent pas au programme de l'*ECA&D* ou proposent moins de stations, soit parce que les données sont de mauvaise qualité. Il est évident que cette faible représentativité spatiale influence les résultats obtenus notamment en matière d'interpolation spatiale (discuté ultérieurement).

## IV. INDICES DE SÉCHERESSE

Il existe une grande variété d'indices climatiques dont la finalité est de quantifier la sécheresse météorologique. C'est d'ailleurs sans doute un des thèmes les plus abordés par les indices. La plupart des indices de sécheresse, sinon l'entièreté, ont été élaborés par et pour les États-Unis, mais sont régulièrement employés sur les autres continents. Heim (2002) a répertorié tous les indices développés au cours du XX<sup>e</sup> siècle aux États-Unis. On remarque une évolution assez évidente de leur complexité, allant du simple cumul des jours sans pluie (*Munger's Index*) jusqu'à l'utilisation d'images satellite afin de lier végétation et sécheresse. Toutefois, deux indices se démarquent nettement des autres : le *Palmer Drought Severity Index (PDSI)* et le *Standardized Precipitation Index (SPI)*.

### A. PDSI et SPI : avantages et inconvénients

#### 1. PDSI

Le *PDSI* est un indice de sécheresse météorologique mécaniste élaboré par Wayne Palmer dès 1965 qui est basé sur la construction d'un bilan hydrologique de mois en mois (Palmer, 1965). C'est sans doute l'indice toujours le plus utilisé à l'heure actuelle.

Le *PDSI* étant basé sur un bilan hydrique réalisé à partir des précipitations, des températures (permettant d'obtenir l'évapotranspiration potentielle à l'aide de la formule de Thornthwaite) et de la réserve utile en eau du sol, il est possible de connaître les valeurs de toutes les variables intervenant dans ce bilan hydrique, à savoir principalement le ruissellement, le taux de recharge, et l'évapotranspiration

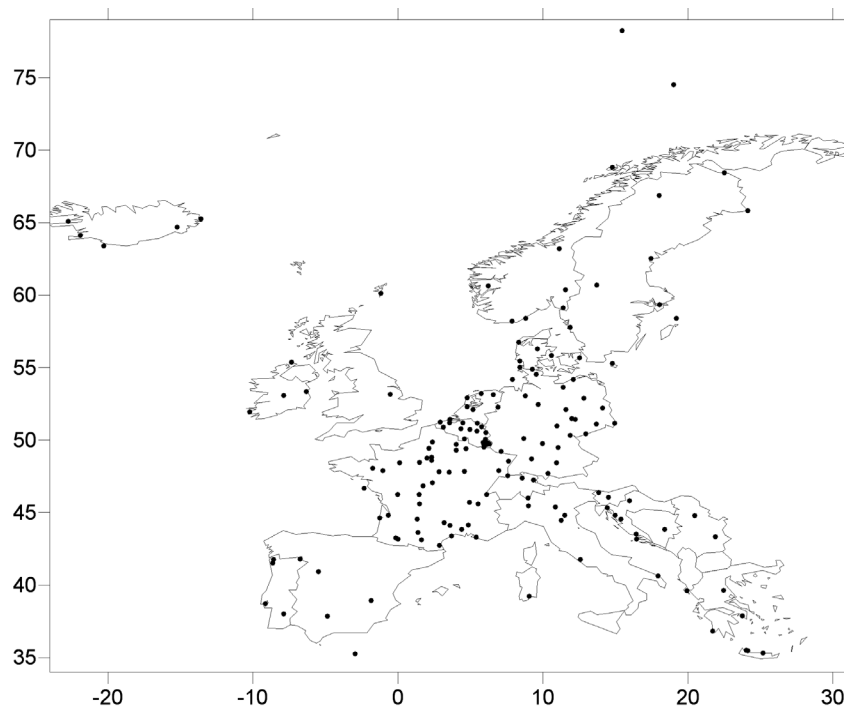


Figure 1. Stations sélectionnées au sein de l'ensemble des stations mises à disposition par l'*ECA&D*

réelle. Cela constitue un avantage certain pour des applications hydrologiques. Enfin, on peut également déterminer la probabilité qu'un événement en cours s'estompe ou perdure, information très utile pour effectuer du suivi en temps réel.

En ce qui concerne les inconvénients, ils sont assez nombreux. Tout d'abord, sa définition repose sur de très nombreuses hypothèses ou approximations (Alley, 1984), ce qui pose problème au niveau de la fiabilité des résultats obtenus. Par exemple, l'utilisation de la formule de Thornthwaite afin d'évaluer l'évapotranspiration potentielle introduit un biais, puisqu'il est bien connu que l'évapotranspiration ne dépend pas uniquement de la température (influence de l'éclairement solaire, du vent, *etc.*). Ensuite, l'algorithme est lourd à mettre en œuvre et nécessite de connaître la capacité au champ du lieu, ce qui est loin d'être une donnée toujours disponible. Le *PDSI* est également difficilement comparable dans l'espace en raison de sa définition purement empirique, reposant uniquement sur un très petit échantillon de stations situées dans seulement deux états des États-Unis (le Kansas et l'Iowa). Or, il est évident qu'un déficit hydrique de  $x$  mm par rapport à la normale climatique n'est pas comparable selon que l'on se trouve, par exemple, dans une région aride ou sous nos latitudes. Il est primordial qu'un indice de sécheresse efficace puisse traduire cet effet. Notons que Wells et ses collaborateurs (2004) sont parvenus récemment à améliorer la capacité du *PDSI* à être comparé spatialement en modifiant légèrement l'algorithme développé par Palmer. Un autre point faible, et non des moindres, est l'échelle temporelle intrinsèque non modifiable du *PDSI*. Nous avons déterminé que cette échelle temporelle est de l'ordre de l'année, ce qui est en accord avec les résultats obtenus par Guttman (1998). Cela pose la question de la pertinence de l'utilisation du *PDSI* comme indice de sécheresse météorologique vu le peu de sensibilité de son signal. Enfin, il est requis afin de calibrer l'indice correctement, de disposer d'une série temporelle suffisamment longue, au moins 50 ans selon Karl (1986). Notons qu'un indice de sécheresse efficace doit être indépendant de sa période de calibration, imposant ainsi que la sévérité de la sécheresse qu'il mesure soit un processus stationnaire, c'est-à-dire que ses propriétés statistiques (principalement la moyenne et la variance) soient indépendantes dans le temps. Cela semble être le cas en Europe, du moins en ce qui concerne la moyenne, puisque un certain nombre d'études indiquent que la sécheresse est un phénomène stochastique présentant une importante variabilité (non cyclique), et qu'il n'existe aucune tendance significative vers une augmentation ou diminution des conditions d'humidité ces 50 dernières années (Bordi & Sutera, 2004, Lloyd-Hughes & Saunders, 2002 ; Van Der Schrier *et al.*, 2005).

