



HAL
open science

Caractérisation de l'impact des sécheresses sur la nappe d'Alsace à l'aide du SPI et du SGI (Années 1950-2020)

Antonin Dalbepierre

► **To cite this version:**

Antonin Dalbepierre. Caractérisation de l'impact des sécheresses sur la nappe d'Alsace à l'aide du SPI et du SGI (Années 1950-2020). Sciences de l'ingénieur [physics]. 2021. dumas-03602322

HAL Id: dumas-03602322

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-03602322v1>

Submitted on 9 Mar 2022

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Diplôme d'Ingénieur de l'ENGEES

—

Master 2 Géographie, Aménagement, Environnement et Développement

Parcours : Fonctionnement et Gestion des Environnements Ruraux et Naturels

Caractérisation de l'impact des sécheresses sur la nappe d'Alsace à l'aide du SPI et du SGI (Années 1950 – 2020)

par
Antonin DALBÉPIERRE

Encadrement :
Agnès Labarchède
Carmen de Jong

Mémoire présenté le 30 juin 2021 devant un jury composé de :

Dominique Schwartz, Professeur des universités
Carmen de Jong, Professeure des universités
Jean-Nicols Beisel, Professeur des universités

Année universitaire 2020-2021

Avant-Propos et Remerciements

Ce mémoire de fin d'études est le fruit d'un travail effectué du 1^{er} février au 25 juin 2021 au sein du Laboratoire Image, Ville, Environnement (LIVE) à Strasbourg dans le Bas-Rhin. C'est un laboratoire de recherche pluridisciplinaire au carrefour des sciences humaines et sociales et des géosciences. 80 personnes réunies dans cette Unité Mixte de Recherche du CNRS et de l'Université de Strasbourg (UMR 7362) sont réparties en 5 groupes de recherche. Ce stage a été réalisé au sein du groupe hydrosystèmes dont le but est d'étudier les hydrosystèmes de manière pluridisciplinaire dans une perspective opérationnelle.

Je souhaite remercier mes encadrantes au LIVE Agnès Labarchède et Carmen de Jong pour leur accueil, leur aide et leurs conseils dans la réalisation de ce travail. Merci à Jean-Nicolas Beisel de m'avoir suivi en tant que professeur encadrant pour l'ENGEES.

Je tenais aussi à remercier les camarades de la salle des Master du LIVE pour l'entraide et les moments de détente.

Un merci à mes amis et ma famille pour leur soutien. Un message particulier à Juliette, Justine et Quentin pour avoir su m'épauler dans mes nombreux moments de doute.

Enfin, je remercie vraiment tous ces anonymes d'internet sans qui je serais sûrement toujours bloqué sur les messages d'erreurs de mon script Python.

Résumé

Impacts des sécheresses sur la nappe d'Alsace à l'aide du SPI et du SGI (Années 1950-2020)

Depuis 2015, des étés relativement chauds et secs se succèdent en Europe. L'année 2018 a d'ailleurs battu des records de chaleurs, dépassant les températures de 2003 (Severe Weather Europe, 2018). Plus particulièrement en Alsace, des assèchements de cours d'eau dits « phréatiques » ont été observés. Ce sont des cours d'eau principalement alimentés par la nappe de la plaine d'Alsace. Au vu de ce contexte, il est pertinent de s'intéresser aux impacts des sécheresses sur la nappe d'Alsace. Il existe différents types de sécheresses qui n'affectent pas les mêmes entités. Les sécheresses hydrogéologiques et les sécheresses météorologiques sont étudiées ici. Ces dernières sont généralement à l'origine de tous les autres types de sécheresses. Pour étudier ces sécheresses, deux indices ont été utilisés. Le premier est le *Standardized Precipitation Index* (SPI) développé par McKee *et al.* (1993). C'est un indice standardisé qui utilise les données de précipitation pour quantifier le déficit ou le surplus de précipitation. Le second est le *Standardized Groundwater level Index* (SGI) développé par Bloomfield et Marchant (2013), un autre indice standardisé qui se base sur les données piézométriques pour étudier les sécheresses hydrogéologiques.

Le but est alors d'étudier l'évolution de ces indices entre les années 1950 et 2020, de les corrélérer pour tenter d'observer le lien entre ces deux types de sécheresses et d'observer si le signal du changement climatique est visible. Au final, le SPI est une bonne première approche pour observer les sécheresses météorologiques mais son utilisation est limitée. Les résultats de corrélation entre les deux indices montrent que les précipitations seules n'expliquent pas les sécheresses hydrogéologiques. D'autres facteurs comme la température, les relations avec le réseau hydrographique ou les prélèvements pourraient avoir un impact sur la vulnérabilité de la nappe face aux sécheresses.

Abstract

Impacts of droughts on the Alsace aquifer using the SPI and SGI (1950s-2020s)

Since 2015, particularly hot and dry summers occurred in Europe. 2018 broke records with temperatures exceeding 2003 record (Severe Weather Europe, 2018). In the Alsatian region in France, dryness of phreatic rivers has been observed. The water of these rivers mainly comes from the aquifer. Thus, it seems relevant to study the impacts of droughts on the Alsatian aquifer. There are different types of droughts, they do not affect the same entities. Here are studied hydrogeological and meteorological droughts. The latter generally initiate the other types of droughts. To study these droughts, two indexes have been used. The first one is the Standardized Precipitation Index (SPI) created by McKee et al. (1993). It uses precipitation data to quantify precipitation deficit or surplus. The second one is the Standardized Groundwater level Index (SGI) created by Bloomfield and Marchant (2013), which uses piezometric data to quantify hydrogeological droughts.

The aim of the study is to study the evolution of these indexes over the period 1950-2020, to correlate the indexes in order to observe the relation between the two types of droughts and to observe if climate change is visible.

The SPI is a good approach to take a look at meteorological droughts, but it quickly shows its limits. The SGI seems to be a good index to study hydrogeological droughts. The results of correlation between SPI and SGI are mixed. The hydrographic network and pumping seem to have a huge impact on the vulnerability to droughts of the Alsatian aquifer.

Table des matières

<i>Avant-Propos et Remerciements</i>	<i>i</i>
<i>Résumé</i>	<i>ii</i>
<i>Abstract</i>	<i>iii</i>
<i>Table des matières</i>	<i>1</i>
<i>Table des figures</i>	<i>3</i>
<i>Table des tableaux</i>	<i>4</i>
<i>Sigles et Acronymes</i>	<i>4</i>
<i>Introduction</i>	<i>5</i>
Objectif	6
1. Contexte de l'étude : Changement climatique et sécheresses	7
1.1. Changement Climatique	7
1.2. Interactions Nappe-Rivière	8
1.3. Notion de sécheresse	9
1.4. Caractérisation des sécheresses	11
2. Site d'étude	15
2.1. Généralités	15
2.2. Climat	15
2.3. Géologie	16
2.4. Hydrologie	17
2.5. Bilan hydrologique	19
2.6. Le SAGE III-Nappe-Rhin	20
3. Méthodologie	23
3.1. Données utilisées	23
3.1.1. Données météorologiques	23
3.1.2. Données piézométriques	24
3.1.2.1. <i>Provenance des données</i>	24
3.1.2.2. <i>Justification du choix des piézomètres</i>	24
3.2. Indices utilisés	28
3.2.1. Le SPI	28
3.2.1.1. <i>Calcul du SPI</i>	28
3.2.1.3. <i>Visualisation du SPI</i>	32
3.2.2. Le SGI	34
3.2.3. Observation de l'évolution des indices	36
3.2.3.1. <i>Moyenne mobile</i>	36
3.2.3.2. <i>Régression linéaire simple</i>	36
3.2.4. Observation des relations entre les sites	37
3.2.5. Corrélation entre le SPI et le SGI	37

4. Résultats et discussion	39
4.1. Le SPI	39
4.1.1. Évolution temporelle du SPI.....	39
4.1.2. Pente des tendances sur les 30 et 5 dernières années.....	41
4.1.3. Corrélations spatiales du SPI	45
4.1.4. Limites du SPI	47
4.2. Le SGI	47
4.2.1. Évolution temporelle du SGI.....	47
4.2.2. Évolution des tendances sur les 30 et 5 dernières années.....	52
4.2.3. Corrélations du SGI entre les sites.....	55
4.2.4. Limites du SGI.....	57
4.3. Corrélations entre le SPI et le SGI.....	58
Conclusion et perspectives	62
Bibliographie.....	64
Annexes	68
Table des annexes	68

Table des figures

FIGURE 1 – ÉVOLUTION DES ECARTS A LA MOYENNE DE LA TEMPERATURE AU SOL DEPUIS 1951 (SOURCE, NASA, 2021)	7
FIGURE 2 – INTERACTIONS NAPPE-RIVIERE : A GAUCHE, LA RIVIERE DRAINE LA NAPPE ;.....	8
FIGURE 3 – LES CATEGORIES DE SECHERESSES ET LEUR DEVELOPPEMENT.	11
FIGURE 4 – REPARTITION DE L’OCCUPATION DU SOL SUR LES DEPARTEMENTS DU BAS-RHIN ET DU HAUT-RHIN (DONNEES ISSUES DE DRAAF, 2021)	15
FIGURE 5 – CARTE MORPHOLOGIQUE DE LA PLAINE DU RHIN	16
FIGURE 6 – ÉVOLUTION SPATIALE DE L’ÉPAISSEUR DE LA NAPPE (SOURCE : REGION ALSACE)	17
FIGURE 7 – RESEAU HYDROGRAPHIQUE SIMPLIFIE DE L’ALSACE (SOURCE : BNPA, 2010).....	18
FIGURE 8 – POURCENTAGES DE PRELEVEMENTS DANS LA NAPPE PAR SECTEUR EN ALSACE	19
FIGURE 9 – REPARTITION DU BILAN HYDROLOGIQUE DE LA NAPPE ALSACIENNE (SOURCE : SIGES, S.D.)	20
FIGURE 10 – PERIMETRES DU SAGE ILL-NAPPE-RHIN (SOURCE : REGION ALSACE).....	21
FIGURE 11 – CARTOGRAPHIE DES MILIEUX RIEDIENS DU SAGE ILL-NAPPE-RHIN (SOURCE : REGION ALSACE) ...	22
FIGURE 12 – LOCALISATION DES STATIONS METEOROLOGIQUES ET PIEZOMETRIQUES UTILISEES AINSI QUE DES COUPLES DE CORRELATIONS	27
FIGURE 13 – ÉTAPES DE CALCUL DU SPI : EXEMPLE POUR LE MOIS DE DECEMBRE ET CUMUL SUR 3 MOIS POUR LA STATION D’EBERSHEIM.	32
FIGURE 14 – RESUME DU CALCUL DU SPI-3 MOIS	33
FIGURE 15 – RESUME DU CALCUL DU SGI.....	35
FIGURE 16 – RESULTATS DU SPI-12 MOIS POUR LES DIFFERENTES STATIONS	40
FIGURE 17 – CARTE DES PENTES DES TENDANCES DU SPI-12 MOIS SUR LES 30 ET LES 5 DERNIERES ANNEES, RESPECTIVEMENT A GAUCHE ET A DROITE	44
FIGURE 18 – CORRELATIONS ENTRE LES SITES POUR LES SPI 1, 3, 6 ET 12 MOIS	45
FIGURE 19 – RESULTAT DU SGI POUR LES 17 STATIONS ETUDIEES AVEC LES MOYENNES GLISSANTES SUR 2 ANS, LES TENDANCES SUR TOUTE LA PERIODE, SUR LES 30 ET LES 5 DERNIERES ANNEES.	51
FIGURE 20 – CARTE DES PENTES DES TENDANCES DU SGI SUR LES 30 ET LES 5 DERNIERES ANNEES, RESPECTIVEMENT A GAUCHE ET A DROITE	54
FIGURE 21 – RESUME DES CORRELATIONS ENTRE LES SITES POUR LE SGI.	55
FIGURE 22 – DENSITE DE PROBABILITE DE PRESENCE DU SGI A HETTENSCHLAG	56
FIGURE 23 – SCHEMA DE DEUX CHRONIQUES PIEZOMETRIQUES DISTINCTES AVEC UNE MEME VALEUR MOYENNE MENSUELLE.....	58
FIGURE 24 – TRACE DE LA CORRELATION ENTRE LE SGI ET LE SPI CUMULE SUR LE PAS DE TEMPS AYANT OBTENU LA MEILLEURE CORRELATION	59
FIGURE 25 – SUPERPOSITION DES MOYENNES GLISSANTES SUR 2 ANS DU SGI A LIPSHEIM ET DU SPI-4 MOIS A STRASBOURG-ÉNTZHEIM.	60
FIGURE 26 – SUPERPOSITION DES MOYENNES GLISSANTES SUR 2 ANS DU SGI ET DU SPI-4 MOIS A EBERSHEIM. ...	60

Table des tableaux

TABLEAU 1 – LISTE DES STATIONS METEOROLOGIQUES UTILISEES, LISTEES DU NORD AU SUD	26
TABLEAU 2 – LISTE DES STATIONS PIEZOMETRIQUES UTILISEES, LISTEES DU NORD AU SUD	26
TABLEAU 3 – SEUILS DE SECHERESSE ASSOCIES AU SPI (SOURCE : MCKEE ET AL. 1993).....	33
TABLEAU 4 – PENTE DES TENDANCES SUR LES 30 DERNIERES ANNEES DES SPI 1, 3, 4, 6 ET 12 MOIS.	42
TABLEAU 5 – COEFFICIENTS DE CORRELATIONS ENTRE LES SITES POUR LES SPI 1, 3, 6 ET 12 MOIS	46
TABLEAU 6 – PENTE DES TENDANCES DE L’EVOLUTION DU SGI SUR LES 30 ET LES 5 DERNIERES ANNEES.	52
TABLEAU 7 – COEFFICIENTS DE CORRELATION ENTRE LES SITES POUR LE SGI. LES NUMEROS DE LA PREMIERE COLONNE ET DE LA DERNIERE LIGNE CORRESPONDENT AUX NUMEROS DES SITUATIONS DONNEES DANS LA FIGURE 21).....	56

Sigles et Acronymes

APRONA : Association de PROtection de la Nappe phréatique de la plaine d’Alsace

BNPE : Banque Nationale des Prélèvements quantitatifs en Eau

BRGM : Bureau de Recherches Géologiques et Minières

CASH : Comité d’Anticipation et de Suivi Hydrologique

DRAAF : Direction Régionale de l’Alimentation, de l’Agriculture et des Forêts

DREAL : Direction Régionale de l’Environnement, de l’Aménagement et du Logement

GIEC : Groupe d’Experts Intergouvernemental sur l’Évolution du Climat

GWE : Global Water Partnership

IPCC : *Intergovernmental Panel on Climate Change*

IPS : Indice Piézométrique Standardisé

NASA : national Aeronautics and Space Administration

OMM : Organisation Mondiale de Météorologie

PDSI : Palmer Drought Severity Index

SAGE : Schéma d’Aménagement et de Gestion de l’Eau

SGI : *Standardized Groundwater level Index*

SIGES : Système d’Information pour la GESTion de l’aquifère rhénan

SPI : *Standardized Precipitation Index*

SPLI : *Standardized Piezometric Level Index*

SRSI : *Standardized River Stages time series Index*

Introduction

Depuis l'année 2015, des étés particulièrement chauds se succèdent. En 2015, la température de la saison était de 2°C plus de plus que la moyenne en Europe de l'Ouest (Van Lanen, 2016). L'année 2018 a atteint de nouveaux records devenant une nouvelle année de référence au même titre que l'année 2003 (Bastos *et al.*, 2020). La température moyenne en Europe a été de 2,16°C supérieure à la moyenne de 1910-2000 (Severe Weather Europe, 2018). Ces dernières années ont aussi marqué l'Alsace par leurs sécheresses menant à l'assèchement de certains cours d'eau notamment d'origine phréatique. L'été 2021 risque d'être dans la continuité des années précédentes. En mai 2021, le Comité d'Anticipation et de Suivi Hydrologique (CASH) a estimé le risque de sécheresses pour l'été 2021 comme étant possible dans le Haut-Rhin et probable dans le Bas-Rhin (Ministère de la Transition Écologique, 2021). La carte des territoires avec risque de sécheresse pour l'été 2021 est disponible en annexe 1. Ces situations de sécheresses de plus en plus récurrentes impactent les eaux de surface et les eaux souterraines dont le comportement est lié. Elles sont principalement dues à un manque de pluviométrie mais d'autres facteurs peuvent entrer en compte comme des prélèvements excessifs en période critique, principalement pour l'irrigation, ou des températures élevées qui augmentent l'évapotranspiration.

La ressource en eau est donc très vulnérable aux effets du réchauffement climatique. Les situations de sécheresses sont de plus en plus récurrentes alors même que la demande en eau augmente que ce soit pour le maintien des activités ou le maintien de la biodiversité.

L'étude des sécheresses et des étiages sont donc nécessaires pour mieux appréhender le phénomène et chercher à anticiper les futurs événements afin de limiter leurs impacts.

La vulnérabilité de la nappe d'Alsace face aux sécheresses n'a pas encore été très étudiée. Pourtant, de plus en plus de sécheresses menant à des assèchements de rivières phréatiques dans la région du Grand Ried sont observés (Labarchède *et al.*, 2020).

Ce travail s'intègre dans le cadre de la thèse d'Agnès Labarchède qui a démarré en 2018. C'est une thèse en cours sur la résilience de la nappe phréatique alsacienne aux changements climatiques et anthropiques, en particulier sur la zone du Grand Ried d'Alsace. Pour étudier cette résilience, il faut étudier les impacts du changement climatique et anthropique ; et les sécheresses sont une partie majeure de ces impacts.

Le but est alors d'étudier l'évolution de ces sécheresses avec le changement climatique et anthropique. Sont-elles plus fréquentes, plus intenses, plus longues ? Quelle est l'évolution spatiale de ces sécheresses ?

Pour chercher à répondre à ces questions, l'idée est d'étudier les sécheresses à l'aide de deux indices fréquemment utilisés pour l'analyse des sécheresses : le *Standardized Precipitation Index* (SPI) et le *Standardized Groundwater level Index* (SGI) ; et d'étudier leur relation.

Objectif

L'objectif principal de cette étude est d'analyser les sécheresses météorologique et hydrogéologiques en Alsace. Trois sous-objectifs sont alors définis : (1) Calculer les indices, (2) Corréler les deux indices, (3) Observer s'il y a une évolution dans le comportement de la nappe face au changement climatique.

Pour répondre à ces objectifs, nous ferons d'abord un point sur le changement climatique, les sécheresses et leurs caractéristiques ; puis nous commencerons par présenter la région et la nappe d'Alsace. Nous définirons alors plus précisément les données utilisées et les indices pour finalement présenter et discuter les résultats obtenus.

1. Contexte de l'étude : Changement climatique et sécheresses

1.1. Changement Climatique

Dans le rapport de synthèse AR5 datant de 2014 (IPCC, 2014), le Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat (GIEC ou IPCC en anglais) affirme qu'il est extrêmement probable (90-100%) que l'activité humaine serait le facteur d'influence majeure du réchauffement climatique observé depuis le milieu du XXe siècle. Le futur rapport AR6 devrait apporter de nouvelles informations. Il sera publié au premier semestre 2022.

En 2018, le GIEC établit un nouveau rapport spécial sur les effets du réchauffement planétaire de 1,5°C en moyenne. Dans son résumé pour les décideurs (GIEC, 2018), il est indiqué que la fréquence et l'intensité des sécheresses a de fortes probabilités d'augmenter avec la hausse des températures.

C'est d'ailleurs ce qu'a montré récemment la National Aeronautics and Space Administration (NASA). Le 23 avril 2021, ils ont publié la figure 1. Elle représente l'évolution des écarts de température au sol depuis 1951, année choisie comme référence.

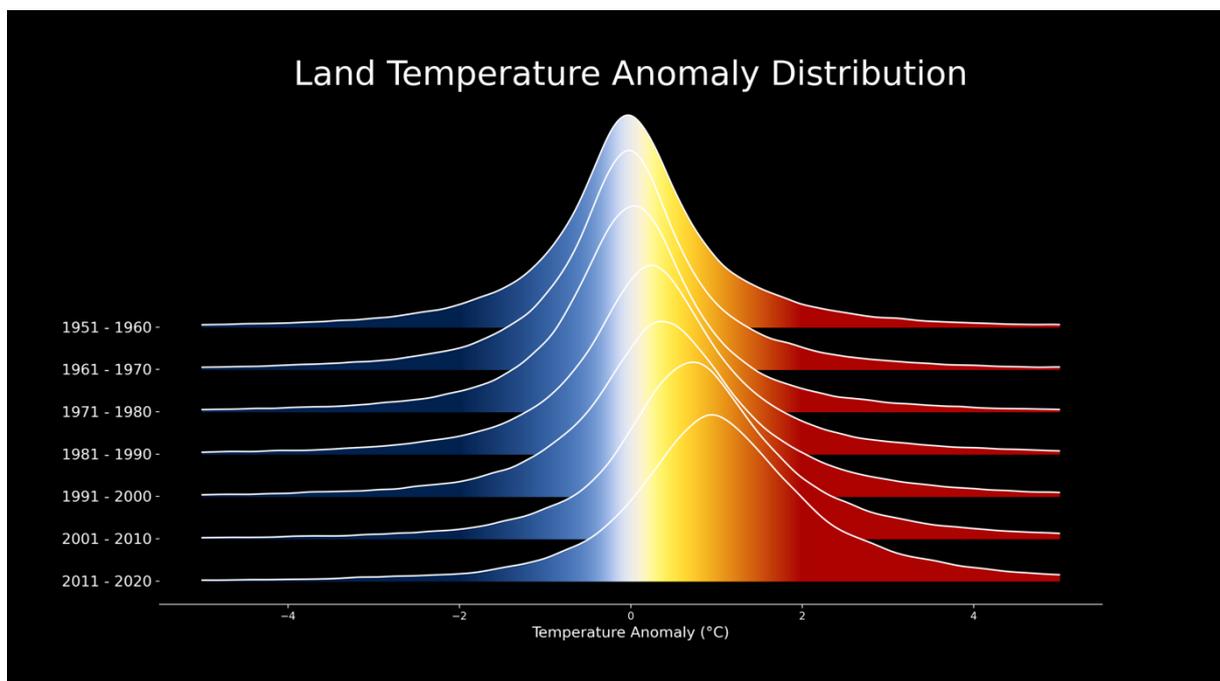


Figure 1 – Évolution des écarts à la moyenne de la température au sol depuis 1951 (source, NASA, 2021)

L'effet du changement climatique est clairement observable, le pic de distribution des écarts à la température moyenne se déplace dans le sens des anomalies positives avec le temps.

La température moyenne a donc augmenté depuis 1951, d'environ 1°C. De plus, la distribution s'étale. Cela signifie qu'il y a de plus en plus d'anomalies extrêmes de températures par rapport à 1951. En comparant la courbe 1951-1960 et 2011-2020, la fréquence d'évènements à +4 °C par rapport à la moyenne de 1951 est approximativement multipliée par 5.

Une augmentation de l'évapotranspiration est associée à ces évènements de fortes chaleurs. Les ressources en eau sont fortement exploitées. Une augmentation de la fréquence de ces évènements extrêmes augmente donc la pression sur les nappes et les situations de sécheresse peuvent être plus souvent observées.

1.2. Interactions Nappe-Rivière

Les nappes phréatiques sont en constante interaction avec le réseau hydrographique en surface. Dans la plaine d'Alsace, il existe des cours d'eau localement appelés « rivières phréatiques ». Ce sont des cours d'eau dont le débit est principalement issu de la nappe qu'ils drainent (Glossaire eau, milieux marins et biodiversité, 2019). Ce type de cours d'eau est donc fortement influencé par la hauteur d'eau de la nappe. Lorsque le niveau de la nappe est au-dessus du niveau du cours d'eau, le cours d'eau draine la nappe, lorsque son niveau est plus bas que celui du cours d'eau, ce dernier la recharge. La figure 2 représente les deux cas de figure.

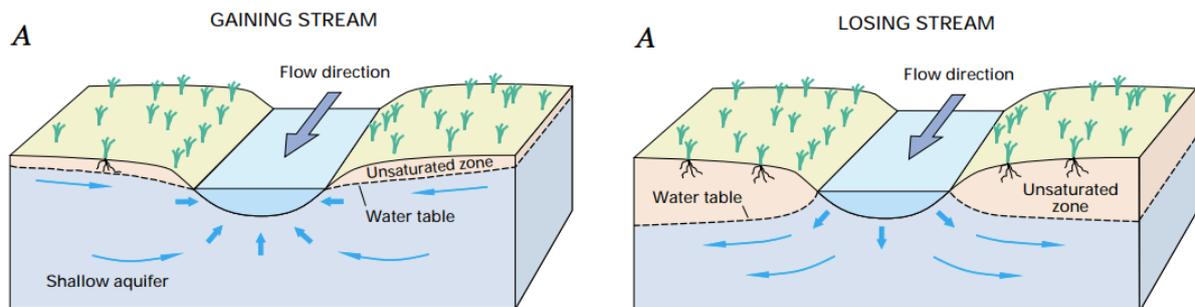


Figure 2 – Interactions nappe-rivière : à gauche, la rivière draine la nappe ; à droite, la rivière alimente la nappe. (source : Winter et al, 1998)

Il peut alors arriver que le cours d'eau s'assèche localement dans le deuxième cas et cela a forcément un impact sur la biodiversité. Même lorsque qu'il reste toujours un débit visible dans le cours d'eau, celui-ci n'est parfois pas suffisant pour la survie de la biodiversité présente. Ces cours d'eau phréatiques naissent de points de résurgences, lieux où la nappe est très proche sur sol. L'eau qui alimente ces cours d'eau provenant de la nappe, est relativement peu oxygénée avec un écoulement relativement lent.

Un risque de colmatage du fond du lit est présent. Ce colmatage isole le cours d'eau de la rivière et peut donc mener à son assèchement puisqu'il n'est plus alimenté. Ce colmatage peut être provoqué par un débit trop faible vis-à-vis de la charge en suspension à mobiliser : les particules en suspension ont le temps de se poser au fond du lit et ne sont pas remobilisées. Avec les fortes chaleurs, la perte en eau par évaporation augmente et la végétation proche du cours d'eau a besoin de plus d'eau. La quantité d'eau et le débit liquide dans la rivière diminuent donc. Il y a alors plus de risques de colmatage.

L'assèchement de ces cours d'eau peut aussi mener à l'assèchement des zones humides qui fonctionnent et donc la disparition de la biodiversité remarquable qui y est présente.

Le niveau de la nappe a donc une grande importance pour les différents écosystèmes. Les sécheresses de la nappe peuvent avoir des conséquences sur tous les systèmes l'entourant et toutes les activités liées à son exploitation. Étudier les sécheresses a donc un intérêt tout particulier dans le but de prévoir leur arrivée et de limiter leurs effets.

1.3. Notion de sécheresse

Une sécheresse est un phénomène naturel qui peut être classé dans le type des catastrophes naturelles tout comme les inondations, les séismes, les avalanches, etc. La sécheresse est considérée par la communauté scientifique comme étant le phénomène naturel le plus complexe mais aussi le moins compris des phénomènes naturels, c'est un phénomène qui fait partie des risques hydrologiques, au même titre que les crues. Réussir à évaluer et prévoir les sécheresses permettrait de mettre en place une gestion plus efficace de la ressource en eau et d'éviter des conséquences catastrophiques. Wilhite (2000) estime d'ailleurs que le phénomène de sécheresse est le phénomène naturel qui affecte le plus de personnes. Les conséquences économiques des sécheresses sont importantes et peuvent être bien supérieures à celles des crues. Naumann (2020) estime à 1,244 millions d'euros les pertes liées aux sécheresses en France en 2015.

En raison de la multitude de facteurs qui régissent les sécheresses, il est difficile de donner une définition unique et précise des sécheresses. Tallaksen et Van Lanen (2004) donnent une définition générale : C'est « une période prolongée pour laquelle la ressource en eau est inférieure à la normale. C'est un phénomène récurrent et mondial dont les caractéristiques spatiales et temporelles varient considérablement d'une région à l'autre ». Van Loon (2015) définit alors 4 grands types de sécheresse : météorologiques, édaphiques, hydrologiques et

socio-économiques. Une distinction entre les sécheresses hydrologiques et hydrogéologiques semble pertinente dans le cadre de cette étude. Cinq types de sécheresses sont donc définies :

- La sécheresse météorologique correspond à un déficit prolongé de précipitations qui peut être accompagné d'une augmentation de l'évapotranspiration potentielle. Elle s'étend sur une grande superficie et une grande échelle spatiale.
- La sécheresse édaphique ou sécheresse agricole correspond à un déficit en eau disponible dans les sols superficiels (Glossaire Eau, 2020). La végétation est alors moins alimentée. C'est le type de sécheresse qui est principalement responsable de la perte des récoltes.
- La sécheresse hydrologique correspond à un déficit dans les eaux de surface et plus globalement dans toutes les parties des hydrosystèmes (rivières, lacs, sources, etc.).
- La sécheresse hydrogéologique correspond à un déficit en eau dans la nappe. La sécheresse hydrogéologique est parfois incluse dans la sécheresse hydrologique. La distinction est réalisée ici puisque l'étude se focalise sur ce type de sécheresse en particulier. Plus précisément, le Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM, 2018) donne la définition suivante pour la sécheresse hydrogéologique : c'est un « déficit de recharge qui se traduit sur le régime naturel des nappes, jusqu'au cas extrême de l'assèchement des sources pérennes ou l'assèchement des forages dus à l'abaissement des niveaux piézométriques ».
- La sécheresse socio-économique est un type de sécheresse qui résulte des 4 précédentes. La sécheresse socio-économique peut prendre plusieurs formes : impact écologique et sanitaire, restriction d'usage de la ressource en eau, etc.

La figure 3 résume ces sécheresses et leur développement.

Bien souvent, les sécheresses météorologiques sont à l'origine des autres types de sécheresses.

