

MÉMOIRE N°:-----

Mémoire présenté le : Mardi 31 janvier 2023
par

M. Alexandre DELORME

étudiant de l'Université Paris-Dauphine pour l'obtention du

Certificat d'Actuaire de Paris-Dauphine

sur le sujet :

Assurances contre la sécheresse au XXI^e siècle : perspectives d'évolution

Membres du jury :

Maryse LE PEVEDIC

Camille OUARRAK

Florence PICARD

Alexandre YOU

Quentin GUIBERT




Lieu de stage :

Prim'Act

Responsable du stage dans
l'entreprise :

M. Frédéric PLANCHET



CONFIDENTIEL :

Remarques :

Admission à l'Institut des actuaires :

~~admis publiable~~ - admis - ~~ajourné avec/sans resoutenance~~ - refusé

(merci de rayer les mentions inutiles)

**Mémoire présenté devant l'Université de Paris-Dauphine
pour l'obtention du Certificat d'Actuaire de Paris-Dauphine
et l'admission à l'Institut des Actuaires**

Par : Alexandre DELORME

Titre : Assurances contre la sécheresse au XXI^e siècle : perspectives d'évolution

Confidentialité : Non Oui (Durée : 1 an 2 ans)

Les signataires s'engagent à respecter la confidentialité ci-dessus

*Membres présents du jury de l'Institut
des Actuaires :*

*Membres présents du Jury du Certificat
d'Actuaire de Paris-Dauphine :*

Entreprise :

Nom : Prim'Act

Signature :



PRIM'ACT SAS
42 av. de la Grande Armée
75007 PARIS
Tél. 01 22 22 11 00
R.C.S. PARIS 791 352 784

Directeur de Mémoire en entreprise :

Nom : Frédéric Planchet

Signature :




*Autorisation de publication et de mise en ligne sur un site de diffusion de documents
actuariels (après expiration de l'éventuel délai de confidentialité)*

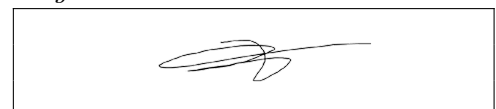
Secrétariat :

Bibliothèque :

Signature du responsable entreprise



Signature du candidat



Résumé

Dans un contexte de changement climatique, ce mémoire s'intéresse aux potentielles évolutions de la sécheresse en France, et aux impacts de ces dernières en assurance. En particulier, l'accent est mis sur les régions méditerranéennes qui pourraient être celles dont la situation se détériorerait le plus.

Le phénomène de sécheresse est d'abord présenté dans son intégralité, puis les différents types d'assurance y répondant sont détaillés (régime Cat Nat, régime des calamités agricoles, assurance récolte et assurance paramétrique). Certains de ces mécanismes pourraient s'avérer fragiles face à un assèchement du climat, et sont déjà en évolution.

L'assurance des catastrophes naturelles comme l'assurance paramétrique utilisent des indices pour mesurer la sécheresse. Quelques indices usuels sont présentés, tandis que d'autres sont proposés dans ce mémoire.

À l'aide de données simulées fournies par un modèle climatique spécifique et disponibles sur le portail DRIAS, une étude détaillée du changement climatique est réalisée pour le sud-est de la France. En comparant les distributions de variables climatiques simples de la fin du XX^e siècle à celles de la fin du XXI^e, il est déjà possible de conclure à un assèchement du climat dans les régions méditerranéennes. Ce constat est renforcé par le calcul d'indices à partir des variables climatiques.

Enfin, cet assèchement est mesuré sous le scope assurantiel. Dans un premier temps, à travers l'évolution simulée du coût du risque pour différents contrats d'assurance paramétrique. Puis en étudiant la fréquence et le seuil de déclenchement de l'assurance des catastrophes naturelles pour la sécheresse. Pour ces études, deux autres modèles climatiques sont alors également utilisés afin d'obtenir des conclusions plus robustes.

Mots-clés : sécheresse, changement climatique, régime Cat Nat, régime des calamités agricoles, assurance récolte, assurance paramétrique.

Abstract

In a context of climate change, this master thesis focuses on the potential evolutions of drought in France, and their impacts in insurance. The study will focus more on the Mediterranean regions, as they could be the most sensitive to these changes.

The drought is presented in its different forms before to detail on the insurance contracts dedicated to this danger (“Cat Nat” regime, agricultural disasters regime, crop insurance and parametric insurance). These mechanisms could not be resistant to a blow up of the drought, so some of them are already trying to evolve.

The parametric insurance and the insurance against natural disaster are using indexes to estimate the force of a drought episod. Some classical indexes are presented here, while others are proposed.

Using simulations of a particular climate model, publicly available on the website DRIAS, a detailed view of the climate change is given for the south-eastern France. Comparing the distributions of simple variables between ends of the XXth and the XXIst centuries, it is already possible to notice that the climate is drying up. This statement is confirmed by computing drought indexes from the basic variables.

Finally, this phenomenon is quantified from the point of view of insurance. We will first see how big can be the increase of the pure premiums for some parametric insurance contracts. Then, we will study the changes in the level for the “Cat Nat” regime to intervene, and how frequently the trigger is exceeded. For these applications in insurance, two more climate models will be included to provide a more solid analysis.