## 2. *SPI*

Le *SPI*, quant à lui, est un indice statistique de type probabiliste. Il a été mis au point par l'université du Colorado au début des années 90 (McKee, 1993).

Hayes et ses collaborateurs (1999) ont répertorié un certain nombre d'avantages en faveur de l'utilisation *SPI*, qui sont :

- sa grande simplicité. En effet, il n'est basé que sur les précipitations, les calculs sont rapides et intuitifs ;
- le *SPI* est versatile : on peut aisément adapter l'échelle temporelle en fonction du type d'évaluation ;
- les résultats sont cohérents dans l'espace en raison des caractéristiques de la loi normale sur laquelle il est basé. Ainsi, une sécheresse extrême à la même probabilité d'occurrence sous nos latitudes que dans les régions arides ou semi-arides ;
- il est efficace tant l'hiver que l'été, et n'est pas affecté par l'effet de la topographie puisqu'il ne prend pas en compte l'eau dans le sol.

Le *SPI* possède également quelques inconvénients. Le choix de la distribution utilisée pour modéliser les données est fondamental. À cet effet, la distribution gamma est globalement acceptée car elle s'ajuste généralement bien aux données de précipitations. Cela n'est cependant pas toujours le cas au niveau des régions arides et semi-arides (Ntale & Gan, 2003). Un autre point délicat concerne la calibration. En effet, il faut disposer d'une série suffisamment longue et de qualité pour réaliser l'ajustement de la distribution et calibrer ainsi le *SPI*. McKee et ses collaborateurs (1993), tout comme Guttman (1999), recommandent de disposer d'au moins 30 ans de données de qualité.

Malgré que le *PDSI* ait été utilisé dans de nombreuses applications et soit toujours utilisé actuellement sans doute par « tradition », nous avons décidé de concentrer nos efforts uniquement sur l'application du *SPI*. En effet, ce dernier présente de très nombreux avantages par rapport à son concurrent, principalement une bien meilleure flexibilité, des calculs sensiblement plus simples, et des résultats aisément comparables dans l'espace et dans le temps. De surcroît, il est plus transparent et conserve mieux la dimensionnalité des données (Keyantash & Dracup, 2002). D'ailleurs, selon Keyantash et Dracup (2002), le *SPI* est actuellement l'outil le plus efficace pour l'analyse de la sécheresse météorologique.

## B. Description détaillée du *SPI*

L'objectif de McKee et de ses collaborateurs fut de mettre au point un indice de sécheresse météorologique uniquement basé sur les précipitations, qui ait une signification statistique. Ainsi, ils ont eu l'idée d'appliquer une standardisation aux précipitations moyennées sur une échelle temporelle définie par l'utilisateur. Très souvent, la standardisation consiste à soustraire la moyenne aux données et à diviser le résultat par l'écart-type de la série. Cependant, cette méthode simple s'applique mal aux précipitations qui ne suivent pas ou très rarement une distribution normale. Il s'agit donc d'utiliser une conversion appropriée. Le *SPI* correspond à la transformation de la série temporelle des précipitations en une distribution normale standardisée de moyenne nulle et d'écart-type unitaire, également appelée *z-distribution*, distribution normale ou distribution gaussienne.

Le *SPI* est obtenu en ajustant une densité de probabilité appropriée à la distribution de fréquences des précipitations moyennées sur une échelle temporelle définie. Traditionnellement, les échelles temporelles les plus souvent utilisées sont 3, 6, 9, 12 et 24 mois en fonction du type de sécheresse étudié. L'ajustement se fait séparément pour les 12 mois de l'année afin de conserver la saisonnalité. Ensuite, chaque densité de probabilité cumulée est transformée en une distribution normale standardisée en appliquant la loi normale inverse de moyenne nulle et d'écart-type unitaire. En d'autres mots, le *SPI* pour un total de précipitations de  $x$  mm est le quantile gaussien ( $Q_\sigma$ ) de la valeur de la fonction de répartition de la loi statistique ( $F$ ) s'ajustant aux données, prise en  $x$  [équation (1)].

$$SPI(x) = Q_\sigma[F(x)] \quad (1)$$

Enfin, chaque valeur du *SPI* est reliée à un degré de sévérité repris dans le tableau 1, dans lequel figurent également les probabilités d'occurrence.

### C. Choix de la distribution statistique

Le calcul du *SPI* peut être réalisé au départ de n'importe quelle distribution statistique, pour autant qu'elle s'ajuste bien aux données. C'est Guttman (1999) qui a, pour la première fois, comparé les performances d'un grand nombre de distributions, et en est venu à la conclusion que la fonction de Pearson III suivie de la gamma à deux paramètres sont, globalement, les meilleures distributions pour modéliser les précipitations. Guttman a également transcrit pour la première fois le calcul du *SPI* en Fortran 77, généralisant ainsi l'utilisation du *SPI* dans le monde. Cependant, nous n'avons pas utilisé cette version du calculateur qui emploie la Pearson III, mais une version améliorée mise au point par l'université du Colorado qui utilise la distribution gamma. Le code source est gratuitement mis à disposition en ligne (<http://climate.atmos.colostate.edu/standardizedprecipitation.shtml>). Notons que la distribution gamma est souvent préférée car elle est plus simple et mène à des résultats quasiment identiques.

La densité de probabilité de la distribution gamma s'écrit, pour  $x > 0$  :

$$g(x) = \frac{1}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} x^{\alpha-1} e^{-x/\beta} \quad (2)$$

où  $\alpha$  est le paramètre de forme,  $\beta$  est le paramètre d'échelle, et  $x$  est la quantité de précipitations.  $\Gamma(\alpha)$  est la fonction gamma, qui se définit comme

$$\Gamma(\alpha) = \int_0^\infty x^{\alpha-1} e^{-x} dx \quad (3)$$

L'ajustement de la distribution gamma aux données requiert donc de déterminer  $\alpha$  et  $\beta$ . Ils peuvent être estimés de la sorte (Thom, 1958) :

$$\hat{\alpha} = \frac{1}{4A} \left( 1 + \sqrt{1 + \frac{4A}{3}} \right) \quad (4)$$

$$\hat{\beta} = \frac{\bar{x}}{\hat{\alpha}} \quad (5)$$

où, pour  $n$  observations :

$$A = \ln(\bar{x}) - \frac{\sum \ln(x)}{n} \quad (6)$$

En intégrant la fonction densité de probabilité sur  $x$ , en injectant les valeurs de  $\alpha$  et  $\beta$  estimées respectivement dans les équations (4) et (5), on obtient une expression de la probabilité cumulée  $G(x)$  qui détermine la probabilité d'observer telle quantité de précipitations ou une quantité inférieure pour un mois et une échelle temporelle donnés :

$$G(x) = \frac{1}{\hat{\beta}^{\hat{\alpha}} \Gamma(\hat{\alpha})} \int_0^x x^{\hat{\alpha}-1} e^{-x/\hat{\beta}} dx \quad (7)$$

