

## Détermination d'un indice de sécheresse atmosphérique des forêts en Belgique

**Auteur :** Baudewyn, Miriam

**Promoteur(s) :** Doutreloup, Sébastien; 20760

**Faculté :** Faculté des Sciences

**Diplôme :** Master en sciences géographiques, orientation global change, à finalité approfondie

**Année académique :** 2022-2023

**URI/URL :** <http://hdl.handle.net/2268.2/20828>

---

### *Avertissement à l'attention des usagers :*

*Tous les documents placés en accès ouvert sur le site le site MatheO sont protégés par le droit d'auteur. Conformément aux principes énoncés par la "Budapest Open Access Initiative"(BOAI, 2002), l'utilisateur du site peut lire, télécharger, copier, transmettre, imprimer, chercher ou faire un lien vers le texte intégral de ces documents, les disséquer pour les indexer, s'en servir de données pour un logiciel, ou s'en servir à toute autre fin légale (ou prévue par la réglementation relative au droit d'auteur). Toute utilisation du document à des fins commerciales est strictement interdite.*

*Par ailleurs, l'utilisateur s'engage à respecter les droits moraux de l'auteur, principalement le droit à l'intégrité de l'oeuvre et le droit de paternité et ce dans toute utilisation que l'utilisateur entreprend. Ainsi, à titre d'exemple, lorsqu'il reproduira un document par extrait ou dans son intégralité, l'utilisateur citera de manière complète les sources telles que mentionnées ci-dessus. Toute utilisation non explicitement autorisée ci-avant (telle que par exemple, la modification du document ou son résumé) nécessite l'autorisation préalable et expresse des auteurs ou de leurs ayants droit.*

---



Faculté des sciences  
Département de géographie

# Détermination d'un indice de sécheresse atmosphérique des forêts en Belgique

Mémoire présenté par : **Miriam BAUDEWYN**

pour l'obtention du titre de

**Master en sciences géographiques,  
orientation Global Change, à finalité approfondie climatologie**

Année académique :

**2022-2023**

Date de défense :

**Juin 2023**

Président de jury :

**Pr Xavier FETTWEIS**

Promoteur :

**Dr Sébastien DOUTRELOUP**

Co-promoteur :

**Dr. Audrey BOLOGNA**

Lecteurs :

**Pr Geoffrey HOUBRECHTS**

**Dr Nicolas GHILAIN**



## REMERCIEMENTS

Ce mémoire marque la fin de mes études à l'Université de Liège. Ce deuxième master m'a permis de me plonger dans le monde de la climatologie et de la recherche et il m'a également permis de progresser rapidement en français, aussi bien à l'écrit qu'à l'oral.

Tout d'abord, je tiens à remercier Sébastien Doutreloup et Audrey Bologna d'avoir proposé ce mémoire sur les sécheresses, un sujet très intéressant et plus que jamais d'actualité. Merci de m'avoir accompagnée tout au long de l'année.

Je tiens aussi à remercier Quentin, Laurine et tante Cécile pour leur révision de la grammaire et de l'orthographe française et pour leurs conseils. Un grand merci également à mes colocataires pour les nombreux moments agréables et leurs encouragements.

Enfin, je veux remercier mes parents et mon frère car ils sont toujours là pour moi et m'encouragent à faire les bons choix. *Bedankt, papa en mama, voor al jullie steun en voor de kans die jullie mij gegeven hebben om nog twee jaar verder te studeren, een beetje verder van huis, aan de Universiteit van Luik.* C'est en partie grâce à vous, qu'après ces sept années d'études, un nouveau chapitre s'ouvre maintenant pour moi en tant que doctorante en climatologie à l'Université de Liège.

## RÉSUMÉ

Au cours des dernières décennies, le changement climatique est devenu un défi mondial urgent. L'augmentation de la fréquence et de l'intensité des phénomènes météorologiques extrêmes, tels que les sécheresses atmosphériques, a un impact majeur sur les écosystèmes. Il est donc particulièrement important de choisir un indice approprié pour la surveillance des sécheresses. En Belgique, les phénomènes de sécheresse sont suivis de près dans le domaine de l'agriculture, tandis que peu d'informations sont disponibles pour les écosystèmes forestiers. L'analyse de plusieurs indicateurs de sécheresse atmosphérique – leurs points forts et faibles, leur intérêt dans des zones forestières et leur applicabilité en Wallonie – est développée dans le cadre de ce travail.

De l'analyse de la corrélation entre les différents indices calculés et des valeurs de teneur en eau du sol est ressorti que l'indice précipitations – évapotranspiration normalisé (SPEI) calculé à une échelle de 3 mois est le mieux adapté pour déterminer les sécheresses en forêt en Wallonie. Cet indice – nommé SPEI-3 – utilise des données d'évapotranspiration potentielle en plus des données de précipitations ce qui permet d'analyser les conséquences du réchauffement climatique sur la fréquence et intensité des sécheresses atmosphériques.

Mots clés : sécheresses atmosphériques, indices de sécheresse, forêts, Belgique, MAR

## **ABSTRACT**

Over the last few decades, climate change has become an urgent global challenge. The increase both in frequency and intensity of extreme meteorological events, such as atmospheric droughts, is having a major impact on ecosystems around the world. It is therefore particularly important to choose an appropriate index for drought monitoring. In Belgium, drought events are closely monitored in the agricultural sector, while little information is available concerning forest ecosystems. The analysis of several atmospheric drought indicators - their strengths and weaknesses, their relevance in forest areas and their applicability in Wallonia - is developed in this study.

Analysis of the correlation between the different calculated indices and the soil water content values revealed that the calculated normalised precipitation-evapotranspiration index (SPEI) on a 3-month scale is the most suitable for determining forest droughts in Wallonia. This index - named SPEI-3 - uses potential evapotranspiration data in addition to precipitation data, which allows for an analysis of the consequences of global warming on the frequency and intensity of atmospheric droughts.

Keywords : atmospheric droughts, drought indices, forests, Belgium, MAR

## TABLE DES MATIÈRES

<b>1. INTRODUCTION .....</b>	<b>11</b>
<b>2. ÉTAT DE L'ART .....</b>	<b>13</b>
<b>2.1 La sécheresse atmosphérique.....</b>	<b>13</b>
<b>2.2 Indices de sécheresse atmosphérique .....</b>	<b>15</b>
2.2.1 PNI – <i>Percent of Normal Index</i> .....	15
2.2.2 SPI – <i>Standardized Precipitation Index</i> .....	16
2.2.3 SPEI – <i>Standardized Precipitation Evapotranspiration Index</i> .....	17
2.2.4 PDSI – <i>Palmer Drought Severity Index</i> .....	18
2.2.5 Estimation de l'évapotranspiration potentielle .....	18
2.2.6 Caractéristiques des sécheresses .....	19
<b>2.3 Réseaux de données pluviométriques sur le territoire wallon .....</b>	<b>21</b>
2.3.1 IRM – Institut Royal Météorologique .....	21
2.3.2 Le réseau Agromet (CRA-W).....	22
2.3.3 Le réseau ICOS.....	22
<b>2.4 Recherches précédentes en Wallonie / Belgique / Europe .....</b>	<b>22</b>
2.4.1 Études des sécheresses atmosphériques .....	23
2.4.2 Études de l'impact des sécheresses en forêt en Belgique .....	25
<b>3. MÉTHODOLOGIE ET DONNÉES.....</b>	<b>27</b>
<b>3.1 Le modèle MAR.....</b>	<b>27</b>
<b>3.2 Calcul des indices de sécheresse .....</b>	<b>28</b>
3.2.1 L'indice PNI .....	28
3.2.2 L'indice SPI .....	28
3.2.3 L'indice SPEI .....	29
<b>3.3 Sélection du meilleur indice pour étudier les sécheresses en forêt en Wallonie .....</b>	<b>32</b>
<b>4. RÉSULTATS .....</b>	<b>35</b>
<b>4.1 Validation des données MAR.....</b>	<b>35</b>
<b>4.2 Calcul de l'évapotranspiration potentielle .....</b>	<b>36</b>
<b>4.3 Sélection du meilleur indice pour étudier les sécheresses en forêt en Wallonie .....</b>	<b>37</b>

<b>4.4</b>	<b>Analyse de l'indice choisi .....</b>	<b>39</b>
4.4.1	L'évaluation des sécheresses extrêmes .....	39
4.4.2	La saisonnalité des sécheresses forestières.....	41
4.4.3	Impact de la température sur les valeurs de l'indice de sécheresse.....	43
<b>5.</b>	<b>DISCUSSION.....</b>	<b>45</b>
5.1	La pertinence de l'indice retenu .....	45
5.2	Réflexions et perspectives.....	46
5.3	Que se passera-t-il dans le futur ? .....	47
<b>6.</b>	<b>CONCLUSION.....</b>	<b>49</b>
<b>7.</b>	<b>RÉFÉRENCES .....</b>	<b>51</b>
7.1	Articles scientifiques.....	51
7.2	Ressources Internet .....	55
<b>8.</b>	<b>ANNEXES .....</b>	<b>57</b>



## LISTE DES FIGURES

<b>Figure 1</b> : Les différents types de sécheresse atmosphérique (Cook, 2019 ; modifiée) .....	<b>14</b>
<b>Figure 2</b> : Exemple d'une série temporelle de l'indice SPI (Cunha <i>et al.</i> , 2019 ; modifiée)..	<b>16</b>
<b>Figure 3</b> : Définition de quelques caractéristiques locales des évènements de sécheresse (Soubeyroux <i>et al.</i> , 2011 ; modifiée).....	<b>20</b>
<b>Figure 4</b> : Carte de risque pour les évènements de sécheresse avec une période de retour de 20 ans (Zamani <i>et al.</i> , 2016).....	<b>23</b>
<b>Figure 5</b> : Évolution temporelle des sécheresses SPI-3 au cours du XXI <sup>e</sup> siècle selon les saisons à partir des projections Arpège V4.6 scénario A2 (Soubeyroux <i>et al.</i> , 2011).....	<b>25</b>
<b>Figure 6</b> : (A) Différentes versions de la distribution Gamma et (B) la distribution normale ( <a href="https://saylordotorg.github.io">https://saylordotorg.github.io</a> ; <a href="https://en.wikipedia.org">https://en.wikipedia.org</a> ) .....	<b>29</b>
<b>Figure 7</b> : Comparaison des précipitations mensuelles simulées par MAR-ERA5 avec les données d'observation de l'IRM.....	<b>35</b>
<b>Figure 8</b> : Comparaison des températures moyennes mensuelles simulées par MAR-ERA5 avec les données d'observation de l'IRM.....	<b>36</b>
<b>Figure 9</b> : Les résultats de la formule de Thornthwaite pour le calcul de l'évapotranspiration potentielle en fonction de la température moyenne mensuelle et de la saison pour le pixel (38,40).....	<b>37</b>
<b>Figure 10</b> : Série temporelle (1950 – 2022) de l'indice SPEI-3 simulé par MAR-ERA5, valeurs moyennes sur toute la Belgique .....	<b>40</b>
<b>Figure 11</b> : Magnitude (gauche) et intensité (droite) de la sécheresse de 2022, simulées par MAR-ERA5 .....	<b>41</b>
<b>Figure 12</b> : Evolution du SPEI-3 (Distribution Gamma) simulé par MAR-ERA5, moyenné sur toute la Belgique – pour chaque saison .....	<b>42</b>
<b>Figure 13</b> : Evolution des valeurs SPEI-3 simulées par MAR-ERA5 par rapport aux valeurs SPI-3 simulées par MAR-ERA5, en fonction de la saison, moyenné sur 30 ans et sur toute la Belgique .....	<b>43</b>

## LISTE DES TABLEAUX

<b>Tableau 1</b> : Terme correctif mensuel $F(\varphi)$ selon la latitude, utilisé pour les estimations de l'évapotranspiration potentielle avec la formule de Thornthwaite (Lebourgeois & Piedallu, 2005).....	<b>31</b>
<b>Tableau 2</b> : Corrélations entre les différentes versions des indices PNI, SPI et SPEI (simulés par MAR-ERA5) et les observations de teneur en eau du sol (SWC) à différentes profondeurs dans une forêt mature à Vielsalm .....	<b>38</b>
<b>Tableau 3</b> : Caractéristiques des sécheresses les plus extrêmes en Belgique depuis l'année 1950 simulées par MAR-ERA5.....	<b>40</b>

## ACRONYMES

MAR : Modèle Atmosphérique Régional

RCM : *Regional Climate Model*

GCM : *General Circulation Model*

ERA5 : *Fifth Generation of the European Reanalysis*

IRM : Institut Royal Météorologique

OMM : Organisation Météorologique Mondiale

CRA-W : Centre Wallon de Recherches Agronomiques

ECA&D : *European Climate Assessment and Dataset*

ICOS : *Integrated Carbon Observation System*

PNI : *Percent of Normal Index*

SPI : *Standardized Precipitation Index*

SPEI : *Standardized Precipitation Evaporation Index*

PDSI : *Palmer Drought Severity Index*

ETP : Évapotranspiration potentielle

AWC : *Available Water Content*

RMSE : *Root Mean Square Error*

## 1. INTRODUCTION

Le changement climatique mondial, qui est à la fois le plus gros problème et le défi le plus complexe auquel les êtres humains sont confrontés, attire l'attention du public et des gouvernements du monde entier. La fréquence et l'intensité des événements climatiques extrêmes, comme les sécheresses, ont augmenté de manière significative depuis les années 1970 (Cook, 2019). Les événements extrêmes sont d'ailleurs considérés comme la principale source d'instabilité des écosystèmes terrestres et ont un impact important sur les écosystèmes et l'économie humaine (Liu *et al.*, 2016).

Depuis plusieurs années maintenant, le territoire wallon connaît des épisodes de sécheresse importants aussi bien au printemps qu'en été et cette tendance devrait se maintenir ou s'amplifier à cause du changement climatique (<https://www.wallonie.be>, consulté le 10 décembre 2022). Ces épisodes récurrents impactent notre environnement et l'agriculture est une filière durement touchée par ces sécheresses. Les agriculteurs qui ont subi des dommages sur leurs parcelles à la suite d'un événement climatique extrême tel qu'une sécheresse peuvent bénéficier d'une compensation financière pour la perte de leur production. Des conditions sont nécessaires à l'obtention de cette aide financière: l'évènement doit être officiellement reconnu comme une 'calamité agricole' dont la procédure est régie par le Décret wallon du 23 mars 2017 qui a introduit un paragraphe relatif aux aides destinées à remédier aux dommages causés par des calamités agricoles dans le Code Wallon de l'Agriculture (<https://www.agriculture.wallonie.be>, consulté le 26 mai 2023). Les phénomènes de sécheresse sont ainsi suivis de près dans le domaine de l'agriculture, tandis que peu d'informations sont disponibles pour les écosystèmes forestiers. Or, les forêts souffrent aussi de ce phénomène : pour preuve, une chute de feuilles précoce a été observée fin de l'été 2022 chez certaines espèces (bouleau, aubépine, ...) suite à la double sécheresse subie durant le printemps et l'été 2022 (<http://owsf.environnement.wallonie.be>, consulté le 12 décembre 2022). Les sécheresses impactent négativement la croissance des arbres, en la ralentissant voire en l'arrêtant (Latte, 2017), ainsi que leur physiologie en augmentant le risque d'embolie gazeuse (Cochard *et al.*, 2016). Si le stress engendré à court terme par une sécheresse est bien visible, les effets à plus long terme d'une augmentation de la fréquence de ces événements climatiques extrêmes sur l'état de santé des forêts sont encore incertains et font l'objet d'études récentes (comme Vacek *et al.*, 2020 et Subramanian *et al.*, 2019). Ces événements météorologiques extrêmes de plus en plus fréquents pourraient également jouer un rôle à plus grande échelle en tant que facteur déclenchant de dépérissement des forêts.

L'Observatoire wallon de la santé des forêts (SPW) souhaiterait donc, en collaboration avec l'Université de Liège, mettre en place à terme un outil cartographique dynamique permettant au gestionnaire forestier d'obtenir, via des indicateurs climatiques, des informations sur les conditions abiotiques locales de ses parcelles forestières. Cet outil cartographique dynamique sera librement accessible pour les gestionnaires forestiers et à terme, plus d'informations pourraient y être ajoutées telles que la teneur en eau du sol, les précipitations effectives arrivant en forêt *etc.* Le premier indicateur cartographique choisi concerne l'état de sécheresse atmosphérique sur des forêts en Wallonie.

Quelques indices de sécheresse sont déjà mis à disposition du public par l'Institut Royal Météorologique (IRM). Cette étude s'en distingue en visant l'obtention des informations plus poussées et plus locales en utilisant le modèle atmosphérique régional MAR développé au Laboratoire de Climatologie et de Topoclimatologie de l'ULiège. L'analyse de plusieurs indicateurs de sécheresse atmosphérique – leurs points forts, leurs points faibles, leur intérêt dans des zones forestières et leur applicabilité en Wallonie – sera développée dans le cadre de ce travail.

## 2. ÉTAT DE L'ART

### 2.1 La sécheresse atmosphérique

Tout d'abord, qu'est-ce qu'une sécheresse ? Une sécheresse est une période limitée dans le temps pendant laquelle les conditions sont plus sèches que la normale, la normale étant propre à un lieu et à une période de l'année (Soubeyroux *et al.*, 2012). Les sécheresses atmosphériques sont une cause majeure de dommages agricoles, économiques et environnementaux. Contrairement à un feu de forêt ou une tempête, une sécheresse atmosphérique est une catastrophe « à évolution lente », dont les effets s'accumulent progressivement au fil des semaines, des mois, voire des années (Cook, 2019).

Il existe différents types de sécheresse atmosphérique. Les trois types reconnus notamment par l'Organisation Météorologique Mondiale, sont classés en fonction de l'endroit du cycle hydrologique où se produisent les déficits d'eau. Ils parlent de sécheresse météorologique, sécheresse agricole et sécheresse hydrologique. Enfin, cette organisation prend également en considération leurs impacts socio-économiques (Figure 1).