Keywords : drought; climate change; “Cat Nat” regime; agricultural disasters regime; crop insurance; parametric insurance.

Note de Synthèse

À mesure que le climat global de la planète se détériore, la sécheresse progresse. La France est régulièrement touchée, parfois sévèrement comme en 2022. La sécheresse impacte de nombreux secteurs. Cela motive l'existence d'assurances sur ce segment. Différentes formes d'assurance existent donc pour se prémunir de ce risque et de ses multiples conséquences.

Pour les agriculteurs, deux régimes permettent de se couvrir face à la sécheresse des sols : les calamités agricoles et l'assurance récolte (MRC). La concomitance de ces deux régimes pose différents problèmes, un nouveau régime universel va donc voir le jour en 2023.

La sécheresse fragilise les bâtiments à travers le retrait-gonflement des sols argileux (RGA). Le régime des catastrophes naturelles (dit « Cat Nat ») indemnise les sinistres RGA lors d'épisodes exceptionnels de sécheresse.

L'assurance paramétrique, où l'indemnisation repose sur un indice plutôt que sur un sinistre, peut également être utilisée pour limiter l'exposition à la sécheresse, en proposant notamment des solutions à la carte.

Cependant, la récurrence des sécheresses de ces dernières années pose des questions. La sinistralité a clairement augmenté, des produits comme l'assurance MRC sont ainsi déficitaires. Cette tendance est *a priori* amenée à se poursuivre dans les prochaines décennies. De nombreuses études, dernièrement COVÉA (2022), montrent que la hausse de la sinistralité RGA pourrait être importante d'ici le milieu de siècle, fragilisant le régime Cat Nat.

Ces études ont été réalisées sur la France entière, mais toutes les régions ne subiront pas nécessairement le même sort. Les conditions climatiques des régions méditerranéennes pourraient ainsi particulièrement se dégrader. Le bassin méditerranéen serait alors l'un des foyers de la désertification dans le monde selon la CNULCD (2022).

Ce mémoire étudie les perspectives d'évolution de l'assurance sécheresse avec une vision plus long terme (fin de siècle), en ciblant les régions méditerranéennes françaises.

Dans un premier temps, une présentation globale de la sécheresse est essentielle à sa bonne compréhension. Il faut tout d'abord distinguer :

- la sécheresse météorologique, qui correspond au déficit prolongé de précipitations ;
- la sécheresse édaphique ou sécheresse agricole, qui qualifie le manque d'humidité des sols en surface (là où les plantes puisent l'eau nécessaire à leur développement) ;
- la sécheresse hydrologique, qui illustre quant à elle le niveau insuffisant des cours d'eau, lacs et nappes phréatiques.

Ces sécheresses sont liées mais bien différentes. Pour comprendre comment un territoire arrive en situation de sécheresse, il faut connaître les différents flux d'eau qui concernent les sols. Les précipitations

sont essentielles : elles constituent le flux d'eau entrant (de l'atmosphère vers le sol). L'évapotranspiration est le mouvement inverse, et ne doit pas être négligée puisqu'elle représente environ deux tiers des précipitations. Les pluies corrigées de l'évapotranspiration sont appelées précipitations efficaces.

L'évapotranspiration potentielle (ETP) est l'évapotranspiration théorique d'un sol humide avec un couvert végétal bas et continu. Cette variable est plus facile à obtenir que l'évapotranspiration réelle (ETR). Lorsque les sols sont secs, ils évaporent moins et la différence ETP-ETR augmente.

Les précipitations efficaces apportent de l'eau dans le sol. Celle-ci est évacuée soit par ruissellement, soit par drainage (écoulement par gravité de l'eau vers le sous-sol). Ces flux alimentent les cours d'eau en surface et les eaux souterraines.

Les mesures de sécheresse ne sont pas aisées par rapport à l'obtention de certaines variables climatiques. Des indices de sécheresse sont calculables à partir de données climatiques simples. Le SPI est ainsi un indice standardisé basé sur les précipitations uniquement, tandis que le SPEI est une extension intégrant l'ETP. Ces indices sont utilisés en assurance paramétrique. Le SWI est un indice d'humidité des sols qui nécessite un matériel complexe pour être mesuré sur le terrain. Il peut en revanche être simulé numériquement par des modèles hydrométéorologiques. Cette approche est retenue dans le volet sécheresse du régime Cat Nat. Par ailleurs, un indice de sécheresse (IS) est proposé dans ce mémoire, ainsi que deux versions standardisées de cet indice.

Avant de mesurer l'impact du changement climatique sur les sécheresses à travers des indices, le dérèglement climatique est étudié plus globalement. Cela permet de comprendre les mécanismes qui peuvent avoir une influence sur les sécheresses à horizon lointain. Des données climatiques sont ainsi téléchargées sur le portail [Drias les futurs du climat](http://www.drias-climat.fr)^{*}, pour deux périodes de 30 ans : 1975-2005 et 2070-2100. Un bon aperçu du changement climatique peut ainsi être obtenu, tout en limitant l'impact de la variabilité naturelle du climat.