Tableau 1. *SPI* et classes de sévérité associées

<i>SPI</i>	Classe	Probabilité (%)
$SPI \geq +2,00$	Extrêmement humide	2,3
$+1,99 \geq SPI \geq +1,50$	Sévèrement humide	4,4
$+1,49 \geq SPI \geq +1,00$	Modérément humide	9,2
$+0,99 \geq SPI \geq 0$	Légèrement humide	34,1
$0 > SPI \geq -0,99$	Sécheresse légère	34,1
$-1,00 \geq SPI \geq -1,49$	Sécheresse modérée	9,2
$-1,50 \geq SPI \geq -1,99$	Sécheresse sévère	4,4
$SPI \leq -2,00$	Sécheresse extrême	2,3

(Source : d'après Lloyd-Hughes et Saunders 2002, p. 1574)

La distribution gamma n'étant pas définie pour  $x = 0$ , et le cas où le total des précipitations est nul sur l'échelle temporelle définie pouvant se produire, la probabilité cumulée devient :

$$H(x) = q + (1 - q)G(x) \quad (8)$$

où  $q = P(x = 0) > 0$  est la probabilité d'obtenir des précipitations nulles.

$H(x)$  est ensuite transformée en une distribution normale standardisée qui correspond à la valeur du *SPI*. Cette transformation est illustrée à la figure 2. Cette conversion peut être approximée en utilisant la formule suivante élaborée par Abramowitz (1965) :

$$\begin{cases} Z = SPI = - \left( t - \frac{c_0 + c_1 t + c_2 t^2}{1 + d_1 t + d_2 t^2 + d_3 t^3} \right) & \text{pour } 0 < H(x) \leq 0,5 \\ Z = SPI = + \left( t - \frac{c_0 + c_1 t + c_2 t^2}{1 + d_1 t + d_2 t^2 + d_3 t^3} \right) & \text{pour } 0,5 < H(x) < 1 \end{cases} \quad (9)$$

où

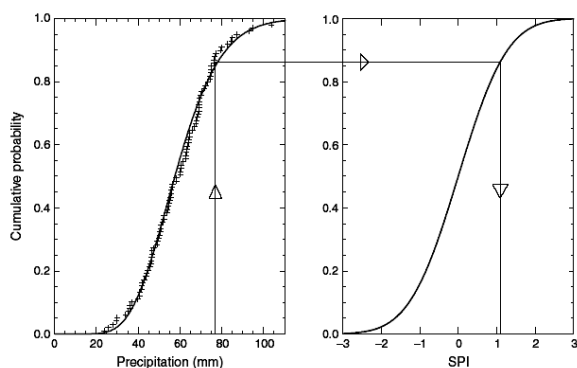
$$\begin{cases} t = \sqrt{\ln [1/(H(x))^2]} & \text{pour } 0 < H(x) \leq 0,5 \\ t = \sqrt{\ln [1/(1 - H(x))^2]} & \text{pour } 0,5 < H(x) < 1 \end{cases} \quad (10)$$

et

$$\begin{aligned} c_0 &= 2,515517 & c_1 &= 0,802853 & c_2 &= 0,010328 \\ d_1 &= 1,432788 & d_2 &= 0,189269 & d_3 &= 0,001308 \end{aligned} \quad (11)$$

#### D. Choix de l'échelle temporelle

Un des grands avantages du *SPI* déjà mentionné, est la possibilité d'adapter l'échelle temporelle en fonction du type de sécheresse qui est analysé. Pratiquement, il s'agit de faire la moyenne des précipitations mensuelles à partir de la valeur du mois en cours et des  $x$  mois le précédant, le choix de l'échelle temporelle consistant donc à choisir cette valeur de  $x$ .



**Figure 2.** Exemple de transformation d'une fonction de répartition de la loi gamma en une distribution normale standardisée

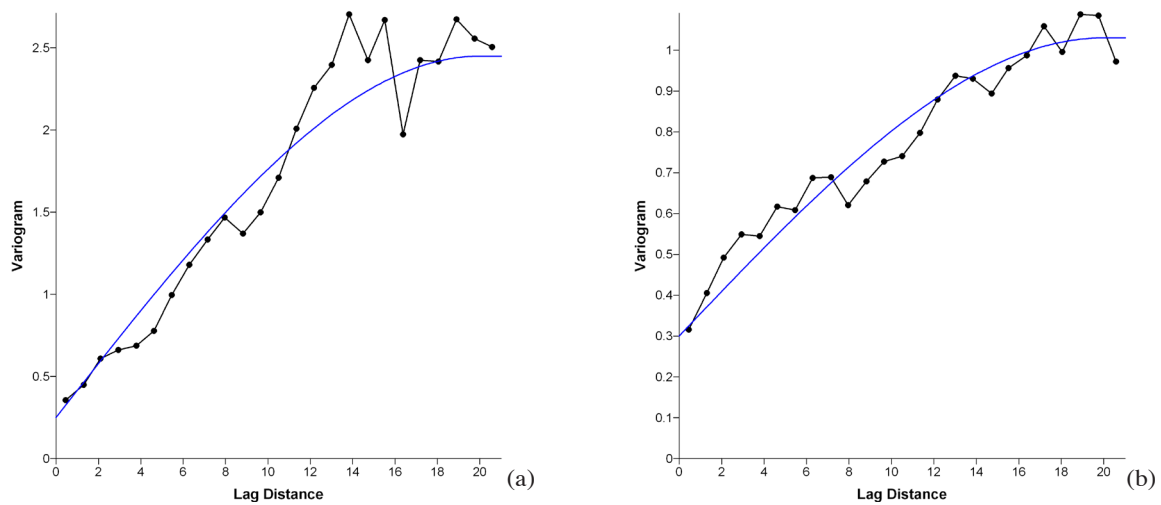
Le choix de l'échelle temporelle est directement en relation avec le type d'application que l'on souhaite réaliser. Par exemple, il apparaît évident que l'on choisira volontiers des échelles temporelles courtes afin de décrire la sécheresse agricole, alors que les échelles de temps plus longues sont préférées dans le cadre d'applications liées à l'hydrologie. Lloyd-Hughes et Saunders (2002) ont ainsi rassemblé les résultats de plusieurs études et ont conclu que le *SPI* peut être utilisé de manière efficace pour la plupart des types de sécheresse. La sécheresse affectant le ruissellement est décrite optimalement en utilisant des échelles temporelles de 2 à 6 mois, tandis que pour l'eau souterraine, de bonnes relations ont été décelées à des échelles de 5 à 24 mois. On trouve même, dans la littérature, des applications du *SPI* dans l'analyse de crues comme en témoigne l'étude menée par Seiler et ses collaborateurs (2002). La sécheresse agricole (intimement liée à l'eau dans le sol), quant à elle, est la mieux décrite à des échelles temporelles de 2-3 mois. Cependant, les performances du *SPI* pour le suivi de la sécheresse agricole sont assez limitées (Quiring & Papakryiakou, 2003 ; Rodriguez *et al.*, 2005), sans doute parce qu'il ne prend pas en compte d'autres facteurs importants, comme le rôle joué par l'évapotranspiration par exemple qui dépend fortement de la température.