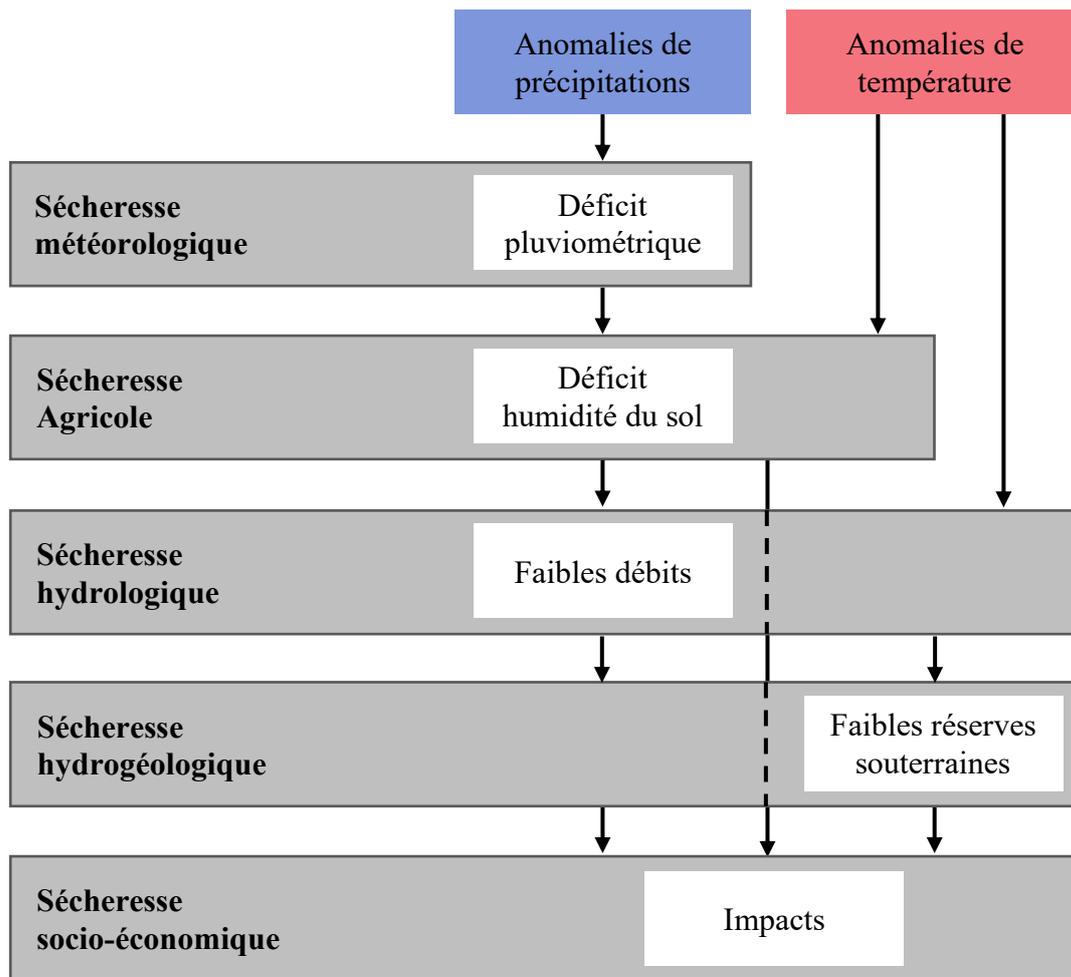


Figure 3 –Les catégories de sécheresses et leur développement.
(traduit et modifié de Van Loon, 2015)

1.4. Caractérisation des sécheresses

Une sécheresse peut être caractérisée par plusieurs facteurs et notamment par sa durée, son intensité ou l'étendue de la zone touchée.

Eslamian *et al.*, 2017 définit 5 types de méthodes pour caractériser et analyser les sécheresses :

- Méthode basée sur le bilan hydrique du sol : Le manque d'eau dans le sol, nécessaire à la croissance des plantes a été l'un des premiers types de sécheresses étudiés. La plupart des indices qui utilisent cette méthode cherchent à identifier les facteurs impactant le bilan hydrique du sol. Bien souvent, l'évapotranspiration fait partie des facteurs.
- Méthode d'analyse synoptique : Ce type de méthode cherche à étudier les sécheresses en tant que processus climatique dynamique. Peu de recherches ont été menées à ce sujet. On peut tout de même citer le travail de Wu *et al.* (2004) dont les résultats montrent la circulation des anticyclones dans les régions tempérées de l'hémisphère Nord à un effet direct sur la fréquence des sécheresses.

- Méthode basée sur l'analyse des précipitations : C'est un type de méthode très utilisé puisque les données de précipitations sont généralement facilement accessibles. De plus, ce facteur est considéré impactant directement les sécheresses. C'est donc le premier facteur étudié pour l'analyse de tous les types de sécheresses. Le *Standardized Precipitation Index* (SPI) est un indice qui se base sur cette méthode.
- Méthodes d'analyses de données hydrologiques : Ces méthodes se basent sur les données des débits de cours d'eau, de la quantité d'eau dans la nappe, les réservoirs ou les lacs. Le but est principalement d'étudier la sécheresse hydrologique en analysant l'évolution des données. Le *Standardized Groundwater level Index* (SGI) est un indice qui se base sur ce type de méthode.
- Étude Historique et géomorphologique : Cette méthode se base sur une analyse des archives, des histoires et des témoignages. Les analyses géomorphologiques permettent de corroborer ces informations. C'est souvent l'impact social des sécheresses qui est alors étudié. Ce type de données est souvent moins précis et plus difficile à obtenir que des données chiffrées mais cela permet de combler les données manquantes et d'étudier sur un plus long terme.

On peut ajouter un autre type de caractérisation :

- Étude dendrochronologie : C'est une méthode qui se base sur l'analyse de la croissance des arbres. Pendant les années sèches, la croissance d'arbres est souvent moins importante. Ce déficit de croissance est observable à partir de la largeur des cernes des arbres. Cette méthode est souvent moins précise que les chroniques historiques puisqu'un arbre peut continuer à se développer normalement en période de sécheresse s'il est suffisamment proche de la nappe.

Il y a donc différentes manières d'étudier les sécheresses, de nombreux outils et différents indices ont été créés. L'Organisation Mondiale de Météorologie (OMM ou *World Meteorological Organization*, WMO en anglais) et le Partenariat Mondial de l'Eau (*Global Water Partnership*, GWP, en anglais) en recensent 50 (WMO et GWP, 2016). Ils sont classés par méthode de calcul (météorologie, humidité du sol, hydrologie, télédétection, modélisation). Le SPI fait partie des indices météorologiques. En revanche, aucun indice basé sur l'utilisation de données piézométriques n'est recensé. Ce type d'indice tend à se développer depuis les dix dernières années.

Il existe de nombreux travaux de recherche utilisant le SPI. En Europe, on peut citer Lloyd *et al.* (2002), ou Spinoni *et al.* (2015). Ces derniers ont cherché à combiner plusieurs indices pour chercher les zones où sont principalement localisées les sécheresses en Europe.

Le SGI est un indicé créé relativement récemment (en 2013). Ses créateurs, Bloomfield et Marchant ont utilisé cet indice pour étudier les sécheresses hydrogéologiques au Royaume-Uni. On peut aussi citer les travaux de Kumar *et al.* (2015) qui ont travaillé sur deux régions, une au sud de l'Allemagne et l'autre aux Pays-Bas.

Haas et Birk (2017) ont calculé le SPI et le SGI à l'échelle de l'Autriche. Ils ont aussi calculé un autre indice, le *Standardized River Stages time series Index* (SRSI). C'est un indice qui s'intéresse plus particulièrement au niveau d'eau des rivières.

Dans toutes les études ayant calculé le SGI, le SPI était calculé et une corrélation entre les deux indices a été cherchée.

En Allemagne, une étude des sécheresses depuis 1500 a été réalisée par Glaser et Kahle (2020). Le SPI y est corrélé avec un autre indice, le *Historical Precipitation Index* pour reconstituer les chroniques de sécheresses depuis 1500.

En France, le projet ClimSec dont les résultats ont été publiés par Soubeyroux *et al.* (2012) a été initié pour étudier la sécheresse du sol en France. Dans cette étude, ils utilisent entre autres le SPI. Ils montrent alors que d'ici l'horizon 2100, le risque de sécheresses estivales et automnales devrait augmenter avec un nombre accru de sécheresses modérées à sévères alors que le nombre de sécheresses hivernales et automnales devrait rester stable.

Le Bureau de Recherches Géologique et Minières (BRGM) a lancé de nombreuses recherches pour étudier les sécheresses hydrogéologiques. Dans le rapport de Seguin (2015), un indice piézométrique a été créé dans le but de remplacer l'indice alors utilisé pour réaliser le bulletin de situation hydrologique. Ce nouvel indice est le *Standardized Piezometric Level Index* (SPLI). Cet est basé sur la méthodologie du SPI. C'est un indice similaire au SGI sur ce point. Au final, il a été conclu que le SPLI semble peu adapté aux nappes à cycles pluriannuels ou dont la tendance évolue à la hausse ou à la baisse.

Dans le rapport Giuglaris *et al.* (2018), les impacts des prélèvements dans la nappe d'Alsace dans la zone du Grand Ried d'Alsace ont été étudiés. En analysant les chroniques piézométriques il a été montré qu'au niveau global, la piézométrie reste stable mais qu'au niveau local, l'impact de l'irrigation est observable avec une diminution de 5 à 40 cm de la hauteur piézométrique selon la période d'irrigation. L'effet d'inertie de l'impact est estimé à 1

an dans cette zone. Cela signifie que la nappe met 1 an à revenir à son niveau normal suite aux prélèvements.

Toujours dans le Grand Ried, le rapport Ges'EAU'R (Giuglaris, 2020) poursuit l'étude précédente et cherche à analyser les interactions nappe-rivière et à fournir des éléments pour une meilleure gestion quantitative des ressources en eau. Les zones les plus impactées semblent être la partie ouest de l'Ill, le sud de la réserve naturelle de l'Illwald. La baisse du niveau de la nappe est moindre dans les secteurs où les rivières alimentent la nappe. Ce sont principalement les secteurs proches de rivières bénéficiant de soutien à l'étiage.

Il ne semble pas qu'il y ait eu de publication sur le SPI et le SGI en Alsace. Le BRGM a bien calculé le SPI sur la station de Strasbourg-Entzheim mais ce n'était que pour faire une comparaison avec l'indice qu'ils ont créé, le SPLI.

2. Site d'étude

2.1. Généralités

L'étude se focalise sur la nappe d'Alsace, située dans la plaine d'Alsace qui correspond à la partie française du Fossé rhénan. Ce fossé prend la forme d'une plaine de 300 km de long entre Bâle en Suisse au sud et Mayence en Allemagne au nord qui s'étend sur 35 km de large avec la Forêt-Noire comme bordure à l'est et les Vosges à l'ouest. (Birler et Elsass, 2006)

La nappe d'Alsace est donc localisée dans la partie amont du Fossé rhénan. Elle est limitée par les collines du Sundgau au sud et par le massif des Vosges à l'ouest, elle s'étend entre Bâle au sud et Lauterbourg au nord.

En Alsace, la répartition de l'occupation du sol est la suivante :

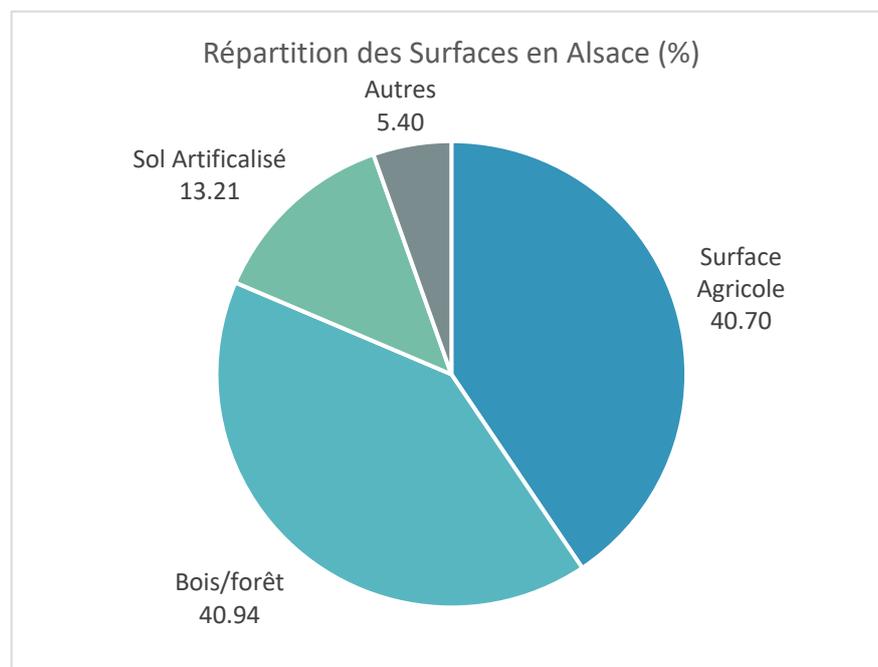


Figure 4 – Répartition de l'occupation du sol sur les départements du Bas-Rhin et du Haut-Rhin (données issues de DRAAF, 2021)

Sur la nappe d'Alsace, le sol est majoritairement occupé par des surfaces agricoles.

2.2. Climat

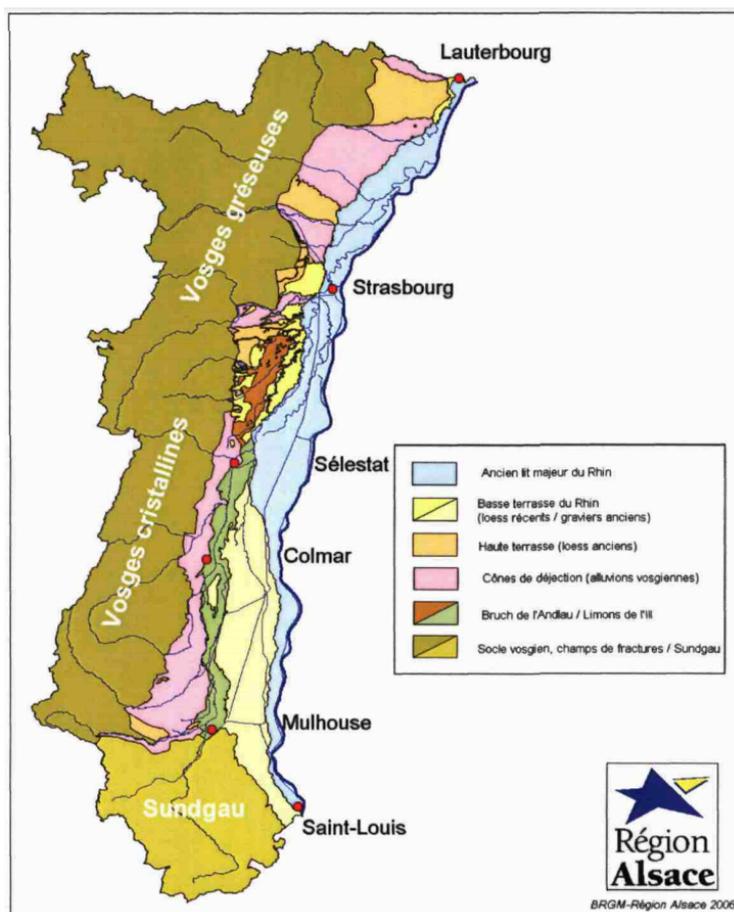
L'Alsace bénéficie d'un climat dit semi-continentale comme tout le quart Nord-Est de la France. Selon Météo-France, un climat semi-continentale est un type de climat où les étés sont chauds et les hivers froids. Habituellement, la pluviométrie y est élevée mais l'Alsace bénéficie

de la protection des Vosges qui limite les évènements pluvieux et apporte un climat sec. La moyenne annuelle de précipitations autour de 600 mm par an avec un minimum en février et un maximum en mai (infoclimat, 2021).

2.3. Géologie

L'Aquifère rhénan est constitué d'alluvions quaternaires. Ces alluvions sont composées de galets, graviers, sables, limons et argiles déposés par le Rhin et ses affluents sur grande épaisseur (entre 25 et 205 m d'épaisseur) (Birler et Elsass, 2006). La plaine d'Alsace a donc servi de piège à sédiments provenant des Alpes et du Jura. Plus au Nord de l'Alsace, on retrouve des alluvions d'origine Vosgienne.

Sans pour autant donner la géomorphologie très détaillée de l'Alsace, plusieurs morphologies sont distinguées par Birler et Elsass (2006), la figure 5 les localise :



- Les hautes terrasses : Morphologies les plus anciennes, couvertes de dépôts loessiques
- Les basses terrasses : Se raccordent plus ou moins aux cônes alluviaux des rivières vosgiennes.
- La basse plaine alluviale : Lit d'inondation du Rhin avant la rectification de son cours.
- Des zones dépressionnaires : Lieu privilégié du développement de zones humides comme les Ried.

Figure 5 – Carte morphologique de la plaine du Rhin (source : Birler et Elsass, 2006)

La nappe d'Alsace est principalement localisée sur l'ancien lit majeur du Rhin, les basses terrasses du Rhin, le Bruch de l'Andlau et les limons de l'Ill et les cônes de déjection.

2.4. Hydrologie

L'écoulement s'effectue principalement dans l'axe du Rhin, du sud au nord. La pente de la surface piézométrique est relativement faible et l'eau s'écoule à une vitesse faible. En bordure, l'eau s'écoule du pied des Vosges vers l'est pour converger vers le Rhin.

C'est une nappe dont l'épaisseur varie localement. La figure 6 provenant de la Région Alsace, montre l'évolution spatiale de l'épaisseur de la nappe.

Le principal affluent du Rhin est l'Ill qui prend sa source dans le Sundgau. De nombreux autres petits cours d'eau prennent leur source dans cette région et s'infiltrent entièrement dans l'aquifère. Les autres rivières majeures s'écoulant en plaine d'Alsace prennent leur source dans les Vosges (Thieron *et al.* 2012).

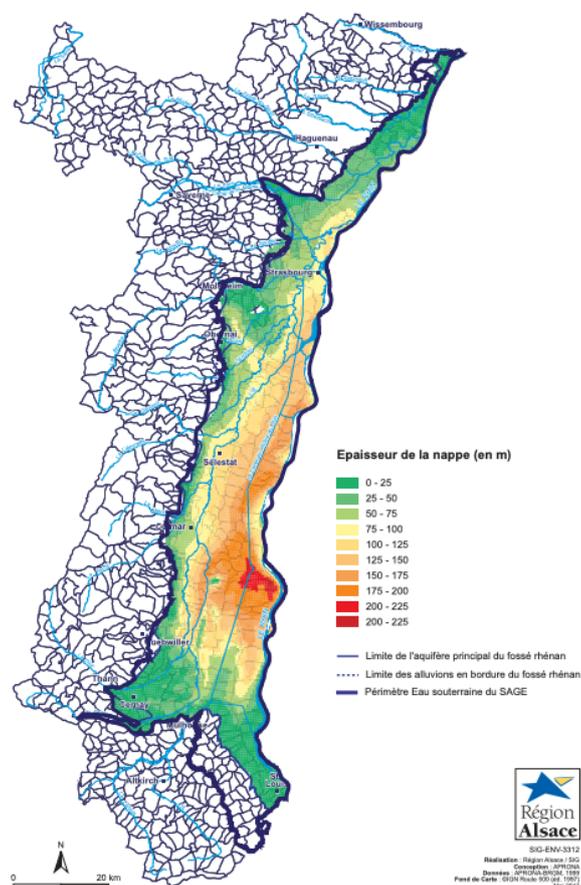


Figure 6 – Évolution spatiale de l'épaisseur de la nappe (source : Région Alsace)

Le comportement hydrologique de la nappe diffère de Bâle à Lauterbourg. Les hauteurs piézométriques sont sensibles aux précipitations, aux échanges avec l'Ill, le Rhin ou les rivières Vosgiennes.

Le long de la région alsacienne, le régime du Rhin est un régime dit « pluvio-nivo-glaciaire », son débit dépend des conditions climatiques de sa partie alpine en amont. Globalement, son niveau est en hautes eaux entre mai et juillet et en étiage de septembre à mars. Le fonctionnement de l'Ill est inverse à celui du Rhin et cela à cause des rivières vosgiennes qui l'alimentent. L'influence de l'Ill sur la nappe n'est pas homogène d'amont en aval. En amont de Colmar, l'Ill est perchée par rapport à la nappe. Elle alimente donc fortement la nappe et peut perdre jusqu'à un quart de son débit (Elsass et Rau, 1995). En aval de Colmar, des zones de drainage et d'alimentation se succèdent. Les cours d'eau vosgiens alimentent aussi la nappe dès leur arrivée dans la plaine. C'est là un des processus principaux de recharge de la nappe.

La figure 7 montre les principaux cours d'eau en Alsace. Sont aussi localisées les gravières qui peuvent influencer la hauteur de la nappe.

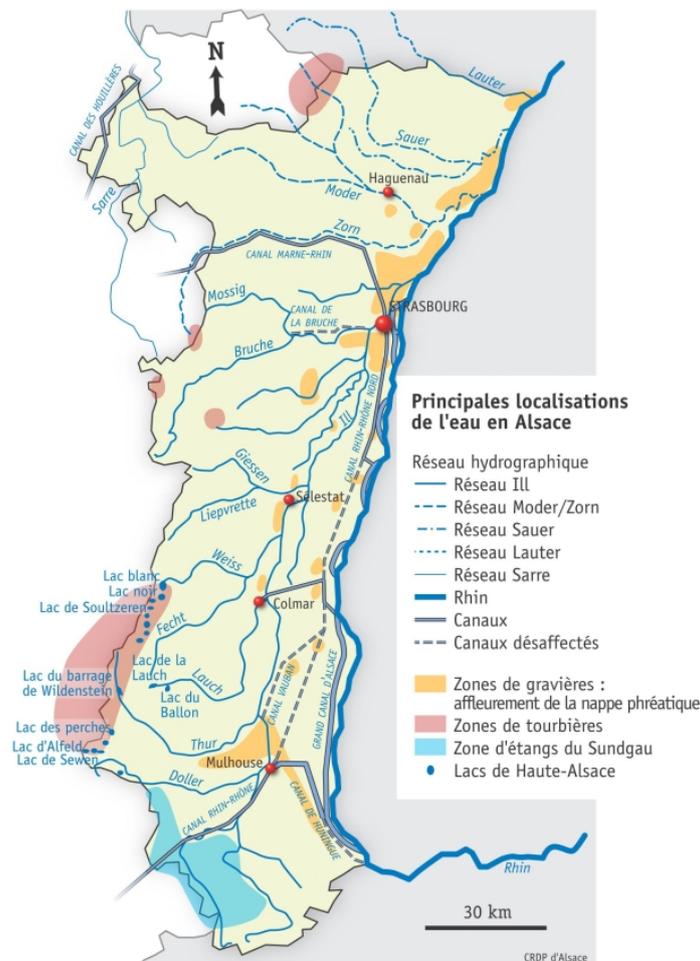


Figure 7 – Réseau hydrographique simplifié de l'Alsace (source : BNPA, 2010)

Les principaux cours d'eau ayant une influence sur la nappe sont le Rhin et l'Ill qui s'écoulent parallèlement du Sud au Nord pour se rejoindre au nord de Strasbourg.

2.5. Bilan hydrologique

L'Aquifère rhénan est l'un des plus grands réservoirs d'eau souterrain d'Europe, sa partie alsacienne est estimée à 35 milliards de m³ (APRONA). C'est un aquifère dont le toit est peu profond donc facilement accessible. Il est donc fortement exploité. La Banque Nationale des Prélèvements quantitatifs en Eau (BNPE) estimait à un peu moins de 450 millions de m³ la quantité d'eau prélevée dans la nappe sur l'ensemble des départements du Haut-Rhin et du Bas-Rhin pour l'année 2019. La répartition est la suivante :

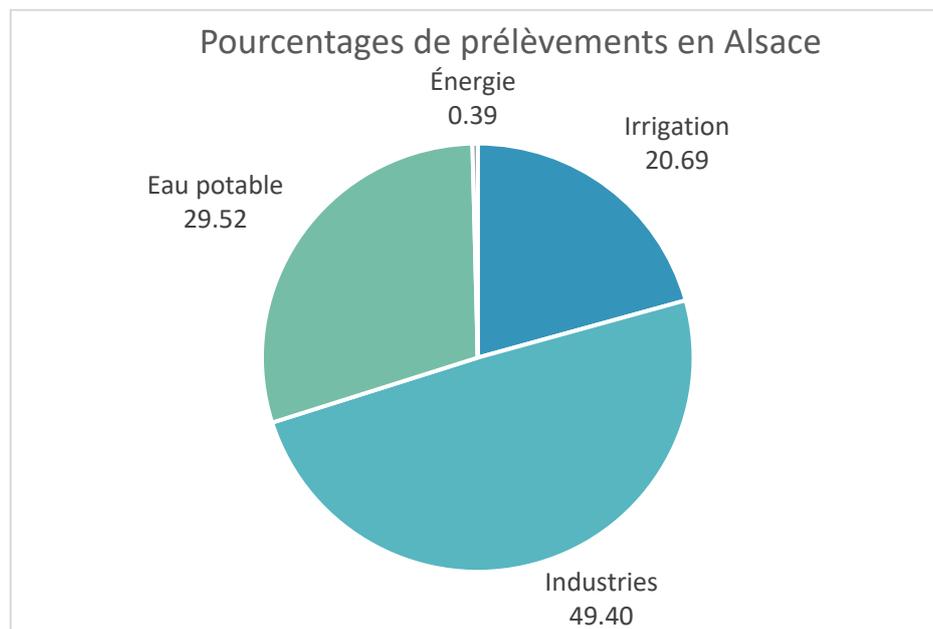
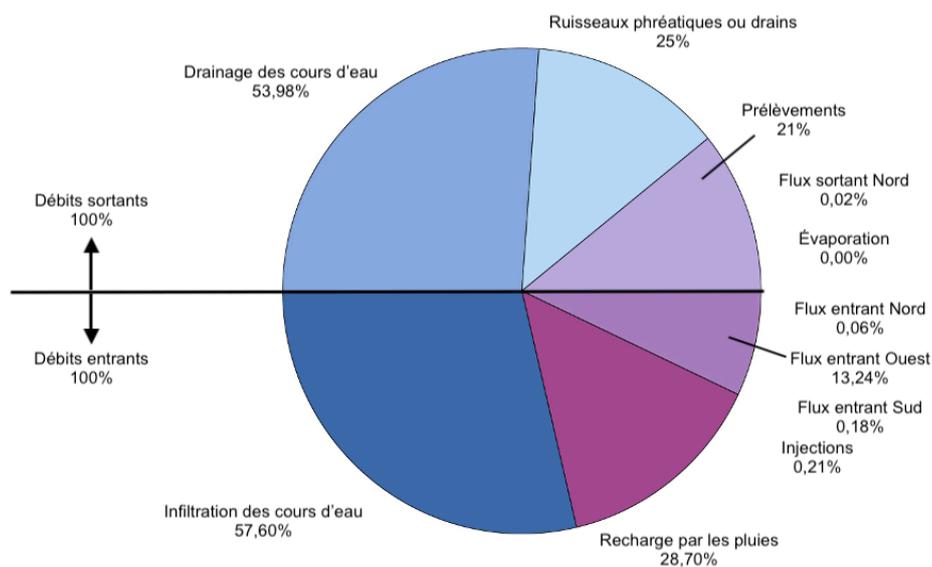


Figure 8 – Pourcentages de prélèvements dans la nappe par secteur en Alsace pour l'année 2019 (données issues de la BNPE)

Ce ne sont là que des estimations, il est difficile d'avoir des chiffres précis et notamment pour les prélèvements pour l'irrigation. Les prélèvements sont donc potentiellement plus élevés. La période critique pour les sécheresses est habituellement la période estivale. C'est aussi en cette période qu'une grande partie de l'irrigation a lieu.

Plusieurs modèles ont cherché à étudier le bilan hydrologique de la nappe. En 2006, Risler *et al.* ont modélisé les débits entrants et sortant de la nappe. Le résultat est présenté en figure 9. Il a alors été estimé qu'en situation de moyennes eaux, 2,7 milliards de m³ d'eau sont renouvelés dans la nappe (SIGES, s.d.).



Source : Rislér et al., 2006

Figure 9 – Répartition du bilan hydrologique de la nappe alsacienne (source : SIGES, s.d.)

Selon cette étude, la recharge de la nappe s’effectue principalement par les cours d’eau. L’impact direct de la pluviométrie est moindre.

2.6. Le SAGE III-Nappe-Rhin

Dans le but de protéger la ressource en eau sur la plaine d’Alsace, un Schéma d’Aménagement et de Gestion des Eaux (SAGE) est en place depuis 1997, c’est le SAGE III-Nappe-Rhin. Son principal but est de parvenir à préserver et restaurer la qualité des cours d’eau, des zones humides et de la nappe qui les accompagne. Deux périmètres sont alors définis dans le but de préserver la ressource en eau souterraine et superficielle. La carte suivante (figure 10) montre ces périmètres.

Carte n°1 : Périmètres Eaux Superficielles et Eaux Souterraines
SAGE III-Nappe-Rhin

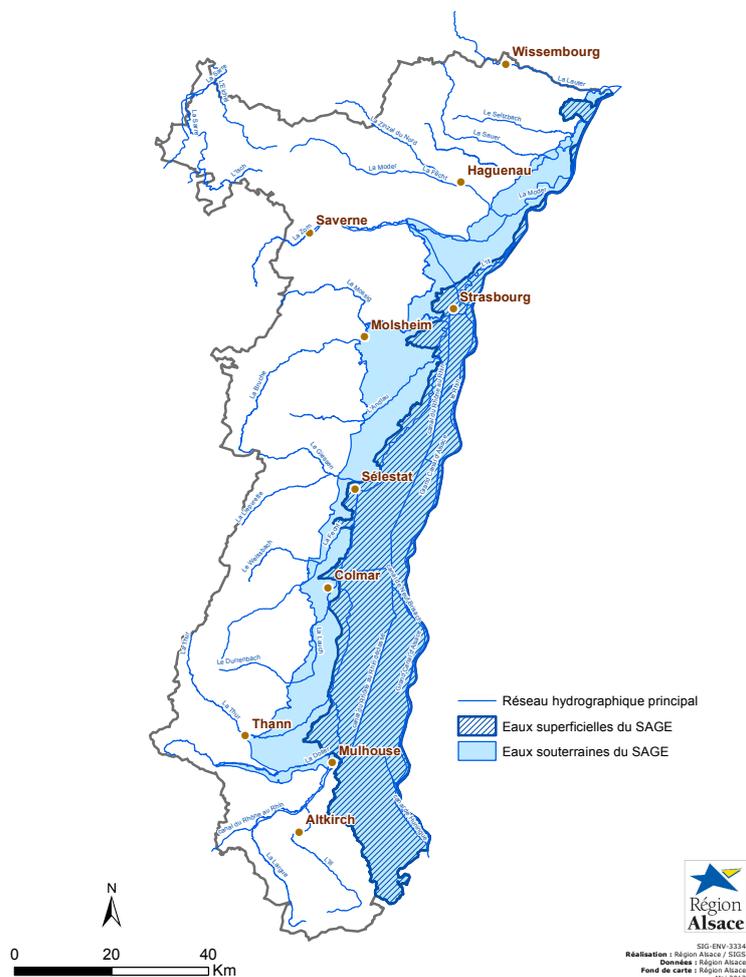


Figure 10 –Périmètres du SAGE III-Nappe-Rhin (source : Région Alsace)

Le périmètre des eaux souterraines de ce SAGE correspond globalement à la plaine d’Alsace.