Des subtilités existent quant-à ces deux fenêtres temporelles. La première ne constitue pas véritablement des données historiques. En effet, elles correspondent à des simulations dans des conditions historiques et non aux observations réelles. Cela permet d'éviter un biais inhérent aux modèles climatiques. Par ailleurs, les données projetées nécessitent une hypothèse socio-économique sur le futur puisque le changement climatique est lié à l'activité humaine (par l'émission de gaz à effet de serre). Les modèles climatiques se basent sur les scénarios RCP proposés par le GIEC. L'étude se concentre sur le plus pessimiste d'entre eux (le RCP8.5) pour observer au mieux les effets du dérèglement climatique.

Le modèle climatique CNRM-ALADIN63 - CNRM-CERFACS-CNRM-CM5 est étudié ici. Le périmètre géographique est limité aux anciennes régions Languedoc-Roussillon, PACA et Corse, qui bordent la Méditerranée. Il compte ainsi 1 071 points de simulation de la grille SIM2, qui en possède 8 981 sur la France entière. Ces choix permettent de limiter le volume des données à commander sur le site du DRIAS.

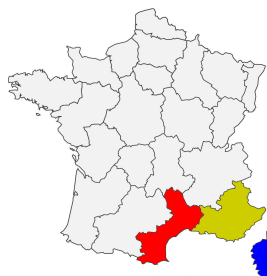


FIGURE 1 : Régions étudiées du territoire français.

*Lien vers la plateforme : <http://www.drias-climat.fr/>

À partir des données sur la période de référence, des régions homogènes en climat peuvent être identifiées. En utilisant une analyse en composantes principales puis une classification ascendante hiérarchique, cinq zones climatiques sont obtenues.

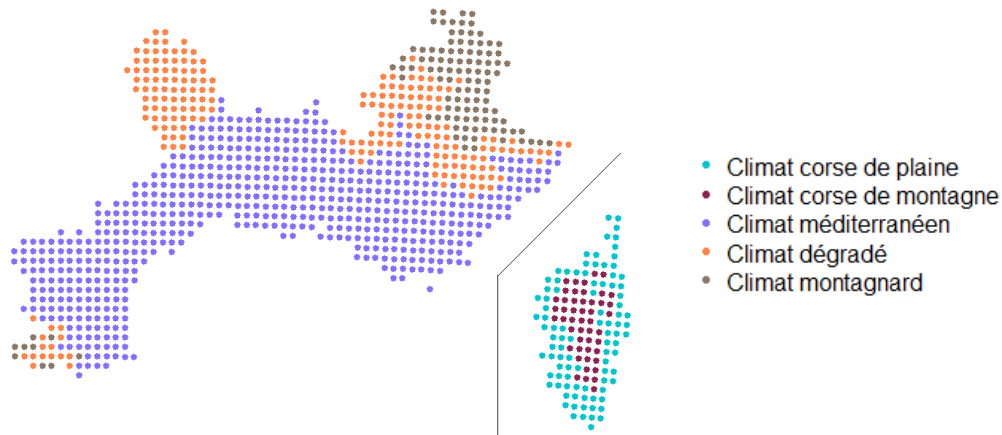


FIGURE 2 : Regroupement des 1 071 points en cinq groupes homogènes, vision cartographique.

En comparant le climat de fin du XXI^e siècle à celui de la période de référence, on observe tout d'abord une nette hausse des températures, de l'ordre de 4°C. Cette progression est légèrement atténuée en Corse par rapport au continent, tandis que les points en altitude se réchauffent plus vite que ceux en plaine. Ces changements ne sont pas homogènes dans l'année : le réchauffement est plus marqué en été qu'en hiver, avec par exemple +5°C en juillet contre +3°C en décembre.

La progression est également plus nette sur les périodes anormalement chaudes. Des mois exceptionnellement chauds sur la période de référence correspondent à des mois très froids à horizon lointain. Ainsi, si d'une zone à l'autre les températures moyennes se rapprochent très légèrement, le climat est caractérisé par une plus grande amplitude thermique entre hiver et été mais aussi entre jours normaux et chauds.

La hausse des températures à l'échelle de la planète entraîne une accélération du cycle de l'eau, et donc une hausse des précipitations. Ce n'est pas forcément vrai à l'échelle locale, et le climat projeté laisse ici apparaître des précipitations en légère baisse sur le bassin méditerranéen (-3%). Cette diminution est nette sur le climat montagnard avec un dixième de précipitations de perdues. Là encore, le phénomène est inégalement réparti dans l'année. Les pluies gagnent en importance en début d'année, mais diminuent drastiquement en été. La fréquence des jours de pluie recule d'environ 10% dans les cinq régions climatiques. Cependant, les pluies fortes gagnent en puissance. Les précipitations diminuent donc plus en fréquence qu'en volume, et leur saisonnalité se renforce. Les pluies ont une plus mauvaise répartition en fin de siècle, ce qui favorise les sécheresses.

L'ETP subit une forte augmentation en fin de siècle par rapport à la période de référence, de l'ordre de +15% en Corse et +20% sur le continent. Cette hausse est assez uniforme dans le temps et l'espace. Les constats sont bien différents sur la variable ETR. Celle-ci croît nettement moins, et à deux vitesses : environ +5% en plaine alors que la hausse est supérieure à 10% en montagne. La légère montée de l'ETR cache une certaine hétérogénéité. En effet, l'ETR a tendance à augmenter plus nettement sur les mois froids, mais à baisser sur les mois chauds. Dès lors, l'étude conjointe de l'ETP et de l'ETR permet d'affirmer que le climat s'assèche en été en fin de siècle dans un scénario pessimiste.