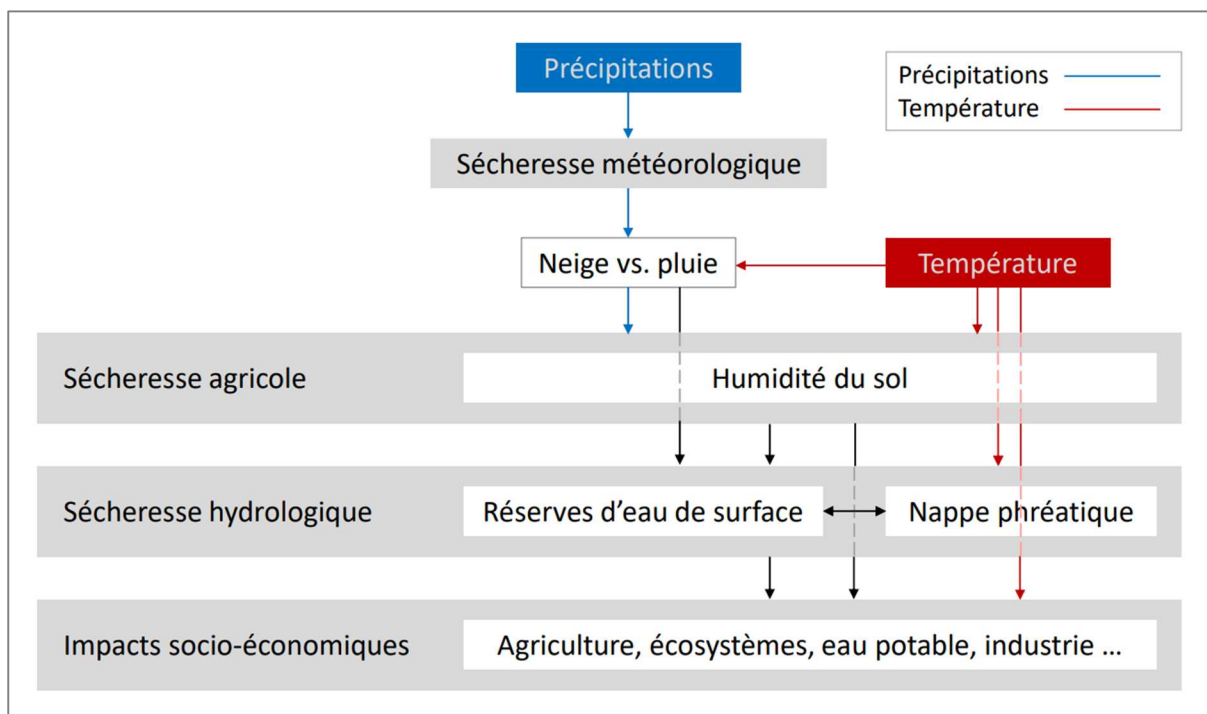
La sécheresse météorologique peut être définie comme une période pendant laquelle il y a un déficit de cumul de précipitations (Soubeyroux, 2012). Caloiero *et al.* (2018) ont défini la sécheresse météorologique comme « une quantité de précipitations temporairement inférieure à la moyenne ». Il peut y avoir ou non des précipitations un jour donné, mais dans le cas des sécheresses météorologiques, ce qui est important, ce sont les déficits de précipitations qui s'accumulent au fil des semaines ou plus longtemps.

La sécheresse agricole se manifeste lorsque des déficits d'humidité importants se développent dans la zone non saturée du sol au-dessus de la nappe phréatique. C'est le résultat d'un manque de précipitations conduisant à un manque d'eau disponible pour les plantes dans les sols (Soubeyroux, 2012). Des températures élevées, des vents soutenus, la texture du sol et la couverture végétale peuvent également avoir un impact sur l'occurrence et l'intensité d'une sécheresse agricole (Cook, 2019). Ces sécheresses agricoles sont ainsi nommées parce que la productivité agricole, les processus de végétation et la santé de l'écosystème sont directement affectés par la teneur en eau du sol. Dans ce mémoire, les sécheresses agricoles en forêt sont analysées, également appelés "sécheresses forestières".

La sécheresse hydrologique est une période avec un déficit des réserves en eaux souterraines par rapport à une situation normale (Soubeyroux, 2012). Elle se produit quand

les déficits de précipitations et d'humidité du sol continuent à s'accumuler au fil des mois ou des années.

Une quatrième catégorie, les impacts socio-économiques, est parfois utilisée. Une situation dans laquelle la demande en eau pour un bien économique dépasse l'offre peut avoir un effet négatif sur la vie des gens (Eklund & Seaquist, 2015). Ces conséquences socio-économiques dépendent à la fois du déficit d'humidité et des activités humaines (les modes de gestion et d'utilisation des ressources en eau peuvent aggraver ou améliorer les impacts de sécheresse) (Thibaut & Ozer, 2021).



*Figure 1 : Les différents types de sécheresse atmosphérique. Les déficits de précipitations (sécheresse météorologique) sont le moteur ultime de la plupart des sécheresses, les anomalies d'humidité associées se propageant dans les sols (sécheresse agricole) et finalement dans les réserves d'eau de surface et souterraines (sécheresse hydrologique). La température peut aggraver la sécheresse agricole et hydrologique en augmentant la fonte de neige et les pertes par évaporation (Source : Cook, 2019 ; modifiée).*

La Figure 1 montre les différents types de sécheresse atmosphérique, l'influence des précipitations (flèches bleues) et de la température (flèches rouges) et les interactions entre l'environnement physique et les facteurs humains (flèches noires).

## 2.2 Indices de sécheresse atmosphérique

L'étude des sécheresses atmosphériques nécessite des indicateurs quantitatifs pour suivre la gravité et l'évolution des périodes de sécheresse. Vu la complexité de leurs manifestations dans l'espace, dans le temps et dans le cycle hydrologique, aucun indicateur de sécheresse n'est adapté à toutes les situations (Cook, 2019). Plus de 100 indices de sécheresse sont utilisés dans le monde pour déterminer la sécheresse atmosphérique. Ils n'utilisent pas tous les mêmes paramètres climatiques. Les précipitations, la température et l'évapotranspiration sont les plus importants pour déterminer la gravité d'une sécheresse. On s'accorde généralement sur l'importance des précipitations pour expliquer la variabilité de la sécheresse et sur la nécessité d'inclure cette variable dans le calcul de tout indice de sécheresse (Vicente-Serrano *et al.*, 2010). Néanmoins, une variable qui tient compte de la demande d'eau par les plantes (telle que l'évapotranspiration) est également souvent utilisée.

### 2.2.1 PNI – *Percent of Normal Index*

Le PNI décrit la sécheresse comme étant l'écart des précipitations par rapport à la normale. Il est donc uniquement basé sur des données de précipitation. La normale correspond généralement à la moyenne des 30 dernières années. Le rapport à la normale est calculé en divisant les précipitations réelles ( $P$ ) par les précipitations normales ( $P_{ref}$ ) et en les multipliant par 100% (Böhnisch *et al.*, 2021). Des valeurs supérieures à 100% indiquent des périodes humides et des valeurs inférieures à 100% indiquent des périodes sèches.

Le principal avantage de cet indice est la simplicité de son calcul et sa facilité de compréhension, ce qui le rend favorable à la communication des niveaux de sécheresse au grand public.

Cet indice présente néanmoins quelques inconvénients. Premièrement, le PNI suppose que les précipitations suivent une distribution normale, pour laquelle la moyenne et la médiane sont égales. Or, les précipitations à l'échelle mensuelle ou saisonnière n'ont pas une distribution normale (Hayes *et al.*, 2002). Deuxièmement, puisque les distributions pour les saisons et les régions sont différentes, cet indice ne peut pas être utilisé pour comparer la sécheresse entre les saisons ou entre les régions (Zargar *et al.*, 2011).



## 2.2.2 SPI – Standardized Precipitation Index

L'indice SPI (en français : Indicateur Pluviométrique Standardisé) est un indicateur statistique qui compare les précipitations totales, tombées pendant une période d'un ou plusieurs mois, à la distribution des précipitations à long terme pour la même période. Le SPI est l'indice de sécheresse météorologique adopté par l'Organisation Météorologique Mondiale (OMM) pour les évaluations nationales et régionales des sécheresses (Rolbiecki *et al.*, 2022). Le SPI a été développé par McKee *et al.* (1993) et est notamment utilisé par l'Institut Royal Météorologique (IRM) de Belgique.

Le SPI surmonte les problèmes résultants de l'utilisation d'une distribution non normalisée en transformant la distribution des précipitations en une distribution normale centrée réduite – c'est-à-dire où la moyenne est égale à 0 et l'écart-type à 1. Ainsi, les valeurs supérieures à zéro indiquent des périodes humides et les valeurs inférieures à zéro indiquent des périodes sèches (Zargar *et al.*, 2011). Si une valeur inférieure à zéro est constamment observée et qu'elle atteint une valeur de -1 ou moins, on dit qu'une sécheresse s'est produite (McKee *et al.*, 1993). Si la valeur descend en dessous de -2, on parle d'une sécheresse extrême.

Le SPI peut être calculé pour une variété d'échelles de temps. Habituellement, ces échelles de temps vont d'un seul mois à un groupe de mois représentant une saison particulière à une année complète (Hayes *et al.*, 2002; Zargar *et al.*, 2011). Les indices SPI correspondants sont désignés par SPI-1, SPI-3, SPI-6, etc.

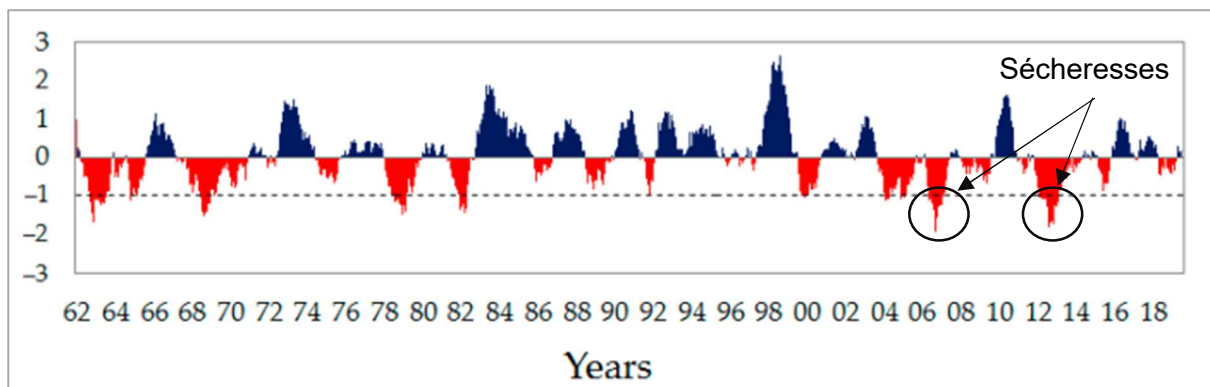


Figure 2 : Exemple d'une série temporelle de l'indice SPI. Les périodes humides sont affichées en bleu, les périodes sèches en rouge. On parle d'une sécheresse si la valeur est inférieure à -1, indiquée avec une ligne pointillée (Source : Cunha *et al.*, 2019 ; modifiée).

Dans la Figure 2, on peut voir un exemple d'une série temporelle de l'indice SPI pour une région du Brésil entre 1962 et 2019 sur base des données de précipitations mensuelles. Les

valeurs sont calculées à une échelle de 12 mois (SPI-12), donc si le SPI est négatif pour un certain mois, ça veut dire que le cumul des précipitations des 12 mois précédents est inférieur à la normale. Les périodes de sécheresses sont celles où la valeur du SPI est inférieure à -1, c'est-à-dire en dessous de la ligne pointillée.

Le SPI est simple à calculer, les résultats sont aisément comparables dans l'espace et dans le temps et il peut être adapté aux périodes qui intéressent l'utilisateur. Cela explique pourquoi il est souvent utilisé dans la gestion des risques et l'analyse des décisions (Edossa *et al.*, 2010). Le SPI est devenu très populaire grâce à ses faibles besoins en données car il décrit le comportement d'une seule variable, les précipitations (Angelidis *et al.*, 2012).

Cet indice possède également quelques inconvénients. Premièrement, la calibration du SPI nécessite une série suffisamment longue pour pouvoir normaliser la distribution, au moins 30 ans de données de qualité selon McKee *et al.* (1993). Deuxièmement, le SPI n'utilise que des données de précipitations. Il présume donc que l'importance d'autres variables, comme la température, le vent et l'évapotranspiration, est négligeable. Cependant, plusieurs études (comme Williams *et al.*, 2011 et Linares & Camarero, 2011) ont montré que l'augmentation de la température affecte considérablement la gravité des sécheresses en augmentant l'évapotranspiration. Il n'est donc pas recommandé d'utiliser cet indice pour l'analyse des conséquences du réchauffement climatique sur les conditions de sécheresse.

### 2.2.3 SPEI – *Standardized Precipitation Evapotranspiration Index*

Vicente-Serrano *et al.* (2010) ont proposé un nouvel indice de sécheresse atmosphérique : l'indice précipitations - évapotranspiration normalisé (SPEI). Le SPEI est basé sur les données de précipitations et d'évapotranspiration potentielle (ETP) et il a l'avantage d'inclure les effets de la variabilité de la température sur l'évaluation de la sécheresse. La procédure de calcul de l'indice implique un simple bilan hydrique climatique, l'accumulation de déficit/excédent de ce bilan à différentes échelles de temps, et l'ajustement à une distribution de probabilité (Zargar *et al.*, 2011). L'évapotranspiration potentielle peut être calculée via une des méthodes expliquées dans la paragraphe 2.2.5.

Le grand avantage est donc que cet indice tient compte du bilan hydrique, soit la différence entre les précipitations et l'évapotranspiration potentielle. Dans ce cas, on parlera généralement de "bilan hydrique climatique" ou "potentiel". Les précipitations quantifient l'eau disponible pour les cultures et l'évapotranspiration potentielle modélise la quantité maximale

d'eau qui pourrait s'évaporer et être transpirée par les plantes dans des conditions idéales (<https://spei.csic.es>, consulté le 20 octobre 2022).

L'évapotranspiration est l'une des composantes du bilan hydrique les plus importantes et la plus difficile à estimer. Il existe plusieurs méthodes pour estimer l'évapotranspiration potentielle (voir paragraphe 2.2.5).

#### 2.2.4 PDSI – *Palmer Drought Severity Index*

L'indice de gravité de la sécheresse de Palmer (PDSI) a été développé par Palmer en 1965. Cet indicateur est un bon exemple d'indice de sécheresse exhaustif. Ceux-ci utilisent une variété de variables météorologiques, agricoles et hydrologiques pour établir un aperçu complet de la sécheresse (Zargar *et al.*, 2011). Le PDSI utilise des données de ruissellement et de teneur en eau disponible du sol (*Available Water Content* - AWC) en plus des données de précipitation et d'évapotranspiration (Hayes *et al.*, 2002).

Cet indice permet d'avoir une image assez complète du bilan hydrique, ce qui est très intéressant pour les applications hydrologiques. En revanche, il y a plusieurs inconvénients. Tout d'abord, l'algorithme est complexe et nécessite une série temporelle suffisamment longue, au moins 50 ans selon Karl (1986). De plus, l'échelle temporelle est obligatoirement de l'ordre de l'année, ce qui le rend trop peu sensible aux sécheresses météorologiques et agricoles d'après Klein (2009).

#### 2.2.5 Estimation de l'évapotranspiration potentielle

L'évapotranspiration potentielle est la quantité maximale d'eau qui pourrait s'évaporer et être transpirée par les plantes dans des conditions idéales, c'est-à-dire quand la surface est recouverte d'eau et donc à saturation (Guyot, 1999). C'est un concept théorique qui peut être estimé mais qui ne peut pas être mesuré. Bien que l'évapotranspiration potentielle soit principalement déterminée par quatre variables météorologiques (la température de l'air, le rayonnement net, la pression de vapeur et la vitesse du vent), il existe de nombreuses formules plus ou moins complexes qui permettent d'estimer l'évapotranspiration potentielle.

A. Formule de Thornthwaite : Thornthwaite a été le premier à utiliser le concept d'évapotranspiration potentielle en 1948. Sa formule est encore utilisée aujourd'hui grâce à sa facilité d'utilisation. Il s'agit d'une formule empirique dans laquelle seule la température moyenne de l'air est explicitement prise en compte. La latitude est utilisée

pour calculer la durée maximale d'ensoleillement. Cette méthode ne prend pas en compte l'impact de la pression de vapeur et de la vitesse du vent (Guyot, 1999).

- B. Formule de Hargreaves : Tout comme la formule de Thornthwaite, cette formule utilise uniquement des données de température. Ici, outre la température moyenne, la différence entre la température minimale et maximale est utilisée afin d'estimer le rayonnement net (Stagge *et al.*, 2015).
- C. Formule de Penman-Monteith : Cette méthode est plus complexe vu qu'elle tient compte d'un plus grand nombre de variables. Pour pouvoir l'appliquer, on utilise des données de radiation nette au lieu d'une estimation en fonction de la température. De plus, cette formule utilise des données de vitesse du vent, de pression de vapeur et d'humidité spécifique (van der Schrier *et al.*, 2011). Des conditions météorologiques particulièrement asséchantes (comme des vents d'est au printemps en Belgique) sont donc prises en compte dans cette méthode. La formule de Penman-Monteith a été adoptée par l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO) comme procédure standard pour le calcul de l'évapotranspiration potentielle.
- D. Formule de Penman modifiée : Il s'agit d'une version modifiée de la formule de Penman-Monteith pour les régions forestières. Elle prend en compte des facteurs tels que l'indice de surface foliaire et la résistance de la canopée (Shiau & Davar, 1973). Vu que le couvert végétal n'est pas pris en compte dans les calculs des indices de sécheresses présentés dans le paragraphe 2.2, utiliser la formule modifiée de Penman peut être une façon d'intégrer le type de couvert végétal.

#### 2.2.6 Caractéristiques des sécheresses

Les caractéristiques les plus importantes sont la durée, la magnitude, l'intensité et la fréquence des sécheresses. Elles sont toujours basées sur un indice de sécheresse atmosphérique (SPI, SPEI, PDSI ...) qui a été calculé au préalable.

La durée ( $L$ ) d'une période de sécheresse est le temps écoulé entre son début et sa fin. Elle peut varier d'une semaine à quelques années. À cause de la nature dynamique de la sécheresse, une région peut connaître des périodes humides et sèches simultanément si l'on considère différentes échelles de temps (Rolbiecki *et al.*, 2022).