Dans le cadre de ce SAGE, il est notamment possible de définir un volume en eau disponible à se répartir entre utilisateurs pour préserver la ressource (SAGE III-Nappe-Rhin, 2015).

Dans le périmètre des eaux superficielles, des milieux remarquables sont mis en avant : les milieux riediens. Ce sont des zones de dépression où la nappe est très proche du niveau du sol, des zones humides remarquables où de nombreux cours d’eau phréatiques naissent. La carte suivante (Figure 11) localise ces milieux riediens.

Carte n°16 : Milieux riediens
SAGE Ill-Nappe-Rhin

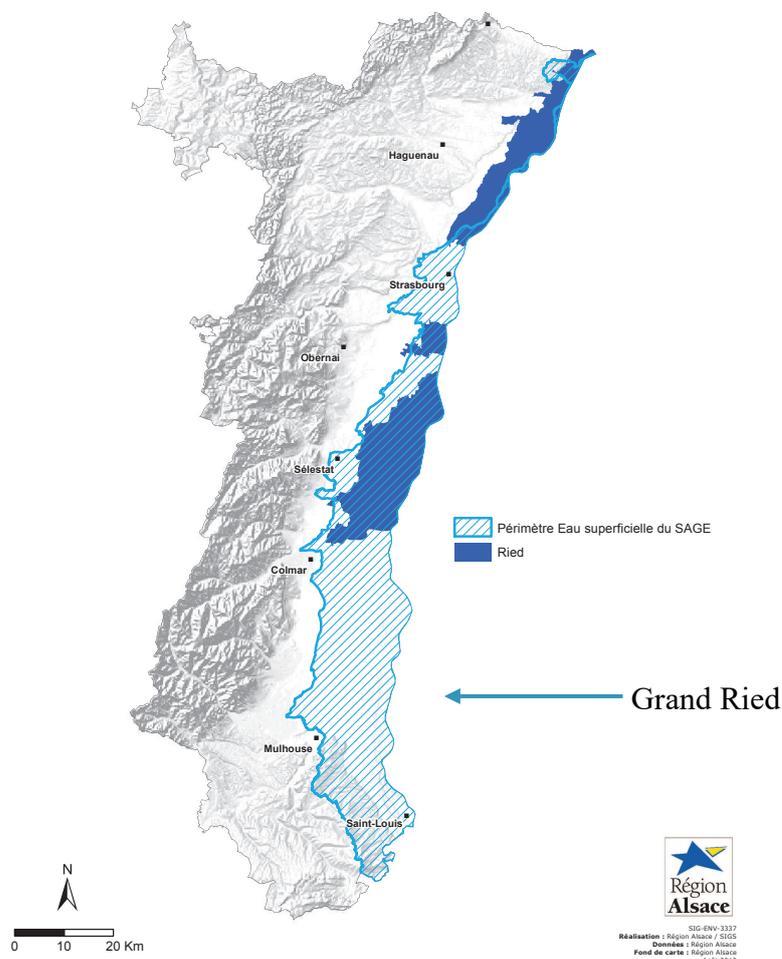


Figure 11 – Cartographie des milieux riediens du SAGE Ill-Nappe-Rhin (source : Région Alsace)

Ces milieux riediens sont des espaces qui renferment une biodiversité remarquable. Ce sont des zones où la ressource en eau est particulièrement sensible. Il est interdit de prélever ou de rejeter de l'eau dans les cours d'eau phréatiques appartenant aux Rieds (SAGE Ill-Nappe-Rhin, 2015).

Au centre de l'Alsace se trouve le Grand Ried, l'une des plus vastes zones humides de vallée fluviale d'Europe occidentale, localisée dans la figure 11. C'est une zone particulièrement soumise à la pression agricole qui a connu en 2011, 2015 et 2017 des sécheresses remarquables. (Giuglaris, 2018). C'est d'ailleurs dans cette zone que des cours d'eau phréatiques asséchés ont été observés ces dernières années. C'est aussi dans cette zone qu'Agnès Labarchède étudie les interactions entre la nappe et certains cours d'eau sur lesquels elle a installé des sondes pour mesurer leur niveau d'eau.

3. Méthodologie

Cette étude a nécessité d'acquérir des données auprès de Météo-France et de l'APRONA. Il a alors fallu créer les algorithmes pour calculer les indices étudiés. Le choix s'est porté sur le langage de programmation Python, utilisé par Agnès Labarchède dans le cadre de sa thèse. Cela permettra de lui fournir les scripts afin de continuer à les utiliser dans le cadre de son travail. La version 3.8.5 du logiciel Python, sous la version 4.1.5 de l'environnement Spyder a alors été utilisée.

3.1. Données utilisées

Afin d'étudier les sécheresses météorologiques et hydrogéologiques, deux types de données seront utilisées : des données pluviométriques pour étudier l'évolution des sécheresses météorologiques et des données piézométriques pour étudier l'évolution de la hauteur d'eau dans la nappe phréatique.

3.1.1. Données météorologiques

Les données météorologiques proviennent de stations Météo-France réparties sur la nappe et dans les Vosges. La figure 12 localise les stations météorologiques pour lesquelles nous avons des données. Les stations utilisées sont donc celles de Strasbourg-Botanique, Strasbourg-Entzheim, Ebersheim, Colmar-INRAE (anciennement Colmar-INRA) et Colmar-Meyenheim. Le tableau 1 donne quelques une de leurs caractéristiques. Ce sont des données de pluviométrie mensuelles sauf pour la station de Strasbourg-Entzheim pour laquelle les données sont journalières. Il y a des stations météorologiques sur la nappe d'Alsace et des stations dans les Vosges.

Puisque la pluviométrie varie localement, il est important d'avoir plusieurs points de données pour une meilleure représentation spatiale des phénomènes étudiés.

Initialement, l'idée était d'utiliser les stations dans les Vosges pour observer l'importance des sécheresses en amont des rivières étudiées par Agnès Labarchède afin de l'aider à mieux comprendre leur comportement. Mais les chroniques de données dans les Vosges n'étaient pas assez longues et comportaient de nombreuses lacunes : aucune des chroniques des 7 stations ne durait plus 30 ans et ce, même en comblant artificiellement les

manques de données qui pouvaient durer jusqu'à 15 ans. L'annexe 2 présente les chroniques de ces stations.

3.1.2. Données piézométriques

3.1.2.1. *Provenance des données*

Les données piézométriques proviennent de l'Association pour la Protection de la Nappe phréatique de la plaine d'Alsace (APRONA). Son réseau est composé de 170 piézomètres répartis sur toute la nappe d'Alsace qui fournissent le niveau du toit de la nappe. La fréquence des mesures de la hauteur de la nappe est hebdomadaire. Pour obtenir des données mensuelles, une moyenne mensuelle des valeurs hebdomadaires est alors réalisée. On suppose alors que le pas de temps hebdomadaire est suffisant pour représenter l'état réel de la nappe même si le minimum de hauteur d'eau réel de la nappe ne sera pas forcément mesuré.

Toutes les stations ne seront pas utilisées pour cette étude. 17 stations ont été choisies pour des raisons explicitées juste après. Elles sont listées dans le tableau 2 et localisées dans la figure 12.

3.1.2.2. *Justification du choix des piézomètres*

Un des objectifs de cette étude est de réaliser une corrélation entre les deux indices calculés. Des piézomètres proches des stations météorologiques localisées sur la nappe ont alors été sélectionnés. Ce sont les piézomètres de Strasbourg-place des étudiants, Ebersheim, Colmar et Oberhergheim ; respectivement numérotés 2, 7, 11, 13 dans le tableau 2.

Pour les choisir, la longueur des chroniques de données des piézomètres les plus proches ont été étudiées. Si des données manquaient dans la chronique ou si cette dernière était trop courte (durée inférieure à 30 années consécutives, comme recommandé pour le calcul des indices), le piézomètre n'était pas retenu et le deuxième piézomètre le plus proche était étudié et ainsi de suite jusqu'à obtenir un piézomètre avec une chronique de données jugée satisfaisante.

Au final tous les piézomètres retenus sont à une distance inférieure à 4,5 km des stations météorologiques sauf le piézomètre de Lipsheim (numéro 3 du tableau 2). Dans son rapport pour le BRGM, Seguin (2015) a calculé le SPI avec un pas de temps de 12 mois sur la station de Strasbourg-Entzheim et le SPLI sur le piézomètre de Lipsheim puis a cherché à corrélérer les

deux indices. Cette configuration a donc été gardée pour pouvoir comparer nos résultats avec ceux de cette étude.

Les couples stations météorologiques / piézomètres utilisés pour réaliser une corrélation sont repérés sur la figure 2. Ce sont les couples Strasbourg-Botanique / Strasbourg (resp. a / 2 dans les tableaux 1 et 2), Strasbourg-Entzheim / Lipsheim (resp. b / 3), Ebersheim / Ebersheim (resp. c / 7), Colmar-INRAE / Colmar- (resp. d / 11) et Colmar-Meyenheim / Oberhergheim (resp. e / 13).

Des piézomètres supplémentaires ont ensuite été choisis pour mieux étudier le comportement de la nappe face aux sécheresses.

Les piézomètres de Plobsheim et d'Artolsheim (respectivement numérotés 4 et 9 dans le tableau 2) sont en zone d'influence rhénane.

Le piézomètre d'Illhaeusern (numéro 10 du tableau 2) est proche du Riedbrunnen, un cours d'eau sur lequel sont installés deux capteurs de hauteur d'eau. Un des capteurs a été installé par Agnès Labarchède pour la durée de sa thèse, l'autre par la Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement (DREAL) de manière pérenne. Les résultats pour ce piézomètre seront donc utiles à Agnès Labarchède pour mettre directement en relation le comportement du cours d'eau et celui de la nappe.

Le piézomètre de Baldenheim (numéro 8 du tableau 2) est situé dans la zone du Grand Ried. Il est situé proche du Hanfgraben, du Kesslergraben et du Schiffgraben, trois cours d'eau étudiés par Agnès Labarchède.

Le piézomètre de Matzenheim (numéro 5 du tableau 2) est localisé dans la zone d'influence de l'Ill. Il est à noter que la cote du piézomètre peut atteindre la cote du sol en hautes eaux : la hauteur d'eau maximale observée est supérieure à la cote du sol (tableau 2). Cela pourra avoir une influence sur les résultats. Il en est de même pour la station d'Illhaeusern.

D'autres piézomètres ont finalement été choisis pour avoir une meilleure représentation spatiale. Ce sont les piézomètres de Sessenheim, Rossfeld, Hettenschlag, Fessenheim, Wittenheim, Habsheim et Hésingue (Respectivement numéros 1, 6, 12, 14, 15, 16 et 17 du tableau 2). Ils ont été choisis dans la liste des piézomètres utilisés pour réaliser le bulletin de situation hydrogéologique de l'APRONA¹. Pour réaliser ce bulletin, un indicateur a été créé par le BRGM. C'est l'Indicateur Piézométrique Standardisé (IPS), qui est inspiré du SPI. L'utilisation de ces piézomètres pourra permettre une comparaison des résultats.

¹ Liste des piézomètres du bulletin :

<https://www.aprona.net/FR/observatoire-eau/acces-aux-donnees/bulletinhydro.html>

Indice	Code	Localisation	Début de période	Fin de période	Pluviométrie annuelle (mm)			Altitude (m)
					min.	max.	moy.	
a	67482001	Strasbourg-Botanique	août-1940	déc-2020	354,1	996,2	719,1	139
b	67124001	Strasbourg-Entzheim	juin-1945	déc-2020	314,2	811,1	612,5	150
c	67115001	Ebersheim	nov-1945	déc-2020	67,4	815,5	610,3	164
d	68066001	Colmar-INRAE	avr-1972	déc-2020	374,2	807	566	202
e	68205001	Colmar-Meyenheim	avr-1957	déc-2020	365,1	794,8	588,9	207

Tableau 1 – Liste des stations météorologiques utilisées, listées du Nord au Sud

Indice	Code	Localisation	Début de période	Fin de période	Niveau de la nappe (m)			Cote du sol (m)
					min.	max.	moy.	
1	01995X0012 / 342B	Sessenheim	oct-1964	déc-2020	117,37	119,37	118,03	120,2
2	02723X0900 / 245R1	Strasbourg	juin-1988	déc-2020	135,41	136,14	135,71	141,53
3	02726X0029 / 238	Lipsheim	mars-1955	déc-2020	145,36	147,17	146,04	147,97
4	02726X0008 / 235G	Plobsheim	janv-1971	déc-2020	144,93	146,23	145,6	147,31
5	03081X0038 / 269	Matzenheim	oct-1958	déc-2020	153,49	155,58	154,05	155,21
6	03081X0025 / 223	Rosfeld	janv-1965	déc-2020	157,04	158,79	157,47	159,44
7	03078X0014 / 214	Ebersheim	mars-1955	déc-2020	161,77	164,43	162,7	166,89
8	BSS003MKHM / PI	Baldenheim	janv-1975	déc-2020	167,16	168,75	167,76	170,21
9	03431X0027 / 207A	Artolsheim	janv-1965	déc-2020	168,95	170,07	169,34	172,15
10	03423X0064 / 94A	Illhaeusern	janv-1984	déc-2020	176,16	177,58	176,68	177,55
11	03782X0080 / 84B	Colmar	mai-1955	déc-2020	186,76	189,05	187,98	190,74
12	03783X0046 / 71	Hettenschlag	janv-1955	déc-2020	190,74	193,9	192,28	197,51
13	03787X0088 / 65A	Oberhergheim	juil-1977	déc-2020	196,06	199,93	197,67	203,95
14	03795X0093 / PZ-N2	Fessenheim	janv-1957	déc-2020	196,56	199,87	197,72	205,09
15	04132X0086 / PP6	Wittenheim	oct-1980	déc-2020	224,7	230,43	227,09	232,93
16	04137X0018 / 15	Habsheim	déc-1954	déc-2020	213,98	241,73	235,03	244,22
17	04458X0023 / S3	Hésingue	nov-1975	déc-2020	254,25	256,99	255,17	269,5

Tableau 2 – Liste des stations piézométriques utilisées, listées du nord au sud

Localisation des stations météorologiques et piézomètres

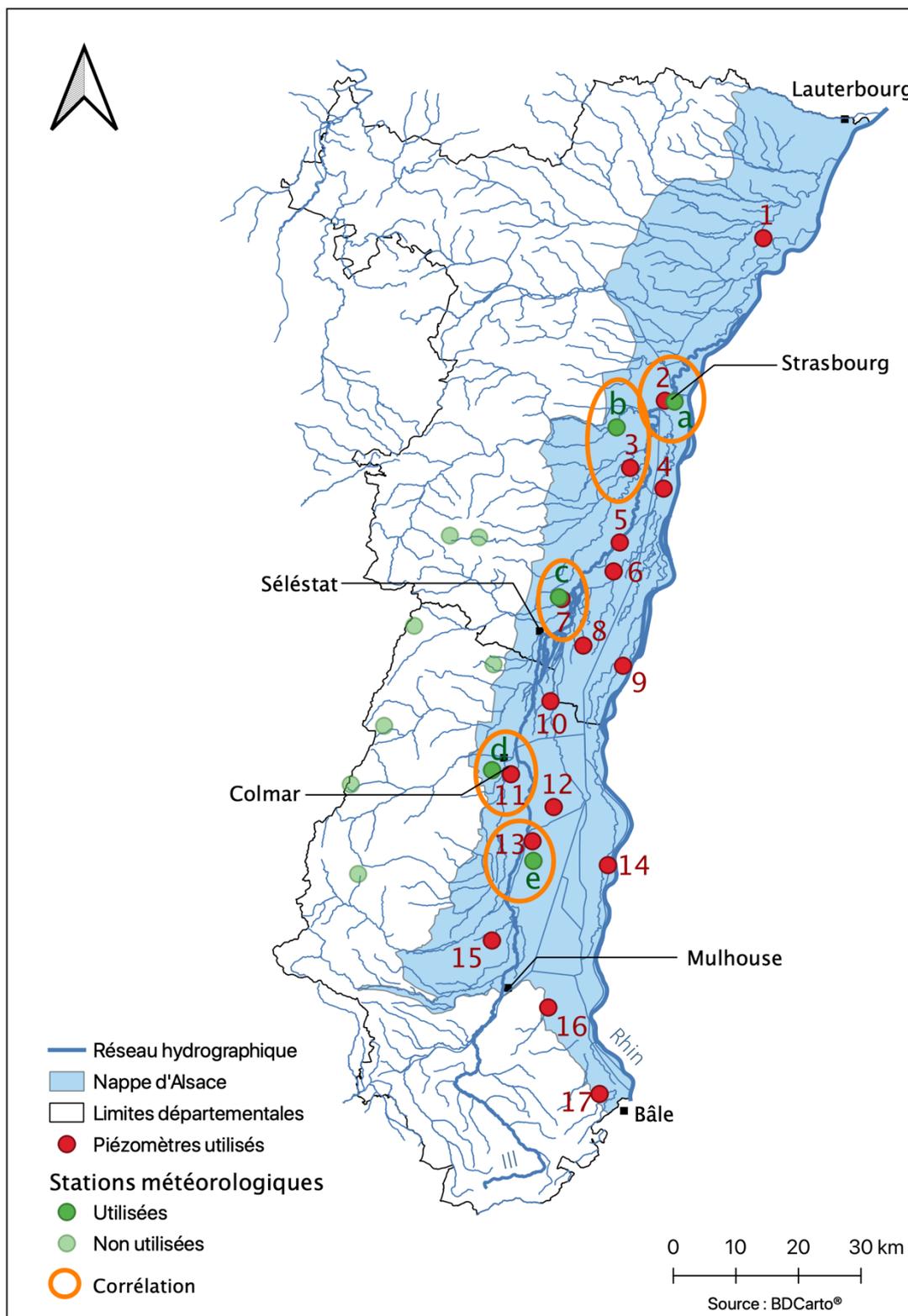


Figure 12 – Localisation des stations météorologiques et piézométriques utilisées ainsi que des couples de corrélations

3.2. Indices utilisés

3.2.1. Le SPI

Le *Standardized Precipitation Index* (SPI) a été développé par McKee et al. (1993). Le but est de caractériser les sécheresses et les événements humides en les comparant à leur valeur moyenne. C'est un indice qui peut être estimé sur différents pas de temps en réalisant un cumul des précipitations sur le pas de temps souhaité.

Il a été créé dans le but de pallier les difficultés de calcul de l'indice de sécheresse de Palmer ou *Palmer Drought Severity Index* (PDSI), un autre indice de sécheresse créé par Palmer, 1965. Cet indice très largement utilisé aux États nécessite de connaître de nombreuses données d'entrée : pluie, évapotranspiration, infiltration, ruissellement, exfiltration ; ce qui le rend difficile à utiliser.

Les avantages du SPI sur le PDSI sont qu'il ne nécessite que les données de pluie pour être calculé et qu'il peut être calculé pour différents pas de temps.

L'OMM recommande d'ailleurs l'utilisation du SPI pour caractériser les événements météorologiques pour sa puissance, sa souplesse d'utilisation et sa simplicité (OMM, 2012).

3.2.1.1. Calcul du SPI

Le SPI est calculé en adaptant une fonction de densité de probabilité à la distribution des fréquences de précipitations cumulées sur un pas de temps donné.

Il a été montré que la loi gamma était celle qui s'adaptait le mieux aux données météorologiques (Guttman, 1999).

Pour calculer le SPI, la méthode suivie est celle proposée par Edward et McKee (1997) et suivie par Lloyd-Hughes *et al.* (2002) et Roudier et Mahe (2010).

La méthode de calcul est décrite avec l'exemple du SPI-3 mois, c'est-à-dire le SPI calculé avec un cumul de précipitations sur 3 mois.

Étape 0 : Construction d'une série de données continue supérieure ou égale à 30 ans, comme recommandé par McKee *et al.* (1993).

Étape 1 : Pour chaque station, les précipitations mensuelles sont sommées sur le pas de temps souhaité. Pour le SPI-3 mois : la précipitation du mois *i* est ajoutée à la somme des précipitations des deux mois précédents.

Étape 2 : 12 séries de données sont alors créées. Chaque série comporte les cumuls sur les mêmes mois : une série pour les cumuls des mois de janvier (*ie* cumul des mois NDJ), une série pour les cumuls des mois de février (*ie* cumul des mois DJF), ..., une série pour les cumuls des mois de décembre (*ie* cumul des mois OND).

Étape 3 : Pour chaque série, une loi statistique est ajustée. Ici, la loi gamma est utilisée. L'hypothèse H_0 : « Les données s'ajustent à la loi gamma » est alors émise.

La fonction de densité de probabilité de la loi gamma est :

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

Avec : • $x > 0$: la précipitation

- $\alpha > 0$: le paramètre de forme
- $\beta > 0$: le paramètre d'échelle
- $\Gamma(\alpha)$: la fonction gamma définie par :

$$\Gamma(\alpha) = \lim_{n \rightarrow \infty} \prod_{v=0}^{n-1} \frac{n! n^{y-1}}{y+v} \equiv \int_0^{\infty} y^{\alpha-1} e^{-y} dy$$

Il est alors nécessaire d'estimer les paramètres α et β pour ajuster la loi statistique. Pour cela, un estimateur par maximum de vraisemblance est utilisé en appliquant l'approximation de Thom (1958) :

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

$$\hat{\beta} = \frac{\bar{x}}{\hat{\alpha}}$$

- Où :
- $\hat{\alpha}$: estimation de α
 - $\hat{\beta}$: estimation de β
 - \bar{x} : la moyenne de la série de données de précipitations
 - $A = \ln(\bar{x}) - \frac{\sum \ln(x)}{n}$ avec n le nombre d'individus de la série.

Les paramètres α et β de la loi gamma étant estimés, le but est de calculer la fonction de répartition pour la normaliser afin d'obtenir les valeurs de SPI.

La fonction de répartition de la loi gamma est l'intégrale de sa fonction de densité de probabilité :

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

En substituant $x/\hat{\beta}$ par t , on obtient la fonction gamma incomplète :

$$G(x) = \frac{1}{\hat{\beta}^{\hat{\alpha}} \Gamma(\hat{\alpha})} \int_0^x t^{\hat{\alpha}-1} e^{-t} dt$$

Bien que la fonction gamma ne soit pas définie en 0, la probabilité d'avoir une pluviométrie nulle est à prendre en compte.

Pour cela, on calcule la probabilité d'une pluviométrie nulle dans l'échantillon :

$$q = P(x = 0) = \frac{n_{x=0}}{n}$$

Où :

- $n_{x=0}$: le nombre d'individus de valeur nulle dans la série
- n : le nombre d'individus total dans la série

La fonction de répartition devient finalement :

$$H(x) = q + (1 - q)G(x)$$

Pour implémenter la fonction gamma incomplète, un algorithme issu de Press *et al.* (2007) a été retranscrit sous Python.

Cette fonction de répartition est alors normalisée pour obtenir les valeurs de SPI. La conversion d'Abramowitz a alors été utilisée comme recommandé par Edward et McKee (1997). Le SPI est obtenu par :

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

Où :

$$t = \begin{cases} \sqrt{\ln\left(\frac{1}{(H(x))^2}\right)} & \text{pour } H(x) \leq 0,5 \\ \sqrt{\ln\left(\frac{1}{(1-H(x))^2}\right)} & \text{pour } H(x) > 0,5 \end{cases}$$

Et :

$$c_0 = 2,515517 \quad c_1 = 0.802853 \quad c_2 = 0.010328 \\ d_1 = 1,432788 \quad d_2 = 0,189269 \quad d_3 = 0.001308$$

Étape 4 : Un test de Kolmogorov-Smirnov à 5% est ensuite réalisé pour vérifier l'hypothèse H_0 . Si le test échoue pour une série, il faut essayer une autre loi de probabilité. Par exemple, il a été montré qu'une distribution Poisson-gamma s'adaptait mieux pour la modélisation des précipitations en Catalogne (Lana *et al.* 2001).

3.2.1.2. Test de Kolmogorov-Smirnov (Institut de mathématiques de Toulouse)

Ce test permet de vérifier si un échantillon (X_1, X_2, \dots, X_n) suit bien la loi choisie. Dans notre cas l'échantillon est la série de données pluviométriques et la loi est la loi gamma. On note F la fonction de répartition de l'échantillon et F_0 celle de la loi.

On teste alors l'hypothèse $H_0 : F=F_0$ contre $H_1 : F \neq F_0$. On note α le seuil de confiance désiré.

C'est un test qui repose sur la construction de la fonction de répartition empirique de l'échantillon, on la note F_n :

$$F_n(x) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n 1_{X_i < x}$$

Le test de Kolmogorov-Smirnov consiste à calculer :

$$D_n = \sup_{x \in \mathbb{R}} |F_n(x) - F_0(x)|$$

Cette valeur correspond à l'écart maximum entre les fonctions de répartition expérimental et théorique. On rejette H_0 dès lors que $D_n \geq d_{n,\alpha}$

Pour obtenir la valeur $d_{n,\alpha}$, on peut lire le tableau en annexe 3.

Sous Python, la fonction `kstest` de la bibliothèque `scipy.stats` renvoie directement un pourcentage appelé *p-value* à comparer au seuil α choisi. Si $p\text{-value} < \alpha$, on rejette H_0 .

3.2.1.3. Visualisation du SPI

Le processus de transformation des données de précipitations en SPI est représenté par la figure 13. Sur la figure de gauche sont tracées la probabilité cumulée empirique pour le mois de décembre du SPI-3 mois à Ebersheim et la probabilité cumulée théorique de la fonction gamma ajustée. Les valeurs de SPI correspondantes sont tracées sur la figure de droite. Pour obtenir la valeur de SPI correspondant à une précipitation, on part de la valeur de précipitation (150 mm par exemple), on remonte perpendiculairement jusqu'à intersecter la distribution théorique. On se dirige alors horizontalement sur la figure de droite jusqu'à intersecter la courbe de SPI. On peut alors redescendre verticalement jusqu'à l'axe des abscisses pour obtenir la valeur de SPI (0,31 pour continuer l'exemple).

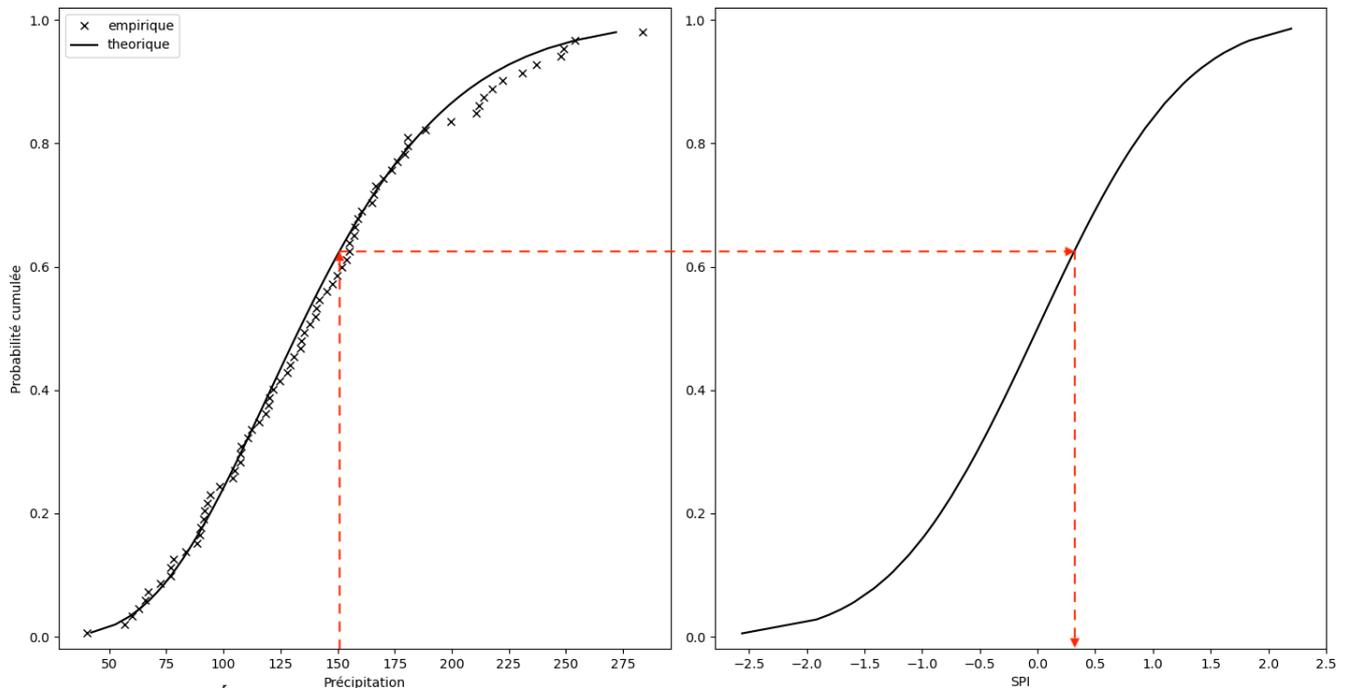


Figure 13 – Étapes de calcul du SPI : Exemple pour le mois de décembre et cumul sur 3 mois pour la station d'Ebersheim.

Le schéma ci-dessous résume le procédé de calcul du SPI.