Plus globalement, la balance hydrique des sols est facilement calculée à partir des différentes variables climatiques disponibles. À horizon lointain, les normales mensuelles de la balance hydrique des sols ont globalement la même forme que sur la période de référence. Cependant, l'assèchement des

Variable	Évolution	Commentaires
Températures	++	Phénomène plus marqué en montagne, en été, ou dans des conditions anormalement chaudes.
Précipitations	-	Diminution nette pour le climat montagnard, hausse des précipitations en hiver et forte baisse en été.
ETP	++	Augmentation uniforme.
ETR	+	Faible progression en plaine, hausse concentrée sur l'automne et l'hiver.
Drainage	--	Diminution plus marquée en plaine, et en été.
Ruissellement	--	Très forte baisse en montagne, visible surtout en hiver.

TABLE 1 : Résumé de la comparaison entre données « historiques » et à horizon lointain dans le RCP8.5 pour le bassin méditerranéen.

sols entre avril et juillet est plus prononcé et uniforme. La perte d'eau moyenne des sols en août est plus faible que sur la période 1975-2005, alors même que le climat est moins humide. Cela s'explique par le fait que les sols deviennent encore plus secs en août à horizon lointain ; ils ne peuvent pas perdre l'eau qu'ils ne contiennent pas. La recharge au mois de septembre se détériore. Cependant, les sols sont encore saturés à la fin de l'hiver puisque le mois de février pourtant très humide n'a pas d'impact sur la teneur en eau des sols.

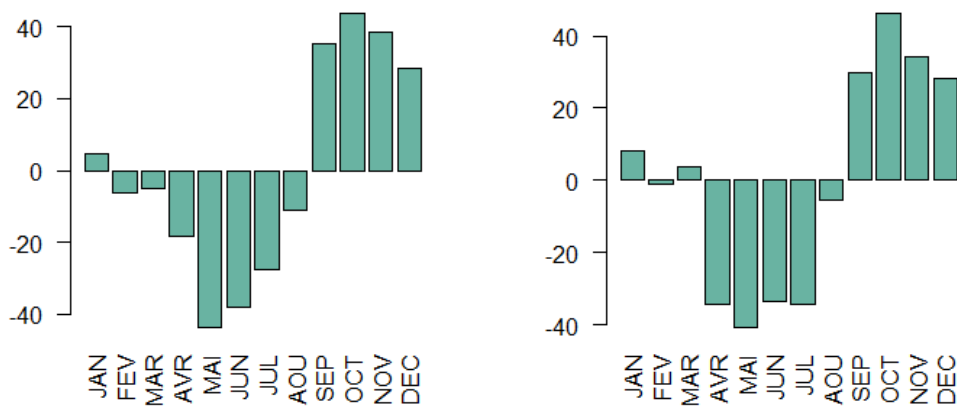


FIGURE 3 : Normales mensuelles (en mm) de la balance hydrique des sols dans le bassin méditerranéen : 1975-2005 (gauche) et 2070-2100 dans le RCP8.5 (droite).

Des indices de sécheresse peuvent être dérivés des variables climatiques étudiées. Il est intéressant de voir comment leurs distributions se déforment en passant de la période de référence à la fin de

siècle. Trois indices sont ainsi étudiés : RAI, EDI et IS.

L'indice RAI est croissant avec l'humidité, et basé sur les précipitations. Sa valeur moyenne à horizon lointain est assez proche de celle de la période de référence sauf pour le climat montagnard où elle est en nette baisse. Contrairement à la moyenne, la médiane se détériore clairement dans les cinq régions climatiques. L'indice se dégrade particulièrement en juillet.