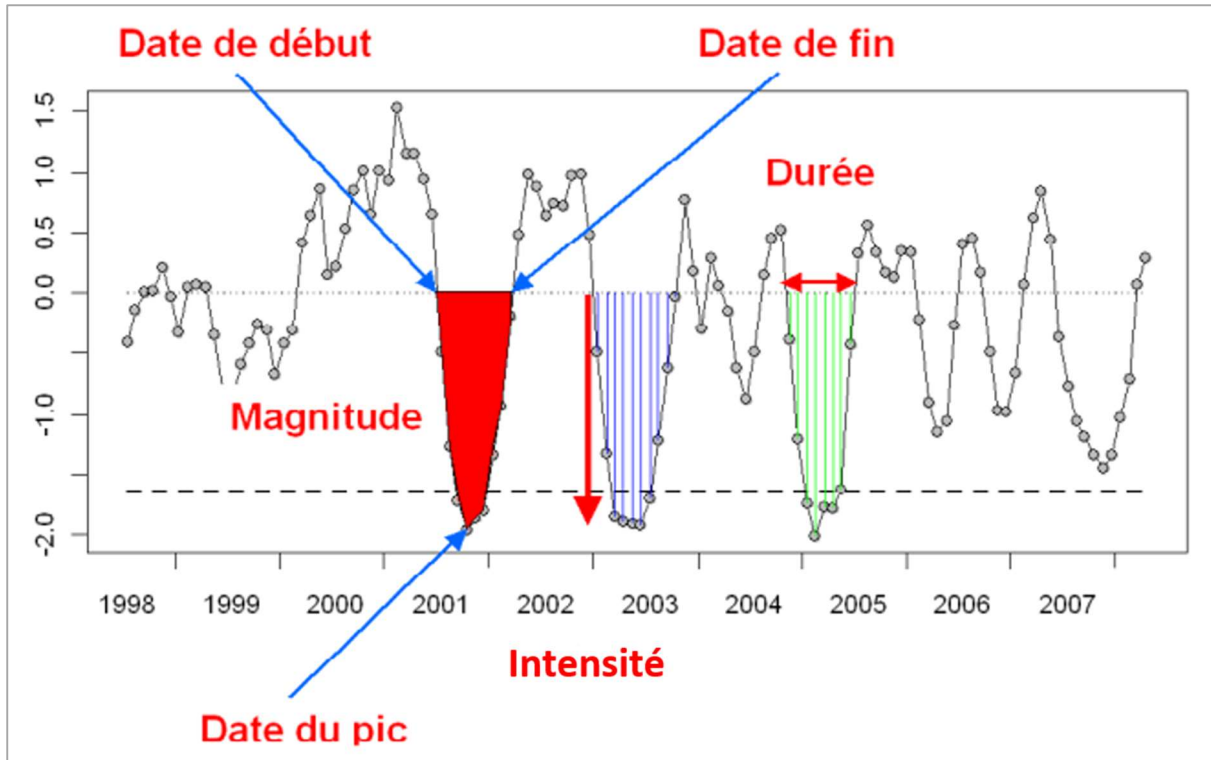


Figure 3 : Définition de quelques caractéristiques locales des évènements de sécheresse (date de début, date de fin, date du pic, magnitude  $M$ , intensité  $I$  et durée  $L$ ). L'axe vertical représente les valeurs d'un indice de sécheresse tel que le SPI, SPEI ou PDSI et l'axe horizontal le temps exprimé en années (Source : Soubeyroux et al., 2011 ; modifiée).

La magnitude ( $M$ ) d'une sécheresse est égale au cumul des valeurs de l'indice de sécheresse pendant la sécheresse. Elle est liée au déficit cumulé de précipitations pendant une période de sécheresse. Sur la Figure 3, on peut considérer la surface rouge comme la magnitude de la sécheresse en 2001.

$$M = - \left[ \sum_i^D (\text{indice\_de\_sécheresse})_i \right]$$

L'intensité ( $I$ ) d'une période sèche  $i$  est le rapport entre la magnitude  $M$  de la sécheresse et la durée  $L_i$  de sécheresse. Il s'agit donc d'une moyenne de l'indice sur toute la période de sécheresse.

$$I_i = \frac{M}{L_i}$$

La fréquence d'une sécheresse ( $f$ ) est définie comme le nombre moyen d'épisodes de sécheresse dont la gravité est égale ou supérieure à un seuil pendant une certaine période d'observation (Zargar *et al.*, 2011) :

$$f = \frac{n}{N} * 100$$

avec  $n$  = nombre de mois de sécheresse (indice de sécheresse  $\leq$  seuil) et  $N$  = nombre total de mois pendant la période entière.

## **2.3 Réseaux de données pluviométriques sur le territoire wallon**

### **2.3.1 IRM – Institut Royal Météorologique**

L'IRM dispose de 27 stations météorologiques synoptiques en Belgique (dont 12 en Wallonie) qui enregistrent à heure fixe la température, l'humidité, la pression atmosphérique, le vent et les précipitations (<https://www.meteo.be>, consulté le 20 octobre 2022). Ces mesures sont automatisées, ce qui réduit significativement le risque d'erreur humaine.

L'IRM dispose également d'un réseau climatique qui compte environ 200 stations manuelles réparties à travers toute la Belgique, dont environ la moitié se trouve en Wallonie. Il est constitué d'observateurs particuliers (généralement des passionnés de météorologie) qui récoltent une ou deux fois par jour les données météorologiques destinées à l'IRM, notamment la quantité des précipitations ainsi que la température minimale et maximale dans la plupart des stations. Ces informations sont centralisées dans la base de données de l'IRM où la qualité des données est contrôlée et validée (<https://www.meteo.be>, consulté le 20 octobre 2022).

Finalement, l'IRM dispose aussi d'un réseau de radars météorologiques. Ces quatre radars permettent d'observer les précipitations à distance dans toute la Belgique depuis 2001. Ils réalisent toutes les cinq minutes un balayage volumique de l'atmosphère produisant des mesures de réflectivité et de vitesse radiale jusqu'à une distance maximale de 250-300 km. Ces observations sont surtout utilisées pour les prévisions à court terme des précipitations et des orages, mais peuvent aussi être utilisées pour explorer de nouvelles approches de type « *Crowdsourcing* » et « *Citizen Science* » pour collecter des observations météorologiques (<https://www.meteo.be>, consulté le 20 octobre 2022).

Grâce à une convention entre l'IRM et le Laboratoire de Climatologie et de Topoclimatologie de l'Université de Liège, un jeu de données de l'IRM qui rassemble toutes les données climatiques de l'IRM de 1950 à 2022 (interpolées sur une grille de 5 km sur 5 km) peut être utilisé dans la cadre de ce mémoire.

### 2.3.2 Le réseau Agromet (CRA-W)

Le réseau Agromet (anciennement Pameseb) est actif depuis 25 ans et appartient au Centre Wallon de Recherches Agronomiques (CRA-W). Le réseau se compose de 30 stations agrométéorologiques qui couvrent la Wallonie avec une maille d'environ 30 km<sup>2</sup>. Les stations mesurent la température et l'humidité de l'air, la température à la surface du sol et à 20 cm sous terre, la direction et la vitesse du vent à une altitude de 2 mètres, les précipitations et l'ensoleillement. Les données météorologiques, avec une résolution temporelle d'une heure, sont systématiquement vérifiées, corrigées si besoin et validées (<https://app.pameseb.be>, consulté le 12 juin 2023). L'évapotranspiration est calculée automatiquement. Il s'agit de l'évapotranspiration potentielle calculée sur base de la formule Penman-Monteith (voir paragraphe 2.2.5).

### 2.3.3 Le réseau ICOS

ICOS (Integrated Carbon Observation System) est un organisme de recherche s'intéressant au rôle climatique positif de nos écosystèmes (forêts, prairies, océans...) sur le taux de CO<sub>2</sub> présent dans l'atmosphère à l'échelle européenne. Le réseau ICOS consiste en plus de 140 stations réparties dans 14 pays européens, dont 10 stations belges. Une seule station en Wallonie dans la catégorie « écosystèmes » est implantée dans une forêt à Vielsalm. Cette station, dont le code est ICOS BE-Vie, se trouve dans une forêt mature composée principalement de hêtres et de douglas. Ces deux stations mesurent toutes les 30 minutes la température de l'air, l'humidité relative de l'air, les précipitations, l'épaisseur de la neige, différents flux de rayonnement, ainsi que diverses données du sol telles que la température, la teneur en eau, le flux thermique et la profondeur de la nappe phréatique (<https://www.gembloux.uliege.be>, consulté le 13 décembre 2022).

## 2.4 Recherches précédentes en Wallonie / Belgique / Europe

Quelles études ont déjà été faites sur les sécheresses atmosphériques et forestières en Wallonie, en Belgique ou, par extension, en Europe ? Quels sont les indices utilisés ? Quelles données ont été utilisées ?

### 2.4.1 Études des sécheresses atmosphériques

Klein (2009) a comparé les sécheresses de 1976 et 2003 en Europe occidentale en utilisant les données météorologiques de l'ECA&D (*European Climate Assessment and Dataset*). Le SPI a été choisi comme indice de sécheresse le plus performant, après avoir comparé les avantages et les inconvénients du SPI et du PDSI. Le set de données ECA&D n'a pas été abordé ici car il n'y a qu'une seule station pluviométrique qui se trouve en Belgique.

Zamani *et al.* (2016) ont étudié l'estimation spatiale du risque de sécheresse atmosphériques en Belgique et ont réalisé une carte de risque (Figure 4) pour les événements de sécheresse avec une période de retour de 20 ans. Comme indicateur de sécheresse, ils ont utilisé le déficit maximal de précipitations entre le 1<sup>er</sup> avril et le 30 septembre. Les valeurs les plus élevées se situent le long de la côte, tandis que les valeurs les plus basses se trouvent en Ardenne. Le déficit de précipitations est défini comme un bilan précipitations – évapotranspiration. Les données de précipitations et de températures journalières des 13 stations synoptiques de l'IRM ont été utilisées. L'évapotranspiration potentielle a été calculée à l'aide de la méthode Bultot (Bultot & Dupriez, 1973), développée spécifiquement pour la Belgique en 1973. Cette méthode est une modification de l'équation de Penman-Montheith pour le calcul de l'évapotranspiration potentielle journalière.

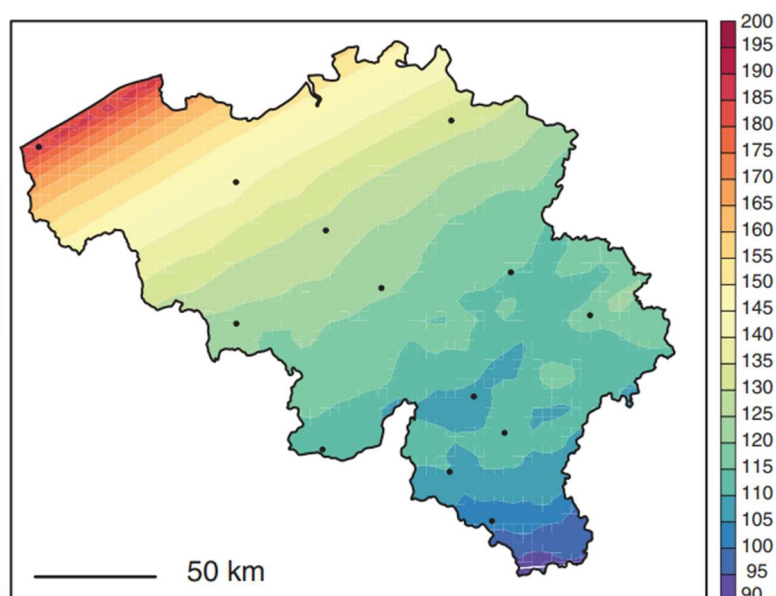


Figure 4 : Carte de risque pour les événements de sécheresse avec une période de retour de 20 ans, exprimés en déficit maximal de précipitations entre le 1<sup>er</sup> avril et le 30 septembre (en mm) (Source : Zamani *et al.*, 2016).



Thibaut (2020) a analysé la sécheresse de 2018 en Belgique et la perception des sécheresses dans le cadre du système de planification d'urgence et de gestion de crise. Il fournit une description détaillée des impacts directs et indirects des sécheresses en Belgique. A la fin de son mémoire, il souligne l'importance de l'anticipation à long terme d'un épisode de sécheresse. Il propose la création d'un outil cartographique des risques de sécheresses, rejoignant l'objectif visé ici à long terme pour les écosystèmes forestiers.

Chaque jour, l'Institut Royal Météorologique (IRM) publie l'état de sécheresse en Belgique sur base de deux indices (SPI-3 et SPEI-3) sur son site internet. Le SPI-3 est l'indice de précipitations normalisé qui caractérise le total des précipitations des 3 derniers mois. Le SPEI-3 est l'indice précipitation-évapotranspiration normalisé qui caractérise le bilan d'eau des 3 derniers mois. L'évapotranspiration potentielle utilisée pour calculer le SPEI-3 est estimée à partir des observations de la température, de l'humidité relative, du rayonnement solaire global et de la vitesse du vent. L'IRM dispose également des cartes montrant comment les deux indices de sécheresse se comportent spatialement en ce moment. Les prévisions à 10 jours du SPI-3 sont également cartographiées (<https://www.meteo.be>, consulté 12 décembre 2022).

Le projet ClimSec (Soubeyroux *et al.*, 2011) a étudié l'impact du changement climatique en France sur les sécheresses et la teneur en eau du sol. Les indices qui ont été utilisés, le SPI, le SSWI (*Standardized Soil Wetness Index*) et le SFI (*Standardized Flow Index*), représentent respectivement les sécheresses météorologiques, les sécheresses agricoles et les sécheresses hydrologiques. Ils ont été calculés sur base des réanalyses sur 50 ans à une résolution de 8 km. La Figure 5 montre quelques résultats de ce projet, notamment l'évolution temporelle future des sécheresses météorologiques par saison à partir de l'indice SPI sur une échelle de 3 mois. Ces résultats montrent une augmentation des sécheresses en été et en automne à partir de 2050. En été, c'est le Nord Est de la France (des régions avec un climat similaire à la Belgique) qui connaîtrait les évolutions les plus fortes par rapport au climat actuel (Soubeyroux *et al.*, 2011). Ces résultats donnent une indication sur l'évolution des sécheresses en Belgique dans le futur. Le projet ClimSec est aussi un très bon exemple d'une étude qui a permis de mettre en place un outil pour le suivi des sécheresses en temps réel.

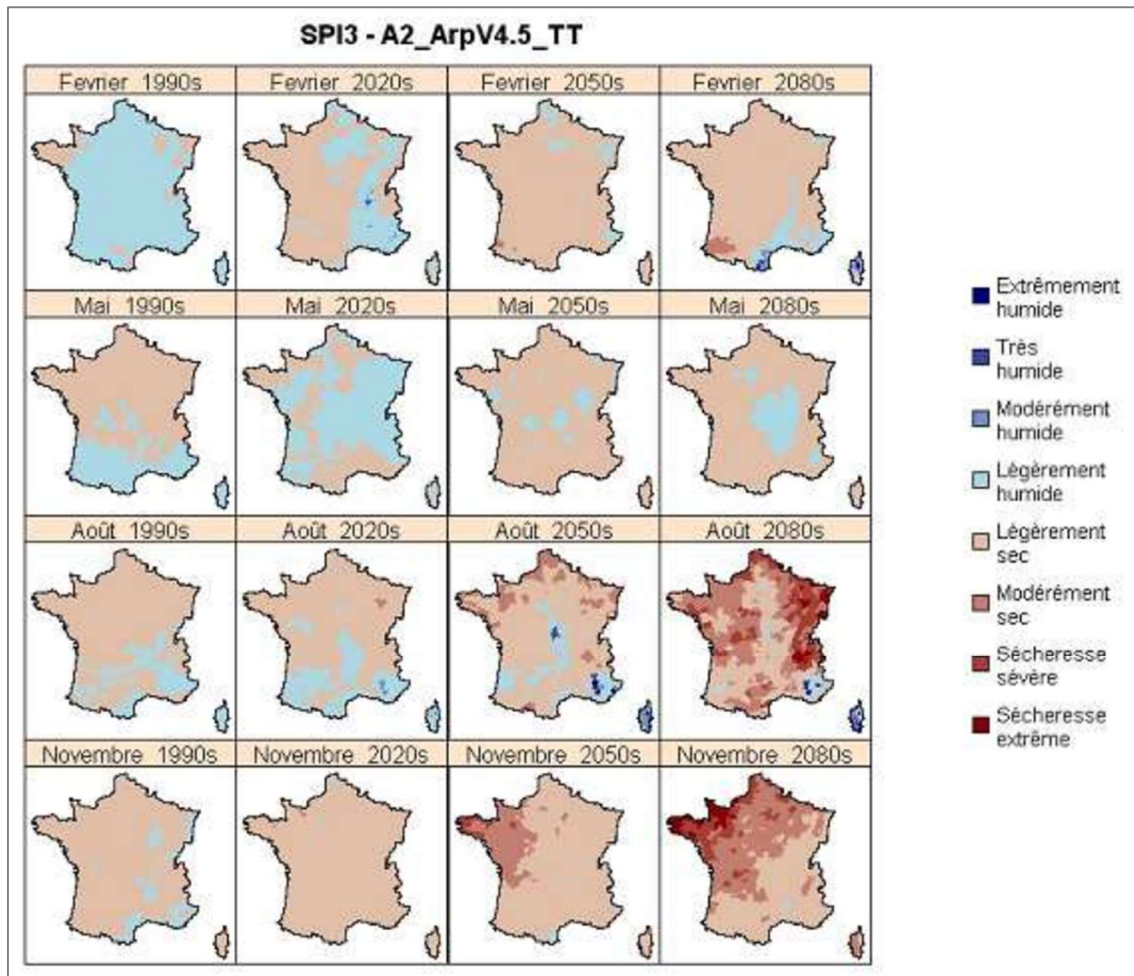


Figure 5 : Évolution temporelle des sécheresses SPI-3 au cours du XXIe siècle selon les saisons (février = hiver, mai = printemps, août = été, novembre = automne) à partir des projections Arpège V4.6 scénario A2 (Source : Soubeyrou et al., 2011).

#### 2.4.2 Études de l'impact des sécheresses en forêt en Belgique

Le but de ce mémoire est de trouver un indice de sécheresse approprié pour étudier les sécheresses dans les forêts belges. En Belgique, il existe quelques études sur l'impact que certaines sécheresses dans le passé ont eu sur les forêts ou sur une espèce en particulier, notamment suite à la sécheresse de l'été 2022. Ces impacts peuvent être désastreux lors des sécheresses successives en période de végétation – comme la Belgique a connu en 2017, 2018, 2020 et 2022 (Vanwijnsberghe, 2022). Ces sécheresses sont amenées à se répéter et à devenir plus fréquentes voir plus intenses par rapport au passé, notamment en été. Ce sont des informations principalement obtenues grâce aux rapports du GIEC, comme le quatrième et le cinquième rapport d'évaluation (IPCC, 2007 et IPCC, 2014), et grâce aux rapports climatiques de l'IRM (comme IRM, 2020). Néanmoins, aucune étude n'a encore essayé de chercher le meilleur indice climatique pour étudier et caractériser plus précisément les sécheresses forestières en Belgique.



### 3. MÉTHODOLOGIE ET DONNÉES

#### 3.1 Le modèle MAR

Le modèle MAR (Modèle Atmosphérique Régional) est un modèle climatique développé à l'origine par Hubert Gallée en 1994. Il est principalement utilisé pour modéliser le climat dans les régions polaires, mais il est bien adapté pour les régions tempérées (Doutreloup *et al.*, 2022). Le modèle MAR est décrit amplement par Kittel (2021). Le MAR est un RCM (*Regional Climate Model*) qui représente, contrairement à un GCM (*General Circulation Model*), une partie spécifique du globe avec une meilleure résolution spatiale et temporelle que les modèles globaux.