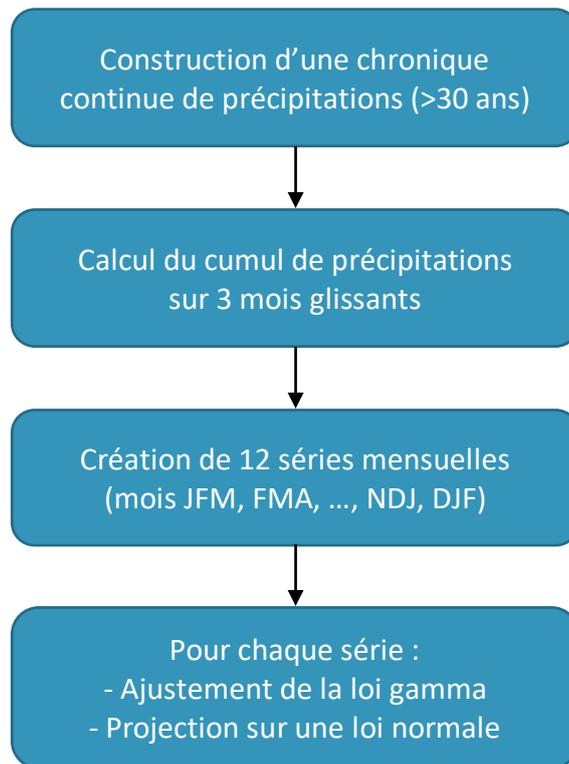


Figure 14 – Résumé du calcul du SPI-3 mois

Au final, le SPI est simplement la transformation d'une série de précipitations en une distribution normale standardisée.

Cet indice permet de représenter les sécheresses et situations humides de la même manière. Les valeurs négatives représentent des situations plus sèches que la normale tandis que les valeurs positives représentent des situations plus humides que la normale. McKee et al. (1993) ont alors arbitrairement défini des seuils pour caractériser les sécheresses :

Valeur du SPI	Catégorie de sécheresse
$0 \leq SPI < -1$	Légère sécheresse
$-1 \leq SPI < -1,5$	Sécheresse modérée
$-1,5 \leq SPI < -2$	Sécheresse sévère
$-2 \leq SPI$	Sécheresse extrême

Tableau 3 – Seuils de sécheresse associés au SPI (source : McKee et al. 1993)

3.2.2. Le SGI

Le *Standardized Groundwater level Index* (SGI) est un autre indice de sécheresse créé par Bloomfield et Marchant (2013). Son but est d'étudier les sécheresses directement par le niveau piézométrique pour déterminer l'état de la nappe.

La méthodologie est basée sur celle du SPI. Cependant, il n'y a pas de cumul des données piézométriques sur une période donnée : la hauteur piézométrique étant une donnée continue, cela n'a pas vraiment de sens.

Étape 0 : Construction d'une série continue de données piézométriques mensuelles.

Étape 1 : Création de 12 séries mensuelles de données piézométriques (janvier, février, ... décembre)

Étape 2 : Pour chaque série de données : Un ajustement non paramétrique des données est réalisé. Pour créer cet indice, la première idée était de trouver une loi statistique qui s'adapte bien aux données piézométriques mais les résultats ont montré qu'il n'y a pas de loi unique qui s'adapte à toutes les distributions mensuelles des données piézométriques. Les auteurs se sont alors tournés vers l'utilisation d'un ajustement non-paramétrique : la transformation en score standard. C'est une transformation statistique basée sur un classement des données. D'autres types d'ajustements existent comme l'estimation par noyau utilisée par Kumar *et al.* (2016).

Étape 2.1 : Tri des données par valeur croissante. Un rang est alors associé, 1 pour la valeur la plus faible, 2 pour la deuxième... n pour la dernière valeur.

Étape 2.2 : On associe une probabilité à chaque valeur piézométrique. Cette probabilité est donnée par :

$$p = \frac{2r - 1}{2n}$$

- Où :
- p : probabilité associée à la valeur piézométrique ($p \in [0 ; 1]$)
 - r : rang associé à la valeur piézométrique
 - n : nombre de valeurs piézométriques dans la série

Ainsi, les probabilités sont également réparties entre $\frac{1}{2n}$ et $1 - \frac{1}{2n}$. Ce sont là des probabilités cumulées.

Étape 3 : Normalisation des données. La fonction de répartition normale inverse est alors appliquée sur les probabilités cumulées pour obtenir les valeurs de SGI.

Étape 4 : Les données piézométriques et leur valeur de SGI associée sont remises en ordre chronologique.

Le schéma suivant résume le processus de calcul du SGI.

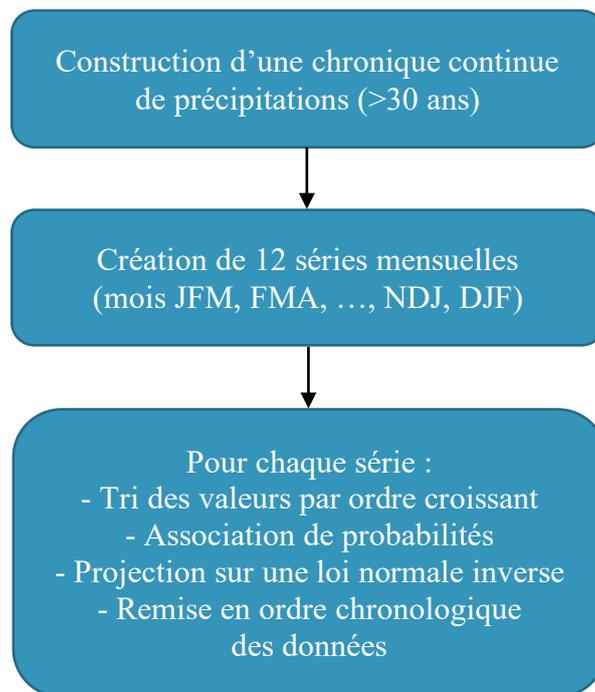


Figure 15 – Résumé du calcul du SGI

Contrairement à ce que McKee *et al.* (1993) ont réalisé, Bloomfield et Marchant (2013) n'ont pas défini de valeurs seuils pour caractériser l'état de la nappe.

3.2.3. Observation de l'évolution des indices

Pour chaque site et chaque indice, une régression linéaire et une moyenne sur 2 ans seront réalisées dans le but d'observer la tendance de l'évolution de l'indice dans le temps.

3.2.3.1. Moyenne mobile

Le but de la moyenne mobile (aussi appelée moyenne glissante) sur N-mois est de lisser les résultats bruts des indices. Le fonctionnement est similaire à la somme mobile réalisée dans l'étape 2 du calcul du SPI sauf qu'une moyenne est réalisée à la place d'une somme.

Pour chaque mois, une moyenne de la valeur de l'indice du mois et des N-1 valeurs précédentes est réalisée. Cette moyenne n'est donc calculable qu'à partir de la N-ième valeur de l'indice.

Dans cette étude, une moyenne mobile des indices sur 2 ans sera réalisée. C'est un choix arbitraire décidé en comparant les moyennes sur 6 mois, 1 an, 2 ans et 5 ans. L'annexe 4 permet de comparer les différentes moyennes glissantes en prenant l'exemple du SPI 3 mois et du SPI-12 mois sur la station d'Ebersheim.

Cette moyenne lisse les résultats, cela permet d'observer s'il y a une tendance à la hausse, à la baisse ou une cyclicité dans la survenue des sécheresses.

3.2.3.2. Régression linéaire simple

Une régression linéaire est également réalisée sur les indices pour observer la tendance de leur évolution temporelle : hausse ? baisse ? stagnation ?

Le but est de trouver une relation linéaire dans une variable, ici l'indice étudié. On cherche donc une relation affine entre la valeur de l'indice et le temps.

La forme souhaitée est :

$$indice = a \cdot temps + b$$

- Où
- *indice* est l'indice étudié (SPI ou SGI)
 - *temps* est la variable temporelle
 - *a* est la pente de la fonction affine
 - *b* est l'ordonnée à l'origine

Pour réaliser cette régression, on utilise ici la fonction `polyfit` de la bibliothèque `numpy` sous Python. Cette fonction ajuste les coefficients *a* et *b* par la méthode des moindres carrés.

Dans son rapport pour le BRGM, Canceill, 1974 donne plus de détails sur le calcul pratique de la régression linéaire.

3.2.4. Observation des relations entre les sites

Dans le but d'observer les relations entre les différents sites pour un même indice, une corrélation de Bravais-Pearson est réalisée. Cela permettra d'observer quels sites ont un comportement similaire et quels sites ont un comportement totalement différent.

Point sur la corrélation de Bravais-Pearson (Grasland, 2005)

Le but est de calculer un coefficient de corrélation entre deux variables. La corrélation de Bravais-Pearson permet d'analyser la présence ou non d'une relation linéaire entre deux variables. On l'obtient par la formule :

$$r(X, Y) = \frac{Cov(X, Y)}{\sigma_X \sigma_Y}$$

- où
- $r(X, Y)$ est le coefficient de corrélation
 - $Cov(X, Y)$ est la covariance entre X et Y, c'est à dire la moyenne du produit des écarts à la moyenne.
 - σ_X et σ_Y sont les écarts-types de X et Y

Sa valeur est comprise entre -1 et 1. Une valeur de -1 indique qu'il y a une relation linéaire négative entre les deux variables, que les variables évoluent en opposition ; une valeur de 0 indique qu'il n'y a pas de relation linéaire entre les variables ; une valeur de 1 indique qu'il y a une relation linéaire positive entre les variables, qu'elles varient de la même manière. La valeur présentée sera en réalité le carré du coefficient de corrélation, valeur utilisée dans de nombreuses bibliographies.

3.2.5. Corrélation entre le SPI et le SGI

Le SPI permet de quantifier la sécheresse météorologique, le SGI permet quant à lui de caractériser la sécheresse hydrogéologique. Il est intéressant de connaître le lien entre les deux : avec quel cumul et quel décalage temporel le SPI corrèle le mieux avec le SGI.

Pour cela, comme proposé par Bloomfield et Marchant (2013), une corrélation linéaire de Pearson a été réalisée entre le SGI et les SPI calculés avec un cumul de 1 à 20 mois. Guttman (1999) recommande de calculer le SPI pour des pas de temps supérieurs à 24 mois uniquement dans le cas où la chronique de donnée est supérieure à 60 ans. L'OMM (2012) ne recommande donc pas de calculer l'indice sur de tels pas de temps à moins d'avoir une chronique de données supérieure à 80-100 ans. Si ce n'est pas le cas, le degré de confiance statistique vis-à-vis des résultats est faible. Cela est à prendre en compte pour le calcul des corrélations, c'est pour cela que nous limitons à 20 mois le pas de temps maximal de calcul.

4. Résultats et discussion

4.1. Le SPI

Comme indiqué dans la partie précédente, le SPI peut être calculé sur plusieurs pas de temps, généralement entre 1 et 24 mois. La variation du pas de temps permet d'observer des phénomènes différents. Le SPI 1-mois permet d'observer le déficit de précipitations au niveau mensuel.

En prenant un pas de temps de 3 mois, le déficit en eau est observé à l'échelle de la saison. Dans les régions agricoles, le SPI-3 mois semble être performant pour accéder aux conditions d'humidité en cours (OMM, 2012).

Avec un pas de temps de 6 mois, l'information fournie permet de mettre en évidence les événements ayant lieu sur la période de la saison à moyen terme.

Au pas de temps annuel, l'indice représente les précipitations sur une longue échéance. Puisque l'indice compare les précipitations sur 12 mois consécutifs, les valeurs devraient graviter autour de 0 sauf si des tendances humides ou sèches se sont installées sur le long terme.

Il est alors intéressant de comparer les valeurs entre les différents pas de temps : Les pas de temps faibles auront tendance à sous-estimer la durée de grandes sécheresses alors que les pas de temps élevés auront tendance à sous-évaluer l'intensité des sécheresses.

4.1.1. Évolution temporelle du SPI

Le but de ce paragraphe est d'étudier l'évolution temporelle du SPI calculé. Les sécheresses historiques sont-elles visibles ? Y-a-t-il un changement de comportement ? Les résultats du SPI-12 mois sont présentés dans la figure 16. Les résultats pour les pas de temps de 1, 3 et 6 mois sont donnés en annexe 5 à 7. Sur ces graphiques sont représentés l'évolution temporelle du SPI, la moyenne sur 24 mois glissants du SPI, la tendance de l'évolution de l'indice sur toute la chronique disponible et la tendance de l'évolution de l'indice sur les 30 et les 5 dernières années. Afin de pouvoir comparer les valeurs entre les sites plus facilement, l'axe des abscisses a été fixé pour tous les graphiques. Il correspond à la chronique de données la plus longue. C'est celle de la station de Strasbourg-Botanique (1940-2020).

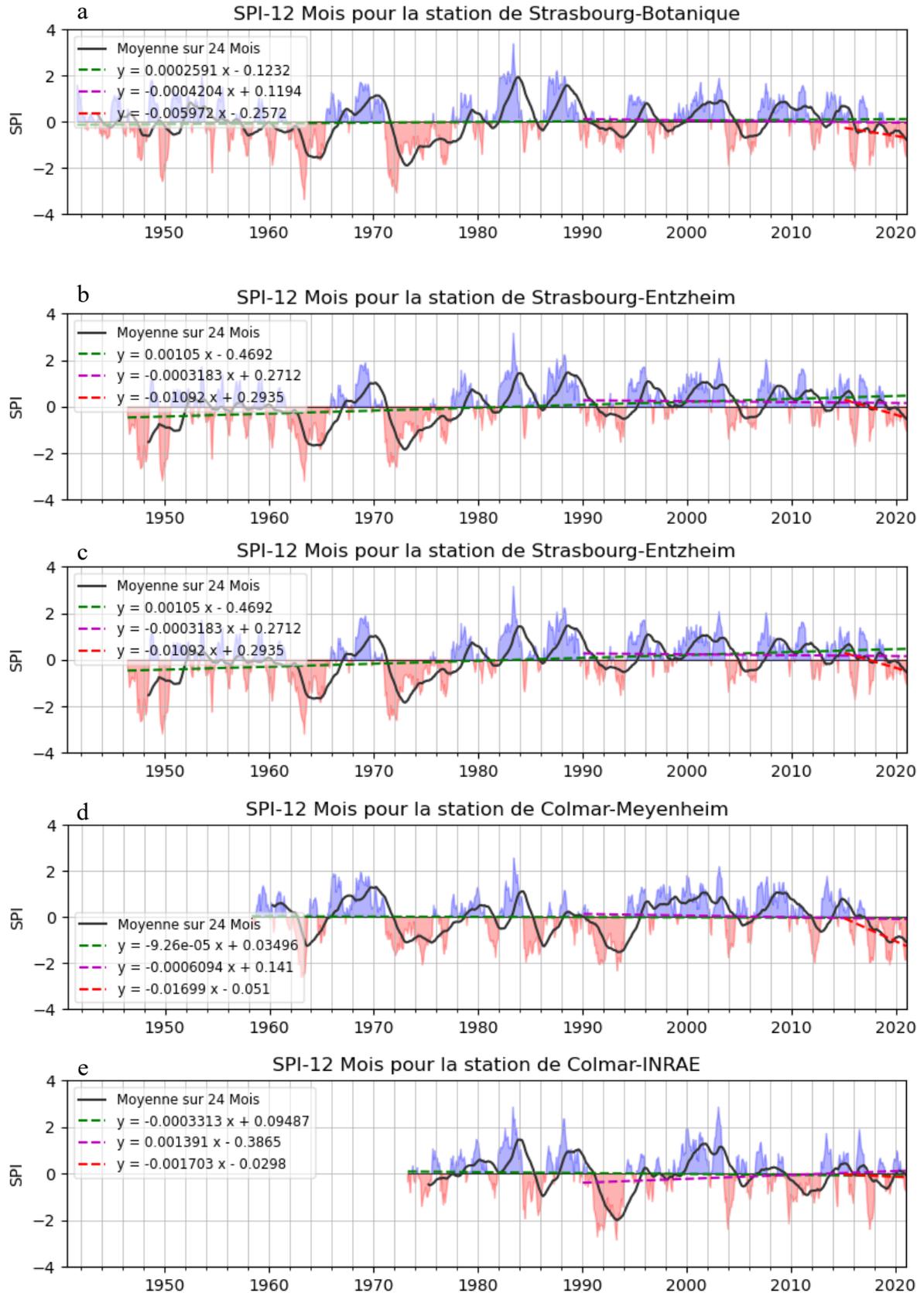


Figure 16 – Résultats du SPI-12 mois pour les différentes stations.
 Légende des tendances : En vert : tendance sur toute la chronique, en rouge : tendance sur les 30 dernières années, et magenta : tendance sur les 5 dernières années

Il semble y avoir eu une grande période de déficit en eau qui a duré environ 5 ans de 1971 à 1976. Cette sécheresse dépasse la valeur de -2 sur tous les sites concernés, elle peut donc être considérée comme extrême. Sa durée est aussi remarquable, c'est l'événement de sécheresse qui a duré le plus longtemps de toutes les chroniques. La station de Colmar-INRAE ne semble pas avoir été autant impactée par cet événement. La figure 16.d montre bien une sécheresse mais elle est moins longue et de moindre intensité. Souchère (2015) a aussi observé cette importante sécheresse lors du calcul du SPI-12 mois sur la station de Strasbourg-Entzheim. Krebs *et al.* (1980) fait référence à cette période de sécheresse.

La sécheresse historique de 2003 semble avoir plus impacté le secteur de Colmar que les autres stations : l'intensité de la sécheresse au pas de temps de 12 mois y est plus élevée. Au pas de temps de 3 mois, la sécheresse de 2003 est plus visible (Annexe 6)

Sur les stations de Colmar-Meyenheim et Colmar-INRAE, le SPI-12 mois indique une autre période de sécheresse à partir de 1989. Cet événement est documenté par Mérillon et Chaperon (1990) qui indiquent que cet épisode de sécheresse devrait continuer en 1990 et peut-être sur d'autres années. C'est ce qui est observé ici, selon les résultats du SPI-12 mois, l'évènement a duré jusqu'en 1994.

La sécheresse de 2015 est aussi très visible sauf pour la station d'Ebersheim (fig 16.c). Sur cette station, au pas de temps de 12 mois, le SPI ne montre pas de fort déficit de pluviométrie. A l'inverse, sur la station de Colmar-Meyenheim (fig. 16.e), des pics de sécheresses météorologiques se succèdent sur les 5 dernières années dont l'intensité atteint les sécheresses historiques. Sur les autres stations, le SPI-12 mois montre aussi des successions de sécheresses sur les 5 dernières années, mais elles sont moins régulières.

En regardant sur un pas de temps plus faible, sur 3 mois ou 6 mois (Respectivement en annexe 6 et 7), Les sécheresses des dernières années sont plus visibles. Ce sont donc des sécheresses moins longues qui ont un impact à court ou moyen terme.

4.1.2. Pente des tendances sur les 30 et 5 dernières années

Pour étudier spatialement l'évolution des sécheresses météorologiques, les tendances sur les 30 et les 5 dernières années des SPI 1, 3, 6 et 12 mois ont été extraites. Le tableau 4 donne les pentes obtenues.

Indice	Localisation	SPI-1 mois		SPI-3 mois	
		Sur 30 ans	Sur 5 ans	Sur 30 ans	sur 5 ans
a	Strasbourg-Botanique	$-4.99.10^{-4}$	$-2.34.10^{-3}$	$-6.21.10^{-4}$	$-2.04.10^{-3}$
b	Strasbourg-Entzheim	$-3.04.10^{-4}$	$-4.27.10^{-3}$	$-3.73.10^{-4}$	$-4.20.10^{-3}$
c	Ebersheim	$1.52.10^{-4}$	$-5.33.10^{-3}$	$4.51.10^{-4}$	$-8.64.10^{-3}$
d	Colmar-INRAE	$-3.51.10^{-4}$	$-5.03.10^{-3}$	$-4.89.10^{-4}$	$-7.98.10^{-3}$
e	Colmar-Meyenheim	$1.19.10^{-4}$	$4.48.10^{-4}$	$5.13.10^{-4}$	$2.32.10^{-3}$
Indice	Localisation	SPI-6 mois		SPI-12 mois	
		Sur 30 ans	Sur 5 ans	Sur 30 ans	Sur 5 ans
a	Strasbourg-Botanique	$-7.08.10^{-4}$	$-3.92.10^{-3}$	$-4.20.10^{-4}$	$-5.97.10^{-3}$
b	Strasbourg-Entzheim	$-4.65.10^{-4}$	$-6.25.10^{-3}$	$-3.18.10^{-4}$	$-1.09.10^{-2}$
c	Ebersheim	$7.49.10^{-4}$	$-1.18.10^{-2}$	$1.23.10^{-3}$	$-1.19.10^{-2}$
d	Colmar-INRAE	$-5.92.10^{-4}$	$-1.07.10^{-2}$	$-6.09.10^{-4}$	$-1.70.10^{-2}$
e	Colmar-Meyenheim	$8.18.10^{-4}$	$2.31.10^{-3}$	$1.39.10^{-3}$	$-1.70.10^{-3}$

Tableau 4 – Pente des tendances sur les 30 dernières années des SPI 1, 3, 4, 6 et 12 mois.

Comparer les valeurs des pentes de tendances entre les 5 et les 30 dernières années n'aurait pas vraiment de sens. Le nombre de points pour caler la tendance étant beaucoup moins important sur 5 ans que sur 30, il est logique que les pentes puissent être beaucoup plus élevées. En revanche, comparer les signes de la pente peut avoir son intérêt.

Pour les stations de Colmar-INRAE et d'Ebersheim, la tendance sur 30 ans du SPI est à la hausse. Il semble donc que les sécheresses météorologiques soient moins impactantes qu'il y a 30 ans. Le déficit d'apport en eau semble moins présent qu'avant.

Pour la station d'Ebersheim (fig. 16.d), les dernières années ont un indice de SPI-12 mois supérieur à 0, cela signifie qu'au pas de temps annuel, les dernières années ont une pluviométrie supérieure à la normale. Il y a relativement peu de périodes avec un indice négatif. En regardant avec un pas de temps plus faible, sur le SPI-3 mois, on observe plus d'évènements secs, notamment avec un $SPI < -2$ qui sont donc des sécheresses sévères, dont la durée est plutôt courte. Mais on observe aussi de évènements très humides. Depuis 30 ans, il semble donc y avoir des successions d'évènements extrêmes humides et secs.

Pour la station de Colmar-INRAE, c'est sûrement le fort événement de sécheresse entre 1990 et 1994 qui impact fortement la tendance, surtout pour le SPI-12 mois. En prenant un pas de temps plus faible, la pente de la tendance diminue et est quasi nulle. On remarque tout de même

En s'intéressant à la pente des tendances des 5 dernières années, une tendance à la hausse n'est observée que pour la station de Colmar-Meyenheim. Pour cette même station, la tendance change de sens en tend à diminuer en regardant le SPI-12 mois. Aussi, pour le SPI-12 mois, la tendance sur tous les sites est à la baisse. Cela signifie que les années sont de moins en moins pluvieuses.

La figure 17 permet d'observer l'évolution spatiale des pentes des tendances du SPI-12 mois sur les 30 et les 5 dernières années. Les pentes des tendances sur les 30 et les 5 dernières années ont respectivement été classées de sorte à avoir 5 classes d'intervalles égaux centrés autour de 0. Cela permet de localiser les secteurs où la tendance est à la hausse, à la baisse ou en stagnation. Sur les 30 dernières années (figure de gauche), il ressort que le secteur autour de Strasbourg connaît une évolution négative du SPI-12 mois. La pluviométrie est à la baisse. Entre la tendance sur les 30 dernières années et celle sur les 5 dernières années, seule la station de Colmar-Meyenheim voit son indice tendre en forte hausse.

Il est difficile de définir des évolutions particulières par secteur vu le nombre de stations.

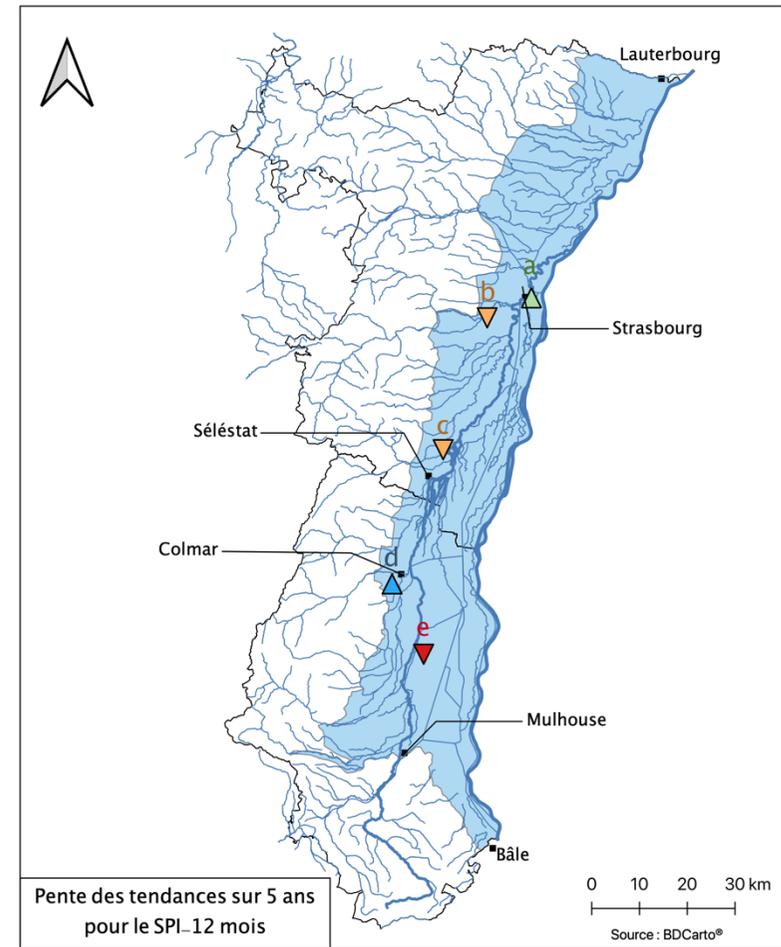
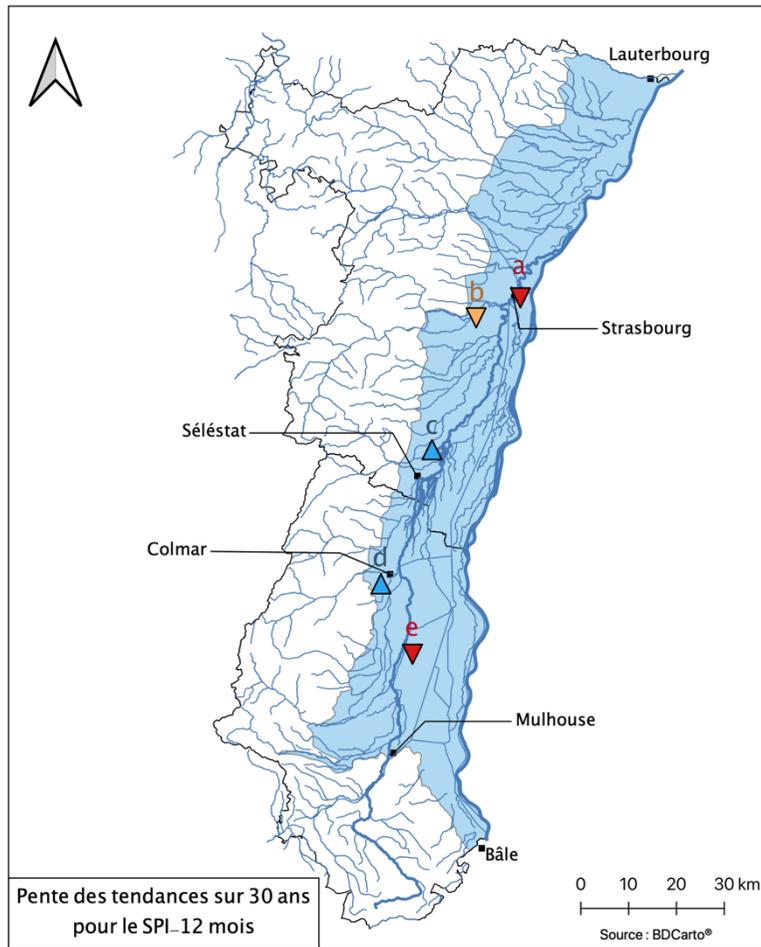


Figure 17 – Carte des pentes des tendances du SPI-12 mois sur les 30 et les 5 dernières années, respectivement à gauche et à droite

4.1.3. Corrélation spatiale du SPI

Pour étudier la relation du SPI entre les 5 sites, une corrélation a été réalisée. Ces corrélations intersites ont été réalisées avec un pas de temps de 1, 3, 6 et 12 mois. La figure 18 montre les résultats. Le tableau 5 présente les coefficients de corrélation obtenus.