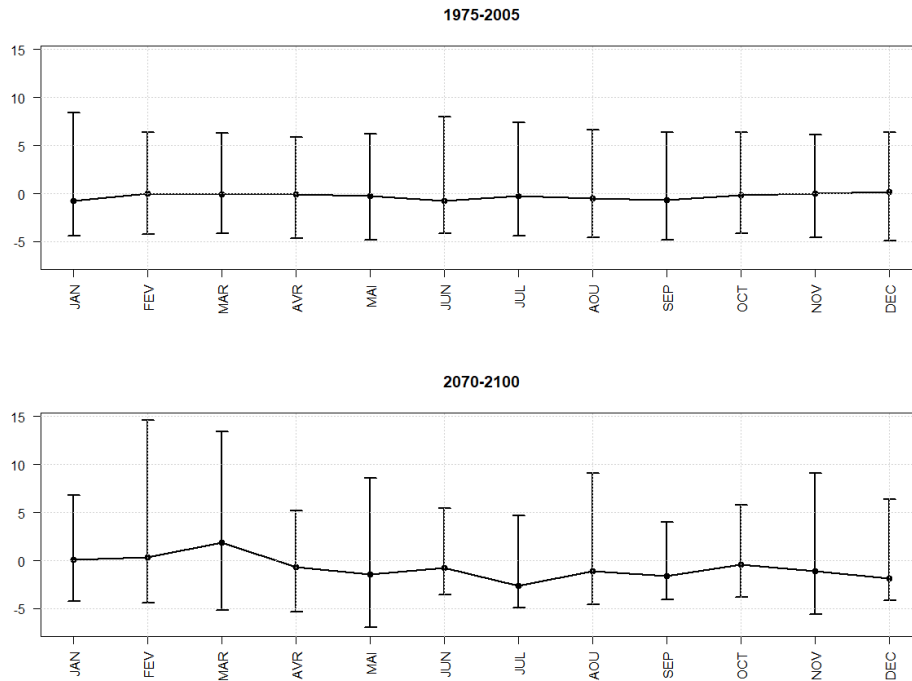


FIGURE 4 : Distributions du RAI (minimum, médiane et maximum) selon le mois en moyennant (avec pondération) sur l'ensemble des cinq zones climatiques - RCP8.5.

L'EDI est lui aussi basé sur les précipitations uniquement, croissant avec l'humidité, mais il utilise une plus grande profondeur que le RAI. Sa valeur moyenne baisse légèrement, sauf pour le climat montagnard avec là encore une chute prononcée. Pour ces deux indices, l'étude globale des distributions amène globalement les mêmes conclusions. Pour le climat montagnard, les conditions climatiques s'assèchent quel que soit le niveau d'humidité. Pour les quatre autres zones climatiques, les conditions s'assèchent pour les périodes sèches ou normales. En revanche, lorsque les conditions sont plutôt humides, il n'y a soit pas de changement soit une humidité exacerbée.

L'indice IS est quant-à-lui croissant avec la sécheresse. Il fait intervenir plusieurs variables climatiques : températures, précipitations et ETP. La valeur moyenne de l'indice augmente nettement dans chaque région climatique. Ce phénomène est plus fort sur le continent qu'en Corse, et l'altitude constitue un facteur aggravant. La distribution de l'indice est plus dispersée en fin de siècle, avec une saisonnalité qui se renforce. Encore une fois, l'assèchement du climat est très clair en juillet.

Les analyses sur ces trois indices tendent toutes vers un assèchement global du climat dans le bassin méditerranéen. Les régions de montagne sont plus sensibles, et le phénomène est maximal en été. Les sécheresses deviennent plus fréquentes et plus intenses dans ce scénario pessimiste.

Ce mémoire propose des applications en assurance paramétrique, dérivées de mesures de sécheresse. Les indices SWI et SPEI (dans une forme modifiée) sont notamment utilisés pour créer des protections

contre la sécheresse agricole et la sécheresse hydrologique respectivement. Les données du modèle climatique précédent sont utilisées, mais aussi celles de deux autres modèles. Ainsi, pour chaque contrat, la prime pure est calculée par période, par modèle et par zone climatique. Des moyennes sont ensuite faites entre les différents résultats des trois modèles climatiques. Le coût du risque est donc obtenu selon une approche multi-modèles. Par ailleurs, le scénario optimiste RCP2.6 est également considéré pour mesurer l'impact d'une politique climatique drastique à l'échelle mondiale.

Deux contrats sont d'abord définis pour se prémunir de la sécheresse agricole, avec pour indice sous-jacent le SWI. Le premier a une approche forfaitaire alors que le second propose une indemnisation par paliers. Pour le deuxième contrat, l'inflation des tarifs à horizon lointain est exprimée dans la grille ci-contre.

Climat \ Scénario	RCP2.6	RCP8.5
Corse de plaine	114%	171%
Corse de montagne	127%	354%
Méditerranéen	131%	293%
Dégradé	154%	294%
Montagnard	85%	250%

TABLE 2 : Évolution des primes pures pour un contrat indemnisant par paliers la sécheresse des sols (tarifs en pourcentages de ceux sur la période de référence).

L'assèchement global du climat dans un scénario pessimiste entraîne une forte montée du coût du risque. Ce phénomène est visible pour toutes les saisons et régions considérées, mais dans des proportions variables. Le choix de l'hypothèse socio-économique est déterminant puisque la hausse des primes peut être limitée. Dans le scénario optimiste, la sécheresse agricole pourrait même reculer en hiver.

Deux autres contrats, basés sur le SPEI, visent cette fois la sécheresse hydrologique. Le contrat n°3 propose une indemnisation en fonction de la période de retour de l'indice. Le dernier contrat est quant-à lui proportionnel à la magnitude d'une sécheresse, c'est-à-dire à sa force lorsque l'épisode est vu dans sa globalité. Le troisième contrat permet d'obtenir des indemnisations très importantes si les conditions sont extrêmement sèches. Ainsi, l'étude de ses primes pures apporte des renseignements sur l'évolution des sécheresses les plus sévères.

Climat \ Scénario	RCP2.6	RCP8.5
Corse de plaine	382%	823%
Corse de montagne	228%	652%
Méditerranéen	286%	1 074%
Dégradé	305%	1 112%
Montagnard	357%	751%

TABLE 3 : Évolution des primes pures pour un contrat avec prestations en fonction de la période de retour de l'indice SPEI (tarifs en pourcentages de ceux sur la période de référence).