Puisque le type de sécheresse que nous souhaitons étudier dans le cadre de ce travail est typiquement météorologique, nous avons décidé de choisir une échelle temporelle relativement courte qui conserve certaines fluctuations rapides, mais qui soit suffisamment longue pour conserver une certaine dépendance dans le temps des valeurs du *SPI*. Nous avons ainsi opté pour une échelle temporelle de 3 mois.

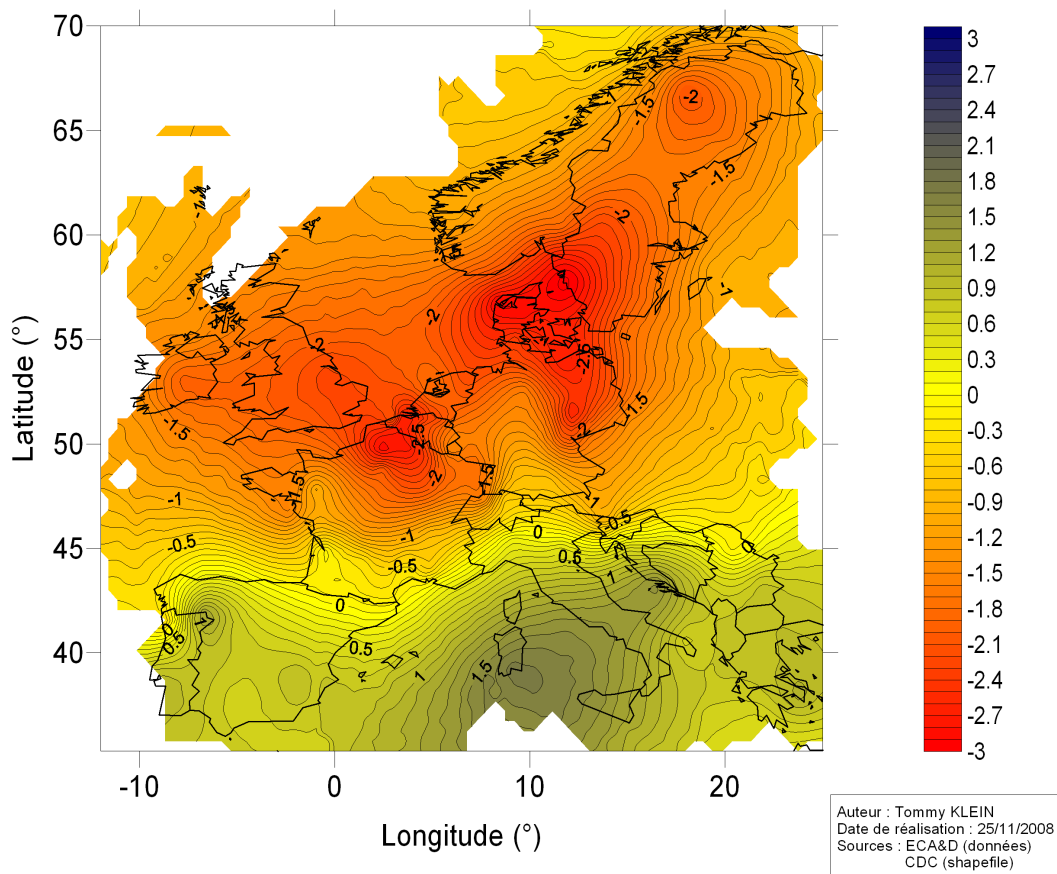
#### V. RÉSULTATS

Cette section contient les résultats de nos analyses. Le *SPI* a été calculé pour les 165 stations sélectionnées dans toute l'Europe puis interpolé par la méthode du krigeage. Deux cartes ont ainsi été produites, respectivement les figures 4 et 6, qui correspondent donc à la représentation spatiale de la sévérité de la sécheresse lors des mois d'août 1976 et 2003. L'interpolation dépend principalement du variogramme (figure 3) lorsque la *lag distance* est relativement petite. Ainsi, les stations situées au Luxembourg, en Belgique et aux Pays-Bas sont de grande importance car elles sont très nombreuses et relativement proches les unes des autres (figure 1).

En analysant la figure 4 (août 1976), il apparaît d'importants contrastes entre l'Europe du Nord et l'Europe du Sud. En effet, à partir du centre de la France jusqu'au nord de la Scandinavie, en passant par l'Allemagne, la Belgique, les Pays-Bas et le Royaume-Uni, on peut véritablement parler de sécheresse sévère ( $SPI < -1,5$ ), voire même extrême ( $SPI < -2$ ) pour certains endroits. On remarque la présence de deux *pôles* avec des valeurs



**Figure 3.** Variogrammes utilisés par le krigeage en vue produire (a) la carte du *SPI* en août 1976 et (b) la carte du *SPI* en août 2003. Les courbes avec marques correspondent aux variogrammes expérimentaux, tandis que les courbes en trait continu correspondent aux modèles théoriques (sphériques avec effet pépite).