Pour pouvoir faire tourner le MAR, il faut toujours définir le domaine (la Belgique, l'Europe, les régions polaires...) et le modèle global qui sera utilisé. Ce dernier va forcer notre modèle à ses frontières. Le modèle régional MAR va ensuite calculer sa propre solution à l'intérieur de son domaine. Comme forçage, un RCM a besoin des données de température, de vent, d'humidité et de pression.

On peut faire tourner le MAR, comme les autres RCM, en trois modes :

- Pour faire des projections futures, en utilisant les modèles globaux et les scénarios du GIEC ;
- Pour reconstruire le climat dans le passé, en utilisant comme forçage des réanalyses (un type de modèle global qui assimile des observations toutes les six heures) ;
- Pour faire des prévisions météo, en utilisant comme forçage un modèle global qui fait des prévisions météo toutes les six heures.

Pour ce mémoire, les données de sortie du MAR sont utilisées avec une résolution spatiale de 5 km et une résolution temporelle d'une heure pour calculer les indices de sécheresse en Belgique dans le passé (1950 – 2022). Comme forçage, les réanalyses ERA5 ont été utilisées. ERA5 est une base de données de réanalyse mondiale. Elle fournit des variables météorologiques telles que la température, les précipitations et la vitesse du vent qui couvrent la terre entière avec une résolution spatiale de 0,25° (environ 31 km) et une résolution temporelle d'une heure à partir de 1940 (<https://cds.climate.copernicus.eu>, consulté le 2 juin 2023).

Les données du modèle MAR utilisées sont les précipitations et la température. La corrélation, les biais et le RMSE centré sont calculés par rapport aux données d'observation de l'IRM, pour avoir une meilleure idée de la qualité de ces simulations.

Les biais sont calculés comme la différence entre la moyenne des simulations MAR et la moyenne des observations. Ces biais sont comparés avec l'écart-type des simulations MAR pour voir s'ils sont significatifs. Un biais significatif signifie qu'il y a une erreur systématique. La corrélation permet de voir si les variations temporelles ou spatiales par rapport à la moyenne sont bien simulées par le modèle MAR. L'erreur quadratique moyenne centrée (RMSE centré) est la différence moyenne entre les observations et les simulations du MAR (desquelles on a enlevé le biais).

### **3.2 Calcul des indices de sécheresse**

#### 3.2.1 L'indice PNI

L'indice PNI (voir paragraphe 2.2.1) a été calculé en Fortran avec la formule

$$PNI = \frac{P}{P_{ref}} * 100$$

où  $P$  est la quantité de précipitations tombées en un mois spécifique (ou la moyenne sur plusieurs mois) et  $P_{ref}$  est la moyenne des précipitations mensuelles sur toute la période observée (1950 – 2022).

#### 3.2.2 L'indice SPI

Comme expliqué dans le paragraphe 2.2.2, le SPI est basé sur une normalisation des précipitations cumulées. La normalisation implique deux étapes :

- A. Premièrement, la distribution originale des précipitations est ajustée à une distribution de probabilité. Les distributions de probabilité qui s'ajustent généralement le mieux aux distributions des précipitations sont la distribution gamma et la distribution Pearson (Type III). La Figure 6A représente plusieurs distributions gamma avec des paramètres différents. Ces paramètres sont adaptés afin que la distribution gamma reflète le mieux possible la distribution réelle.

B. La distribution de probabilité choisie est ensuite transformée en une distribution normale centrée réduite de sorte que la médiane soit égale à zéro et l'écart-type soit égal à 1 (comme dans la Figure 6B).

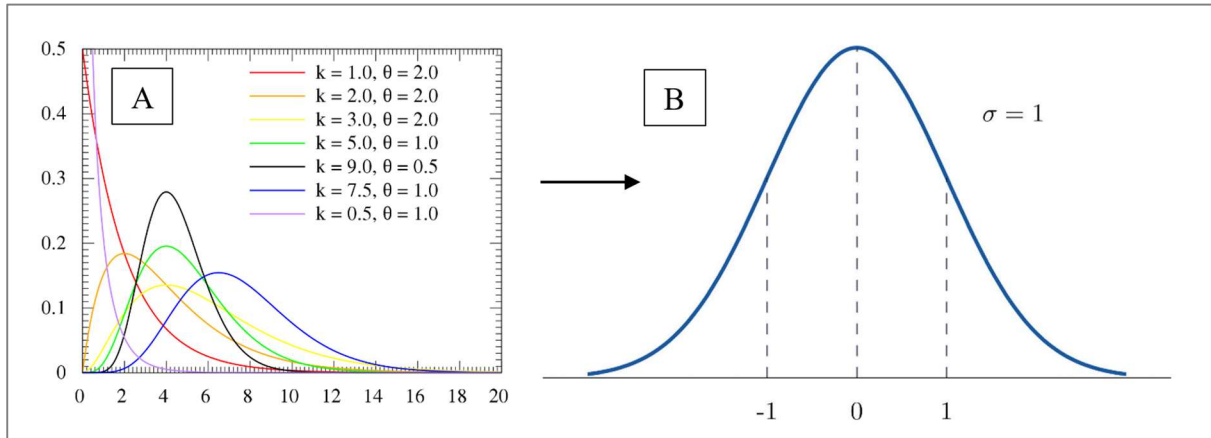


Figure 6 : (A) Différentes versions de la distribution Gamma en fonction de ses paramètres  $k$  et  $\vartheta$  et (B) la distribution normale avec une moyenne égale à 0 et un écart-type égal à 1 (B) (Sources : <https://saylordotorg.github.io>, consulté le 2 juin 2023 ; modifié et <https://en.wikipedia.org>, consulté le 2 juin 2023 ; modifié).

Les valeurs de l'indice SPI sont ensuite calculées en utilisant cette formule :

$$SPI = \frac{(X_i - \bar{x})}{\sigma}$$

où  $\bar{x}$  est la moyenne normalisée,  $X_i$  est la quantité cumulée normalisée de précipitations et  $\sigma$  est l'écart-type de la série temporelle normalisée (Agnew, 2000). Pour une sécheresse donnée, la valeur SPI représente ainsi le nombre d'écart-types de son déficit cumulé de précipitations par rapport à la moyenne normalisée.

Le calcul du SPI, étant plus complexe que celui du PNI, il a été fait en utilisant le module open source *Climate Indices* en Python. Ce module contient des algorithmes qui permettent de calculer différents indices climatiques. Il calcule automatiquement deux versions du SPI : une en utilisant la distribution Gamma et l'autre en utilisant la distribution Pearson.

### 3.2.3 L'indice SPEI

Le calcul de l'indice SPEI (voir paragraphe 2.2.3) est similaire à celui du SPI, mais au lieu d'utiliser des données de précipitations, on utilise le bilan hydrique potentiel. Ce bilan hydrique

est la différence entre la quantité des précipitations cumulées et l'évapotranspiration potentielle pour la même période :

$$D_i = P_i - ETP_i$$

où  $D_i$  est le bilan hydrique potentiel pour le mois  $i$ ,  $P_i$  est la quantité des précipitations cumulées pendant le mois  $i$  et  $ETP_i$  est l'évapotranspiration potentielle calculée pour le mois  $i$  (<https://spei.csic.es>, consulté le 20 octobre 2022). Il existe plusieurs formules pour calculer l'évapotranspiration potentielle (voir paragraphe 2.2.5). Pour ce mémoire, on a choisi d'utiliser la formule de Thornthwaite car elle nécessite peu de données et est facile de calcul :

$$ETP_i \text{ (mm/mois)} = 16 \left( \frac{10 T_i}{I} \right)^{a(I)} F(\varphi)$$

où  $ETP_i$  est une estimation de l'évapotranspiration potentielle pour le mois  $i$ ,  
 $T_i$  est la température moyenne de l'air pour le mois  $i$ ,  
 $I$  est l'indice thermique annuel, somme des indices mensuels  $I_j$  des 12 mois précédents,

$$I = \sum_1^{12} I_j \quad \text{avec } I_j = \left( \frac{t_j}{5} \right)^{1,514}$$

où  $t_j$  est la température mensuelle du mois  $j$

$a(I)$  est une fonction de troisième degré de l'indice thermique  $I$

$$a(I) = 6,75 * 10^{-7} * I^3 - 7,71 * 10^{-5} * I^2 + 1,792 * 10^{-2} * I + 0,49239$$

$F(\varphi)$  est un terme correctif en fonction de la durée théorique de l'insolation variant avec la latitude  $\varphi$  et la saison, donné par le Tableau 1.

Lat. N.	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre
39	0,85	0,84	1,03	1,11	1,23	1,25	1,27	1,18	1,04	0,96	0,83	0,81
40	0,84	0,83	1,03	1,11	1,24	1,25	1,27	1,18	1,04	0,96	0,83	0,81
41	0,83	0,83	1,03	1,11	1,25	1,26	1,27	1,19	1,04	0,96	0,82	0,8
42	0,82	0,83	1,03	1,12	1,26	1,27	1,28	1,19	1,04	0,95	0,82	0,79
43	0,81	0,82	1,02	1,12	1,26	1,28	1,29	1,2	1,04	0,95	0,81	0,77
44	0,81	0,82	1,02	1,13	1,27	1,29	1,3	1,2	1,04	0,95	0,8	0,76
45	0,8	0,81	1,02	1,13	1,28	1,29	1,31	1,21	1,04	0,94	0,79	0,75
46	0,79	0,81	1,02	1,13	1,29	1,31	1,32	1,22	1,04	0,94	0,79	0,74
47	0,77	0,8	1,02	1,14	1,3	1,32	1,33	1,22	1,04	0,93	0,78	0,73
48	0,76	0,8	1,02	1,14	1,31	1,33	1,34	1,23	1,05	0,93	0,77	0,72
49	0,75	0,79	1,02	1,14	1,32	1,34	1,35	1,24	1,05	0,93	0,76	0,71
50	0,74	0,78	1,02	1,15	1,33	1,36	1,37	1,25	1,06	0,92	0,76	0,7
Lat. S.	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre
40	1,27	1,06	1,07	0,93	0,86	0,78	0,84	0,92	1,00	1,15	1,2	1,29
42	1,28	1,07	1,07	0,92	0,85	0,76	0,82	0,92	1,00	1,16	1,22	1,31
44	1,3	1,08	1,07	0,92	0,83	0,74	0,81	0,91	0,99	1,17	1,23	1,33
46	1,32	1,1	1,07	0,91	0,82	0,72	0,79	0,9	0,99	1,17	1,25	1,35
48	1,34	1,11	1,08	0,9	0,8	0,7	0,76	0,89	0,99	1,18	1,27	1,37
50	1,37	1,12	1,08	0,89	0,77	0,67	0,74	0,88	0,99	1,19	1,29	1,41

Tableau 1 : Terme correctif mensuel  $F(\varphi)$  selon la latitude, utilisé pour les estimations de l'évaporation potentielle avec la formule de Thornthwaite (Source : Lebourgeois & Piedallu (2005)).

Après avoir calculé l'évaporation potentielle et le bilan hydrique, on suit les deux mêmes étapes que dans le calcul du SPI pour la normalisation des bilans hydriques cumulés :

- A. Premièrement, la distribution originale des bilans hydriques est ajustée à une distribution de probabilité. Les distributions de probabilité qui s'ajustent généralement le mieux aux distributions des bilans hydriques sont la distribution log-logistique, la distribution gamma et la distribution Pearson (Type III). La Figure 6A représente plusieurs distributions gamma avec des paramètres différents. Ces paramètres sont adaptés afin que la distribution gamma reflète le mieux possible la distribution réelle.
- B. La distribution de probabilité choisie est ensuite transformée en une distribution normale centrée réduite de sorte que la médiane soit égale à zéro et l'écart-type soit égale à un (comme dans la Figure 6B).

Les valeurs de l'indice SPEI sont ensuite calculées en utilisant cette formule :

$$SPEI = \frac{(X_i - \bar{x})}{\sigma}$$

où  $\bar{x}$  est la moyenne normalisée,  $X_i$  est le bilan hydrique cumulé normalisé et  $\sigma$  est l'écart-type de la série temporelle normalisée (Agnew, 2000). Pour une sécheresse donnée, la valeur



SPEI représente ainsi le nombre d'écart-types de son déficit cumulé de bilan hydrique par rapport à la moyenne normalisée.

Comme pour le SPI, le module *Climate Indices* en Python a été utilisé pour calculer deux versions du SPEI : une en utilisant la distribution Gamma et l'autre en utilisant la distribution Pearson.

### **3.3 Sélection du meilleur indice pour étudier les sécheresses en forêt en Wallonie**

Afin de définir l'indice qui représente le mieux les sécheresses forestières en Wallonie, les valeurs des indices doivent être comparées avec des données d'observation. La seule station météorologique en Wallonie qui se trouve dans une forêt, est la station « BE-Vie » du réseau ICOS (voir paragraphe 2.3.3) à Vielsalm. Cette station (50,304962°N 5,998099°E) se situe au milieu d'une forêt mature composée principalement de hêtres et de douglas, en Ardenne dans la Province de Luxembourg (<https://meta.icos-cp.eu>, consulté le 3 juin 2023).

Cette station mesure le stockage de CO<sub>2</sub>, la température et l'humidité relative de l'air à 15 différentes altitudes ainsi que les précipitations, la neige et les différents flux de rayonnements descendants et ascendants. Elle possède également des capteurs dans le sol pour mesurer la température, les flux de chaleur et la teneur en eau à différentes profondeurs.

La variable la plus intéressante pour avoir des informations sur les sécheresses en forêt est la teneur en eau du sol (*Soil Water Content* - SWC) qui est mesurée à trois profondeurs différentes : 20 cm, 45 cm et 90 cm. La profondeur appropriée pour mesurer la sécheresse dans les forêts dépend de la profondeur des racines et peut varier en fonction des facteurs tels que l'essence considérée et le type de sol. Les mesures peu profondes sont utiles pour évaluer la disponibilité de l'humidité près de la surface, ce qui est crucial pour les jeunes plantations. Les mesures plus profondes peuvent fournir des informations sur la disponibilité en eau pour les racines plus profondes et les arbres de plus grande taille.

Les données de cette station sont disponibles sur le site <http://gaia.agraria.unitus.it/> et leurs moyennes mensuelles sont présentées dans l'Annexe 1A. Les observations de la teneur en eau du sol sont disponibles d'août 1996 à 2018. Ces jeux de données ne sont pas complets et il y a deux changements soudains dans les séries temporelles (en 2006 et 2014) qui sont dus à l'installation des nouveaux capteurs. Pour cette raison, seules les données de janvier 2015 à décembre 2018 ont été utilisées (voir Annexe 1B).

La corrélation sera calculée entre les données de teneur en eau et chaque indice de sécheresse. De cette manière, on essaiera de déterminer l'indice de sécheresse le plus fiable pour les sécheresses forestières à Vielsalm et, par extension, en Wallonie.



## 4. RÉSULTATS

### 4.1 Validation des données MAR

Tout d'abord, la corrélation, les biais et le RMSE centré sont calculés pour les précipitations mensuelles pour l'ensemble de la période (1951 – 2021) et par saison. Les résultats sont présentés dans la Figure 7. Le RMSE centré pour l'ensemble de la période se situe entre 20 et 25 mm/mois pour presque toute la Belgique. On a des valeurs légèrement inférieures en hiver et surtout au printemps, et des valeurs légèrement supérieures en été (jusqu'à 35 mm/mois).

En analysant les biais, on constate que MAR a tendance de surestimer les précipitations à certains endroits en Ardenne (biais positifs) et de sous-estimer les précipitations dans le Nord-Est du pays (biais négatifs). Les biais positifs en Ardenne sont plus élevés en hiver et moins élevés en automne. Les biais négatifs, par contre, sont plus importants en automne et moins importants en été. En été, en revanche, la zone où MAR surestime les précipitations est beaucoup plus grande.

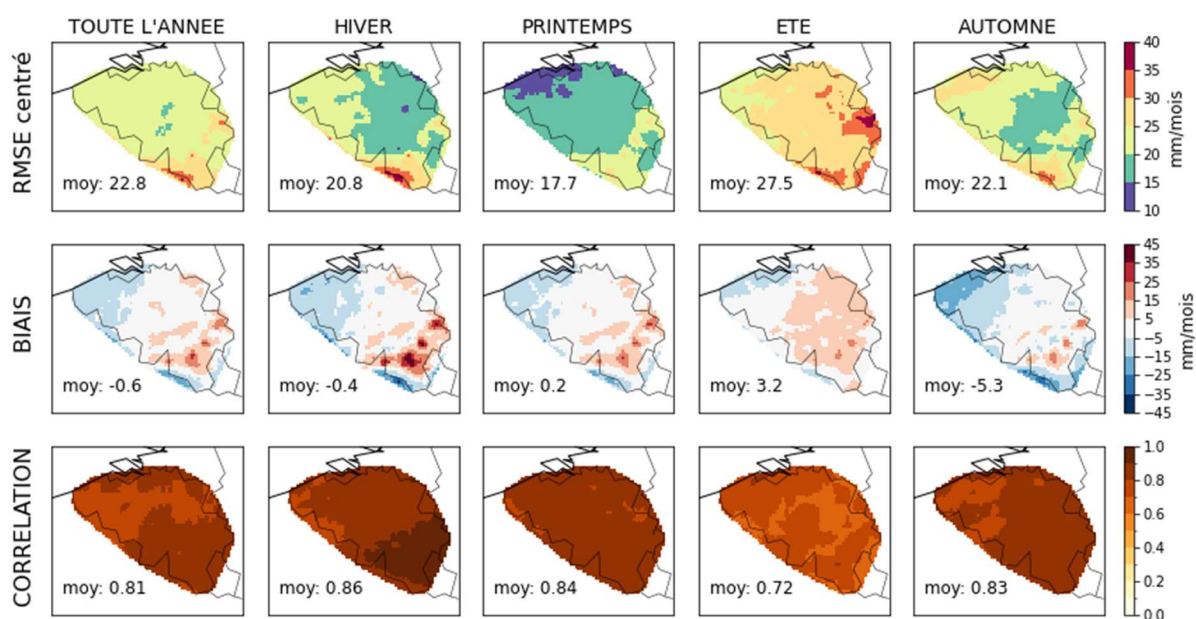


Figure 7 : Comparaison des précipitations mensuelles simulées par MAR-ERA5 avec les données d'observation de l'IRM

Pour savoir s'il y a des différences significatives entre les simulations MAR et les observations de l'IRM, on a testé les valeurs du RMSE centré et les biais par rapport à l'écart-type (voir Annexe 2). Il n'y a aucun biais significatif et très peu de RMSE significatives. Seuls quelques endroits dans le Nord-Ouest de la Belgique montrent des valeurs significatives en hiver et en

automne. Quand on refait le même test en doublant l'écart-type, toutes les valeurs du RMSE centré sont classées comme non-significatives.