L'explosion des primes montre la forte progression des sécheresses extrêmes, même dans un scénario optimiste. Ce phénomène est visible sur toutes les zones climatiques. Néanmoins, la différence entre RCP2.6 et RCP8.5 reste majeure. Le quatrième contrat démontre que l'altitude est un facteur aggravant pour la multiplication des sécheresses plus modérées.

L'indice SWI peut également être exploité pour reproduire le seuil de déclenchement du système Cat Nat pour les sécheresses. Ce régime indemnise les sinistres RGA, qui n'interviennent que sur les sols argileux. Sur les 1 071 points du périmètre de l'étude, les 508 situés en zone d'exposition moyenne

ou forte sont retenus. L'approche multi-modèles est reconduite. Le scénario intermédiaire RCP4.5 intègre l'étude.

Le seuil de déclenchement se dégrade nettement au cours du siècle dans les scénarios RCP4.5 et RCP8.5. Cela signifie que les conditions nécessaires à la reconnaissance en état de catastrophe naturelle pour sécheresse se durcissent. Pour autant, la fréquence de déclenchement du régime augmente, tout particulièrement dans le scénario pessimiste. Si le seuil ne variait pas au cours du temps, les fréquences changeraient encore davantage d'un scénario à l'autre.

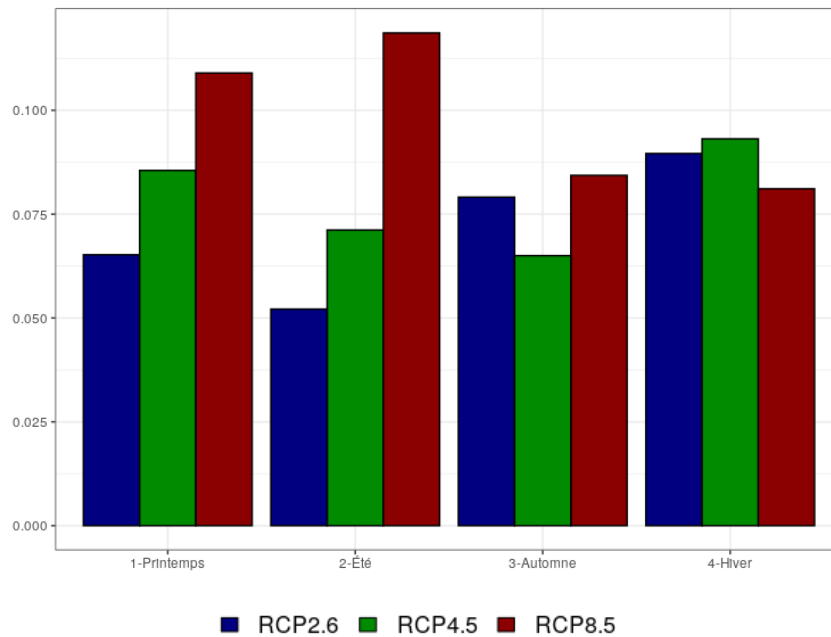


FIGURE 5 : Fréquences moyennes de déclenchement du critère météorologique au XXI^e siècle par saison avec une approche multi-modèles.

Les sécheresses devenant plus intenses, le coût moyen des sinistres pourrait augmenter. Cependant, l'éligibilité au régime Cat Nat devenant plus compliquée, de plus en plus de sinistres RGA se retrouveraient sans indemnisation. Ce problème est déjà source de tensions sur le régime Cat Nat. La prévention contre le risque RGA existe, et doit donc être développée davantage. Il faut également souligner que les évolutions décrites dépendent clairement du scénario étudié.

Ainsi, le changement climatique dans les régions méditerranéennes françaises pourrait être synonyme d'assèchement. Dans un scénario pessimiste, la hausse des températures ne s'accompagne pas d'une pluviométrie plus favorable. Dès lors, les conditions déjà sèches en été se durcissent encore davantage. Cela concerne aussi bien les sols que le réseau hydrologique. Avec la progression du risque sécheresse, le coût de la protection en fin de siècle pourrait devenir rédhibitoire. De nouveaux contrats deviendraient pertinents face à un risque en évolution.

Les régimes d'indemnisation existants sont déjà sous tension, et doivent donc être repensés. La prévention sera un levier essentiel. L'autre marge de manœuvre vient des émissions de gaz à effet de serre. En effet, la trajectoire socio-économique joue un rôle déterminant. Le risque sécheresse peut être sensiblement atténué dans une trajectoire optimiste, mais il faut s'attendre à une progression des sécheresses extrêmes dans tous les cas.

Synthesis note

As the planet's climate is deteriorating, drought progresses. France is more and more affected, sometimes by severe droughts such as in 2022. Drought has an impact on various fields, this is a reason for insurance to get involved on this market. Different forms of insurance exist to face drought and its consequences.

For French farmers, two regimes offer covers against dry soils : the agricultural disasters regime and the crop insurance. The coexistence of these regimes causes problems, so a new universal regime will come into effect in 2023.

Drought can weaken houses through the shrinking and swelling of clay soils (RGA). In France, the "Cat Nat" regime helps the victims of the RGA phenomenon, provided that there is an exceptional drought.

In parametric insurance, compensations depend on indexes rather than damages. This kind of insurance provides customizable services, and can be used to limit the exposition to drought.