**Figure 4.** *Standardized Precipitation Index* en Europe lors du mois d'août 1976 avec une échelle temporelle de 3 mois. Les valeurs négatives sont synonymes de sécheresse, tandis que les valeurs positives sont synonymes d'excès hydrique par rapport aux conditions normales.

inférieures à -2,5, le premier au niveau du Danemark et le second au niveau de la côte belge et du Pas-de-Calais. Des valeurs si basses ont des occurrences très faibles (inférieures à 2 %), et la sécheresse de 1976 constitue sans aucun doute l'événement de sécheresse météorologique le plus extrême qui ait touché notre pays

ces 50 dernières années. Il est également intéressant de remarquer que cette sécheresse ne concerne absolument pas les pays situés au sud, certains d'entre eux comme l'Italie ou la Grèce subissant même des conditions plus humides que la normale. Une autre remarque concerne les gradients élevés observés à certains endroits, comme

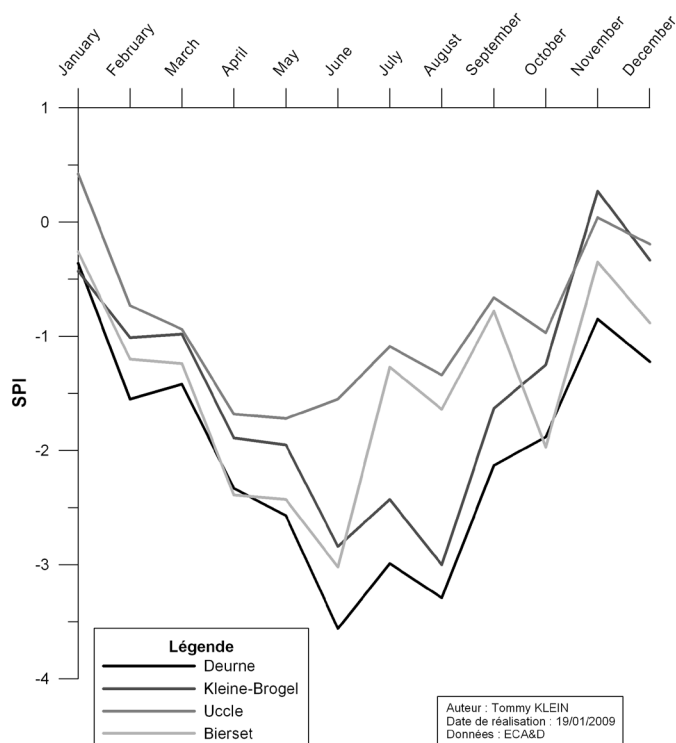


Figure 5. Comparaison des valeurs du *SPI* pour quatre stations belges lors de l'année 1976

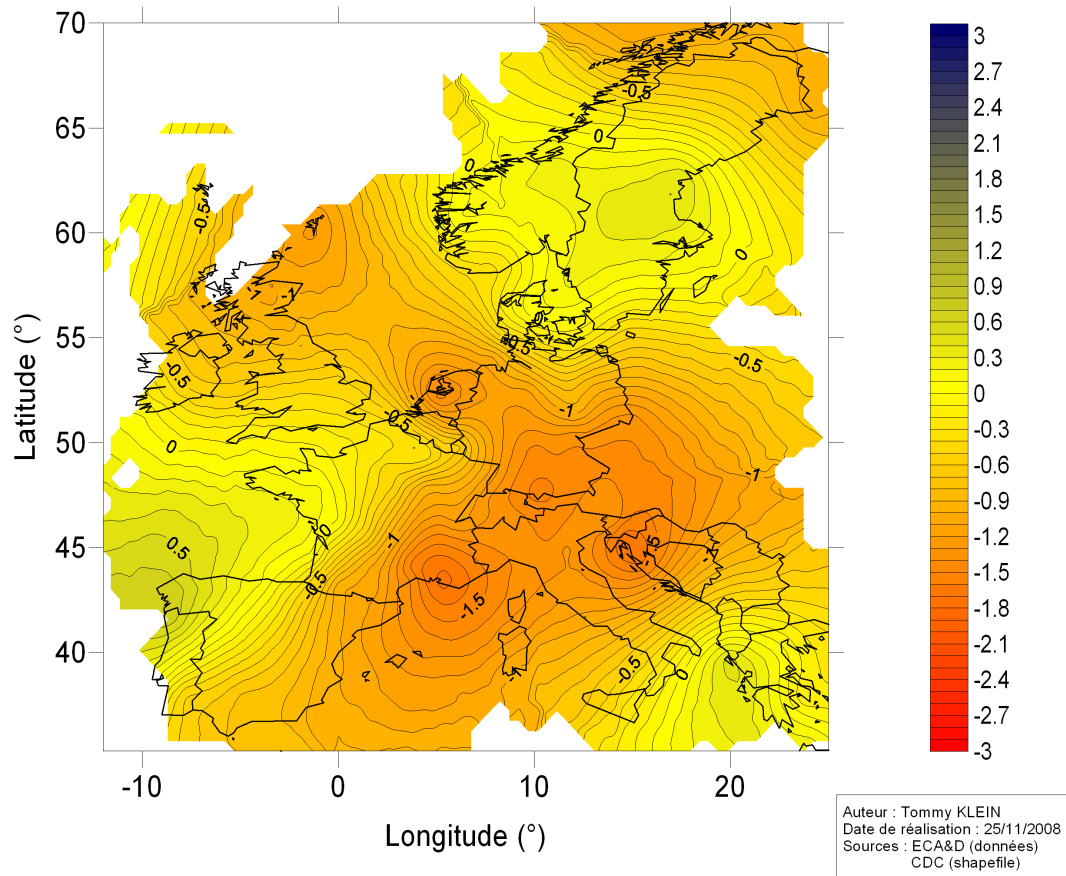


Figure 6. *Standardized Precipitation Index* en Europe lors du mois d'août 2003 avec une échelle temporelle de 3 mois. Les valeurs négatives sont synonymes de sécheresse, tandis que les valeurs positives sont synonymes d'excès hydrique par rapport aux conditions normales.



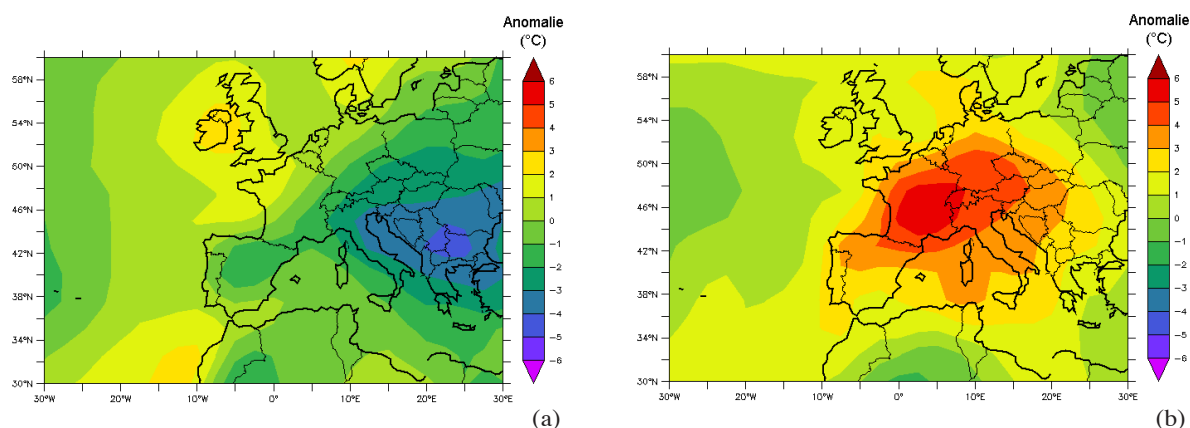
c'est le cas par exemple au niveau du territoire belge. Cela témoigne du caractère local de la sécheresse en 1976, puisque le *SPI* peut varier fortement sur quelques centaines de kilomètres. Ce caractère local est confirmé par la figure 5 qui représente l'évolution du *SPI* calculé mois par mois à Deurne, Kleine-Brogel, Uccle et Bier-set. Il apparaît que la station ayant enregistré les valeurs les plus élevées du *SPI* est Deurne, avec une sécheresse continue de janvier à décembre et des pics jusqu'à  $\sim -3,5$  de juin à août (valeur minimale théorique du *SPI*). À l'inverse, la sécheresse a été beaucoup plus modérée à Uccle, le *SPI* n'étant que très rarement inférieur à  $-1,5$  tout au long de l'année. Cela est également confirmé par le variogramme (figure 3a). En effet, il augmente très rapidement, ce qui témoigne d'une faible autocorrélation spatiale. Ainsi, deux stations proches dans l'espace peuvent avoir des valeurs sensiblement différentes et indépendantes les unes des autres.