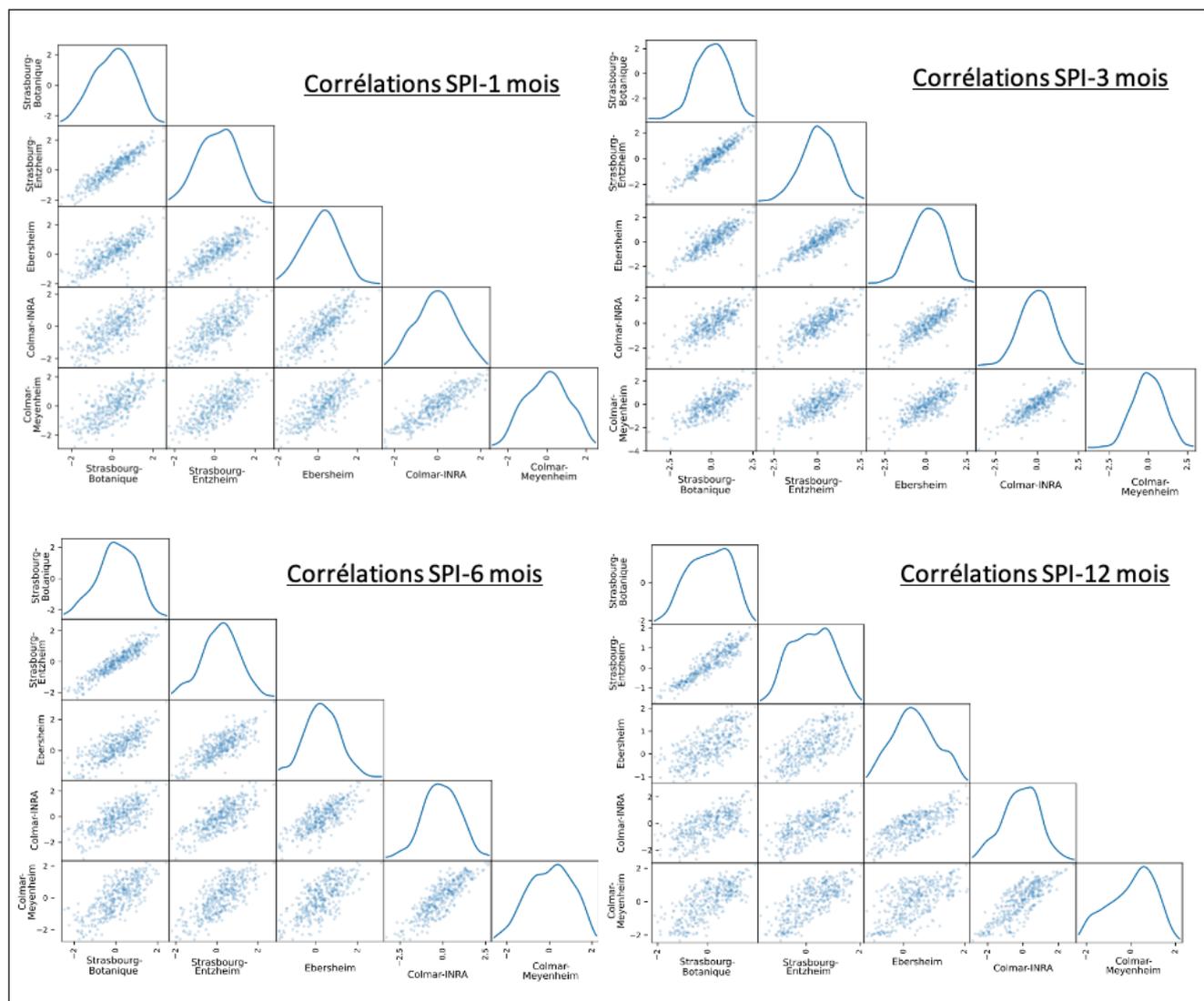


Figure 18 – Corrélations entre les sites pour les SPI 1, 3, 6 et 12 mois

SPI-1M					
SB	1,00				
SE	0,86	1,00			
E	0,72	0,75	1,00		
CI	0,58	0,65	0,70	1,00	
CM	0,57	0,59	0,59	0,73	1,00
	SB	SE	E	CI	CM

SPI-3M					
SB	1,00				
SE	0,87	1,00			
E	0,65	0,69	1,00		
CI	0,55	0,61	0,64	1,00	
CM	0,56	0,57	0,54	0,76	1,00
	SB	SE	E	CI	CM

SPI-6M					
SB	1,00				
SE	0,87	1,00			
E	0,58	0,62	1,00		
CI	0,49	0,53	0,59	1,00	
CM	0,55	0,55	0,50	0,72	1,00
	SB	SE	E	CI	CM

SPI-12M					
SB	1,00				
SE	0,85	1,00			
E	0,47	0,46	1,00		
CI	0,40	0,45	0,56	1,00	
CM	0,55	0,55	0,40	0,65	1,00
	SB	SE	E	CI	CM

SB : Strasbourg-Botanique, SE : Strasbourg-Entzheim, E : Ebersheim,
 CI : Colmar-INRAE, CM : Colmar-Meyenheim

Tableau 5 – Coefficients de corrélations entre les sites pour les SPI 1, 3, 6 et 12 mois

Pour tous les pas de temps, la corrélation la plus élevée est entre les stations de Strasbourg-Botanique et de Strasbourg-Entzheim. C'est une très bonne corrélation dont le coefficient est supérieur à 0.85. On peut donc penser qu'il y a une relation linéaire entre les deux stations. De manière similaire, les stations de Colmar-INRAE et Colmar-Meyenheim ont des résultats de corrélation très élevées. Dans les deux cas, les stations sont relativement proches. La pluviométrie est donc similaire. C'est principalement ce qui explique ces résultats.

La station d'Ebersheim montre de plutôt bons résultats avec les autres stations, il n'y a qu'avec la station de Colmar-Meyenheim que les résultats sont moins élevés. La station d'Ebersheim est celle qui est située au centre de l'Alsace, au centre de toutes les autres stations. C'est donc sûrement sa localisation qui est à l'origine de ces résultats.

Plus le pas de temps du SPI augmente, moins les corrélations sont bonnes. Selon le pas de temps observé, les stations ne réagissent donc pas de la même manière. En regardant les sécheresses sur le long terme, les spécificités locales entrent en compte.

4.1.4. Limites du SPI

Le SPI est un indice relativement simple à calculer, il ne nécessite que des données de pluviométrie pour le calcul. C'est aussi un de ses points faibles : il ne prend en compte que les précipitations liquides. Aussi, la neige n'est pas prise en compte dans le calcul. Un mois d'hiver avec de forts événements neigeux et peu de précipitations paraîtra donc comme sec alors que ce n'est pas le cas en réalité. De même, l'effet d'évapotranspiration n'est pas pris en compte. En période de forte chaleur, elle peut être importante et intensifie la sécheresse en cours voire peut déclencher de nouvelles sécheresses.

Le SPI est relativement sensible à la longueur de la chronique de données. L'ajustement de la loi de probabilité s'effectue moins bien lorsqu'il y a moins de données.

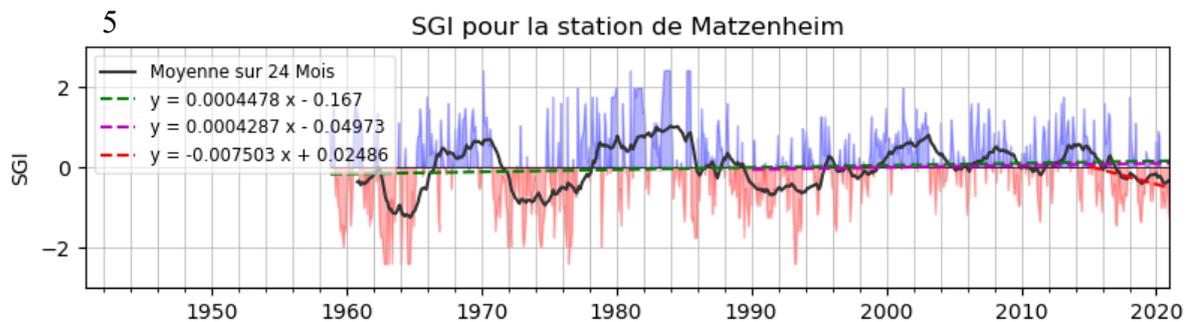
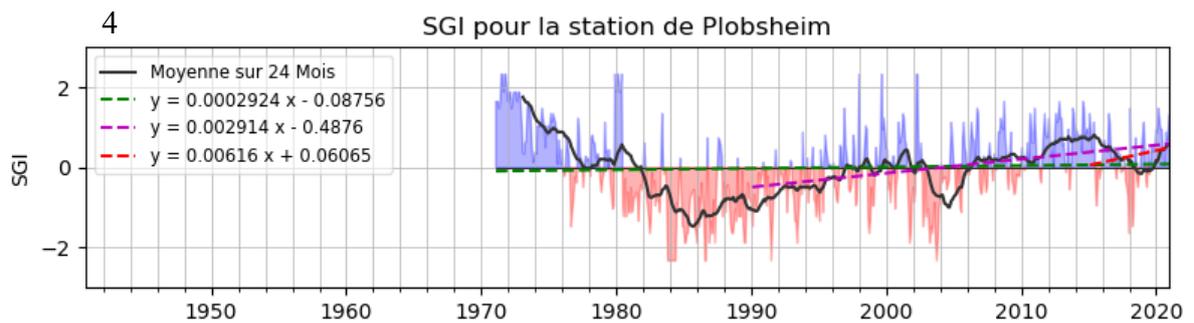
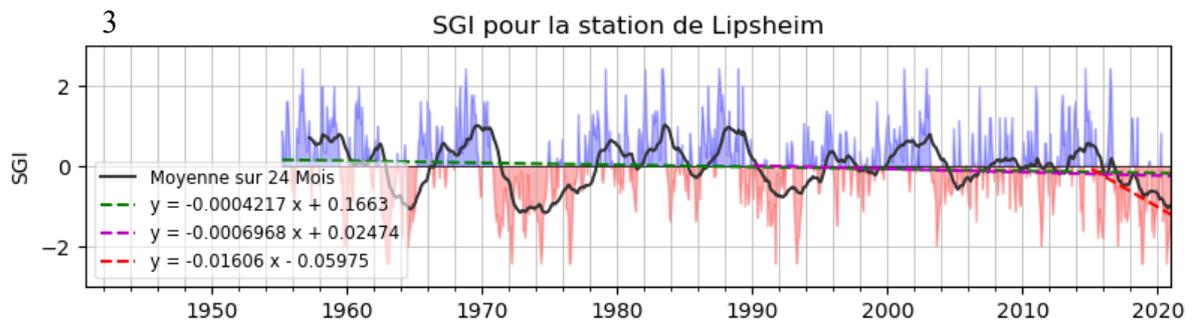
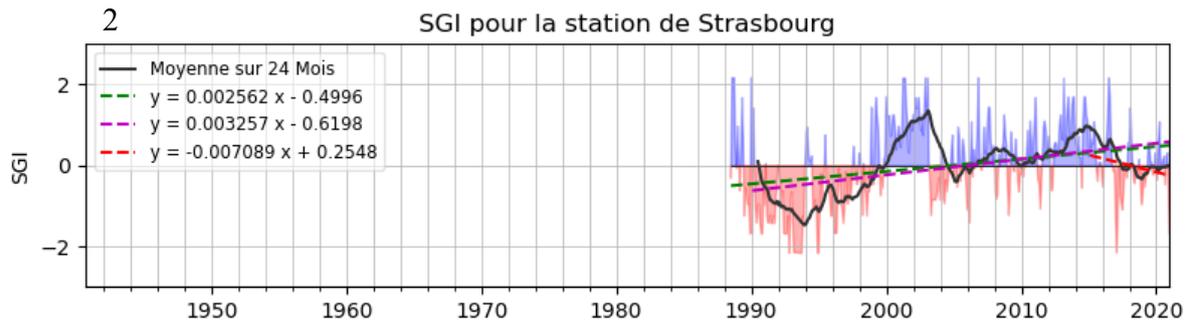
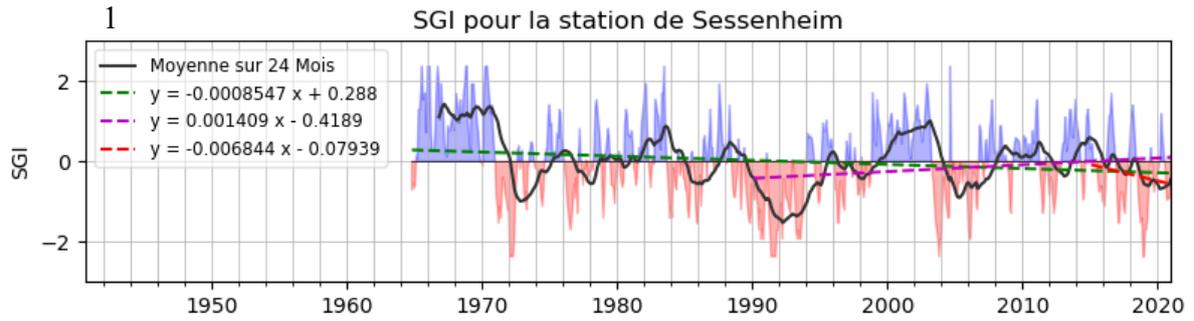
Sur les pas de temps faibles, et notamment sur 1 mois, les résultats obtenus peuvent être faussés. Il est possible que la pluviométrie soit habituellement faible au cours d'un mois donnée, à pas de temps faible, le SPI peut alors donner des valeurs positives ou négatives importantes pour certains événements alors que l'écart de pluviométrie par rapport à la moyenne est relativement faible (OMM, 2012). C'est observable en Alsace où la pluviométrie est relativement faible. Les résultats du SPI-1 en annexe 5 mois montrent des valeurs extrêmes atteignant des valeurs dépassant -3 pour certains mois. Le mois suivant, le SPI prend une valeur positive. De nombreuses variations entre valeurs fortement négatives et fortement positives sont observables. Il faut alors être prudent en interprétant le SPI à pas de temps faible pour ne pas être induit en erreur.

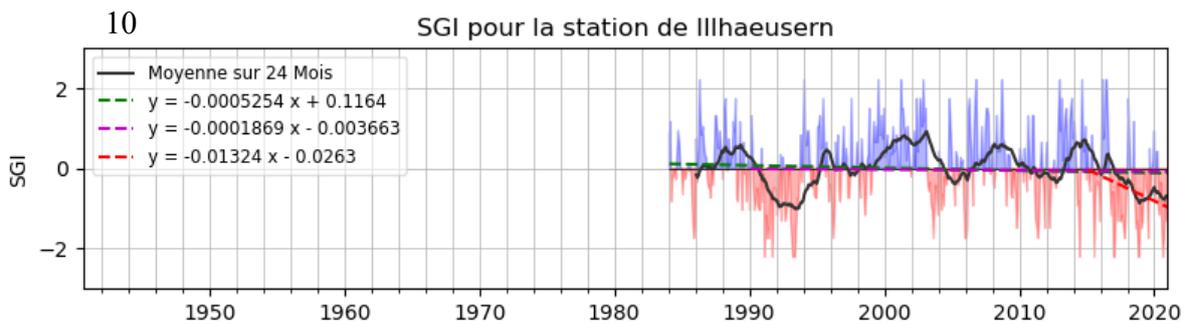
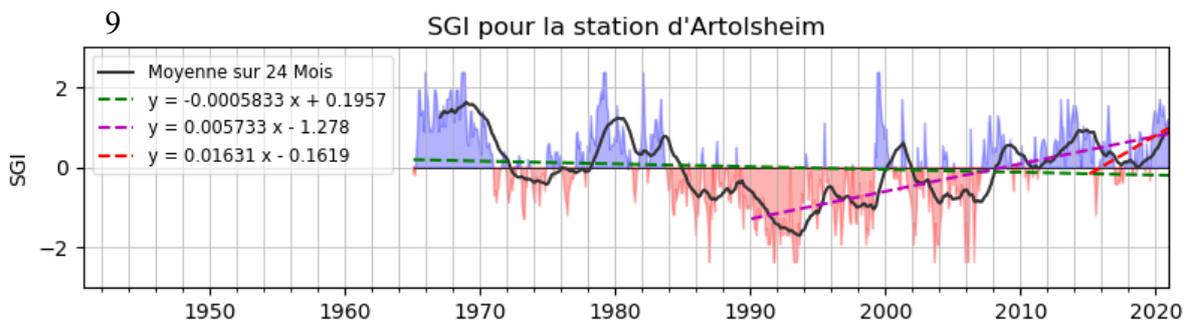
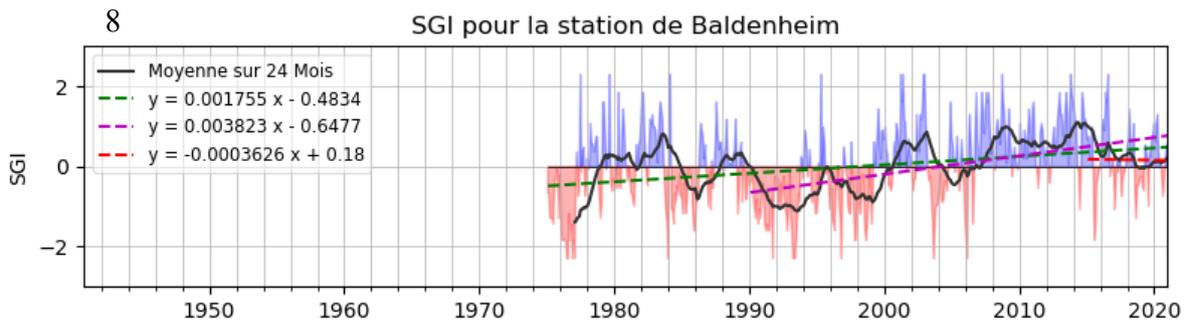
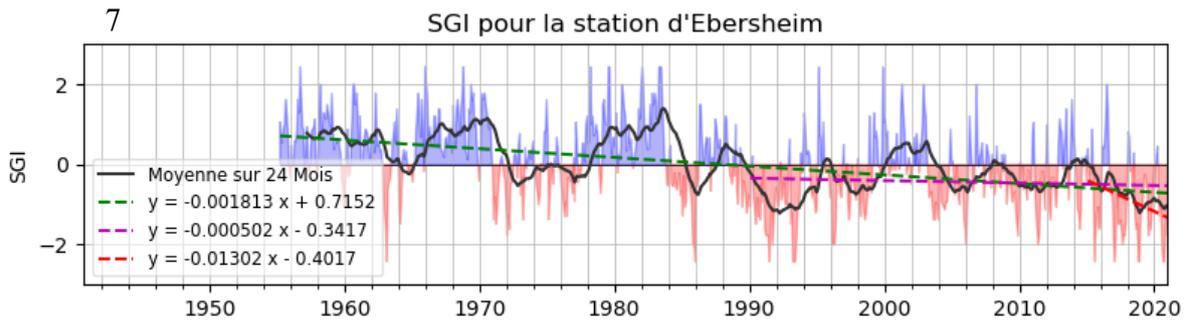
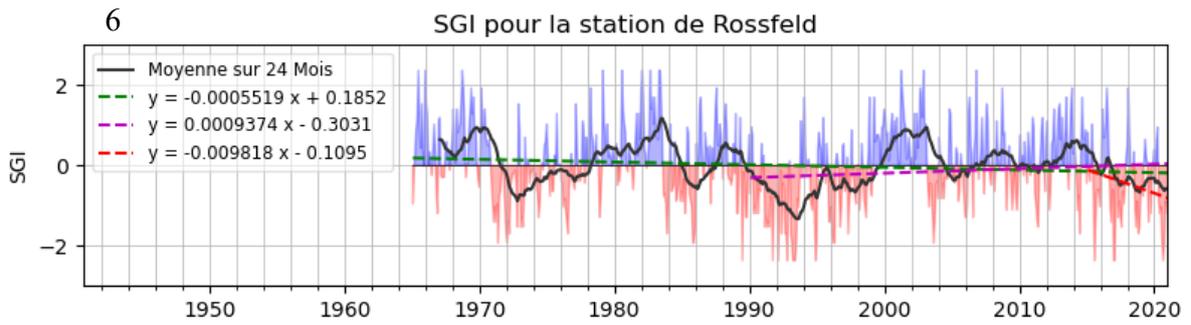
4.2. Le SGI

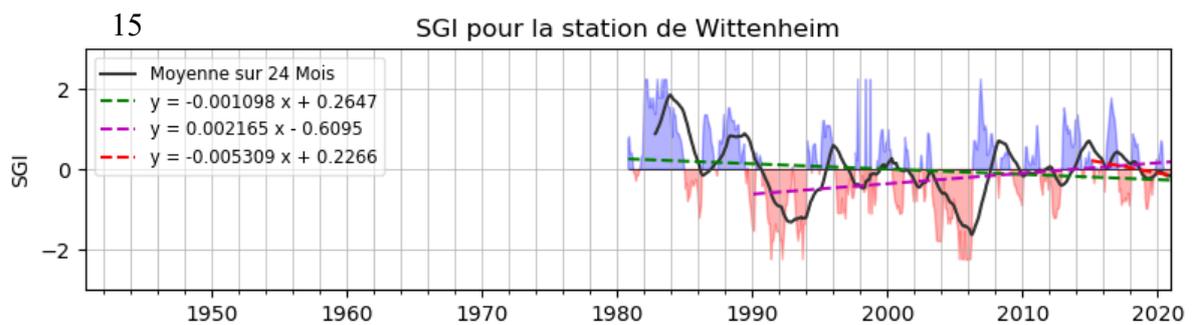
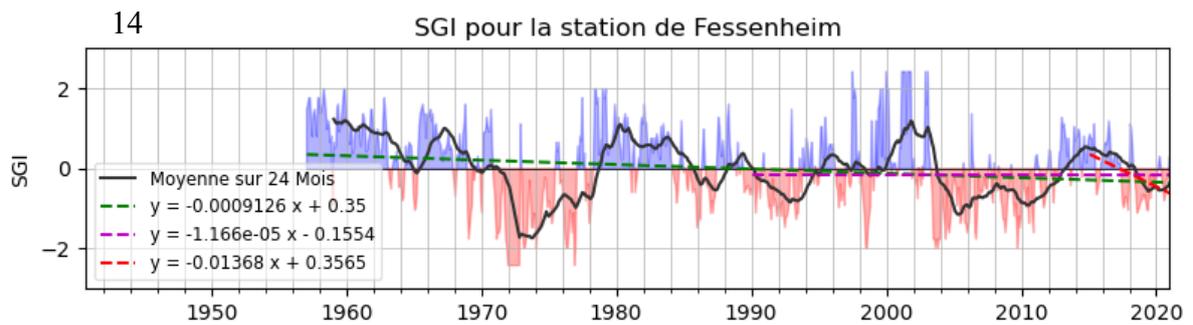
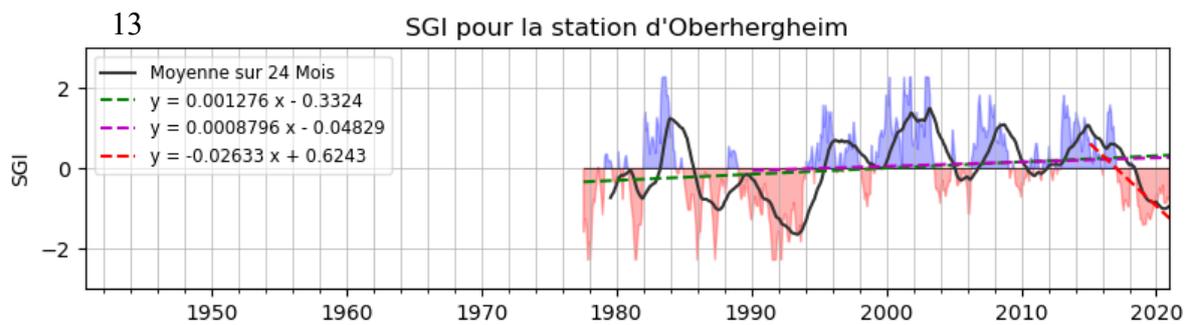
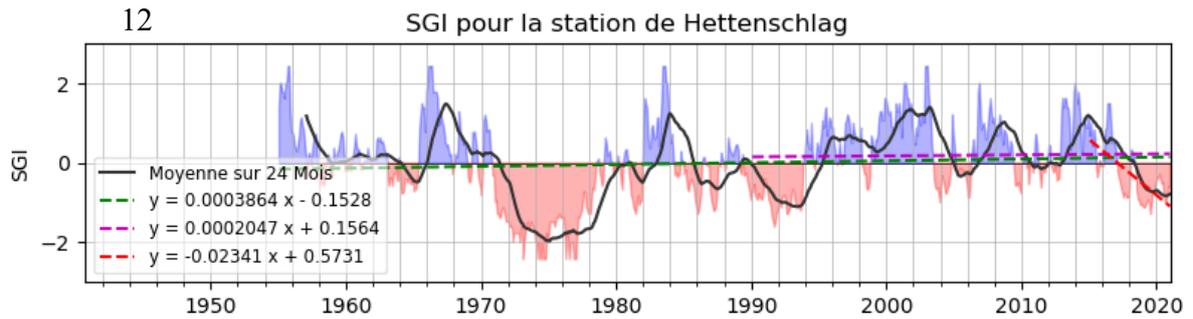
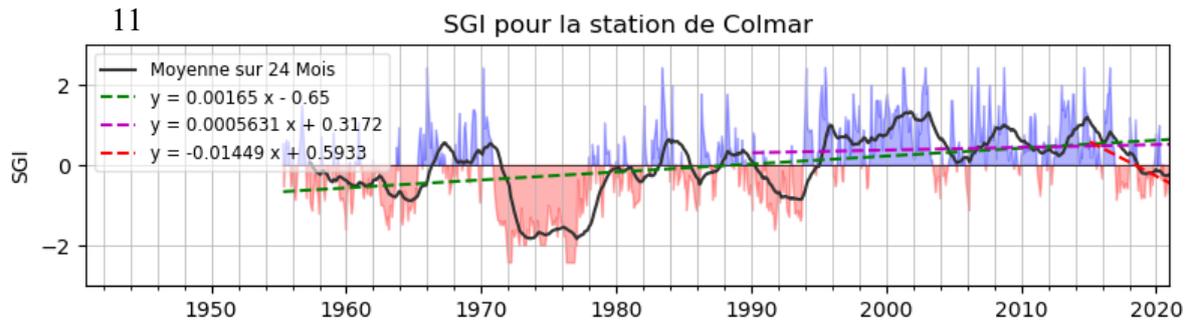
4.2.1. Évolution temporelle du SGI

L'évolution du SGI pour les différentes stations est donnée dans la figure 19. Pour faciliter la comparaison des valeurs avec le SPI, l'axe des abscisses utilisé pour le SPI a été conservé.

Sur la plupart des sites, la période sèche entre 1970 et 1976 est observable mais les sites ne sont pas impactés de la même manière. Il semble que le secteur sud ait été plus impacté que le secteur nord. Seules les stations de Plobsheim et d'Artolsheim (fig. 19.4 et 19.9) se semblent pas avoir été impactée ou très peu impacté par cette succession d'années sèches. Les stations de Colmar et d'Hettenschlag sont les deux stations qui semblent le plus avoir été impactées par cette succession d'années sèches (fig. 19.11 et 19.12)







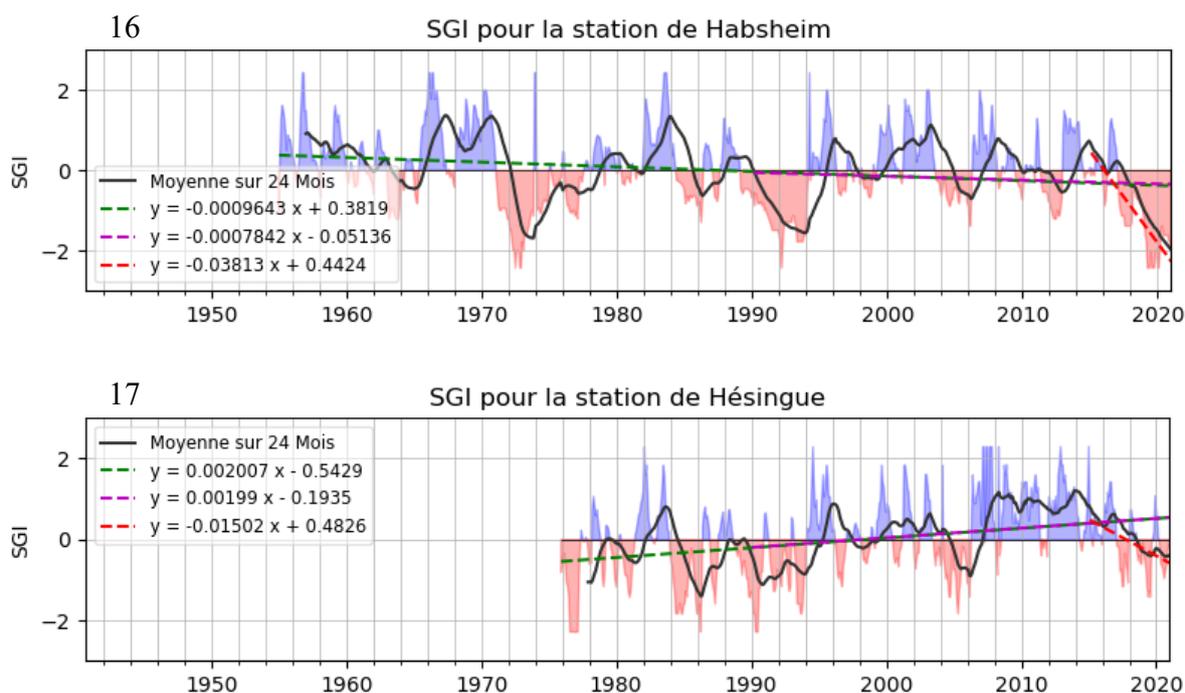


Figure 19 – Résultat du SGI pour les 17 stations étudiées avec les moyennes glissantes sur 2 ans, les tendances sur toute la période, sur les 30 et les 5 dernières années.
Légende des tendances : En vert : tendance sur toute la chronique, en rouge : tendance sur les 30 dernières années, et magenta : tendance sur les 5 dernières années

Un autre événement de sécheresse qui débute en 1989 est observable sur de nombreuses stations. Cet événement semble s'étaler sur 5 ans. Pour les stations de Plobsheim et d'Artolsheim, cet événement est inclus dans un épisode de sécheresse plus grand.

Sur ces 5 dernières années, le SGI montre un niveau de la nappe relativement bas sur la plupart des stations et particulièrement sur les stations de Lipsheim, de Rossfeld, d'Ebersheim, d'Illhausern et de Habsheim (fig. 19.3, 19.6, 19.7, 19.10 et 19.16) dont le SGI dépasse la valeur de -2 sur ces dernières années. Seules les stations de Plobsheim et d'Artolsheim ne semblent pas souffrir de sécheresses sur les dernières années. Le comportement de ces stations est vraiment différent des autres stations. Ce sont deux stations très proches du Rhin, son influence impacte donc grandement leur comportement. La station de Fessenheim (fig. 19.14) est elle aussi très proche du Rhin, pourtant son comportement est semblable à d'autres stations non influencées par le Rhin.

4.2.2. Évolution des tendances sur les 30 et 5 dernières années

Pour les mêmes raisons que pour le SPI, les tendances sur les 30 et les 5 dernières années pour le SGI ont été calculées. L'idée est de pouvoir comparer l'évolution entre les sites des particularités spatiales dans l'évolution de l'indice. Le tableau 6 résume les pentes des tendances calculées.