La corrélation entre les précipitations mensuelles simulées par MAR et les données d'observation de l'IRM sur toute la période se trouve entre 0,75 et 0,85 pour tout le territoire de la Belgique. Comme le RMSE, la corrélation est également un peu plus mieux en hiver et au printemps. En été, la corrélation est nettement moins bonne (0,72 en moyenne).

Les mêmes analyses sont faites pour la température pour la période 1954 – 2021 (voir Figure 8). La température, quant à elle, connaît des erreurs RMSE centrées entre 0,4 et 0,8 °C pour chaque saison. En hiver et au printemps, il y a de légers biais négatifs et en été de légers biais positifs. Cependant, tous les biais et les erreurs RMSE sont non-significatifs (voir Annexe 3) et la corrélation est parfaite.

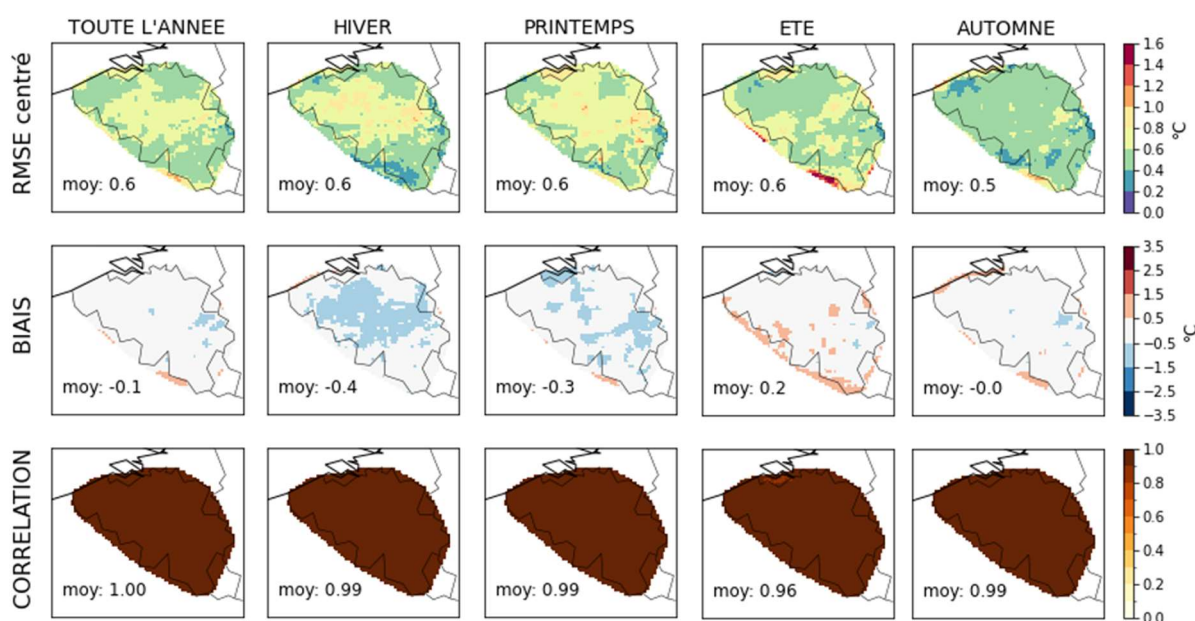


Figure 8 : Comparaison des températures moyennes mensuelles simulées par MAR-ERA5 avec les données d'observation de l'IRM

Le modèle MAR, forcé par les réanalyses ERA5, simule donc très bien les températures et les précipitations mensuelles sauf en hiver, avec une corrélation des précipitations qui est moins bonne.

#### 4.2 Calcul de l'évapotranspiration potentielle

La Figure 9 montre les résultats du calcul de l'évapotranspiration potentielle (ETP) avec la formule de Thornthwaite pour un pixel au centre de la Belgique. La discontinuité est l'effet du

terme correctif utilisé en fonction du mois de l'année. En hiver, les valeurs de l'ETP mensuelle se trouvent entre 0 et 30 mm/mois. La formule de Thornthwaite suppose qu'il n'y a pas d'évapotranspiration si la température est en dessous de 0°C (pour une latitude de 50,70°N). Les valeurs de l'ETP ne dépassent jamais le seuil de 160 mm/mois. En hiver et en automne, l'ETP est légèrement moins sensible aux fluctuations de température qu'au printemps ou en été.

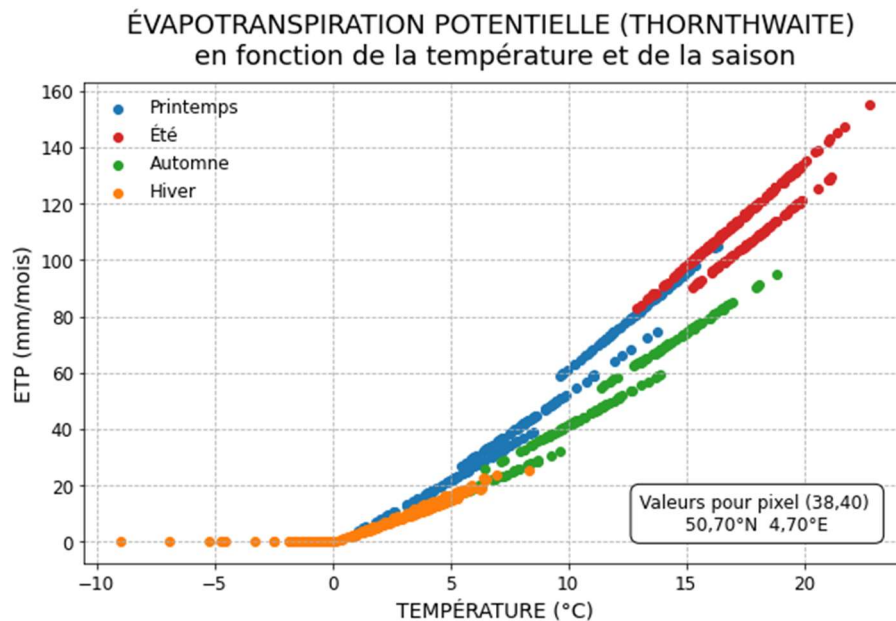


Figure 9 : Les résultats de la formule de Thornthwaite pour le calcul de l'évapotranspiration potentielle en fonction de la température moyenne mensuelle et de la saison pour le pixel (38,40).

Avec les données de température et les valeurs calculées de l'évapotranspiration, toutes les données sont réunies pour pouvoir calculer le PNI, le SPI et le SPEI à différentes échelles. Ces trois indices sont calculés avec les formules expliquées dans la paragraphe 2.3, aux échelles de 1 mois, 3 mois, 6 mois, 9 mois et 12 mois. Ils sont calculés en utilisant les données de sortie du MAR forcé par les réanalyses ERA5.

#### 4.3 Sélection du meilleur indice pour étudier les sécheresses en forêt en Wallonie

Pour avoir une idée de la capacité des indices simulés par MAR-ERA5 à déterminer des sécheresses forestières en Wallonie, ceux-ci ont été comparés avec des données d'observation de teneur en eau du sol pour la période janvier 2015 - décembre 2018.

Des séries temporelles ont été créées pour chaque indice pour le pixel qui représente la station météorologique de Vielsalm. L'Annexe 4 illustre l'ensemble de ces séries temporelles

pour la période 2015 – 2018. Les données de teneur en eau du sol, mesurées par la station ICOS à Vielsalm pour la même période sont représentées dans l'Annexe 1B. Les résultats de la corrélation entre chacun des indices et les valeurs de teneur en eau du sol sont présentés dans le Tableau 2. Pour faciliter l'interprétation de ces résultats, une échelle de couleurs est utilisée (allant du blanc pour des corrélations de 0,20 jusqu'au vert pour des corrélations de 0,75).

Index	Distribution	SWC à 20 cm	SWC à 45 cm	SWC à 90 cm
PNI-1	-	0,30	0,30	0,33
PNI-3	-	0,36	0,38	0,44
PNI-6	-	0,38	0,39	0,38
PNI-9	-	0,45	0,43	0,41
PNI-12	-	0,28	0,28	0,25
SPI-1	Gamma	0,44	0,44	0,45
	Pearson III	0,44	0,45	0,46
SPI-3	Gamma	0,55	0,58	0,63
	Pearson III	0,55	0,59	0,64
SPI-6	Gamma	0,48	0,49	0,49
	Pearson III	0,49	0,50	0,51
SPI-9	Gamma	0,45	0,43	0,41
	Pearson III	0,44	0,43	0,41
SPI-12	Gamma	0,28	0,29	0,25
	Pearson III	0,25	0,26	0,22
SPEI-1	Gamma	0,49	0,50	0,46
	Pearson III	0,48	0,49	0,44
SPEI-3	Gamma	0,73	0,74	0,73
	Pearson III	0,73	0,75	0,73
SPEI-6	Gamma	0,68	0,69	0,70
	Pearson III	0,67	0,68	0,69
SPEI-9	Gamma	0,52	0,51	0,49
	Pearson III	0,52	0,51	0,49
SPEI-12	Gamma	0,36	0,37	0,35
	Pearson III	0,36	0,36	0,35

Tableau 2 : Corrélations entre les différentes versions des indices PNI, SPI et SPEI (simulés par MAR-ERA5) et les observations de teneur en eau du sol (SWC) à différentes profondeurs dans une forêt mature à Vielsalm.

Dans le tableau 2, on peut voir que l'indice PNI n'est pas vraiment capable de fournir des informations sur les sécheresses forestières à Vielsalm, à aucune échelle, vu que les

corrélations se trouvent à chaque fois entre 0,25 et 0,45. L'échelle de 12 mois est la moins adaptée pour les sécheresses en forêt, à la fois pour l'indice PNI, pour l'indice SPI et pour l'indice SPEI. La corrélation entre le SPI et la teneur en eau du sol est la meilleure en utilisant l'échelle de 3 mois. Mais avant tout, on constate que ce sont le SPEI-3 et SPEI-6 qui sont les mieux corrélés à la fois avec la teneur en eau superficielle (à 20 cm), moyenne (à 45 cm) et profonde (à 90 cm).

Les résultats présentés dans le Tableau 2 suggèrent donc que l'indice SPEI-3 est le meilleur indice pour la détermination des sécheresses en forêt. Le fait que les corrélations pour le SPI-3 soient meilleures que celles pour le SPI-6, renforce l'idée de travailler à l'échelle de 3 mois et non pas à l'échelle de 6 mois.

Cependant, ces résultats ne permettent pas de choisir entre la distribution Gamma et la distribution Pearson (Type III). Grâce à l'Annexe 5, on constate que les différences entre les deux distributions sont minimales. Dans la littérature, différentes études se contredisent. Guttman (1999) considère la distribution Pearson Type III comme le meilleur modèle universel, tandis que Lloyd-Hughes & Saunders (2002) et McKee *et al.* (1993) recommandent la distribution Gamma pour respectivement l'Europe et les États-Unis. Stagge *et al.* (2015) ont choisi la distribution Gamma pour le calcul du SPI et la distribution Pearson Type III pour le calcul SPEI, après leurs recherches.

Si on regarde les périodes de sécheresses, se sont surtout les valeurs des sécheresses extrêmes qui sont légèrement différentes, comme pour les sécheresses en 1953, 1959, 2014 et 2018 où la valeur Pearson est en dessous de la valeur Gamma. Sans faire des analyses plus profondes, il est impossible de savoir si on sous-estime les sécheresses extrêmes en utilisant la distribution Pearson ou si on surestime les sécheresses extrêmes en utilisant la distribution Gamma. Pour cette raison, on choisit provisoirement la distribution Gamma, tout en sachant que des analyses plus approfondies seront nécessaires pour pouvoir déterminer quelle distribution avec quels paramètres représente le mieux la distribution réelle des précipitations.

#### **4.4 Analyse de l'indice choisi**

##### **4.4.1 L'évaluation des sécheresses extrêmes**

L'indice choisi pour déterminer les sécheresses forestières en Belgique est donc le SPEI-3, calculé en utilisant la distribution Gamma.



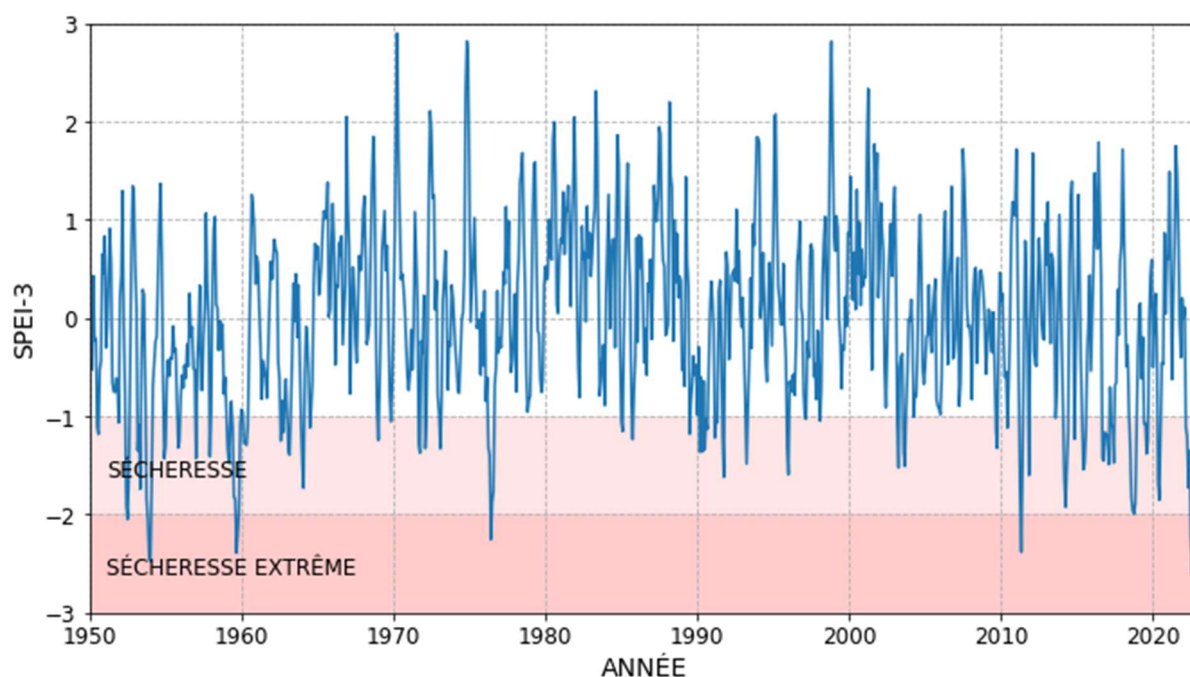


Figure 10 : Série temporelle (1950 – 2022) de l'indice SPEI-3 simulé par MAR-ERA5, valeurs moyennes sur toute la Belgique

La Figure 10 montre l'évolution mensuelle de cet indice, calculé en utilisant les sorties du MAR et moyenné sur toute la Belgique, pour la période 1950 – 2022. Ce qui ressort immédiatement, ce sont les deux périodes reprenant une fréquence plus importante de sécheresses (1950 – 1960 et 2010 – 2022) et les cinq sécheresses extrêmes (en 1954, 1959, 1976, 2011 et 2022).

ANNÉE	Début	Pic	Fin	Durée	Magnitude	Intensité
1954	Octobre 1953	Janvier 1954	Février 1954	5 mois	10,47	2,09
1959	Juin 1959	Septembre 1959	Décembre 1959	7 mois	12,40	1,77
1976	Avril 1976	Juin 1976	Août 1976	5 mois	8,60	1,72
2011	Avril 2011	Mai 2011	Juin 2011	3 mois	5,61	1,87
2022	Mars 2022	Août 2022	Septembre 2022	7 mois	12,04	1,72

Tableau 3 : Caractéristiques des sécheresses les plus extrêmes en Belgique depuis l'année 1950 simulées par MAR-ERA5

Les caractéristiques de ces sécheresses extrêmes (voir paragraphe 2.2.6 et Figure 3) ont été déterminées et sont présentées dans le Tableau 3, la magnitude étant l'indice cumulé et l'intensité étant l'indice moyen sur la période de sécheresse.

En 1954, il s'agissait d'une sécheresse hivernale avec la plus haute intensité. La sécheresse de 1959 a duré de juin jusqu'à décembre et avait la plus haute magnitude. La sécheresse de l'année passée (2022) est comparable à la sécheresse de 1959 en termes de durée, magnitude et intensité. Cela prouve à quel point la sécheresse de 2022 a été exceptionnelle.

Pour chaque sécheresse extrême, deux cartes ont été créées : une carte de magnitude et une carte d'intensité. La Figure 11 montre les cartes pour la sécheresse de 2022. Les régions les plus touchées par cette sécheresse étaient le centre de la Belgique et la côte. Les Hautes-Fagnes étaient en revanche beaucoup moins touchées.

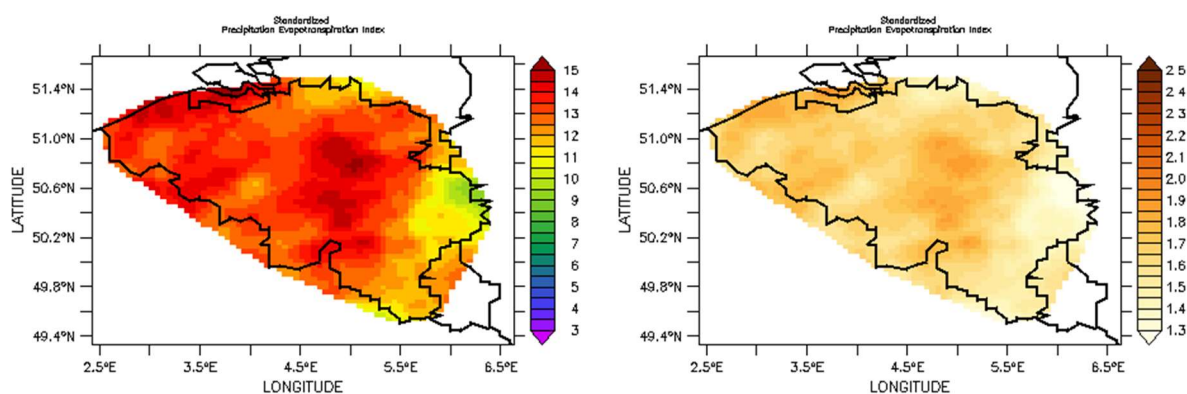


Figure 11 : Magnitude (gauche) et intensité (droite) de la sécheresse de 2022, simulées par MAR-ERA5

Si on compare la Figure 11 avec les cartes de magnitude et d'intensité des quatre autres sécheresses extrêmes (voir Annexe 6), on constate que la distribution de la magnitude et de l'intensité est différente pour chaque sécheresse et qu'il y n'a donc pas de régions qui soient plus souvent touchées que d'autres en cas de sécheresse extrême.