Yet, the multiplication of droughts these last years raises questions. Damages have increased, leading to financial tensions on drought insurances. The crop insurance is for instance a loss-making product in France. But this trend is expected to persist in the following decades. Numerous studies, such as Covéa (2022), show that the damages related to RGA will be enlarged significantly in the middle of the century.

These studies consider the whole Metropolitan France, but all the regions will not necessarily follow the same path. The climate could be particularly distorted in the Mediterranean basin, so in the Southeastern France. The Mediterranean regions could be the most impacted by desertification in the world according to CNULCD (2022).

This master thesis studies the future prospects of drought insurance in a long-term view (end of the century), targeting the French Mediterranean regions.

First, a global presentation of drought is essential to understand it. One distinguishes :

- The meteorological drought, corresponding to the lack of rainfall
- The agricultural drought, which qualifies the dryness of superficial soils (where vegetals collect water)
- The hydrologic drought, illustrating a weak water flow in rivers or a low level in lakes and groundwater tables.

These droughts are linked but they are different. The water flows of the soils are crucial to understand droughts. Rainfall are essential as the incoming flow (from the atmosphere, to the ground). The inverse one, called evapotranspiration, should not be neglected as it represents around two-thirds of the rainfall. The rainfall net of evapotranspiration is named effective rainfall.

The potential evapotranspiration (PET) is the theoretical evapotranspiration of a humid soil with a low and continuous vegetal cover. It is easier to obtain than the real evapotranspiration (RET). When there is a drought, the difference PET-RET is high.

Effective rainfall bring water in the ground. This water is evacuated either by gravity (the water goes deeper) or by runoff (the water moves on the ground). These flows supply the hydrological network.

It is easier to obtain some classic climatic variables than to measure drought. Some drought indexes can be computed with simple variables. For instance, the SPI is a standardized drought index based on the rainfall only, whereas the SPEI is an extension including the PET. These indexes are used in parametric insurance. The SWI is an index for soil wetness, but it is hard to determine in the field. On the other hand, it can be numerically simulated by an hydrometeorological model. This approach is used in the “Cat Nat” regime. In this master thesis, an other index (IS) is offered, with two possible ways to standardize it.

Before to assess its impact on drought, the climate change can be studied more globally. This helps to understand the mechanisms that can have an influence on drought in a long-term view. Data are downloaded from the website [Drias les futurs du climat*](http://www.drias-les-futurs-du-climat.fr), for two periods of 30 years : 1975-2005 and 2070-2100. It allows to get a good insight of the climate change and to limit the impact on the analysis of the climate’s variability.

Subtleties exist with these two periods. The first one does not correspond to historical observations. Indeed, the data are simulations in historical conditions to avoid a climate models’ inherent bias. Furthermore, the projections require a socio-economic hypothesis because the climate change is the consequence of the human activity (through greenhouse gas emissions). Climate models available on the DRIAS work with scenarios proposed by the IPCC and named RCP. To have the best view of the climate change, the study will focus on the pessimistic trajectory (RCP8.5).

The climate model CNRM-ALADIN63 - CNRM-CERFACS-CNRM-CM5 is used here. The geographic perimeter is set to the French regions Languedoc-Roussillon, Corse and PACA, which are alongside the Mediterranean Sea. This zone contains 1 071 of the 8 981 spots of simulation, made on the SIM2 grid. These choices allow to reduce the volume of daily data to order on the DRIAS webpage.

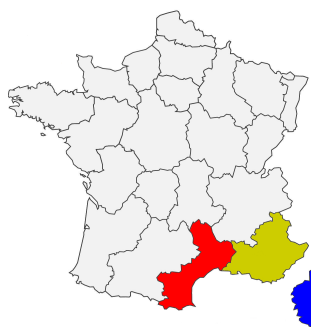


Figure 6: Perimeter of the study.

Homogeneous zones with respect to the climate can be found using the “historical” data. A principal component analysis and an ascending hierarchical classification determine five climatic regions. Corsica is splitted between mountains and coast. The continental regions are divided between a Mediterranean’s climate zone, high montains and a buffer area with a shaded climate.

*Lien vers la plateforme : <http://www.drias-climat.fr/>

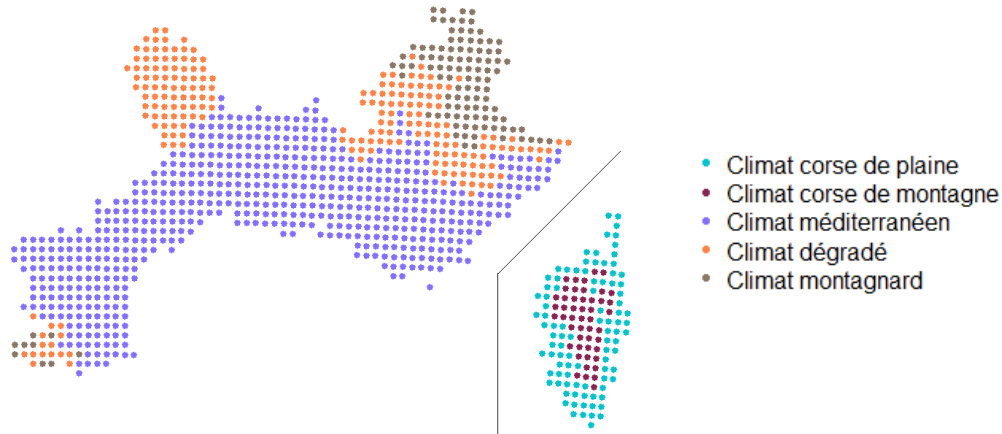


Figure 7: Five climatic regions obtained from the “historical” data.