Indice	Localisation	Tendance	
		sur 30 ans	sur 5 ans
1	Sessenheim	1,43.10 ⁻³	-6,87.10 ⁻³
2	Strasbourg	3,32.10 ⁻³	-7,26.10 ⁻³
3	Lipsheim	-6,97.10 ⁻⁴	-1,61.10 ⁻²
4	Plobsheim	3,21.10 ⁻³	6,65.10 ⁻³
5	Matzenheim	4,29E-04	-8,14.10 ⁻³
6	Rosfeld	9,37E-04	-9,82.10 ⁻³
7	Ebersheim	-3,89.10 ⁻⁴	-1,31.10 ⁻²
8	Baldenheim	3,98.10 ⁻³	-6,05.10 ⁻⁴
9	Artolsheim	5,73.10 ⁻³	1,63.10 ⁻²
10	Illhaeusern	-1,87.10 ⁻⁴	-1,32.10 ⁻²
11	Colmar	5,63.10 ⁻⁴	-1,45.10 ⁻²
12	Hettenschlag	2,05.10 ⁻⁴	-2,34.10 ⁻²
13	Oberhergheim	9,33.10 ⁻⁴	-2,64.10 ⁻²
14	Fessenheim	7,72.10 ⁻⁴	-1,45.10 ⁻²
15	Wittenheim	2,37.10 ⁻³	-5,46.10 ⁻³
16	Habsheim	-7,23.10 ⁻⁴	-3,82.10 ⁻²
17	Hésingue	1,95.10 ⁻³	-1,55.10 ⁻²

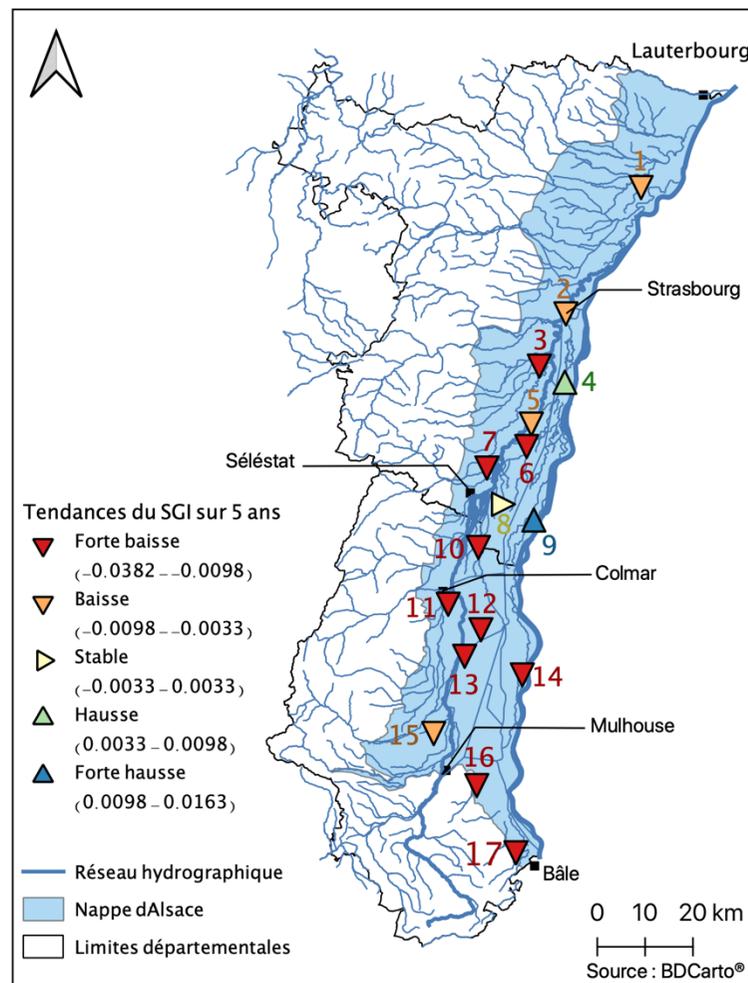
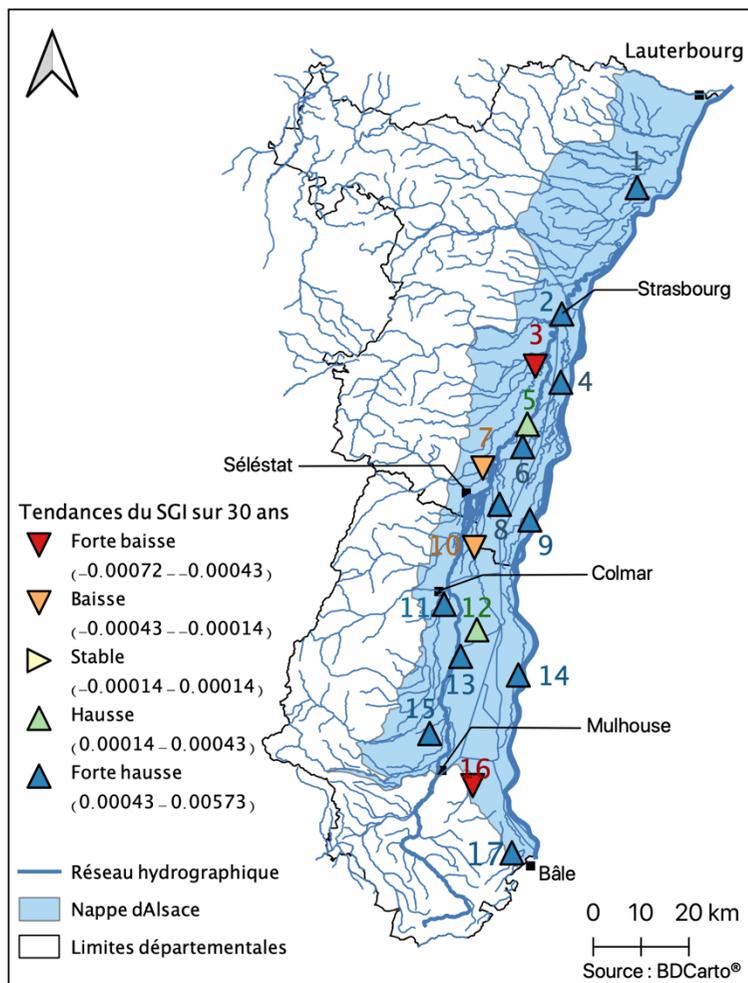
Tableau 6 – Pente des tendances de l'évolution du SGI sur les 30 et les 5 dernières années.

Sur les 30 dernières années, la tendance du SGI est globalement à la hausse. Ce résultat est surprenant vu l'impact des sécheresses des dernières années. La tendance est à la baisse pour seulement 4 des 17 stations étudiées. La date du début de la tendance sur 30 ans est 1990. Comme dit précédemment, c'est une année qui fait partie d'une période de sécheresse intense qui a duré plusieurs années. Cet événement impact donc grandement le calcul de la tendance. C'est une des raisons de la tendance à la hausse.

Sur les 5 dernières années, toutes les tendances passent à la baisse, sauf pour les piézomètres de Plobsheim et d'Artolsheim. L'influence du Rhin est aussi sûrement l'explication de ce résultat.

La figure 20 montre la répartition spatiale des pentes des tendances sur les 30 et les 5 dernières années. Comme pour le SPI, un classement a été créé à partir du logiciel QGIS de sorte à avoir 5 classes d'intervalles égaux centrés autour de 0. Au vu de cette répartition, sur les 30 dernières années, la tendance est fortement à la hausse pour 10 des 17 stations (figure de gauche). Elles ne sont pas localisées sur une partie du territoire. Il est donc difficile de dire si un secteur particulier est plus sensible aux sécheresses.

Sur les 5 dernières années, de nombreuses pentes de tendances sont classées en forte baisse. On observe bien la particularité du piézomètre d'Artolsheim qui reste en forte hausse. Il semble que l'évolution du SGI et donc des sécheresses hydrogéologiques soit plus à la baisse dans le secteur sud que dans le secteur nord. Les sécheresses semblent s'aggraver dans le grand Ried. Il aurait fallu étudier plus de piézomètres dans le secteur nord pour vérifier si l'évolution des sécheresses diffère vraiment entre le nord et le sud sur ces 5 dernières années ou si ces résultats sont simplement dus à des particularités locales. De plus, la cyclicité pluriannuelle de la nappe a un effet sur la valeur du SGI. Les périodes où la nappe est en régime bas auront naturellement une valeur d'indice plus basse et cela sans prendre en compte les éléments extérieurs impactant le niveau de la nappe. Inversement, les périodes de hautes eaux du cycle de la nappe augmenteront la valeur de l'indice du SPI. Cela peut donc avoir un impact sur la valeur de l'intensité des sécheresses.



1 : Sessenheim 3 : Lipshiem 5 : Matzenheim 7 : Ebersheim 9 : Artolsheim 11 : Colmar 13 : Oberhergheim 15 : Wittenheim 17 : Héisingue
 2 : Strasbourg 4 : Plobsheim 6 : Rossfeld 8 : Baldenheim 10 : Illhausern 12 : Hettenschlag 14 : Fessenheim 16 : Habsheim

Figure 20 – Carte des pentes des tendances du SGI sur les 30 et les 5 dernières années, respectivement à gauche et à droite

4.2.3. Corrélations du SGI entre les sites

Une corrélation entre tous les sites a été réalisée dans le but de savoir quels sites réagissent de façon similaire aux sécheresses. Les résultats des corrélations sont donnés dans la figure 21.

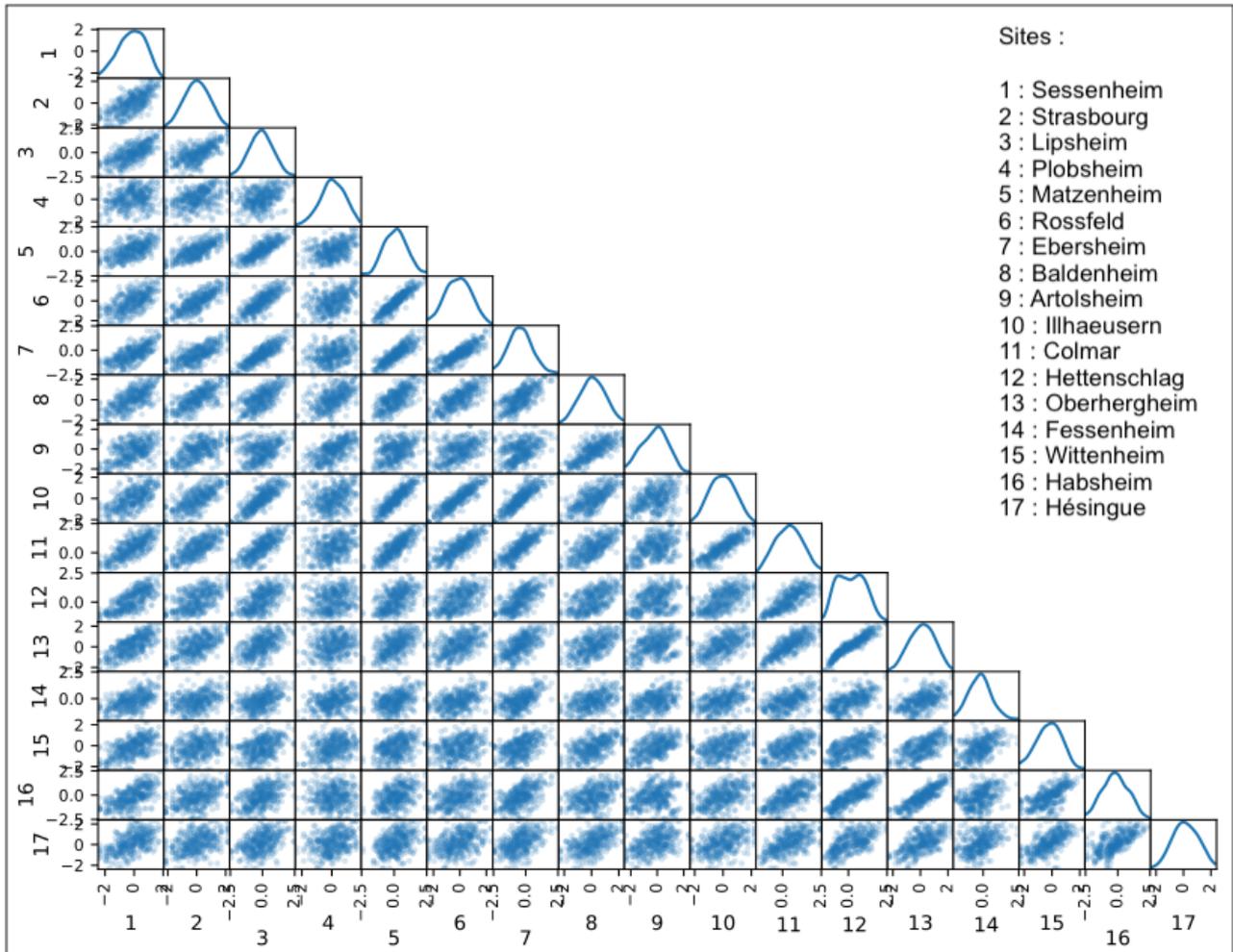
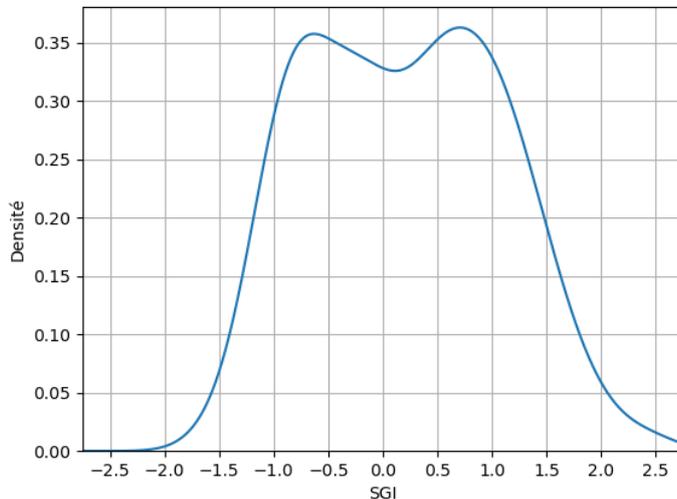


Figure 21 – Résumé des corrélations entre les sites pour le SGI.

Chaque case correspond à la corrélation entre les sites numérotés en colonne et en ligne sauf sur la diagonale. Les graphiques de la diagonale représentent la densité de probabilité de l'indice sur le site en question. Le maximum de densité est proche de 0 pour la majorité des sites. Cela indique que dans la globalité, la répartition est homogène entre sécheresses et périodes de hautes eaux. De manière générale, le niveau de la nappe est à son niveau moyen ou proche de ce niveau moyen. Pour le piézomètre numéro 12 qui est le piézomètre de Hettenschlag, on observe une distribution bimodale, presque symétrique.

La figure 22 montre plus en détail ce graphique.

Le maximum de présence ne se trouve pas à la valeur de 0 mais il y a 2 maxima, un à la valeur de -0,6, l'autre à la valeur de 0,7, le maximum des deux étant à 0,7. C'est un site qui a donc connu plus de périodes de sécheresses mais aussi plus de périodes de hautes eaux. C'est donc



un site plutôt impacté par les évènements extrêmes, qui a tout de même connu plus de périodes de hautes eaux. C'est un site situé entre l'III, le Rhin et à proximité de plusieurs gravières. Le niveau du piézomètre d'Hettenschlag est donc influencé par ces entités.

Figure 22 – Densité de probabilité de présence du SGI à Hettenschlag

Le tableau 7 donne les valeurs des coefficients de corrélations associés aux graphiques de la figure 21.

1	1,00																	
2	0,51	1,00																
3	0,49	0,44	1,00															
4	0,08	0,17	0,14	1,00														
5	0,39	0,57	0,69	0,18	1,00													
6	0,41	0,61	0,68	0,19	0,84	1,00												
7	0,54	0,50	0,76	0,11	0,77	0,75	1,00											
8	0,48	0,57	0,48	0,30	0,52	0,59	0,52	1,00										
9	0,27	0,32	0,12	0,35	0,19	0,25	0,17	0,59	1,00									
10	0,42	0,49	0,70	0,14	0,79	0,81	0,77	0,53	0,20	1,00								
11	0,59	0,55	0,61	0,13	0,67	0,66	0,71	0,51	0,25	0,76	1,00							
12	0,54	0,33	0,38	0,04	0,30	0,30	0,48	0,36	0,17	0,40	0,65	1,00						
13	0,53	0,36	0,34	0,05	0,31	0,30	0,42	0,34	0,18	0,37	0,66	0,90	1,00					
14	0,28	0,16	0,23	0,10	0,19	0,20	0,32	0,23	0,24	0,23	0,29	0,35	0,28	1,00				
15	0,35	0,17	0,16	0,11	0,14	0,12	0,23	0,30	0,32	0,19	0,33	0,38	0,40	0,27	1,00			
16	0,39	0,22	0,28	0,00	0,20	0,18	0,33	0,20	0,07	0,27	0,47	0,74	0,76	0,18	0,41	1,00		
17	0,30	0,19	0,20	0,10	0,18	0,18	0,24	0,32	0,21	0,21	0,35	0,38	0,39	0,18	0,45	0,42	1,00	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17		

Tableau 7 – Coefficients de corrélation entre les sites pour le SGI. Les numéros de la première colonne et de la dernière ligne correspondent aux numéros des situations données dans la figure 21)

Les 10 valeurs les plus basses sont repérées par une case rouge, les 10 valeurs les plus élevées sont repérées par une case verte. La station numéro 4 est la station qui corrèle le moins bien avec les autres stations : elle est impliquée dans 8 des 10 valeurs les plus basses. C'est la station de Plobsheim. Ce piézomètre fait partie des deux seuls pour lesquels les tendances sur les 30 et les 5 dernières années sont à la hausse. Ce comportement est explicable par l'influence du Rhin. C'est un piézomètre très proche du Rhin, le niveau de la nappe est donc fortement influencé par le niveau du Rhin. C'est beaucoup moins le cas pour les autres piézomètres. On observe un comportement similaire pour le piézomètre numéro 9, le piézomètre d'Artolsheim. Les coefficients de corrélation sont aussi plutôt faibles entre ce piézomètre et les autres. C'est aussi un piézomètre très proche du Rhin.

Inversement, les piézomètre numéro 7 et 10 sont les plus impliqués dans des corrélations à fort coefficient. Ce sont les piézomètres d'Ebersheim et d'Illhaeusern. Les stations avec lesquelles les corrélations sont les meilleures sont toutes proches de l'Ill. Ce cours d'eau a donc une grande influence sur le niveau de la nappe.

La corrélation la plus élevée possède un coefficient de 0,90. C'est la corrélation entre les piézomètres d'Hettenschlag et d'Oberhergheim. Ce sont des piézomètres très proches, c'est sûrement la principale raison de ce résultat.

4.2.4. Limites du SGI

Le SGI étant basé sur la méthodologie du SPI, des limites similaires peuvent être recensées. Pour un piézomètre dont les valeurs varient peu, une petite variation peut donner un score extrême alors que la valeur n'est pas si éloignée de la moyenne.

Le classement par le rang pose aussi problème. Des fréquences équiréparties sont associées aux valeurs piézométriques. Deux hauteurs piézométriques très éloignées peuvent donc avoir une valeur de SGI très proche si elles se suivent dans le classement. Mais le fait de réaliser un ajustement non-paramétrique en passant par le rang rend le SGI moins sensible à la longueur de la chronique que le SGI.

Se pose aussi la question autour de la moyenne mensuelle. La figure 23 est le schéma de deux chroniques piézométriques pour un mois mais n'ont pas la même évolution mensuelle. Elles ont la même moyenne mensuelle et donc auront la même valeur de SGI pour ce mois et pourtant, la hauteur d'eau minimale n'est pas la même. L'impact sur les autres parties de l'hydrosystèmes ne sera donc pas le même.

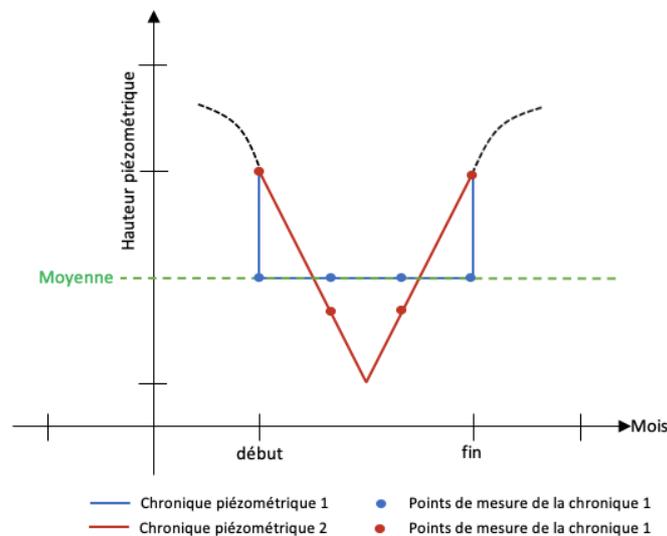


Figure 23 – Schéma de deux chroniques piézométriques distinctes avec une même valeur moyenne mensuelle

4.3. Corrélation entre le SPI et le SGI

Pour observer s'il y a une relation linéaire entre les sécheresses météorologiques et les sécheresses hydrogéologiques, des corrélations entre le SPI et le SGI ont été réalisées sur les sites présentés dans la partie 3.1.2.2. Le pas de temps sur lequel la corrélation entre le SPI et le SGI est la meilleure diffère selon les sites : pour Strasbourg-Entzheim et Ebersheim, c'est le SPI-4 mois qui obtient les meilleurs résultats ; pour Strasbourg-Botanique, c'est le SPI-3 mois ; pour Colmar-INRAE, c'est le SPI-11 mois et pour Colmar-Meyenheim, c'est le SPI-15 mois qui corrèle le mieux. La figure 24 représente le tracé de ces corrélations avec le coefficient de corrélation. Il semble y avoir un changement de comportement dans la corrélation entre les indices entre le nord et le sud. Plus les stations sont au sud, plus le pas de temps du SPI qui obtient la meilleure corrélation avec le SGI est élevé.

Seuls deux sites observent un coefficient de corrélation supérieur à 0,50. Ce sont les corrélations Strasbourg-Entzheim / Lipsheim et Colmar-Meyenheim / Oberhergheim.

En utilisant ces deux indices, il ne semble donc pas y avoir de relation purement linéaire entre les sécheresses météorologiques et hydrogéologiques. La nappe ne semble pas être directement impactée par le manque de précipitations. Ces résultats sont cohérents avec le fait que la recharge de la nappe ne s'effectue pas en majorité par la pluviométrie mais principalement par l'apport des cours d'eau principaux. Il serait donc pertinent de regarder un

autre indice en lien avec le débit des cours d'eau et de corrélérer cet indice avec le SGI pour observer si la corrélation est meilleure.

Kempf et Glaser (2020) ont montré que la diminution du niveau de la nappe en été est liée à l'augmentation des surfaces irriguées en Alsace depuis 2012. L'irrigation est donc un autre facteur pouvant expliquer la venue de certaines sécheresses hydrogéologiques. L'impact cumulé des variations hydrologiques et de l'irrigations peut être supérieur à l'impact du manque de pluviométrie sur le déclenchement des sécheresses hydrogéologiques. Il faut aussi rappeler que le SPI ne prend pas en compte l'effet des températures qui peut augmenter l'intensité des sécheresses météorologiques. Une corrélation avec un indice prenant en compte ces températures pourrait montrer d'autres résultats.

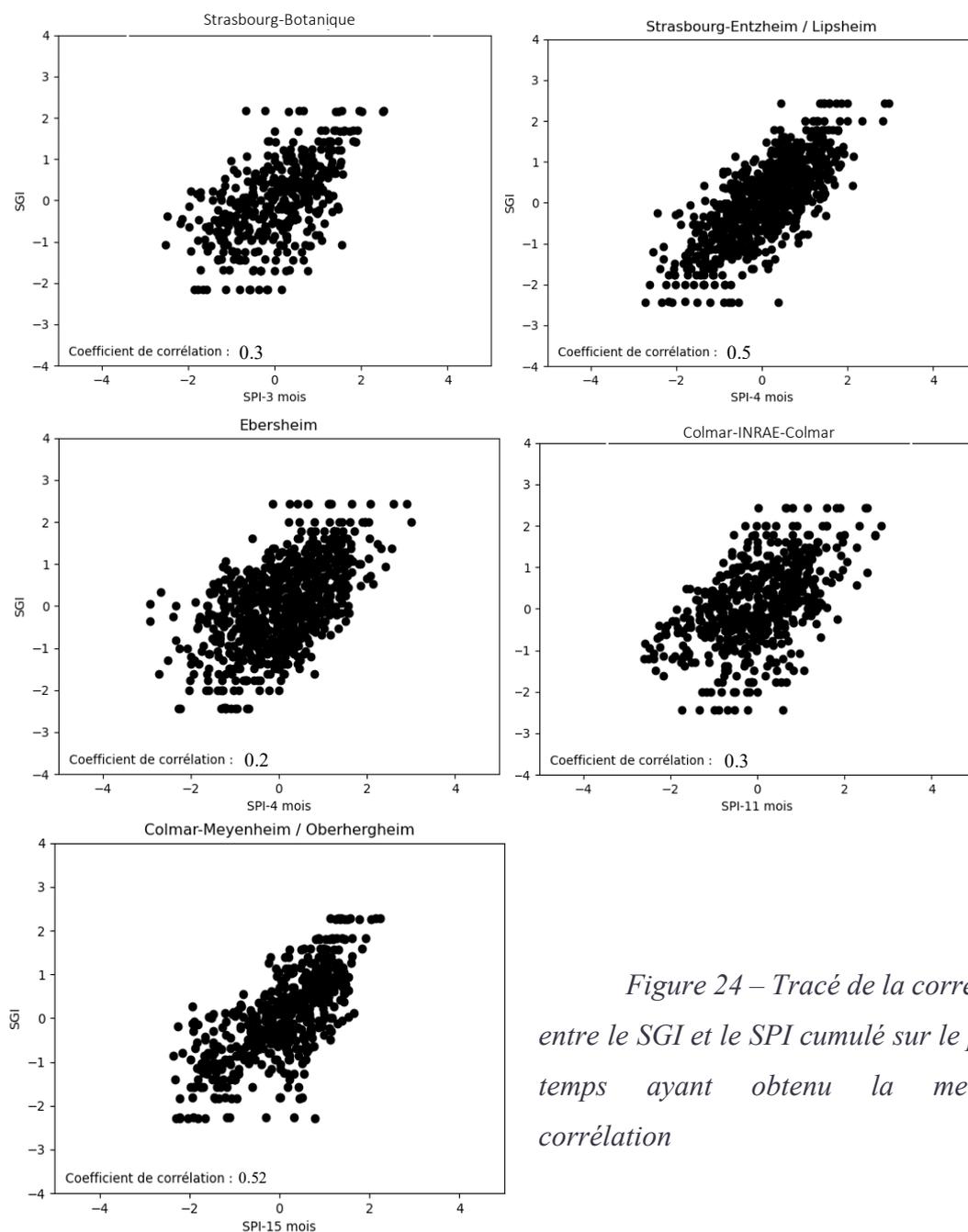


Figure 24 – Tracé de la corrélation entre le SGI et le SPI cumulé sur le pas de temps ayant obtenu la meilleure corrélation

La figure 25 est le tracé de la superposition des moyennes glissantes sur 2 ans entre le SGI à Lipsheim et le SPI-4 mois à Strasbourg-Entzheim. Bien que le coefficient de corrélation ne soit que de 0,56, les moyennes glissantes des indices se superposent bien dans la globalité. Les grandes variations sont similaires, ce sont principalement les petites oscillations qui diffèrent.

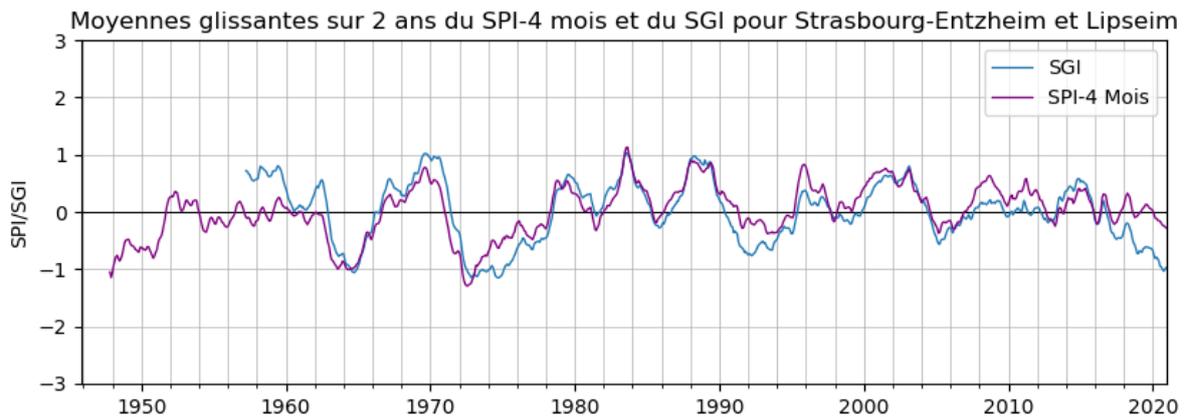


Figure 25 – Superposition des moyennes glissantes sur 2 ans du SGI à Lipsheim et du SPI-4 mois à Strasbourg-Entzheim.

La figure 26 montre la superposition des moyennes glissantes sur 2 ans entre le SGI Lipsheim et le SPI-4 mois à Ebersheim, site où la corrélation est la moins bonne. Le comportement est similaire dans les oscillations mais la tendance est différente : la tendance du SPI-4 mois est à la hausse alors que celle du SGI est à la baisse.