#### 4.4.2 La saisonnalité des sécheresses forestières

L'indice SPEI-3 tient compte des précipitations cumulées pendant les 3 mois précédents, ce qui permet de déterminer les sécheresses par saison. Cette distinction par saison est d'autant plus importante dans le cas des sécheresses forestières au vu de la phénologie des arbres.

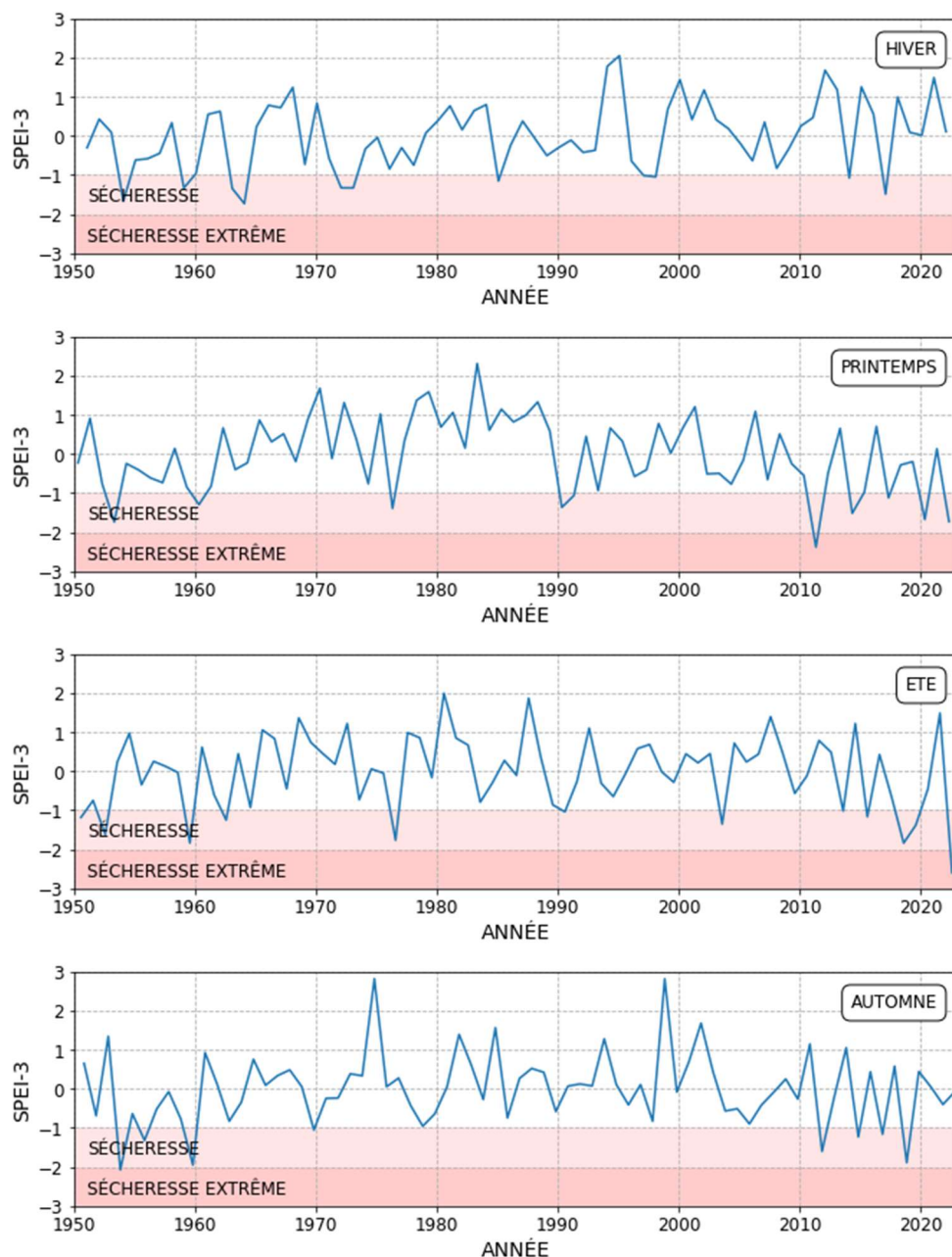


Figure 12 : Evolution du SPEI-3 (Distribution Gamma) simulé par MAR-ERA5, moyenné sur toute la Belgique – pour chaque saison

La Figure 12 montre l'évolution annuelle des sécheresses hivernales, printanières, estivales et automnales, représentées par les valeurs de respectivement les mois de février, mai, août et novembre. Ces graphiques permettent de voir, entre autres, que l'année 1959 a été très sèche durant toutes les saisons, tandis que les années 1963 – 1964 ont connues des sécheresses qu'en hiver.

Il est aussi intéressant de remarquer qu'il n'y a pas eu de sécheresse automnale pendant la période 1970 – 2010. Entre 2010 et 2022 par contre, la Belgique a connu une série de 4 à 5

sécheresses en automne, ainsi qu'en été et en hiver. En revanche, on a eu que deux sécheresses hivernales pendant cette période, dont une très légère.

La Figure 12 permet aussi de constater le contraste entre le printemps et l'été 2022 d'une part (avec respectivement une sécheresse modérée et une sécheresse extrême) et l'hiver et l'automne 2022, d'autre part, avec des valeurs SPEI-3 proche de la normale.

#### 4.4.3 Impact de la température sur les valeurs de l'indice de sécheresse

La procédure pour calculer le SPEI est quasi identique à celle du SPI. La seule différence est la prise en compte de l'évapotranspiration potentielle. Vu que la formule utilisée pour estimer l'évapotranspiration (Thornthwaite) se base uniquement sur des données de température, on peut observer l'impact de la température sur les valeurs du SPEI-3 en calculant la différence entre le SPEI-3 et le SPI-3. La Figure 13 montre l'évolution temporelle de ces biais en Belgique par saison. Des valeurs positives indiquent que la valeur SPEI-3 est plus élevée que la valeur SPI-3 en moyenne sur la Belgique et sur 10 ans. Des valeurs négatives indiquent que la valeur SPEI-3 est plus basse que la valeur SPI-3.

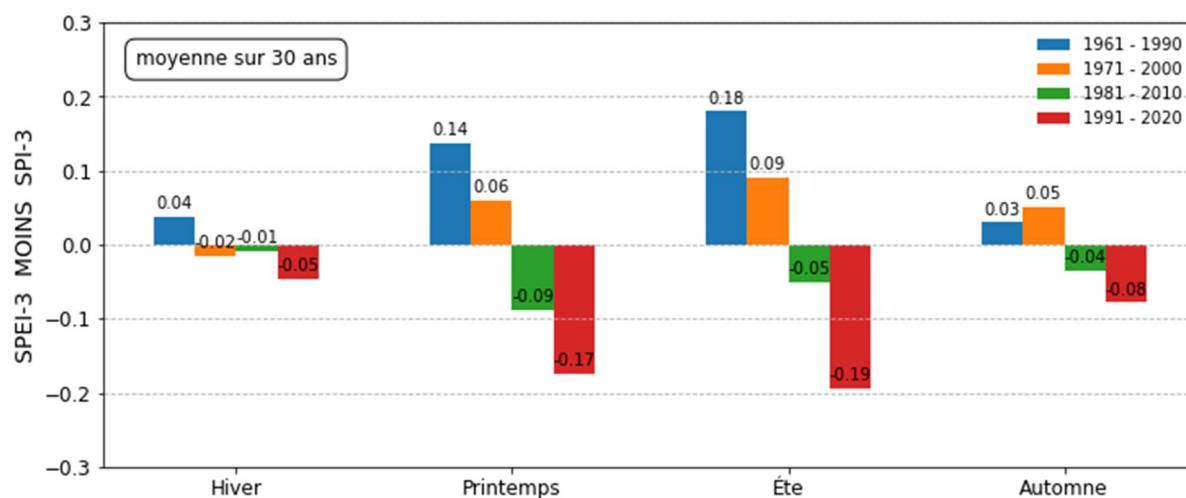


Figure 13 : Evolution des valeurs SPEI-3 simulées par MAR-ERA5 par rapport aux valeurs SPI-3 simulées par MAR-ERA5, en fonction de la saison, moyennée sur 30 ans et sur toute la Belgique

Les indices SPI et SPEI ont tous les deux une distribution normale avec une moyenne égale à zéro, donc la différence entre les deux indices devrait être zéro en moyenne. On constate quand même une nette évolution dans le temps. Pendant la période 1961 – 1990, les valeurs de l'indice SPEI sont en moyenne plus élevées que celle de l'indice SPI. Plus on avance dans le temps, plus les valeurs de l'indice SPEI baissent par rapport aux valeurs de l'indice SPI. Les valeurs SPEI descendent plus rapidement en été et au printemps qu'en hiver et en

automne. On constate une réduction moyenne de 0,31 au printemps et de 0,37 en été entre les périodes 1961 – 1990 et 1991 – 2020. Cette tendance ne peut être due qu'à la température, vu que les valeurs SPEI ont été calculées de la même manière que les valeurs SPI (à la même échelle et en utilisant la même distribution).

Si cette tendance se maintient les prochaines décennies, la diminution des valeurs SPEI sera de plus en plus importante, surtout en été et au printemps. Cela veut dire qu'une valeur de SPEI inférieure à -1 va être atteinte plus vite, ce qui résultera en des périodes de sécheresses plus fréquentes et plus intenses.

## 5. DISCUSSION

Ce dernier chapitre essaie de faire le lien entre les résultats obtenus et l'état de l'art présentés dans les chapitres précédents. Ainsi, sont développés ici les points faibles et forts, l'intérêt dans des zones forestières et l'applicabilité en Wallonie de l'indice de sécheresse retenu. La recherche est évaluée de manière critique et les possibilités d'approfondissement sont discutées.

### 5.1 La pertinence de l'indice retenu

Le SPI est un indice de sécheresse bien documenté et recommandé par l'Organisation Météorologique Mondiale (OMM) et par de nombreux scientifiques. Cet indice peut être calculé à différentes échelles et peut donc être utilisé pour étudier tous types de sécheresses (météorologiques, agricoles et hydrologiques). Son calcul est adaptable aux périodes intéressant l'utilisateur et les valeurs calculées sont aisément comparables dans l'espace et dans le temps. Le SPI a longtemps été très populaire, mais de plus en plus de scientifiques soulignent qu'il faut l'utiliser avec prudence, car il présuppose que l'influence de la température et d'autres variables (telles que le vent) sur l'identification des sécheresses sont négligeables. De ce fait, l'indice retenu pour identifier et caractériser les sécheresses forestières en Belgique est l'indice précipitations – évapotranspiration normalisé (SPEI).

L'indice SPEI a été introduit par Vicente-Serrano *et al.* en 2010. Cet indice a un algorithme de calcul quasiment identique à celui du SPI, mais les valeurs de précipitations sont remplacées par les valeurs du bilan hydrique. De cette manière, les effets de la variabilité de la température sont inclus ce qui permet d'analyser les conséquences du réchauffement climatique sur la fréquence et intensité des sécheresses. Depuis lors, les deux indices ont été comparés dans de nombreuses études dans le monde entier et le SPEI s'avère presque toujours être le meilleur indice, y compris dans le cadre de cette étude.

En plus du choix de l'indice, il faut choisir l'échelle à laquelle il sera calculé. L'échelle la plus performante dépend du contexte dans lequel cet indice sera utilisé. De l'analyse de la corrélation entre les SPEI calculés et les valeurs de teneur en eau du sol est ressorti que l'échelle de calcul de 3 mois est la mieux adaptée pour déterminer les sécheresses en forêt. Comme une saison est une période de trois mois, le choix de travailler à cette échelle permet également d'analyser la saisonnalité des sécheresses. Cela peut donc fournir des informations très utiles, car en fonction de la saison les effets potentiels d'une sécheresse ne sont pas les mêmes. Par exemple, le printemps est une période où les arbres de toutes

essences ont besoin à la fois d'eau et de soleil pour se développer et donc une sécheresse arrivant à cette période aura potentiellement des effets plus dévastateurs qu'une sécheresse hivernale.

L'utilisation de l'indice SPEI implique le calcul de l'évapotranspiration potentielle. Il faut donc aussi choisir la méthode la plus adaptée au contexte, aux données disponibles et à la qualité de ces données. Dans cette étude, la formule de Thornthwaite a été choisie puisqu'elle est fréquemment utilisée dans la littérature, qu'elle nécessite peu de données et qu'elle est simple à calculer.

## **5.2 Réflexions et perspectives**

Il existe d'autres formules plus compliquées qui prennent en compte davantage de variables que la formule de Thornthwaite. Cela peut être à la fois positif et négatif. Positif, car cela permet d'avoir une image plus complète du bilan hydrique. Négatif, car plus le nombre de variables utilisées est important, plus le risque d'introduire des biais est élevé. Après tout, la qualité d'un indicateur ne peut être supérieure à celle des données d'entrée.

Néanmoins, il serait opportun de comparer plusieurs méthodes d'estimation de l'évapotranspiration potentielle et de choisir le meilleur indice en fonction des données d'observation. Une méthode qui a déjà fait ses preuves dans d'autres études est la méthode de Penman-Montheith. Cela vaudrait également la peine de tester la formule de Penman modifiée par Shiau & Davar (1973) qui prend en compte des facteurs tels que l'indice de surface foliaire et la résistance de la canopée. Cela peut être une façon d'intégrer le type de couvert végétal. Les arbres et les forêts, qui ont en général une grande surface foliaire et des racines profondes, ont des taux d'évapotranspiration plus élevés que d'autres types de végétation et la quantité de précipitation arrivant au sol est impactée également. Utiliser un indice de sécheresse qui tient compte du type de couvert végétal apporterait donc une grande valeur ajoutée.

La validation des données de températures et de précipitations a donné des résultats convaincants. Une validation similaire pourrait être faite pour les valeurs de l'évapotranspiration potentielle. Cette variable n'est pas fournie par l'IRM, mais il existe d'autres jeux de données d'observation qui pourraient être utilisés.

Un autre élément crucial dans cette étude est la méthode utilisée pour sélectionner le meilleur indice de sécheresse. Des observations de la teneur en eau du sol par une station

météorologique du réseau ICOS ont été utilisées pour vérifier l'efficacité des indices. Ce choix a été fait parce que la station météorologique utilisée est la seule en Wallonie à être placée au milieu d'une forêt. Malheureusement, seules les observations de 2015 à 2018 ont pu être utilisées. Il y a plusieurs possibilités pour améliorer cette méthode. Le modèle MAR fait aussi des simulations de la teneur en eau du sol. Si la corrélation entre ces données et les observations de la station ICOS est très bonne, on pourrait utiliser les simulations MAR pour calculer les corrélations entre les indices et la teneur en eau du sol. Cela permettrait de calculer la corrélation sur toute la période 1950 – 2022 au lieu de 2015 – 2018. Une deuxième option serait d'essayer d'utiliser une autre variable qui donne des informations sur l'état de sécheresse en forêt, comme le NDVI ou un autre indice de végétation, ou des données satellitaires. Une dernière option serait d'augmenter le nombre de stations en forêt en variant la zone bioclimatique, pédologique et géologique considérée afin d'avoir plus d'observations des données météorologiques au milieu d'une forêt, aux endroits avec différents types de sol et différentes essences.

Pour décrire une sécheresse spécifique, on peut utiliser les caractéristiques décrites dans le paragraphe 2.2.6. Après avoir choisi le SPEI-3, les caractéristiques des sécheresses les plus extrêmes que nous avons connues depuis 1950 ont été calculées. Les sécheresses peuvent avoir des impacts désastreux surtout si elles sont successives et en pleine de végétation. Il pourrait être bien, pour étudier la gravité de sécheresses en forêt, de prendre comme indicateur la magnitude de celles-ci (voir Tableau 3) et de la modifier en ajoutant une pondération en fonction de la saison/mois. Ainsi, un mois d'été sec affectera davantage cet indicateur qu'un mois d'hiver sec.

### **5.3 Que se passera-t-il dans le futur ?**

L'objectif de cette étude était de sélectionner un indice de sécheresse approprié pour identifier des sécheresses forestières en Wallonie. Il s'agit d'une première étape nécessaire afin de pouvoir prédire l'évolution des sécheresses forestières grâce à cet indice dans le futur. Dans les séries temporelles (comme la Figure 12), aucune évolution temporelle claire de l'indice de sécheresses (ni augmentation, ni diminution) n'est visible. Cependant, lorsqu'on regarde l'influence de la prise en compte de la température (comparaison SPI et SPEI), on constate que plus on s'éloigne dans le temps, plus le SPEI est sec par rapport au SPI, surtout en été et au printemps (Figure 13). Comme cette tendance devrait se poursuivre au cours des prochaines décennies, son impact sur les valeurs de SPEI pourrait augmenter. Cela correspond aux résultats du projet ClimSec en France, qui prévoient une augmentation des sécheresses estivales à partir de 2050.





## 6. CONCLUSION

Ce mémoire avait pour ambition d'analyser plusieurs indicateurs de sécheresse atmosphérique – leurs points forts, leurs points faibles, leur intérêt dans des zones forestières et leur applicabilité en Wallonie.

Dans un premier temps, les données utilisées du modèle climatique MAR ont été validées. Il s'agissait des données mensuelles de précipitation et de température entre 1950 et 2022. La comparaison avec les données d'observation de l'IRM a montré que le modèle MAR, forcé par les réanalyses ERA5, simule très bien les températures et les précipitations mensuelles en Belgique sauf en hiver, avec une corrélation des précipitations qui est moins bonne.

Trois indices ont été comparés à 5 différentes échelles et en utilisant 2 distributions différentes. Pour avoir une idée de la capacité de ces indices à déterminer des sécheresses forestières en Wallonie, ceux-ci ont été comparés avec des données d'observation de teneur en eau du sol à trois différentes profondeurs pour la période 2015 - 2018, mesurées par la station météorologique au milieu d'une forêt mature. De l'analyse de la corrélation entre les indices calculés et les valeurs de teneur en eau du sol est ressorti que l'indice précipitations – évapotranspiration normalisé (SPEI) à une échelle de 3 mois est le mieux adapté pour déterminer les sécheresses en forêt en Wallonie.

Cet indice – nommé SPEI-3 – utilise des données d'évapotranspiration potentielle en plus des données de précipitation ce qui permet d'analyser les conséquences du réchauffement climatique sur la fréquence et intensité des sécheresses. Il tient compte des précipitations cumulées pendant les 3 mois précédents, ce qui permet de déterminer les sécheresses par saison. Cette distinction par saison est d'autant plus importante dans le cas des sécheresses forestières au vu de la phénologie des arbres.