En analysant la carte de 2003 (figure 6), il apparaît au premier coup d'œil que les contrastes sont nettement moindres qu'en 1976. En effet, la quasi totalité de l'Europe occidentale subit des conditions modérément sèches à normales (teintes jaunes sur la carte), malgré quelques zones légèrement plus touchées comme la région de Marseille, le nord de la Croatie, les Pays-Bas, ou encore la région de Konstanz en Allemagne. Le variogramme (figure 3b) est en accord avec cette

observation comme en témoignent ses valeurs faibles par rapport à 1976 et sont augmentées nettement plus légèrement avec la distance.

On peut donc déduire que le mois d'août 1976 en Europe fut extrêmement sec tandis que le mois d'août 2003 fut nettement plus modéré en ce qui concerne la sécheresse météorologique. Bien entendu, comme nous l'avons déjà mentionné, le *SPI* n'est basé que sur les précipitations et est en quelque sorte une bonne mesure de l'écart des précipitations observées par rapport à la normale. Donc, dans le cas présent, les fortes températures enregistrées en 2003 n'ont absolument aucun impact sur les deux cartes analysées. En revanche, il est certain que les températures exceptionnelles d'août 2003 ont eu d'importantes conséquences en matière de sécheresse agricole qui dépend, quant à elle, de la quantité d'eau évapotranspirée par les cultures.

À présent, si on se penche, non plus sur les anomalies de précipitations, mais bien sur les anomalies de température, le mois d'août 2003 se démarque très nettement de 1976 (figure 7). En effet, pour 2003, les anomalies sont positives sur toute l'Europe avec des écarts à la moyenne sur le long terme (1948-2007) s'élevant même jusque  $\sim 6$  °C autour du centre de la France, zone la plus touchée par la vague de chaleur. À l'opposé, août 1976 ne présente quasiment aucune anomalie, et ce sur l'ensemble de l'Europe.



**Figure 7.** Anomalies de température (a) du mois d'août 1976 et (b) du mois d'août 2003

Les valeurs d'anomalies correspondent à des écarts à la moyenne calculée sur la période 1948-2007. Ces cartes ont été réalisées à l'aide du logiciel Ferret, à partir de réanalyses NCAR/NCEP1 de la *NOAA/CIRES Climate Diagnostics Center, Boulder, CO*, depuis leur site Internet (<http://www.cdc.noaa.gov>).

Nous pouvons conclure que les années 1976 et 2003, bien que souvent qualifiées toutes deux d'années de sécheresse, présentent d'importantes différences. La première est une année réellement sèche d'un point de vue météorologique, et il est donc tout à fait justifié de parler de « la fameuse sécheresse de 1976 », du moins en Belgique et au Danemark. À l'inverse, août 2003 ne fut pas particulièrement sec à l'exception de quelques régions. Par contre, en ce qui concerne les températures extrêmes, 2003 fut totalement exceptionnelle. Il est alors préférable de parler de « la canicule de 2003 »

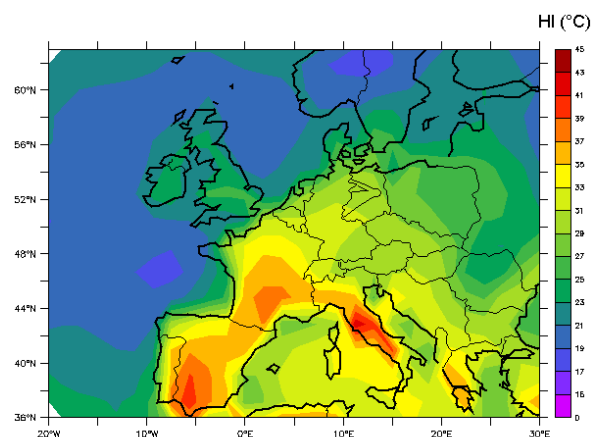
plutôt que de sécheresse. Ce statut d'année caniculaire est confirmé lorsqu'on analyse les valeurs de l'indice de canicule (*Heat Index, HI*) qui traduit l'effet cumulé de la température et de l'humidité relative sur la santé humaine. En effet, de fortes températures sont d'autant moins supportables que l'humidité est élevée. Les calculs du *HI* sont basés sur les travaux de Steadman (1979), et améliorés par la *NOAA*. Le tableau 2 reprend les valeurs de température perçue en fonction de la température (°C) et de l'humidité relative (%), ainsi que les avertissements associés.