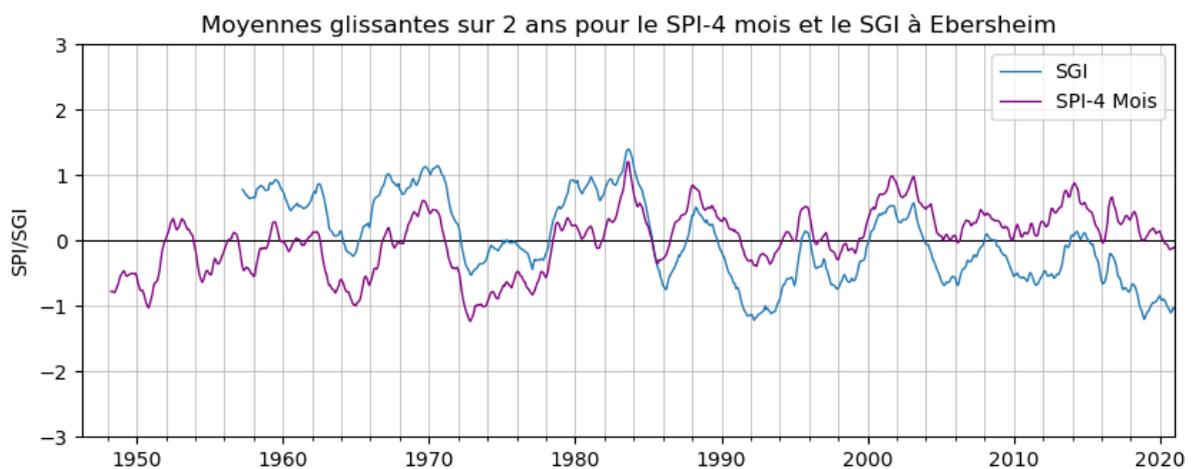


Figure 26 – Superposition des moyennes glissantes sur 2 ans du SGI et du SPI-4 mois à Ebersheim.

Il est bon de rappeler que ce ne sont là que les moyennes glissantes qui sont superposées. Ces moyennes lissent les résultats. Il peut donc sembler que les données se superposent bien, ce qui n'est pas forcément le cas valeurs brutes des indices. Ces graphiques comparent aussi les valeurs des indices. Mais puisqu'ils ne sont pas calculés de la même manière, il faut être prudent en comparant les valeurs brutes des indices.

Les deux indices se basent sur des données mensualisées. Cela peut poser question. Cette mensualisation ne permet pas d'observer les réels minimums des données brut et donc leur réel impact. Pour les données météorologiques, des phénomènes ponctuels comme les orages d'été auront tendance à faire remonter la valeur de l'indice alors que l'eau apportée par ces événements ruisselle énormément, l'apport en eau de ce types d'évènements est relativement faible. Le ruissellement et l'infiltration sont donc deux variables importantes pour lier sécheresses météorologiques et hydrogéologiques.

Conclusion et perspectives

L'analyse des sécheresses n'est pas une chose aisée tant ces phénomènes sont complexes et influencés par différents facteurs. Pour analyser l'impact des sécheresses sur la nappe d'Alsace, caractériser les sécheresses météorologiques est un bon point de départ puisque c'est généralement l'élément déclencheur des autres types de sécheresses, même si de nombreux autres facteurs aggravent les sécheresses. Depuis les années 1950, la tendance du SPI est à la hausse. En revanche, sur les 5 dernières années, 3 des 5 stations étudiées présentent une tendance à la baisse. Le SPI est un bon indice pour commencer à observer les sécheresses météorologiques grâce à sa simplicité d'utilisation mais son utilisation atteint très vite ses limites. Le fait qu'il ne prenne en compte que les précipitations liquides limite l'observation des sécheresses. Avec cet indice, les sécheresses des dernières années ne ressortent pas comme étant vraiment marquantes. Le manque de précipitations seul n'explique donc pas l'intensité observée des sécheresses des dernières années.

Le SGI semble être un bon indice pour étudier les sécheresses hydrogéologiques. Les différents secteurs de la nappe ne semblent pas réagir de la même façon aux sécheresses. Depuis les années 1950, les piézomètres les plus impactés par les sécheresses sont les piézomètres de Lipsheim, Rossfeld, Ebersheim et Illhaeusern. Le Rhin et l'Ill semblent avoir une forte influence sur le niveau de la nappe. Mais de manière générale, les sécheresses sont de plus en plus récurrentes ces dernières années. Plus spécifiquement, une étude plus approfondie sur les densités de probabilité de présence pourraient être réalisée. Si le pic de densité se trouve en partie négative, il est plus probable que de nouvelles sécheresses surviennent. L'évolution de ce pic dans le temps pourrait aussi être étudié de manière similaire à ce qui a été fait par la NASA (2021) sur la température du sol présenté en première partie. Si le pic se déplace vers des valeurs négatives, de plus en plus de sécheresses apparaissent. Cet indicateur pourrait aider à connaître les tendances à venir. Il serait aussi intéressant d'étudier les résultats d'un SGI calculé en moyennant plusieurs mois consécutifs afin d'observer les sécheresses sur plusieurs échelles de temps. C'est ce qu'est en train de développer le BRGM avec son indice SPLI.

Le lien entre sécheresse météorologique et sécheresse hydrogéologique a été étudié en corrélant les deux indices calculés. La corrélation entre le SPI et le SPI ne montre que des résultats nuancés. Certes l'évolution des deux indices présente des similarités mais les coefficients de corrélations sont plutôt faibles. Le facteur précipitations ne semble donc pas être le plus impactant pour les sécheresses hydrogéologiques. L'évolution des débits des cours

d'eau, l'effet des températures et l'impact des pompages en période critique sont à étudier afin de mieux comprendre la survenue et l'intensité des sécheresses hydrogéologiques. Pour étudier plus spécifiquement la succession des dernières sécheresses et l'impact de la pluviométrie sur ces sécheresses, une corrélation entre les deux indices pourrait être réalisée, mais uniquement sur les 5 dernières années. La nappe d'Alsace étant principalement alimentée par les cours d'eau principaux, il peut être pertinent d'étudier les sécheresses hydrologiques et de les lier aux sécheresses hydrogéologiques.

Avec l'évolution à la hausse des températures en Alsace, l'évapotranspiration est un élément qui impacte de plus en plus les sécheresses. C'est un élément qu'il faudrait étudier pour observer son impact sur les sécheresses. Le *Standardized Precipitation and Evapotranspiration Index* (SPEI) développé par Vincente-Serrano *et al.* (2014) prend en compte cette variable pour étudier les sécheresses. Pour continuer l'étude des sécheresses sur la nappe, il serait maintenant pertinent d'étudier les sécheresses hydrologiques, par exemple en calculant le SRSI comme réalisé par Haas et Birk (2017) et de lier cet indice avec le SGI ou un autre indice piézométrique.

Bibliographie

Association pour la Protection de la Nappe phréatique de la plaine d'Alsace, APRONA. [Consulté le 15/03/2021] <<https://www.aprona.net/FR/nappe/description.html>>

Base Numérique du Patrimoine d'Alsace, BNPA, 2010. L'eau en Alsace : une ressource abondante mais inégalement répartie. [Consulté le 01/06/2021] <<http://194.254.4.147/data/patrimoine-naturel/eau-01/pedago.php?parent=16>>

Banque Nationale des Prélèvements quantitatifs en Eau, BNPE, 2021. Données sur les prélèvements en eau. [Consulté le 25/05/2021] <<https://bnpe.eaufrance.fr/>>

BASTOS A., FU Z., CIAIS P., *et al.*, 2020. Impacts of extreme summers on European ecosystems: a comparative analysis of 2003, 2010 and 2018. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, vol. 375, no 1810, p. 20190507. [Consulté le 10/06/2021] <<https://doi.org/10.1098/rstb.2019.0507>>

BIRTLER C. et ELSASS P., 2006. Banque Régionale de l'Aquifère Rhénan –Programme 2003-2006. Rapport final, Rapport BRGM/RP-54876-FR, 104p. [Consulté le 20/05/2021] <<http://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-54876-FR.pdf>>

BLOOMFIELD J.P. et MARCHANT B.P., 2013. Analysis of groundwater drought building on the standardised precipitation index approach. *Hydrology and Earth System Science*. vol. 17, no 12, p. 4769-4787. [consulté le 31/03/21] <<https://hess.copernicus.org/articles/17/4769/2013/>>

Bureau de recherches géologiques et Minières, BRGM, 2018. Éléments sur la sensibilité à la sécheresse des ressources en eau souterraine dans les Vosges alsaciennes. [Diapositives, consultées le [15/04/2021]

CANCEILL M, 1974. Régressions et corrélations en hydrologie. Résultats élémentaires, règles pratiques. Rapport final, Rapport BRGM/74-SGN-170-AME. [Consulté le 03/05/2021] <<http://infoterre.brgm.fr/rapports/74-SGN-170-AME.pdf>>

Direction Régionale de l'Alimentation, de l'Agriculture et de la Forêt, DRAAF, 2021. Agreste Grand-Est -Memento 2020. [Consulté le 12/06/2021] <https://draaf.grand-est.agriculture.gouv.fr/IMG/pdf/memento2020-web_cle072e68.pdf>

EDWARDS C. et McKee T.B. 1997. Characteristics of 20th century drought in the United States at multiple time scales. AIR FORCE INST OF TECH WRIGHT-PATTERSON AFB OH. <<http://hdl.handle.net/10217/170176>>

ELSASS P. et RAU S., 1995. Notice des coupes hydrogéologiques de la feuille Strasbourg-Offenburg. Rapport final, Rapport BRGM/RR-38272-FR. <<http://infoterre.brgm.fr/rapports/RR-38272-FR.pdf>>

ESLAMIAN S., OSTAD-ALI-ASKARI K., SINGH V.P. *et al*, 2017. A review of drought indices. *Int J Constr Res Civ Eng (IJRCRE)*, vol. 3, no 4, p. 48-66. [Consulté le 25/05/2021] <[10.20431/2454-8693.0304005](https://doi.org/10.20431/2454-8693.0304005)>

Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat, GIEC, 2018. Résumé à l'intention des décideurs, Réchauffement planétaire de 1,5 °C, Rapport spécial du GIEC sur les conséquences d'un réchauffement planétaire de 1,5 °C par rapport aux niveaux préindustriels et les trajectoires associées d'émissions mondiales de gaz à effet de serre, dans le contexte du renforcement de la parade mondiale au changement climatique, du développement durable et de la lutte contre la pauvreté. Organisation météorologique mondiale, Genève, Suisse, 32 p. [Consulté le 01/06/2021] <https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2019/09/IPCC-Special-Report-1.5-SPM_fr.pdf>

GIUGLARIS E. 2020. Appui à la GESTion quantitative des Eaux souterraines du grand Ried (GES'Eau'R). Rapport final. BRGM/RP-69729-FR. 287 p. [consulté le 31/03/21] <<https://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-69729-FR.pdf>>

GIUGLARIS E., MANLAY A., AGNUS C., 2018. Impact des prélèvements en eau souterraine sur la zone du Grand Ried. Volet 2 de l'axe 3 du projet « Perspectives et cohabitations des usages de l'eau : de l'équilibre entre les usages agricoles à une gestion partagée des bassins versants ». Rapport final. BRGM/RP-67863-FR. 2018, 93 p. [consulté le 31/03/21] <<https://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-67863-FR.pdf>>

Glaser, R. and Kahle, M., 2020. Reconstructions of droughts in Germany since 1500—combining hermeneutic information and instrumental records in historical and modern perspectives. *Climate of the Past*, 16(4), pp.1207-1222. [Consulté le 11/06/2021] <<https://doi.org/10.5194/cp-16-1207-2020>>

Glossaire eau, milieux marins et biodiversité, 2019. Rivière phréatique. [consulté le 31/05/2021] <<http://www.glossaire-eau.fr/concept/rivi%C3%A8re-phr%C3%A9atique#:~:text=Cours%20d'eau%20dont%20le,nappe%20phr%C3%A9atique%20qu'il%20draine>>

GRASLAND C, 2005. Chapitre 6 : La Corrélacion. Université de Paris-Diderot. [Consulté le 15/05/2021] <http://grasland.script.univ-paris-diderot.fr/STAT98/stat98_6/stat98_6.htm>

GUTTMAN N.B., 1999. Accepting the standardized precipitation index: a calculation algorithm 1. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, vol. 35, no 2, p. 311-322. [Consulté le 07/06/2021] <<https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.1999.tb03592.x>>

HAAS J.C et BIRK S.,2017. Characterizing the spatiotemporal variability of groundwater levels of alluvial aquifers in different settings using drought indices. *Hydrology and Earth System Sciences*, vol. 21, no 5, p. 2421-2448. [Consulté le 13/05/2021] <<https://doi.org/10.5194/hess-21-2421-2017>>

Infoclimat.fr, 2021. <<https://www.infoclimat.fr/previsions-regionales-meteo-3-alsace.html>> [Consulté le 10/06/2021]

Institut de mathématiques de Toulouse. Tests non-paramétriques. [Consulté le 05/04/2021] <<https://www.math.univ-toulouse.fr/~besse/Wikistat/pdf/st-m-inf-np.pdf>>

International Panel on Climate Change, 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*. Ipcc, 2014 [Consulté le 20/05/2021] <https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/SYR_AR5_FINAL_full.pdf>

KEMPF M. et GLASER R., 2020. Tracing Real-Time Transnational Hydrologic Sensitivity and Crop Irrigation in the Upper Rhine Area over the Exceptional Drought Episode 2018–2020 Using Open Source Sentinel-2 Data. *Water*, vol. 12, no 12, p. 3298. [Consulté le 14/06/2021] <<https://doi.org/10.3390/w12123298>>

KUMAR R, MUSUUZA J.L., Van LOON A.F. *et al.* 2016 .Multiscale evaluation of the Standardized Precipitation Index as a groundwater drought indicator. *Hydrology and Earth System Sciences*, vol. 20, no 3, p. 1117-1131. [consulté le 31/03/21] <<https://hess.copernicus.org/articles/20/1117/2016/>>

KREBS G., MIGAYRON J., RISLER J.J., GENDRIN P., 1980. Nappe phréatique de la plaine d'Alsace. Nappe du Pliocène de Haguenau. Rapport sur la piézométrie. Rapport final. BRGM/80-SGN-611-ALS. [Consulté le 12/06/2021] <<http://infoterre.brgm.fr/rapports/80-SGN-611-ALS.pdf>>

LABARCHÈDE A, DE JONG C, GIUGLARIS E *et al*, 2020. Resilience of the Alsatian aquifer, France to climate and anthropogenic change: A case study of the Grand Ried. In : *EGU General Assembly Conference Abstracts*. p. 1178. [consulté le 31/03/21] <<https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2020EGUGA..22.1178L/abstract>>

LLOYD-HUGHES B et SAUNDERS M.A., 2002. A drought climatology for Europe. *International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society*, vol. 22, no 13, p. 1571-1592. [consulté le 31/03/21] <<https://doi.org/10.1002/joc.846>>

MCKEE T.B., DOESKEN N.J., KLEIST J. *et al.*, 1993. The relationship of drought frequency and duration to time scales. In : *Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology*. p. 179-183. [consulté le 31/03/21] <<https://climate.colostate.edu/pdfs/relationshipofdroughtfrequency.pdf>>

Météo-France. Le climat en métropole. [Consulté le 23/05/2021] <<http://www.meteofrance.fr/climat-passe-et-futur/climat-en-france/le-climat-en-metropole#>>

MÉRILLON Y., CHAPERON P., 1990. La sécheresse de 1989. *La houille blanche*, no 5, p. 325-340. [Consulté le 14/06/2021] <<https://doi.org/10.1051/lhb/1990025>>

MTE, Ministère de la Transition Écologique, 2021. Face au risque de sécheresse, de nouveaux outils pour préparer l'été. [Consulté le 05/06/2021] <<https://www.ecologie.gouv.fr/face-au-risque-secheresse-nouveaux-outils-preparer-lete>>

NASA, National Aeronautics and Space Administration, 2021. Shifting Distribution of Land Temperature Anomalies, 1951-2020. [Consulté le : 04/06/2021] <<https://svs.gsfc.nasa.gov/4891>>

NAUMANN G., CAMMALLERI C., MENTASCHI L. *et al.*, 2020. Increasing economic drought impacts in Europe with anthropogenic warming. [Consulté le 12/06/2020] <<https://doi.org/10.31223/osf.io/fg79t>>

Organisation Mondiale de Météorologie, OMM, 2012. Guide d'utilisation de l'indice de précipitations normalisé. <https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=7770>

PRESS W.H., TEUKOLSKY S.A., VETTERLING W.T., FLANNERY B.P. 2007. *Numerical recipes : The art of Scientific Computing*, Third Edition. Cambridge University Press. Chapitre 6.1, Incomplete Gamma Function and Error Function, p. 259-265.

ROUDIER P. et MAHE G., 2010. Study of water stress and droughts with indicators using daily data on the Bani river (Niger basin, Mali). *International Journal of climatology*. vol. 30, no 11, p. 1689-1705. [consulté le 31/03/21] <<https://doi.org/10.1002/joc.2013>>

SAGE III-Nappe-Rhin, 2015. Règlement du SAGE III-Nappe-Rhin. [Consulté le 08/06/2021] <<http://www.sage-ill-nappe-rhin.alsace/wp-content/uploads/2015/07/R%C3%A8glement.pdf>>

SEGUIN J.J. 2015. Proposition d'un indicateur piézométrique standardisé pour le Bulletin de Situation Hydrologique « nappes ». Rapport final. BRGM/RP-64147-FR. 2015, 89 p. [consulté le 31/03/21] <<https://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-64147-FR.pdf>>

Système d'Information pour la GESTion de l'aquifère rhéanais, SIGES, s.d. [Consulté le 17/05/2021] <<http://sigesar.brgm.fr/Hydrodynamisme-de-la-nappe>>

SOUBEYROUX J.M., KITOVA N., BLANCHARD M. *et al.*, 2012. Caractérisation des sécheresses des sols en France et changement climatique: Résultats et applications du projet ClimSec. *La Météorologie*, vol. 78, p. p. 21-p. 30. [Consulté le 02/06/2021] <[10.4267/2042/47512](https://doi.org/10.4267/2042/47512)>

SPINONI J., NAUMANN G., VOGT J., *et al.*, 2015. European drought climatologies and trends based on a multi-indicator approach. *Global and Planetary Change*, vol. 127, p. 50-57. [Consulté le 12/05/2021] <<https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2015.01.012>>

Severe Weather Europe, SWE, 2018. Record-breaking summer in Europe : the summer of 2018 breaks land temperature record. [Consulté le 10/06/2021] <<https://www.severe-weather.eu/news/record-breaking-summer-in-europe-the-summer-of-2018-breaks-land-temperature-record/>>

TALLAKSEN L. M. et Van LANEN H.A.J., 2004. Hydrological drought: processes and estimation methods for streamflow and groundwater. [Consulté le : 22/05/2021] <https://books.google.fr/books?hl=fr&lr=&id=eXLDwGxG0ikC&oi=fnd&pg=PR5&dq=Tallaksen+Van+Lanen+2004&ots=WRNkTVM2gx&sig=dh3fEj6YUIZV4fW1XTdHgi-eiHQ&redir_esc=y#v=onepage&q=Tallaksen%20Van%20Lanen%202004&f=false>

THIERION C., LONGUEVERGNE L., HABETS F., *et al.*, 2012. Assessing the water balance of the Upper Rhine Graben hydrosystem. *Journal of Hydrology*, 2012, vol. 424, p. 68-83. [Consulté le 14/06/2021] <<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.12.028>>

VAN LANEN H.A.J., LAAHA G., KINGSTON D.G. *et al.*, 2016. Hydrology needed to manage droughts: the 2015 European case. *Hydrological Processes*, vol. 30, no 17, p. 3097-3104. [Consulté le 10/04/2021] <<https://doi.org/10.1002/hyp.10838>>

VAN LOON A.F., 2015. Hydrological drought explained. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, vol. 2, no 4, p. 359-392. [Consulté le 02/06/2021] <<https://doi.org/10.1002/wat2.1085>>

Université de Poitiers. UMR 7348. s.d. [Consulté le 25/05/2021] <<http://www.mathlabo.univ-poitiers.fr/>>

WILHITE D.A., 2000. Drought as a natural hazard: concepts and definitions. 2000. [Consulté le 20/05/2021] <<https://digitalcommons.unl.edu/droughtfacpub/69/>>

VICENTE-SERRANO S.M., AZORIN-MOLINA C., SANCHEZ-LORENZO A. *et al.*, 2014. Temporal evolution of surface humidity in Spain: recent trends and possible physical mechanisms. *Climate dynamics*, vol. 42, no 9-10, p. 2655-2674. [Consulté le 14/06/2021] <<https://doi.org/10.1007/s00382-013-1885-7>>

WINTER T.C., HARVEY J.W., FRANKE O.L. *et al.*, 1998. *Ground water and surface water: a single resource*. US geological Survey. [Consulté le 15/05/2021] <<https://doi.org/10.3133/cir1139>>

World Meteorological Organization, WMO and Global Water Partnership, GWP, 2016: *Handbook of Drought Indicators and Indices* (M. Svoboda and B.A. Fuchs). Integrated Drought Management Programme (IDMP), Integrated Drought Management Tools and Guidelines Series 2. Geneva. [Consulté le 13/04/2021] <https://www.droughtmanagement.info/literature/GWP_Handbook_of_Drought_Indicators_and_Indices_2016.pdf>

WU H., HUBBARD K.G. et WILHITE D.A., 2004. An agricultural drought risk-assessment model for corn and soybeans. *International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society*, vol. 24, no 6, p. 723-741. [Consulté le 13/05/2021] <<https://doi.org/10.1002/joc.1028>>

Annexes

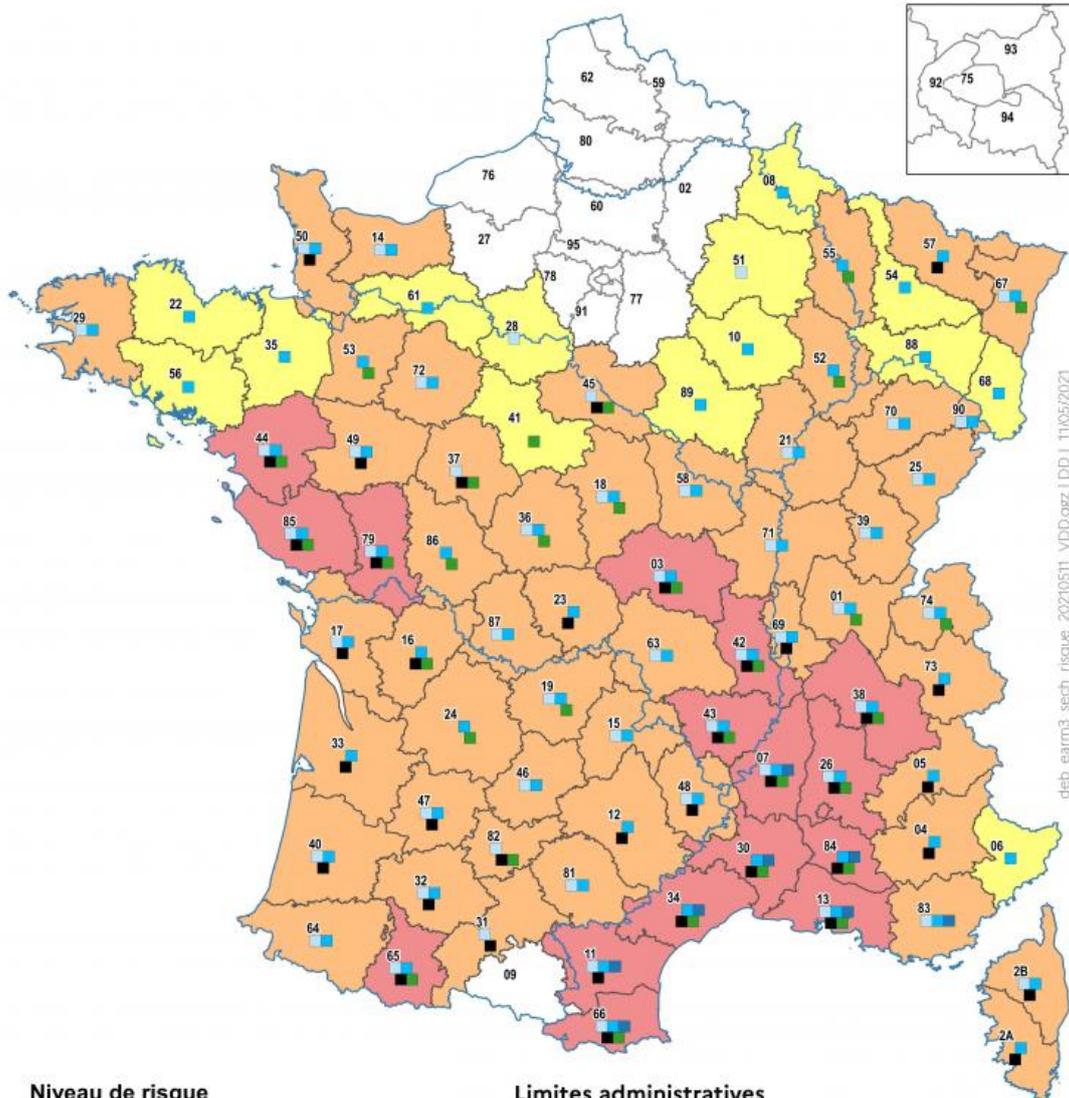
Table des annexes

ANNEXE 1 – CARTOGRAPHIE DES TERRITOIRES AVEC RISQUE DE SECHERESSE POUR L'ETE 2021	69
ANNEXE 2 – CHRONIQUES DES DONNEES DISPONIBLES POUR LES STATIONS METEOROLOGIQUES DE BELMONT, DE BERGHEIM, DU HOHWALD, DU MARKSTEIN, D'ORBAY, DU PETIT ROMBACH ET DE STOSSWIHR.....	70
ANNEXE 3 – TABLE DES VALEURS dn, α , SELON LE SEUIL α CHOISI ET LA TAILLE DE L'ECHANTILLON AFIN DE VALIDER OU NON L'HYPOTHESE H_0 PAR LE TEST DE KOLMOGOROV-SMIRNOV.....	71
ANNEXE 4 – COMPARAISON DES MOYENNES GLISSANTES SUR 6 MOIS, 1 AN, 2 ANS ET 5 ANS	71
ANNEXE 5 – RESULTATS DU SPI-1 MOIS	73
ANNEXE 6 – RESULTATS DU SPI-3 MOIS.....	74
ANNEXE 7 – RESULTATS DU SPI-6 MOIS	75

Annexe 1 – Cartographie des territoires avec risque de sécheresse pour l'été 2021
 (source : Ministère de la Transition Écologique, mai 2021)

MINISTÈRES
 TRANSITION ÉCOLOGIQUE
 COHÉSION DES TERRITOIRES
 MER
 Liberté
 Égalité
 Fraternité

Territoires avec risque de sécheresse Mai 2021



Niveau de risque

- Très probable
- Probable
- Possible

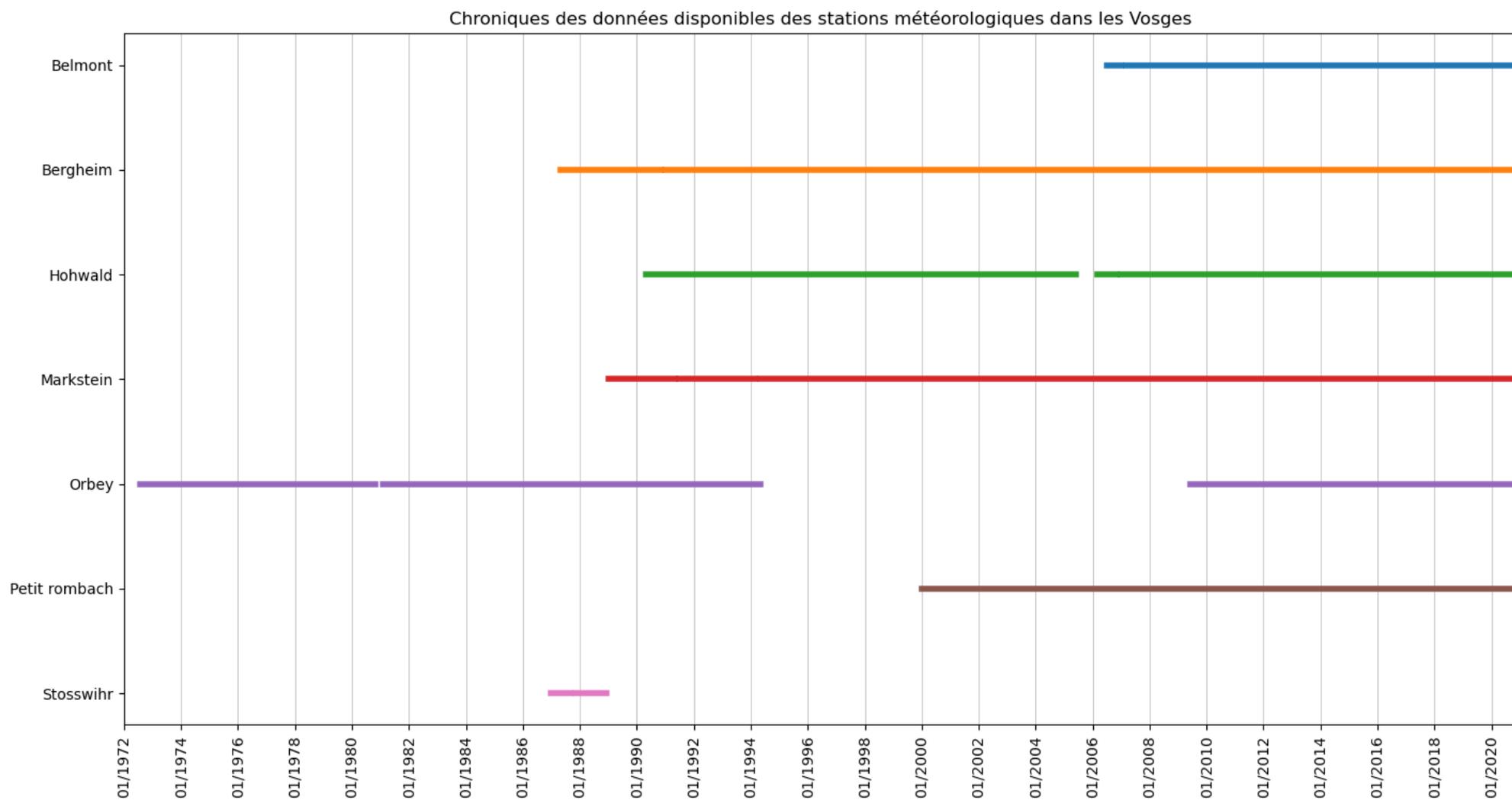
Limites administratives

- Circonscription administrative de bassin
- Département

- Débits (données observées)
- Eaux souterraines (données observées et prévisions)
- Déficit (supérieur à 20%) du cumul de précipitations de septembre 2020 à avril 2021
- Sécheresse des sols (prévisions)
- Suivis ONDE (assecs, ruptures ou baisses des écoulements observés sur le département)

Source : MétéoFrance, BRGM, SHAPI, OFB | Cartographie : DGALN/SAGP/SDP/BCSI

Annexe 2 – Chroniques des données disponibles pour les stations météorologiques de Belmont, de Bergheim, du Hohwald, du Markstein, d’Orbey, du Petit Rombach et de Stosswihr.