Pour adapter davantage cet indice aux sécheresses forestières en Wallonie, il serait opportun de comparer plusieurs méthodes d'estimation de l'évapotranspiration potentielle. En outre, la méthode utilisée pour sélectionner le meilleur indice de sécheresse peut encore être améliorée. en utilisant plus de données ou plus de variables qui donnent des informations sur l'état de sécheresse en forêt. Pour ce faire, il faudrait installer davantage de stations météorologiques dans les forêts.

L'ambition de ce mémoire se limite à trouver un indice approprié pour identifier les sécheresses forestières en Wallonie. Maintenant que ce travail est fait, l'évolution future de

cet indice pourra être simulée à l'aide des différents modèles globaux de la base de données CMIP6 (Eyring *et al.*, 2016) et selon différents scénarios du GIEC (Riahi *et al.*, 2017). Cependant, cette étude a déjà montré que l'augmentation des températures a déjà un impact sur l'indice de sécheresse et que les périodes de sécheresses ont tendance à devenir plus fréquentes et plus intenses, surtout en été et au printemps.

## 7. RÉFÉRENCES

### 7.1 Articles scientifiques

- Agnew, C. T. (2000). Using the SPI to identify drought.
- Angelidis, P., Maris, F., Kotsovinos, N. & Hrisanthou, V. (2012). Computation of drought index SPI with alternative distribution functions. *Water resources management*, 26(9), 2453-2473. <https://doi.org/10.1007/s11269-012-0026-0>.
- Böhnisch, A., Mittermeier, M., Leduc, M. & Ludwig, R. (2021). Hot Spots and Climate Trends of Meteorological Droughts in Europe—Assessing the Percent of Normal Index in a Single-Model Initial-Condition Large Ensemble. *Frontiers in Water*, 3, 716621. <https://doi.org/10.3389/frwa.2021.716621>.
- Bultot, F. & Dupriez, G. L. (1973). L'évaporation d'un bac d'eau libre – Sa signification restreinte. *Journal of Hydrology*, 20(1), 83-95.
- Caloiero, T., Veltri, S., Caloiero, P. & Frustaci, F. (2018). Drought analysis in Europe and in the Mediterranean basin using the standardized precipitation index. *Water*, 10(8), 1043. <https://doi.org/10.3390/w10081043>.
- Cochard, H. H., Badel, E., Herbette, S., Barigah, T. S., Souchal, R. & Conchon, P. (2016). L'embolie et la vulnérabilité des arbres à la sécheresse. In *Journées Portes Ouvertes INRA Crouel* (pp. 1-p).
- Cook, B. I. (2019). *Drought: An interdisciplinary perspective*. New York: Columbia University Press, 215 p.
- Cunha, A. P. M., Zeri, M., Deusdará Leal, K., Costa, L., Cuartas, L. A., Marengo, J. A. & Ribeiro-Neto, G. (2019). Extreme drought events over Brazil from 2011 to 2019. *Atmosphere*, 10(11), 642. <https://doi.org/10.3390/atmos10110642>.
- Doutreloup, S., Bois, B., Pohl, B., Zito, S. & Richard, Y. (2022). Climatic comparison between Belgium, Champagne, Alsace, Jura and Bourgogne for wine production using the regional model MAR. *Oeno One*. <https://oeno-one.eu/article/view/5356>.
- Edossa, D. C., Babel, M. S. & Das Gupta, A. (2010). Drought analysis in the Awash river basin, Ethiopia. *Water resources management*, 24, 1441-1460. <https://doi.org/10.1007/s11269-009-9508-0>.

- Eklund, L. & Seaquist, J. (2015). Meteorological, agricultural and socioeconomic drought in the Duhok Governorate, Iraqi Kurdistan. *Natural Hazards*, 76(1), 421-441. <https://doi.org/10.1007/s11069-014-1504-x>.
- Eyring, V., Bony, S., Meehl, G. A., Senior, C. A., Stevens, B., Stouffer, R. J. & Taylor, K. E. (2016). Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization. *Geoscientific Model Development*, 9(5), 1937-1958. <https://doi.org/10.5194/gmd-9-1937-2016>.
- Guttman, N. B. (1999). Accepting the standardized precipitation index: a calculation algorithm 1. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 35(2), 311-322. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.1999.tb03592.x>.
- Guyot, G. (1999). Climatologie de l'environnement. 2 ème Edition Dunot. Paris, 525p.
- Hayes, M. J., Alvord, C. & Lowrey, J. (2002). *Drought indices*. National drought mitigation center, University of Nebraska.
- IPCC (2007). *Climate Change 2007: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Core Writing Team, Pachauri, R.K and Reisinger, A. (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 104 pp.
- IPCC (2014). *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Core Writing Team, Pachauri R.K. and Meyer L.A. (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp.
- IRM (2020). *Rapport climatique 2020 : de l'information aux services climatiques*. Issue Publication scientifique et technique, IRM. [https://www.meteo.be/resources/misc/climate\\_report/RapportClimatique-2020.pdf](https://www.meteo.be/resources/misc/climate_report/RapportClimatique-2020.pdf).
- Karl, T. R. (1986). The sensitivity of the Palmer Drought Severity Index and Palmer's Z-index to their calibration coefficients including potential evapotranspiration. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 77-86.
- Kittel, C. (2021). *Present and future sensitivity of the Antarctic surface mass balance to oceanic and atmospheric forcings: insights with the regional climate model MAR*. Thèse de doctorat, Liège, Université de Liège, inédit, 268 p. <https://hdl.handle.net/2268/258491>.

- Klein, T. (2009). Comparaison des sécheresses estivales de 1976 et 2003 en Europe occidentale à l'aide d'indices climatiques. *Bulletin de la Société géographique de Liège*, 53, 75-86. <https://popups.uliege.be/0770-7576/index.php?file=1&id=1100>.
- Latte, N. (2017). *Comment le changement climatique influence-t-il la croissance du hêtre (Fagus sylvatica L.) le long du gradient bioclimatique de la Belgique ? Une approche dendroécologique*. Thèse de doctorat, Liège, Université de Liège, inédit, 131 p. <https://hdl.handle.net/2268/206659>.
- Lebourgeois, F. F. & Piedallu, C. C. (2005). Appréhender le niveau de sécheresse dans le cadre des études stationnelles et de la gestion forestière à partir d'indices bioclimatiques. *Revue forestière française*, 57(4), 331-356. <https://hal.science/hal-03449488/document>.
- Linares, J. C. & Camarero J. J. (2011). From pattern to process: linking intrinsic water-use efficiency to drought-induced forest decline. *Global Change Biology* 18: 1000-1015. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2011.02566.x>.
- Liu, X., Zhu, X., Pan, Y., Li, S., Liu, Y. & Ma, Y. (2016). Agricultural drought monitoring: Progress, challenges, and prospects. *Journal of Geographical Sciences*, 26(6), 750-767. <https://doi.org/10.1007/s11442-016-1297-9>.
- Lloyd-Hughes, B. & Saunders, M. A. (2002). A drought climatology for Europe. *International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society*, 22(13), 1571-1592. <https://doi.org/10.1002/joc.846>.
- McKee, T. B., Doesken, N. J. & Kleist, J. (1993). The relationship of drought frequency and duration to time scales. In *Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology* (Vol. 17, No. 22, pp. 179-183).
- Riahi, K., Van Vuuren, D. P., Kriegler, E., Edmonds, J., O'Neill, B. C., Fujimori, S. & Tavoni, M. (2017). The Shared Socioeconomic Pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: An overview. *Global environmental change*, 42, 153-168. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2016.05.009>.
- Rolbiecki, R., Yücel, A., Kocięcka, J., Atilgan, A., Marković, M. & Liberacki, D. (2022). Analysis of SPI as a drought indicator during the maize growing period in the cukurova region (Turkey). *Sustainability*, 14(6), 3697. <https://doi.org/10.3390/su14063697>.

- Shiau, S. Y. & Davar, K. S. (1973). Modified Penman method for potential evapotranspiration from forest regions. *Journal of Hydrology*, 18(3-4), 349-365. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(73\)90057-7](https://doi.org/10.1016/0022-1694(73)90057-7).
- Soubeyroux, J. M., Kitova, N., Blanchard, M., Vidal, J. P., Martin, E. & Dandin, P. (2012). Caractérisation des sécheresses des sols en France et changement climatique: Résultats et applications du projet ClimSec. *La Météorologie*, 78, p-21. <https://doi.org/10.4267/2042/47512>.
- Soubeyroux, J. M., Vidal, J. P., Najac, J., Kitova, N., Blanchard, M., Dandin, P. & Habets, F. (2011). *Projet ClimSec. Impact du changement climatique en France sur la sécheresse et l'eau du sol. Rapport final*. Irstea, 72 p. <https://hal.inrae.fr/hal-02595492>.
- Stagge, J. H., Tallaksen, L. M., Gudmundsson, L., Van Loon, A. F. & Stahl, K. (2015). Candidate distributions for climatological drought indices (SPI and SPEI). *International Journal of Climatology*, 35(13), 4027-4040. <https://doi.org/10.1002/joc.4267>.
- Subramanian, N., Nilsson, U., Mossberg, M. & Bergh, J. (2019). Impacts of climate change, weather extremes and alternative strategies in managed forests. *Ecoscience*, 26(1), 53-70. <https://doi.org/10.1080/11956860.2018.1515597>.
- Thibaut, K. (2020). *Les sécheresses en Belgique (Wallonie): analyse d'un épisode récent (2018) et perception du phénomène dans le cadre du système de planification d'urgence et de gestion de crise*. Mémoire de Master de spécialisation en gestion des risques et des catastrophes, Liège, Université de Liège, inédit, 93 p. <http://hdl.handle.net/2268.2/11265>.
- Thibaut, K. & Ozer, P. (2021). Les sécheresses en Wallonie, un nouveau défi du changement climatique? Quelques pistes pour améliorer la gestion de ce phénomène. *Geo-Eco-Trop: Revue Internationale de Géologie, de Géographie et d'Écologie Tropicales*, 45(3). <https://hdl.handle.net/2268/266096>.
- Vacek, Z., Vacek, S., Prokúpková, A., Bulušek, D., Podrázský, V., Hůnová, I. & Král, J. (2020). Long-term effect of climate and air pollution on health status and growth of *Picea abies* (L.) Karst. peaty forests in the Black Triangle region. *Dendrobiology*, 83. <http://dx.doi.org/10.12657/denbio.083.001>.

- van der Schrier, G., Jones, P. D. & Briffa, K. R. (2011), The sensitivity of the PDSI to the Thornthwaite and Penman-Monteith parameterizations for potential evapotranspiration, *J. Geophys. Res.*, 116, D03106. <https://doi.org/10.1029/2010JD015001>.
- Vanwijnsberghe, S. (2022). 2022, année exceptionnelle ? L'impact des sécheresses sur la forêt. *Forêt.Nature*, 165, 40-52.
- Vicente-Serrano, S. M., Beguería, S. & López-Moreno, J. I. (2010). A multiscalar drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration index. *Journal of climate*, 23(7), 1696-1718. <https://doi.org/10.1175/2009JCLI2909.1>.
- Williams, A. P., Xu, C. & McDowell, N. G. (2011). Who is the new sheriff in town regulating boreal forest growth?. *Environmental Research Letters*, 6(4), 041004. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/6/4/041004>.
- Zamani, S., Gobin, A., Van de Vyver, H. & Gerlo, J. (2016). Atmospheric drought in Belgium—statistical analysis of precipitation deficit. *International Journal of Climatology*, 36(8), 3056-3071. <https://doi.org/10.1002/joc.4536>.
- Zargar, A., Sadiq, R., Naser, B. & Khan, F. I. (2011). A review of drought indices. *Environmental Reviews*, 19(NA), 333-349. <https://doi.org/10.1139/a11-013>.

## 7.2 Ressources Internet

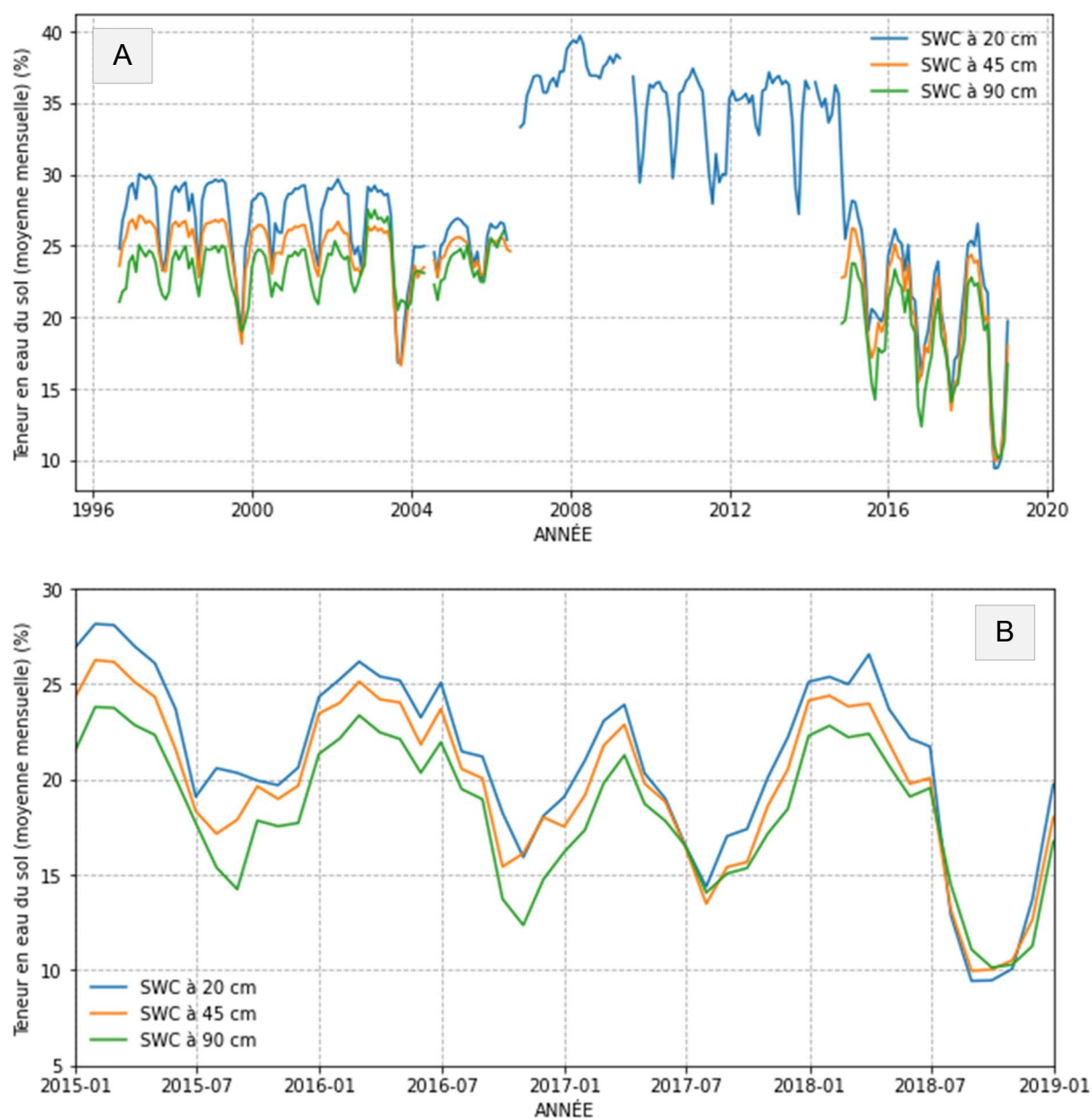
- Anonyme (s.d.). *Gamma distribution*. [https://en.wikipedia.org/wiki/Gamma\\_distribution](https://en.wikipedia.org/wiki/Gamma_distribution). Consulté le 2 juin 2023.
- Beguiría, S., Latorre, B., Reig, F. & Vicente-Serrano, S. M. (s.d.). *Drought monitoring and analysis based on climatic indices*. <https://spei.csic.es/home.html>. Consulté le 20 octobre 2022.
- Centre Wallon De Recherches Agronomiques (s.d.). *Réseau Pameseb*. <https://app.pameseb.be/en/reseau-pameseb/>. Consulté le 12 juin 2023.
- Copernicus Climate Change Service (s.d.). *ERA5 hourly data on single levels from 1940 to present*. <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/reanalysis-era5-single-levels>. Consulté le 2 juin 2023.
- ICOS (s.d.). *Vielsalm*. [https://meta.icos-cp.eu/resources/stations/ES\\_BE-Vie](https://meta.icos-cp.eu/resources/stations/ES_BE-Vie). Consulté le 3 juin 2023.



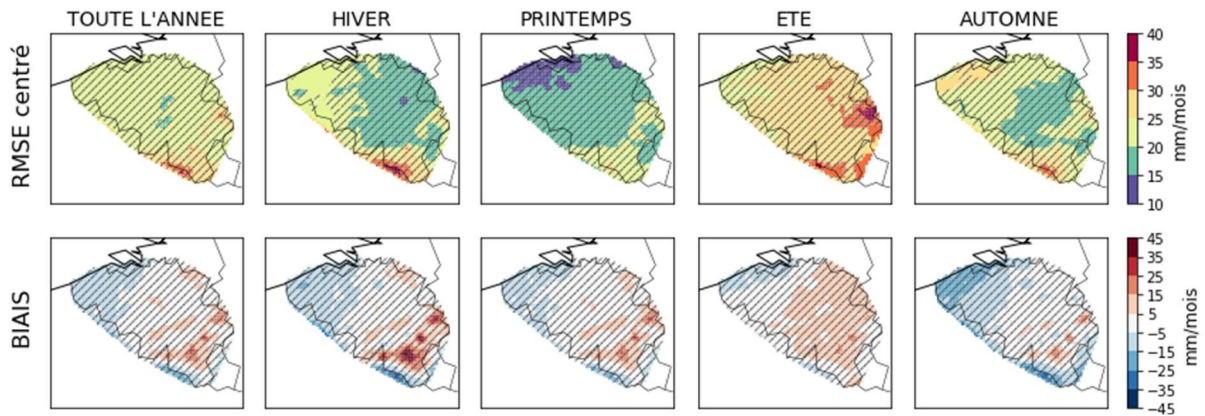
- Institut Royal Météorologique (s.d.). *Réseaux d'observation*. <https://www.meteo.be/fr/a-propos-irm/reseau-d-observation>. Consulté le 20 octobre 2022.
- Institut Royal Météorologique (s.d.). *Sécheresse actuelle en Belgique*. <https://www.meteo.be/fr/meteo/previsions/secheresse>. Consulté le 12 décembre 2022.
- Observatoire Wallon de la Santé des Forêts (2022). *La News de l'OWSF*. <http://owsf.environnement.wallonie.be/fr/27-10-2022-owsf-news-septembre-octobre-2022.html?IDC=5792&IDD=6861>. Consulté le 12 décembre 2022.
- Portail de l'agriculture wallonne (2023). *Calamités agricoles : informations générales*. <https://agriculture.wallonie.be/calamites-agricoles>. Consulté le 26 mai 2023.
- Saylor (s.d.). 5.2 *The Standard Normal Distribution*. [https://saylordotorg.github.io/text\\_introductory-statistics/s09-02-the-standard-normal-distributi.html](https://saylordotorg.github.io/text_introductory-statistics/s09-02-the-standard-normal-distributi.html). Consulté le 2 juin 2023.
- Service Public de Wallonie (2022). *FAQ Sécheresse*. <https://www.wallonie.be/fr/faq-secheresse>. Consulté le 10 décembre 2022.
- Université de Liège (s.d.). *La station de Vielsalm labellisée station « Ecosystème » du réseau ICOS*. [https://www.gembloux.uliege.be/cms/c\\_6455636/fr/la-station-de-vielsalm-labellisee-station-ecosysteme-du-reseau-icos](https://www.gembloux.uliege.be/cms/c_6455636/fr/la-station-de-vielsalm-labellisee-station-ecosysteme-du-reseau-icos). Consulté le 13 décembre 2022.