**Tableau 2.** Indice de canicule (*Heat Index, HI*) et avertissements associés

T (°C)	Humidité relative (%)												
	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100
43	58												
42	54	58											
41	51	54	58										
40	48	51	55	58									
39	46	48	51	54	58								
38	43	46	48	51	54	58							
37	41	43	45	47	51	53	57						
36	38	40	42	44	47	49	52	56					
34	36	38	39	41	43	46	48	51	54	57			
33	34	36	37	38	41	42	44	47	49	52	55		
32	33	34	35	36	38	39	41	43	45	47	50	53	56
31	31	32	33	34	35	37	38	39	41	43	45	47	49
30	29	31	31	32	33	34	35	36	38	39	41	42	44
29	28	29	29	30	31	32	32	33	34	36	37	38	39
28	27	28	28	29	29	29	30	31	32	32	33	34	35
27	27	27	27	27	28	28	28	29	29	29	30	30	31
HI	Avertissements												
>54	Extrême danger, grands risques d'hyperthermie												
41-54	Insolations, crampes et épuisements très probables												
32-41	Insolations, crampes et épuisements possibles												
27-32	Éventuels coups de fatigue en cas d'exposition prolongée												

(Source : d'après la NOAA/NWS, url :  
[http://www.crh.noaa.gov/jkl/?n=heat\\_index\\_calculator](http://www.crh.noaa.gov/jkl/?n=heat_index_calculator))

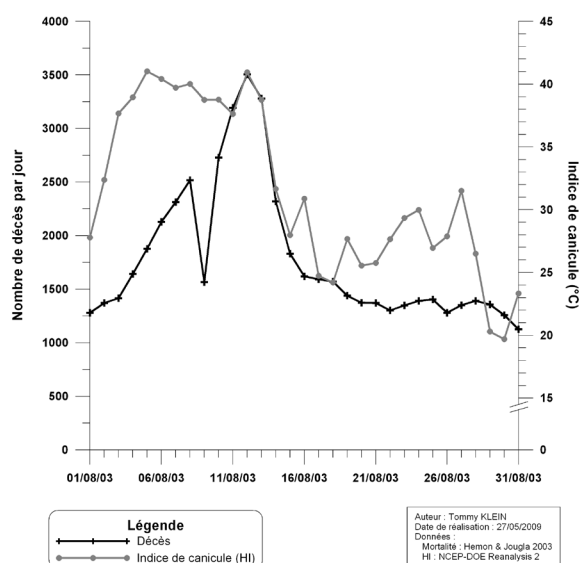
Nous avons utilisé ici la température maximale afin de déterminer le *pic* de canicule. La figure 8 montre la répartition de cet indice de canicule en Europe moyenné du 1<sup>er</sup> au 20 août 2003, correspondant au paroxysme de la vague de chaleur. Pour rappel, il commence à y avoir danger sur la santé humaine pour les personnes à risque à partir d'une valeur du *HI* de 30 °C. Il apparaît que les zones les plus touchées sont le sud de la France, l'Espagne et l'Italie. Il est intéressant de mettre l'indice de canicule en relation



**Figure 8.** Répartition du *HI* moyenné du 1<sup>er</sup> au 20 août 2003 en Europe occidentale

La carte a été réalisée à l'aide du logiciel Ferret, à partir de réanalyses NCEP-DOE2 provenant de la NOAA/CIRES Climate Diagnostics Center, Boulder, CO, depuis leur site Internet (<http://www.cdc.noaa.gov>).

avec le nombre de décès enregistrés en août 2003 afin d'illustrer les risques induits par des vagues de chaleur sur la santé humaine. En France, le nombre de décès en août 2003 était supérieur de 36,93 % à la valeur enregistrée sur la période de référence 1998-2002 (Commission Européenne, *s.d.*). Les autres pays fortement touchés par la canicule ont également atteint des maxima historiques. Ainsi, l'Espagne a comptabilisé une augmentation du nombre de décès de 22,85 % par rapport à 1998-2002, le Portugal 27,75 %, et l'Italie 21,81 % (Commission Européenne, *s.d.*). Cependant, notons que le nombre de décès en excédent n'est pas forcément corrélé avec la localisation du *HI*, ce qui met en évidence une dimension sociale et de vulnérabilité au niveau des décès recensés. La figure 9 décrit l'évolution du nombre de décès de jour en jour en France, en parallèle avec l'indice de canicule moyenné sur une fenêtre centrée sur la France (44° N à 50° N - 1,5° O à 6° E). Il apparaît que le *HI* augmente rapidement début août et dépasse même les 40 °C. Le nombre de décès augmente avec un léger décalage dans le temps. À la mi-août, on atteint le maximum, avec plus de 3 500 décès le 12 août en France, alors que l'indice de canicule reste constamment élevé. Ensuite, le *HI* diminue rapidement et la mortalité atteint sa valeur normale pour la saison de ~1350 décès par jour (Hemon & Jouglu, 2003). Notons que le nombre de décès chute instantanément de manière inexplicable le 9 août avant d'augmenter à nouveau presque linéairement dès le 10 août. Cela est très vraisemblablement dû à une erreur au niveau des données.



**Figure 9.** Évolution du nombre de décès en France, parallèlement à l'indice de canicule moyenné sur une fenêtre centrée sur la France (44° N à 50° N - 1,5° O à 6° E)

## VI. CONCLUSION

La sécheresse est un événement climatique extrême qui peut avoir de lourdes conséquences économiques et sociales, principalement sur l'agriculture et la santé. Selon le dernier rapport d'évaluation du GIEC, il semblerait que de plus en plus de régions du monde soient touchées par des problèmes de sécheresse depuis les années 70. En Europe, deux années ont particulièrement marqué les esprits en raison du manque prolongé de précipitations durant l'été : 1976 et 2003. Cependant, il existe des différences majeures entre ces deux vagues de sécheresse qui ont pu être identifiées à l'aide d'un indice climatique, le *Standardized Precipitation Index (SPI)*. Le *SPI* possède de nombreux avantages et constitue actuellement l'indice de sécheresse météorologique le plus performant.

Lors du mois d'août 1976, on observe d'énormes contrastes entre le nord et le sud de l'Europe. Le sud subit des conditions plus humides que la normale, tandis qu'à partir du nord de la France jusqu'au nord de la Scandinavie, on peut véritablement parler de sécheresse météorologique extrême. Cet événement constitue d'ailleurs un record en Belgique, les précipitations ayant été extrêmement faibles durant de nombreux mois. En revanche, le mois d'août 2003 semble moins contrasté, l'entièreté de la région d'Europe étudiée subissant des sécheresses faibles à modérées. En revanche, si on se base sur les anomalies de température, l'été 2003 est particulièrement exceptionnel. En effet, la température moyenne du mois d'août 2003 fut nettement supérieure à la moyenne du mois d'août sur le long terme, principalement dans le centre de la France. D'ailleurs, l'indice de canicule moyenné du 1<sup>er</sup> au 20 août indique que les conditions de chaleur furent extrêmement dangereuses

dans cette même région pour les personnes les plus vulnérables, tout comme en Espagne et en Italie. Ces valeurs élevées de l'indice de canicule furent accompagnées d'un nombre de décès par jour largement supérieur à la moyenne normalement observée en France pour la saison. À ce stade, on peut donc dire que 1976 fut une année de sécheresse véritable, tandis que 2003 fut une année caniculaire avec de lourdes conséquences sur la santé humaine.

## Remerciements

Cet article est extrait de notre mémoire en climatologie réalisé dans le cadre du Master en Sciences géographiques – orientation climatologie et présenté à l'Université de Liège en juin 2009, intitulé : « Utilisation d'indices climatiques en vue d'analyser l'évolution des événements extrêmes de température et de précipitations en Belgique de 1958 à 2007 ».