Annexe 3 – Table des valeurs $d_{n,\alpha}$, selon le seuil α choisi et la taille de l'échantillon afin de valider ou non l'hypothèse H_0 par le test de Kolmogorov-Smirnov.
(Source : Université de Poitier, s.d.)

$\alpha \backslash n$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0,01	1,0000	0,9950	0,9293	0,8290	0,7342	0,6685	0,6166	0,5758	0,5418	0,5133
0,05	1,0000	0,9750	0,8419	0,7076	0,6239	0,5633	0,5193	0,4834	0,4543	0,4300
0,10	1,0000	0,9500	0,7764	0,6360	0,5652	0,5094	0,4680	0,4361	0,4096	0,3875
0,15	1,0000	0,9250	0,7261	0,5958	0,5248	0,4744	0,4353	0,4050	0,3806	0,3601
0,20	1,0000	0,9000	0,6838	0,5648	0,4927	0,4470	0,4104	0,3815	0,3583	0,3391

$\alpha \backslash n$	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
0,01	0,4889	0,4677	0,4490	0,4325	0,4176	0,4042	0,3920	0,3809	0,3706	0,3612
0,05	0,4092	0,3912	0,3754	0,3614	0,3489	0,3376	0,3273	0,3180	0,3094	0,3014
0,10	0,3687	0,3524	0,3381	0,3255	0,3142	0,3040	0,2947	0,2863	0,2785	0,2714
0,15	0,3425	0,3273	0,3141	0,3023	0,2918	0,2823	0,2737	0,2659	0,2587	0,2520
0,20	0,3226	0,3083	0,2957	0,2847	0,2748	0,2658	0,2577	0,2503	0,2436	0,2373

$\alpha \backslash n$	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29
0,01	0,3524	0,3443	0,3367	0,3295	0,3229	0,3166	0,3106	0,3050	0,2997	0,2947
0,05	0,2941	0,2872	0,2809	0,2749	0,2693	0,2640	0,2591	0,2544	0,2499	0,2457
0,10	0,2647	0,2586	0,2528	0,2475	0,2424	0,2377	0,2332	0,2290	0,2250	0,2212
0,15	0,2459	0,2402	0,2348	0,2298	0,2251	0,2207	0,2166	0,2127	0,2089	0,2054
0,20	0,2315	0,2261	0,2211	0,2164	0,2120	0,2079	0,2040	0,2003	0,1968	0,1934

$\alpha \backslash n$	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39
0,01	0,2899	0,2853	0,2809	0,2768	0,2728	0,2690	0,2653	0,2618	0,2584	0,2552
0,05	0,2417	0,2379	0,2342	0,2308	0,2274	0,2242	0,2212	0,2183	0,2154	0,2127
0,10	0,2176	0,2141	0,2108	0,2077	0,2047	0,2018	0,1991	0,1965	0,1939	0,1915
0,15	0,2021	0,1989	0,1958	0,1929	0,1901	0,1875	0,1849	0,1825	0,1801	0,1779
0,20	0,1903	0,1873	0,1844	0,1817	0,1791	0,1766	0,1742	0,1718	0,1696	0,1675

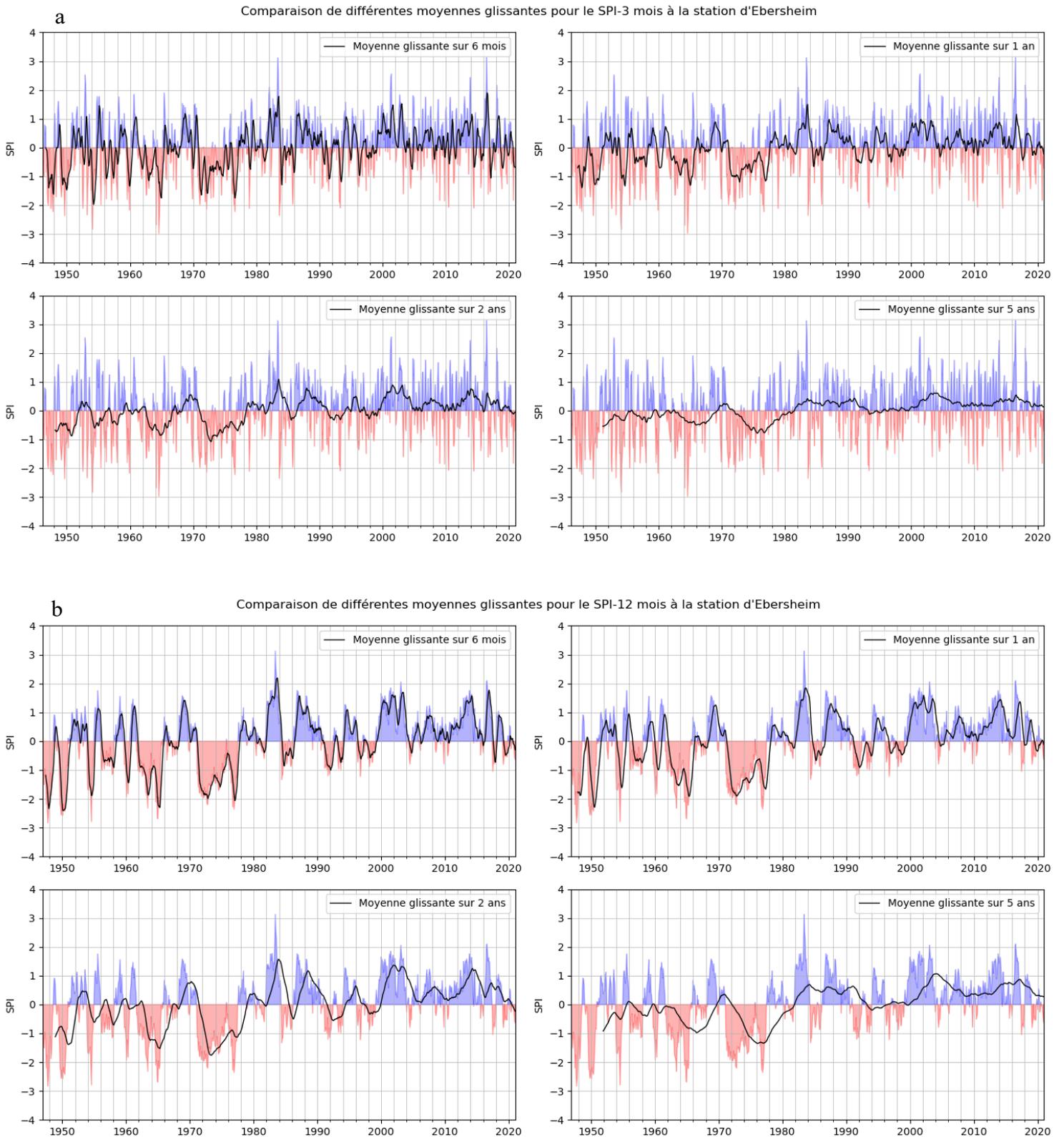
$\alpha \backslash n$	40	42	44	46	48	50	52	54	56	58
0,01	0,2521	0,2461	0,2406	0,2354	0,2306	0,2260	0,2217	0,2177	0,2138	0,2102
0,05	0,2101	0,2052	0,2006	0,1963	0,1922	0,1884	0,1848	0,1814	0,1782	0,1752
0,10	0,1891	0,1847	0,1805	0,1766	0,1730	0,1696	0,1664	0,1633	0,1604	0,1577
0,15	0,1757	0,1715	0,1677	0,1641	0,1607	0,1575	0,1545	0,1517	0,1490	0,1465
0,20	0,1654	0,1616	0,1579	0,1545	0,1514	0,1484	0,1456	0,1429	0,1404	0,1380

$\alpha \backslash n$	60	65	70	75	80	85	90	95	100	105
0,01	0,2067	0,1988	0,1917	0,1853	0,1795	0,1742	0,1694	0,1649	0,1608	0,1570
0,05	0,1723	0,1657	0,1597	0,1544	0,1496	0,1452	0,1412	0,1375	0,1340	0,1308
0,10	0,1551	0,1491	0,1438	0,1390	0,1347	0,1307	0,1271	0,1238	0,1207	0,1178
0,15	0,1441	0,1385	0,1336	0,1291	0,1251	0,1214	0,1181	0,1150	0,1121	0,1094
0,20	0,1357	0,1305	0,1258	0,1216	0,1178	0,1144	0,1112	0,1083	0,1056	0,1031

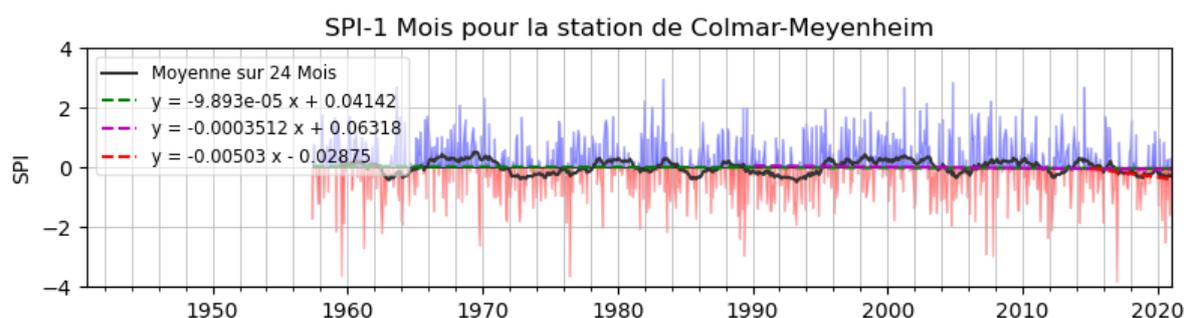
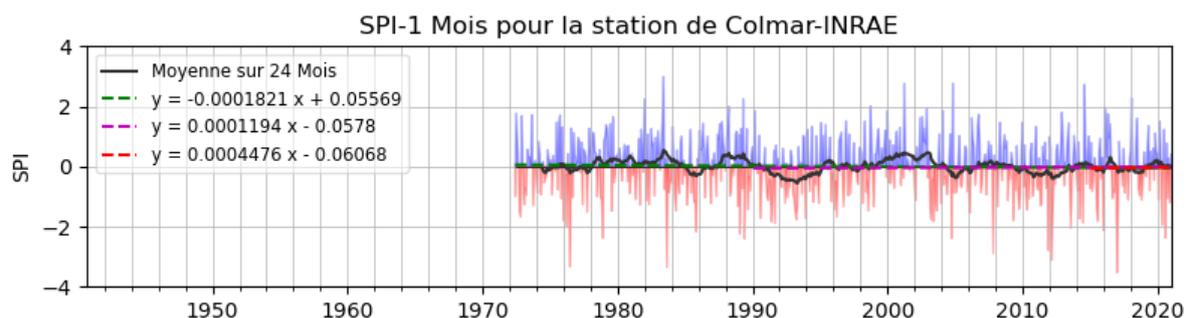
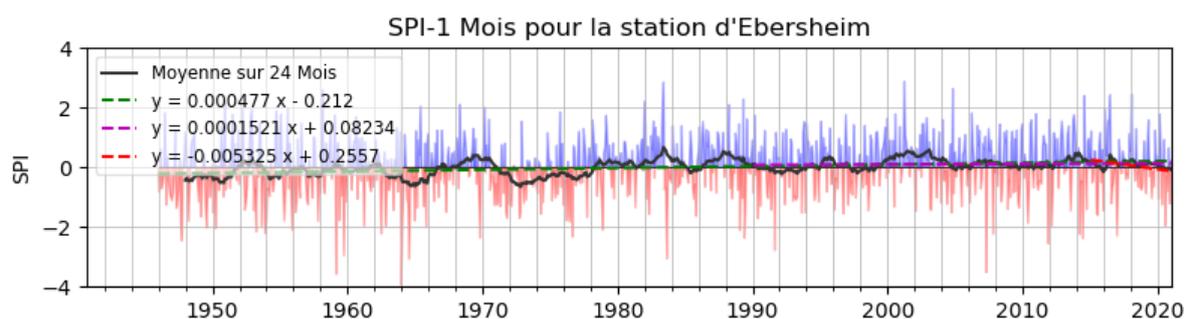
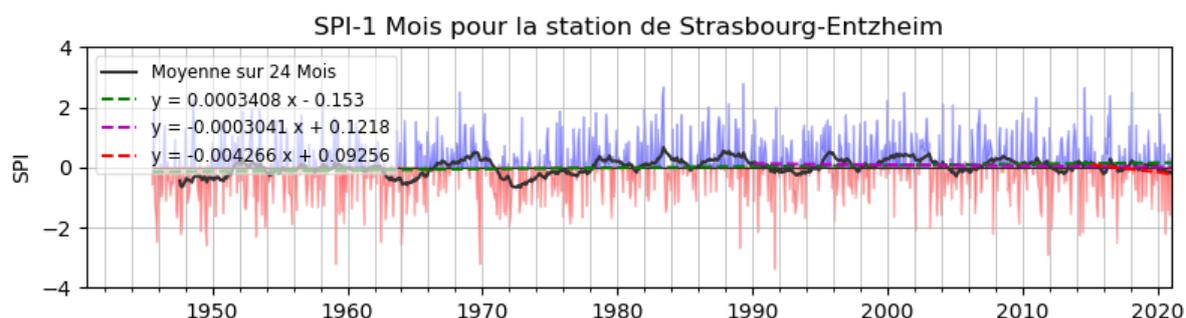
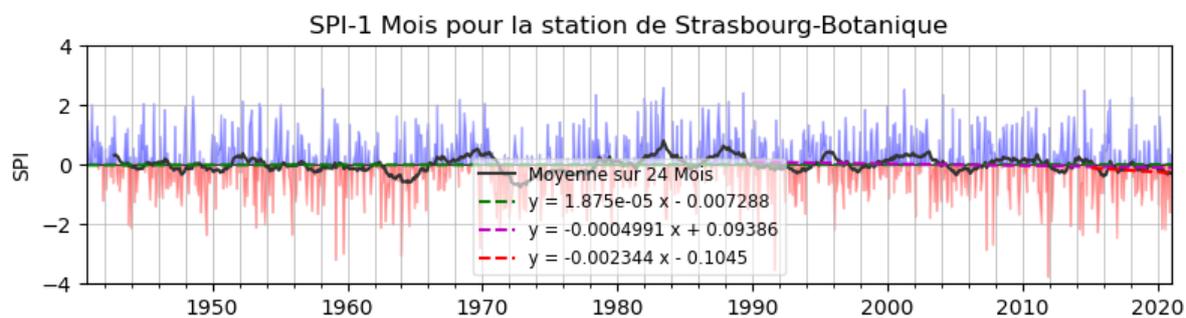
$\alpha \backslash n$	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200
0,01	0,1534	0,1470	0,1413	0,1362	0,1316	0,1275	0,1237	0,1203	0,1171	0,1142
0,05	0,1279	0,1225	0,1178	0,1135	0,1097	0,1063	0,1031	0,1003	0,0976	0,0952
0,10	0,1151	0,1103	0,1060	0,1022	0,0988	0,0957	0,0929	0,0903	0,0879	0,0857
0,15	0,1070	0,1025	0,0985	0,0950	0,0918	0,0889	0,0863	0,0839	0,0817	0,0796
0,20	0,1008	0,0965	0,0928	0,0895	0,0865	0,0838	0,0813	0,0790	0,0769	0,0750

Annexe 4 – Comparaison des moyennes glissantes sur 6 mois, 1 an, 2 ans et 5 ans

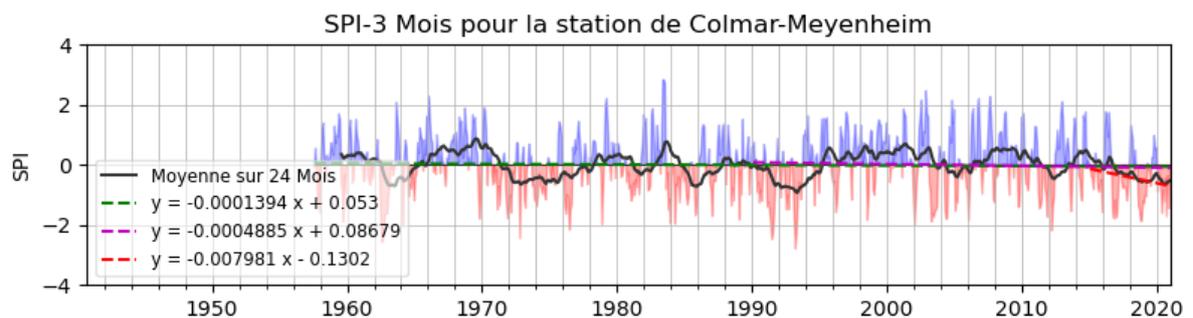
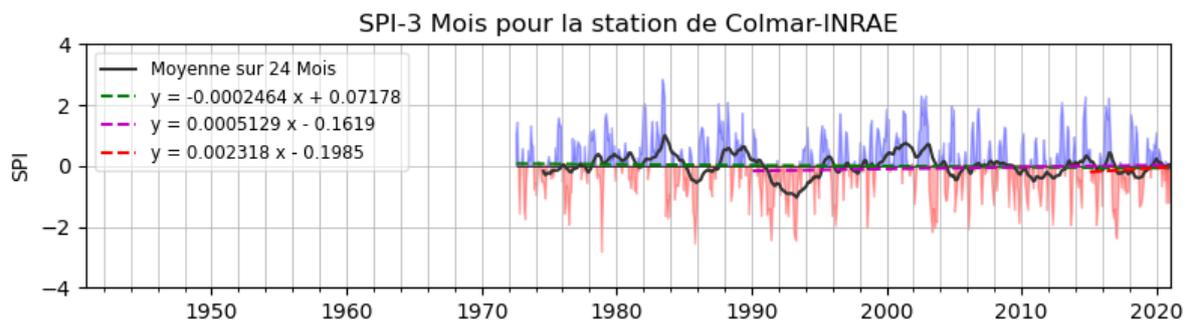
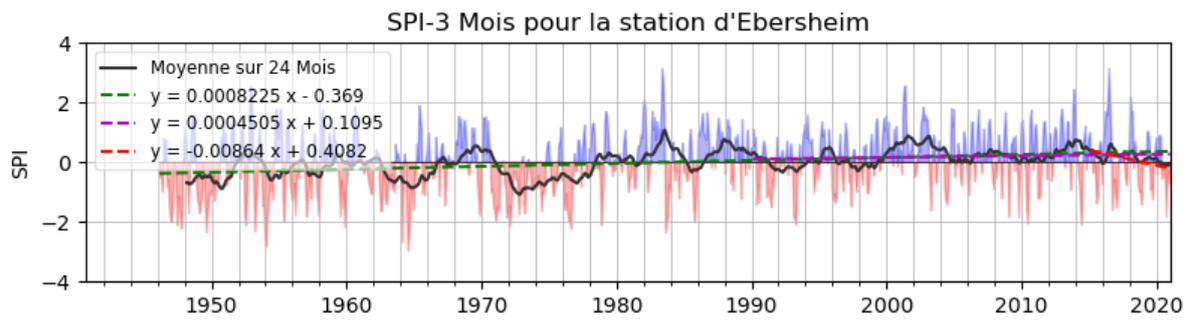
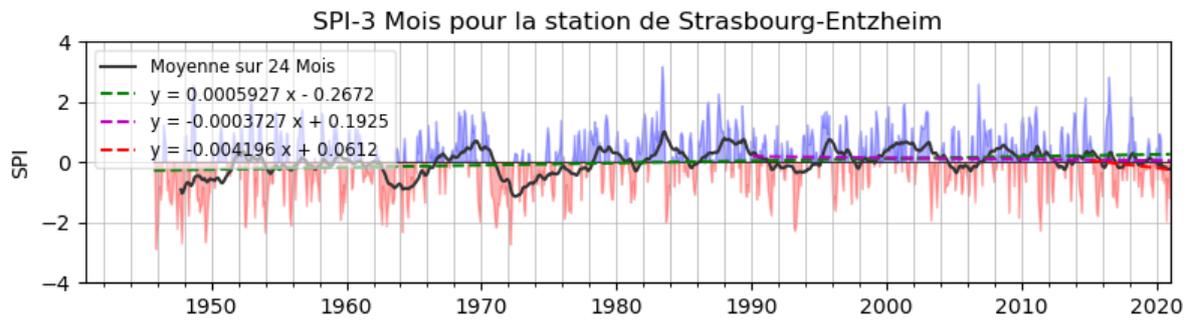
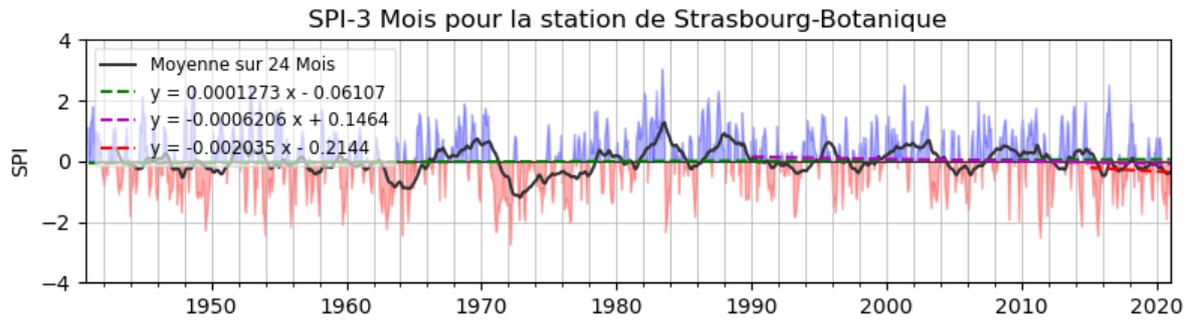
pour le SPI-3 mois (figure a) et le SPI-12 mois (figure b) sur la station d'Ebersheim.



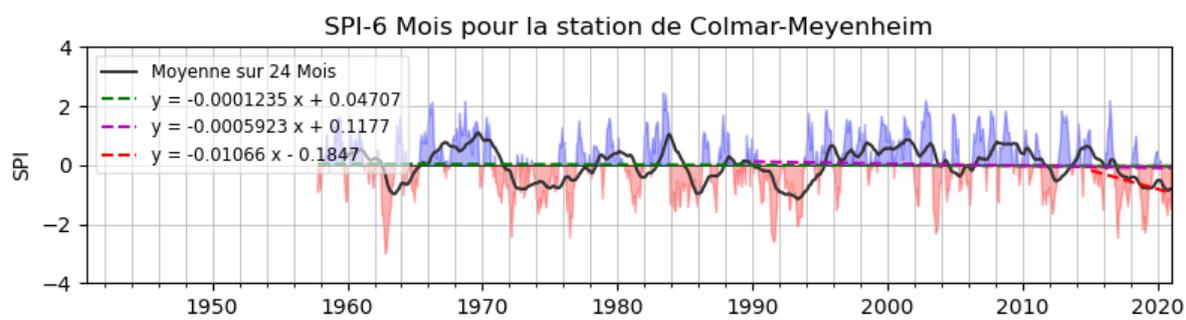
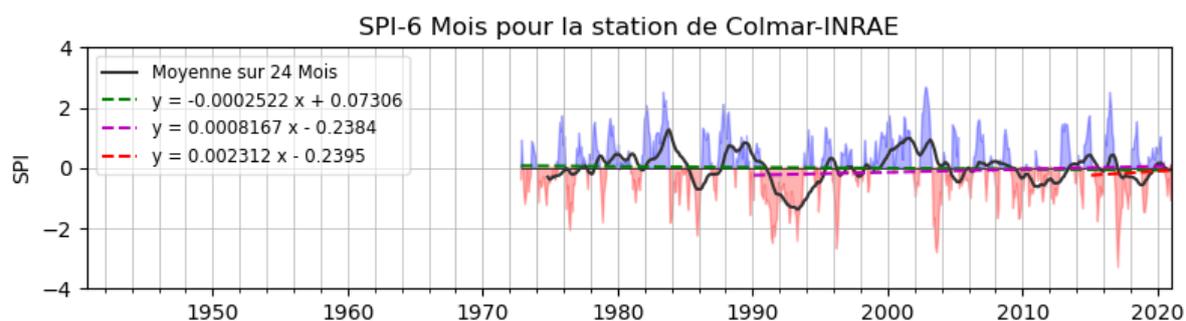
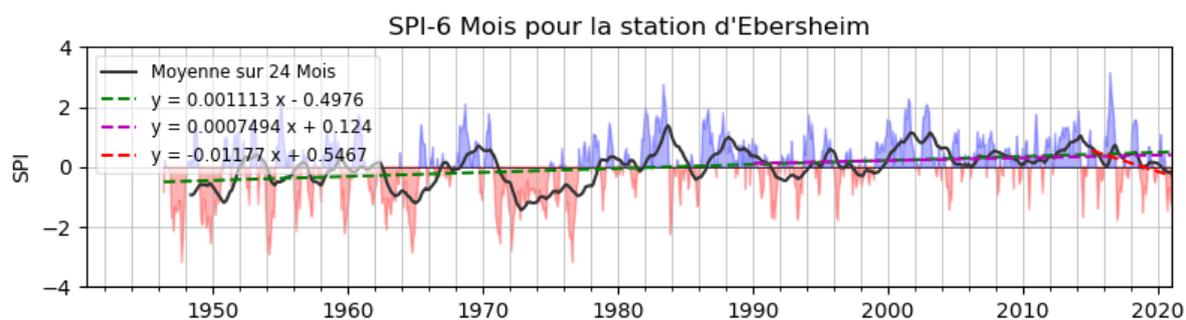
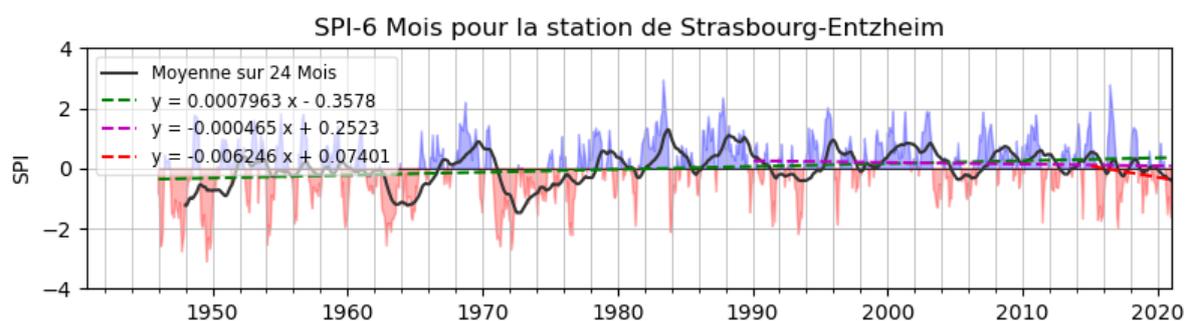
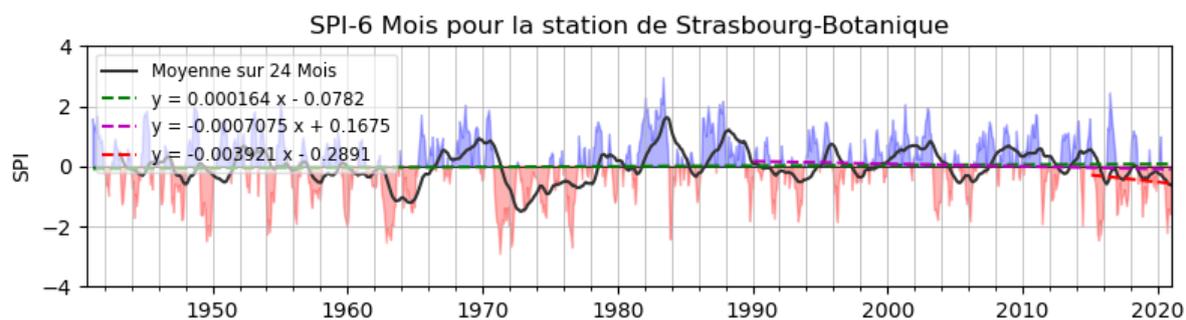
Annexe 5 – Résultats du SPI-1 mois



Annexe 6 – Résultats du SPI-3 Mois



Annexe 7 – Résultats du SPI-6 mois



MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

Diplôme d'ingénieur ENGEES
Master Gestion, Aménagement, Environnement et Développement
Spécialité Fonctionnement et Gestion des Environnements Ruraux et Naturels

Auteur : Antonin Dalbepierre

Année
2020-2021

Titre

Caractérisation de l'impact des sécheresses sur la nappe d'Alsace à l'aide du SPI et du SGI (Années 1950 – 2020)

Nombre de pages 58 de corps de texte 7 annexes
Nombre de références bibliographiques 53

Structure d'accueil : Laboratoire Image, Ville, Environnement, Strasbourg, Bas-Rhin, France

Maître de stage : Pr. Carmen de Jong

Résumé

Ces dernières années, des étés particulièrement chauds ont mené à l'assèchement de cours d'eaux phréatiques, principalement alimentés par la nappe d'Alsace. Étudier l'impact des sécheresses sur la nappe d'Alsace a donc un grand intérêt. Les *Standardized Precipitation Index et Standardized Groundwater level index* (SPI et SGI) ont été utilisés pour caractériser les sécheresses météorologiques et hydrogéologiques. Le SGI semble être un bon indicateur de l'état de la nappe, le SPI montre vite ses limites. Le lien entre les sécheresses météorologiques et hydrogéologique n'est pas totalement direct, le réseau hydrographique et les pompages semblent fortement impacter le comportement de la nappe.

Mots-clés

Sécheresses, SPI, SGI, Alsace, nappe