## 8. ANNEXES

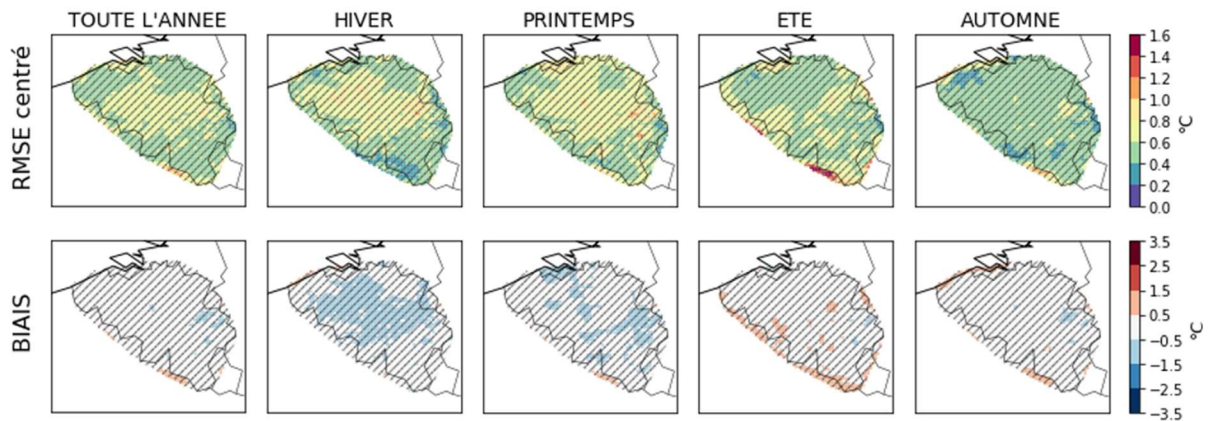
### Observations de la teneur en eau du sol à Vielsalm (ICOS BE-Vie)



**Annexe 1.** A) Série temporelle de 1996 à 2020 de la teneur en eau (SWC) à différentes profondeurs, mesurée à la station météorologique ICOS à Vielsalm (BE-Vie), B) zoom sur la période 2015 – 2018

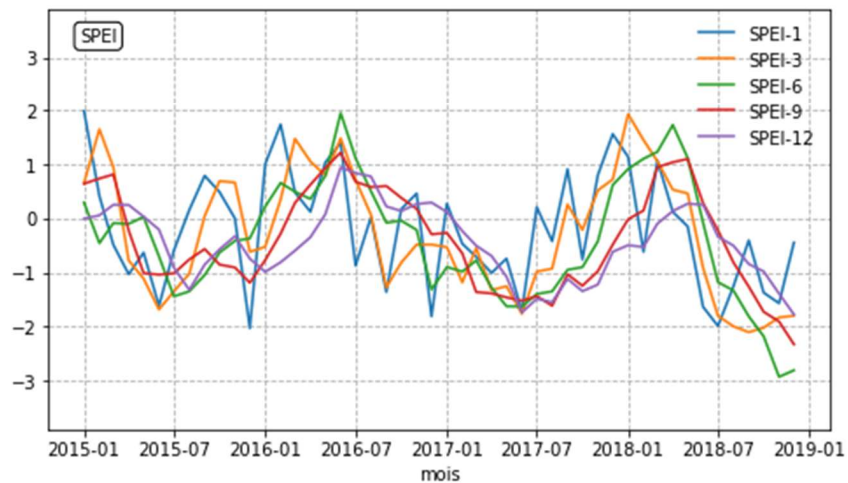
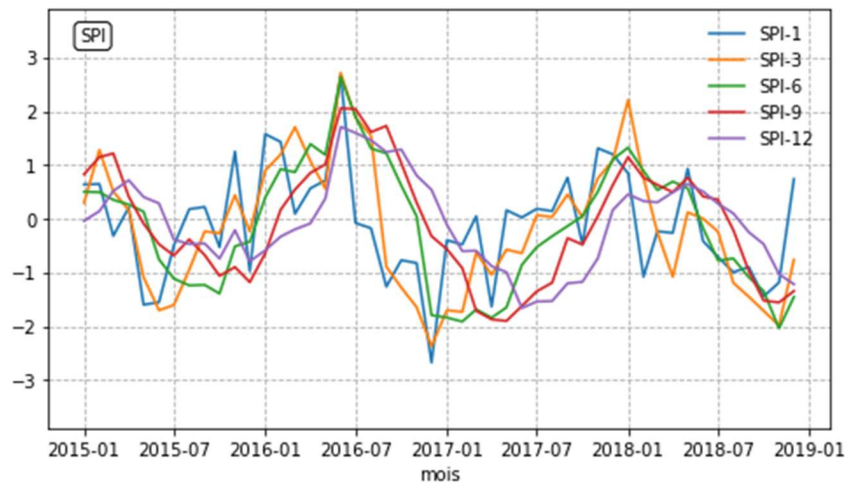
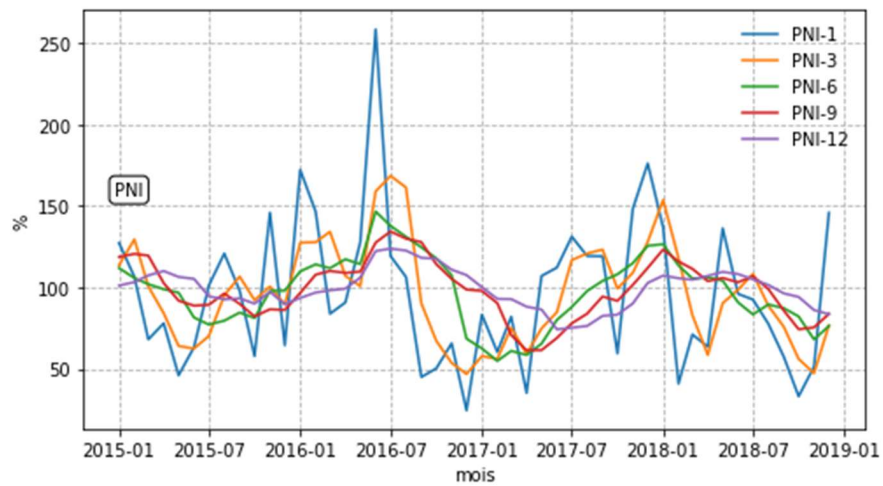


**Annexe 2.** Validation des données de précipitations de MAR - ERA5 par les données d'observation de l'IRM, les résultats non-significatifs (par rapport à l'écart-type) sont hachurés



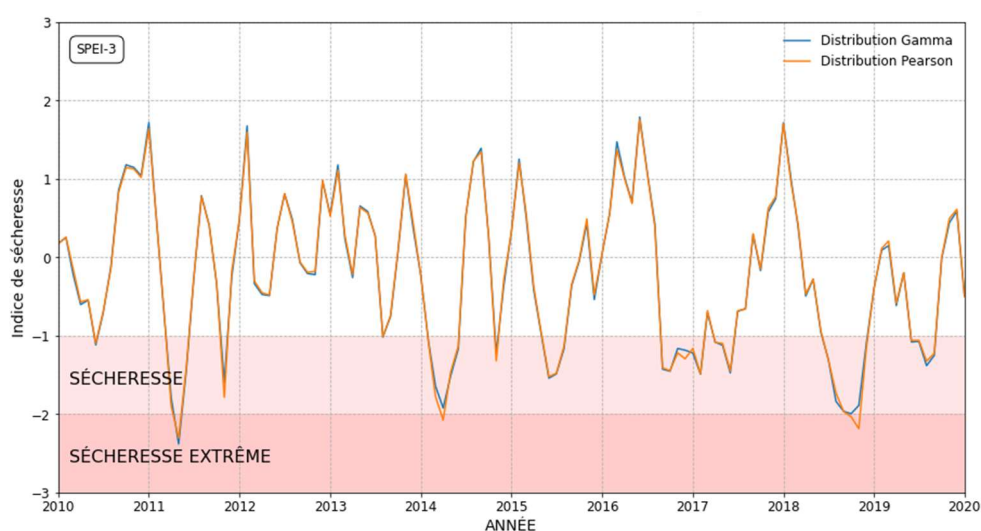
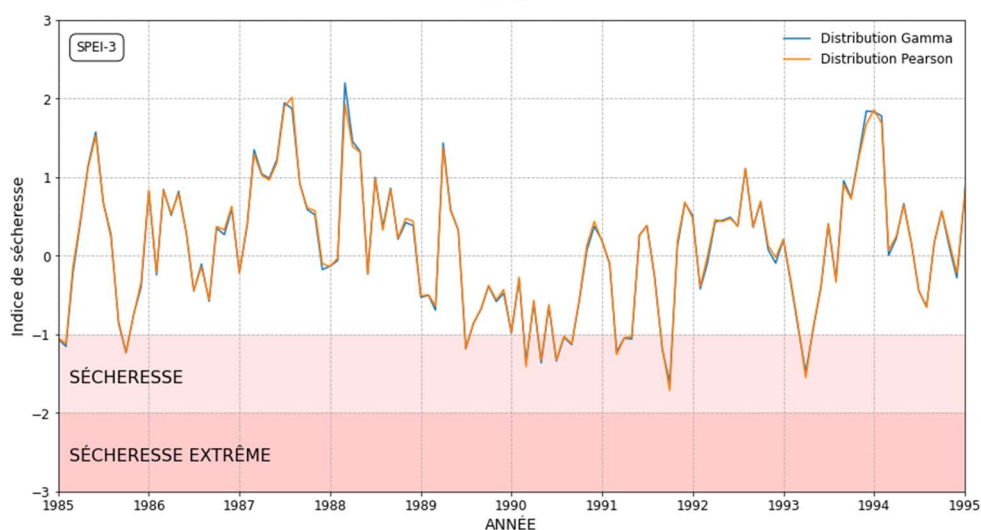
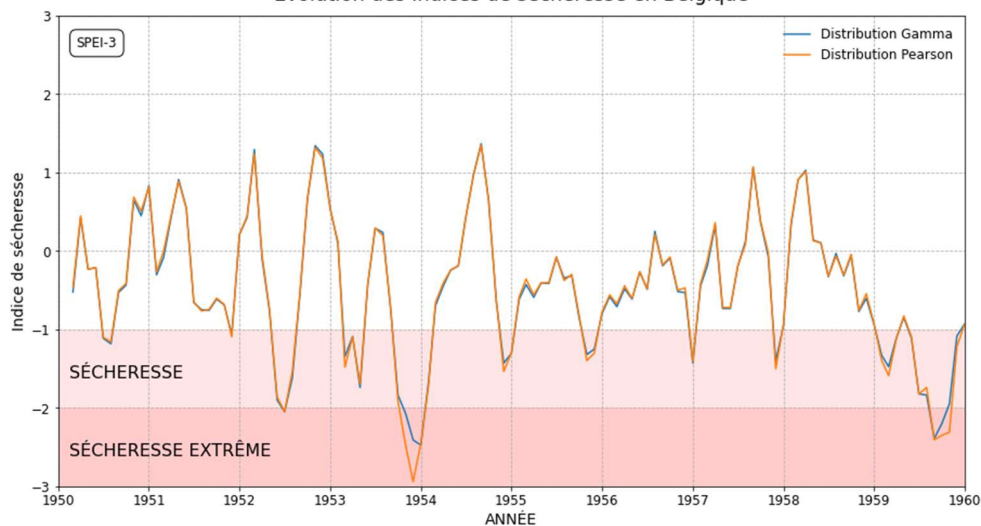
**Annexe 3.** Validation des données de température de MAR - ERA5 par les données d'observation de l'IRM, les résultats non-significatifs (par rapport à l'écart-type) sont hachurés

## VIELSALM - Indices de sécheresse (2015 - 2019)



**Annexe 4.** Séries temporelles des indices PNI, SPI et SPEI à différentes échelles à Vielsalm simulés par MAR-ERA5

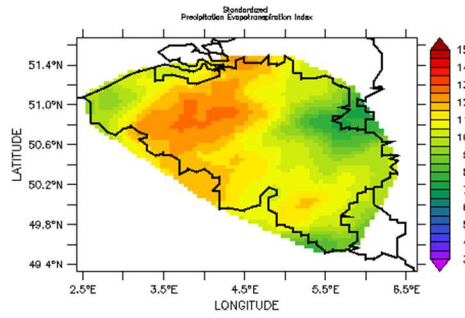
### Évolution des indices de sécheresse en Belgique



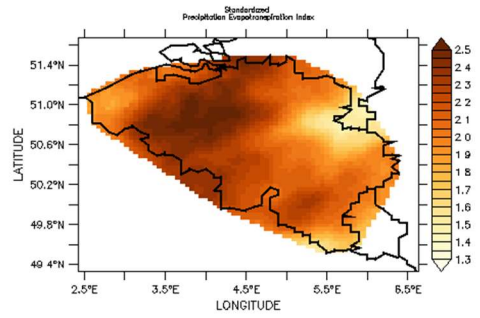
**Annexe 5.** Série temporelle de l'indice SPEI-3 simulé par MAR-ERA5, moyenné sur toute la Belgique, comparaison entre les distributions Gamma et Pearson (Type III) pour trois différentes périodes : 1950 – 1960, 1985 – 1995 et 2010 – 2020

oct  
1953  
–  
février  
1954

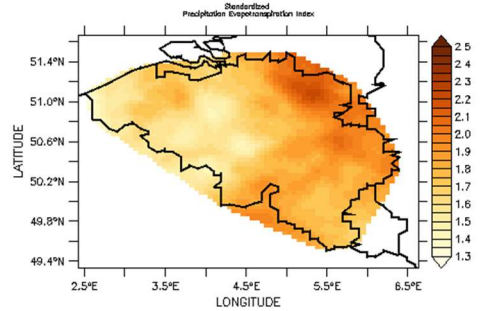
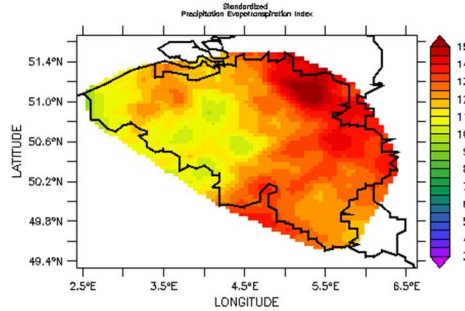
### MAGNITUDE



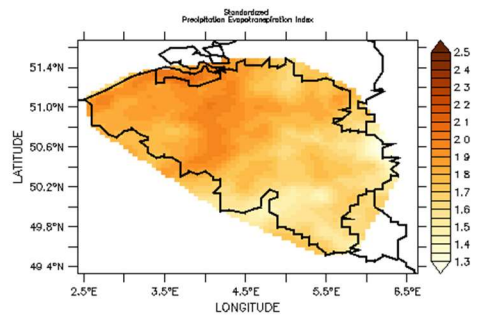
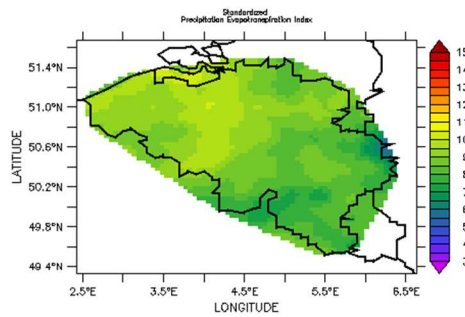
### INTENSITÉ



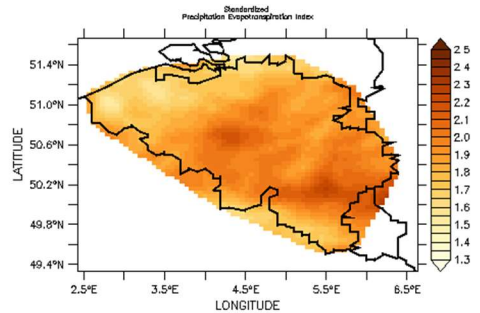
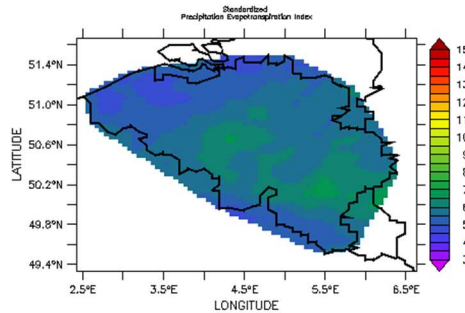
juin – déc  
1959



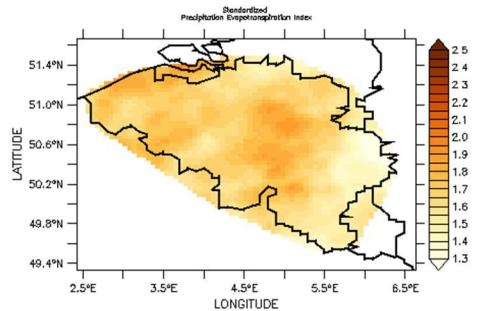
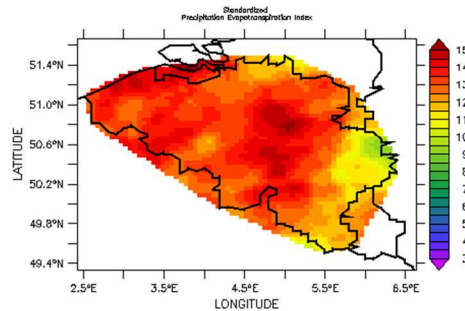
avril – août  
1976



avril – juin  
2011



mars – sept  
2022



**Annexe 6.** Magnitude (gauche) et intensité (droite) des sécheresses extrêmes en 1954, 1959, 1976, 2011 et 2022, simulées par MAR-ERA5