Nous tenons à remercier le promoteur de cette recherche, le Professeur Michel Ericum pour ses conseils.

## BIBLIOGRAPHIE

- ABRAMOWITZ M. & STEGUN A. 1965. *Handbook of mathematical formulas, graphs, and mathematical tables*, New-York : Dover, 1046 p.
- ALLE W.M. 1984. The Palmer Drought Severity Index : limitations and assumptions, *Journal of Climate and applied Meteorology*, 23 (7), pp. 1100–1109.
- BELTRANDO G. & CHEMERY L. 1995. *Dictionnaire du climat*, Collection Références Larousse, Paris, 344 p.
- BOKEN V.K. 2005. Agricultural drought and its monitoring and prediction : some concepts. Boken, V.K., Cracknell A.P. & Heathcote R.L. (éditeurs) : *Monitoring and Predicting Agricultural Drought : A Global Study*, Oxford-New-York : Oxford University Press, pp. 3-10.
- BORDI I. & SUTERA A. 2004. Drought variability and its climatic implications, *Global and Planetary Change*, 40 (1), pp. 115–127.
- GIEC 2007. *Climate Change 2007 : The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Solomon S., Qin D., Manning M. et al., (éditeurs), Cambridge-New-York : Cambridge University Press, 940 p.
- GUTTMAN N.B. 1998. Comparing the Palmer Drought Index and the Standardized Precipitation Index, *Journal of the American Water Resources Association*, 34 (1), pp. 113–121.
- GUTTMAN N.B. 1999. Accepting the Standardized Precipitation Index : a calculation algorithm, *Journal of the American Water Resources Association*, 35 (2), pp. 311–322.

- HAYES M.J., SVOBODA M.D., WILHITE D.A. & VANYARKHO O.V. 1999. Monitoring the 1996 drought using the Standardized Precipitation Index, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 25 (1), pp. 3367–3370.
- HEIM R.R. 2002. A review of twentieth-century drought indices used in the United States, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 83 (8), pp. 1149–1165.
- HEMON D. & JOUGLA E. 2003. *Surmortalité liée à la canicule d'août 2003, Rapport d'étape. Estimation de la surmortalité et principales caractéristiques épidémiologiques*, Inserm, 76 p.
- KARL T.R. 1986. The sensitivity of the Palmer Drought Severity Index and Palmer's Z-Index to their calibration coefficients including evapotranspiration, *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 25 (1), pp. 77–86.
- KARL T.R., KNIGHT R.W., EASTERLING D.R. *et al.* 1996. Indices of climate change for the United States, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 77 (2), pp. 279–292.
- KEYANTASH J. & DRACUP J.A. 2002. The quantification of drought: an evaluation of drought indices, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 83 (8), pp. 1167–1180.
- KLEIN TANK, A.M.G. & KNMI. 2008. EUMETNET/ECSN optional programme : 'European Climate Assessment & Dataset (ECA&D)'. Algorithm Theoretical Basis Document (ATBD), Project number EPJ029135, Version 5, 38 p.
- KLEIN TANK, A.M.G., WIJNGAARD J.B., KÖNNEN G.P. *et al.* 2002. Daily dataset of 20<sup>th</sup> century surface air temperature and precipitation series for the European Climate Assessment, *International Journal of Climatology*, 22 (12), pp.1441–1453.
- LLOYD-HUGHES B. & SAUNDERS M.A. 2002. A drought climatology for Europe, *International Journal of Climatology*, 22 (13), pp. 1571–1592.
- MCKEE T.B., DOESKEN N.J. & KLEIST J. 1993. The relationship of drought frequency and duration to time scales, *Proceedings of the 8<sup>th</sup> Conference on Applied Climatology, 17-22 January 1993, Anaheim, California*, pp.179–184.
- NTALE H.K. & GAN T.W. 2003. Drought indices and their application to East Africa, *International Journal of Climatology*, 23 (11), pp. 1335–1357.
- PALMER W.C. 1965. Meteorological drought. U.S. weather bureau research paper 45, Washington DC, 58 p.
- QUIRING S.M. & PAKAKRYIAKOU T.N. 2003. An evaluation of agricultural drought indices for the Canadian prairies, *Agricultural and Forest Meteorology*, 118 (1), pp. 49–62.
- RODRIGUEZ-PINEDA J.A., GIDDINGS L., GADSHEN H. *et al.* 2005. Agricultural drought in north-central Mexico. Boken V.K., Cracknell A.P. & Heathcote R.L., (éditeurs): *Monitoring and Predicting Agricultural Drought : A Global Study*, Oxford-New-York : Oxford University Press, pp. 132-143.
- SEILER R.A., HAYES M. & BRESSAN L. 2002. Using the Standardized Precipitation Index for flood risk monitoring, *International Journal of Climatology*, 22 (11), pp. 1365–1376.
- STEADMAN R.G. 1979. The assessment of sultriness. part I : a temperature-humidity index based on human physiology and clothing science, *Journal of Applied Meteorology*, 18 (7), pp. 861–873.
- THOM H.C.S. 1958. A note on the gamma distribution, *Monthly Weather Review*, 86 (4), pp. 117–122.
- VAN DER SCHRIER G., BRIFFA K.R., JONES P.D. *et al.* 2005. Summer moisture variability across Europe, *Journal of Climate*, 19 (12), pp. 2335–2351.
- WELLS N., GODDARD S. & HAYES M.J. 2004. A Self-Calibrating Palmer Drought Severity Index, *Journal of Climate*, 17 (12), pp. 2818–2834.
- WIJNGAARD J.B., KLEIN TANK A.M.G. & KÖNNEN G.P. 2003. Homogeneity of 20th century European daily temperature and precipitation series, *International Journal of Climatology*, 23 (6), pp. 679–692.

#### Sites Internet

- NOAAOAA/Nws. 2006. Heat Index. Site du NWS sous la tutelle de la NOAA, ([http://www.crh.noaa.gov/jkl/?n=heat\\_index\\_calculator](http://www.crh.noaa.gov/jkl/?n=heat_index_calculator)), consultation le 27 décembre 2008.
- COMMISSION EUROPÉENNE. s.d. The 2003 European heat wave. Site Internet de la Commission Européenne, section Santé Publique (<http://ec.europa.eu/health>), consultation le 20 mai 2009.

Coordonnées de l'auteur :

Tommy KLEIN  
 Agroscope Reckenholz-Tänikon ART  
 Research Station ART Air Pollution and Climate Group  
 Reckenholzstrasse, 191  
 8046 Zurich  
 Switzerland  
 Tommy.Klein@alumni.ulg.ac.be