Comparing the climate at the end of the century with the “historical” one, a net warming is observed, about 4°C . This phenomenon is a bit softened in Corsica, and the elevation exacerbates the warming. This change is not uniform through the year : temperatures increase more in summer than in winter, with for example $+5^{\circ}\text{C}$ in July but $+3^{\circ}\text{C}$ in December.

The warming is also stronger during heat waves. The months exceptionally hot during the reference period correspond to cold months at the end of the century. From a climatic region to another, mean temperatures get slightly closer. However, there is more amplitude in each climate between seasons, also between normal periods and heat waves.

At the Earth’s scale, the warming will accelerate the water cycle, thus increase the rainfall. This may not be true at a local scale, and in fact the data show even a slight decrease in the rainfall at the end of the century in the Mediterranean basin (-3%). The loss is stronger in high mountains, about -10% . Here again, this is not uniform during the year. Rainfall gets greater in winter, but plummets in summer. The frequency of rainy days diminishes (about -10%) in each of the five climatic zones. However, the heavy rain episodes are getting stronger. The rainfall degradation is more about frequency than volume, with a strengthened seasonality. The new distribution of rainfall favours droughts.

The PET grows up at the end of the century, about $+15\%$ in Corsica and $+20\%$ in the continent. This increase is uniform both in time and in space. The analysis is very different with the RET. It grows less, with a two-tier geography : about $+5\%$ in plains but more than the double in mountains. These numbers hide some heterogeneity in time. Indeed, the RET increases more in the cold months, but decreases in the warm ones. The simultaneous study of PET and RET shows that, in a pessimistic scenario, the climate becomes dryer in the end of the century.

More generally, the water balance of the soils is easy to calculated with the different climatic variables available. At the end of the century, the normals keep the form of the ones on the reference period. However, the drying between April and July gets stronger and more uniform. In August, the losses of water are smaller than in the reference period, but the climate is not wetter. This means that in August, the soils are more dry at the end of the century. They cannot loose the water that they do not contain. In September, the recharge is less effective than “historically”. Yet, the soils are still saturated at the end of the winter because in February (which is very humid), the water balance stays unchanged.

Variable	Evolution	Comments
Temperatures	++	Phenomenon stressed in moutains, in summer or during heat waves.
Rainfall	-	Stronger in high mountains and in summer, increase in winter.
PET	++	Uniform growth.
RET	+	Weaker in plains, increase concentrated in autumn and winter.
Drainage	--	Stronger in plains and in summer.
Runoff	--	Much stronger in high mountains, especially in winter.

Table 4: Sum up of the comparison between “historical” data and long-term projections of the climate in the Mediteranean basin in a pessimistic scenario (RCP8.5).

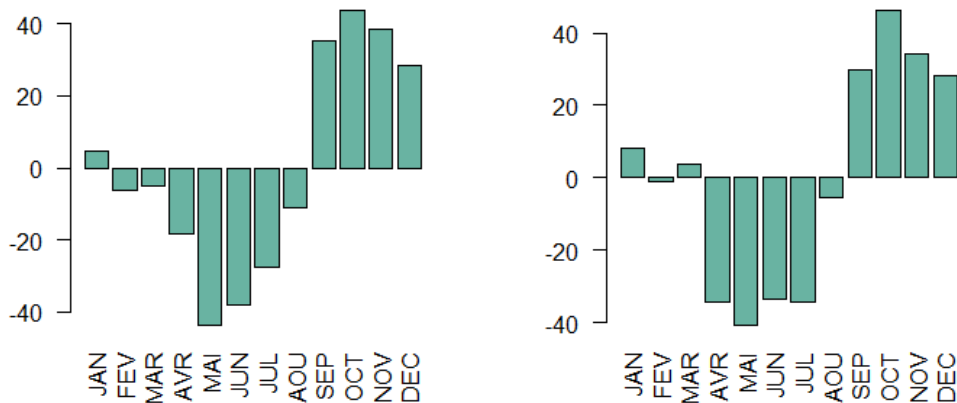


Figure 8: Normal (in mm) of the water balance of the soils in the Mediterranean basin : 1975-2005 (left) ans 2070-2100 in the RCP8.5 (right).

Drought indexes can be derived from the climatic variables studied before. We can analyze how their distributions can be warped between the reference periode and the end of the century. Three indexes are studied : RAI, EDI and IS.

The RAI grows with humidity. It is based on rainfall only. The average of the index does not really move at the end of the century, except in high mountains where it considerably decreases. Unlike the mean, the median deteriorates clearly in each of the five climatic zones. The index diminshes particularly in July.

The EDI is also based on rainfall and growing with humidity, but it is deeper in its construction than the RAI. Its mean decreases slightly (except in high mountains where it is more pronounced). The study of the distributions of both indexes brings the following conclusions. In high mountains,

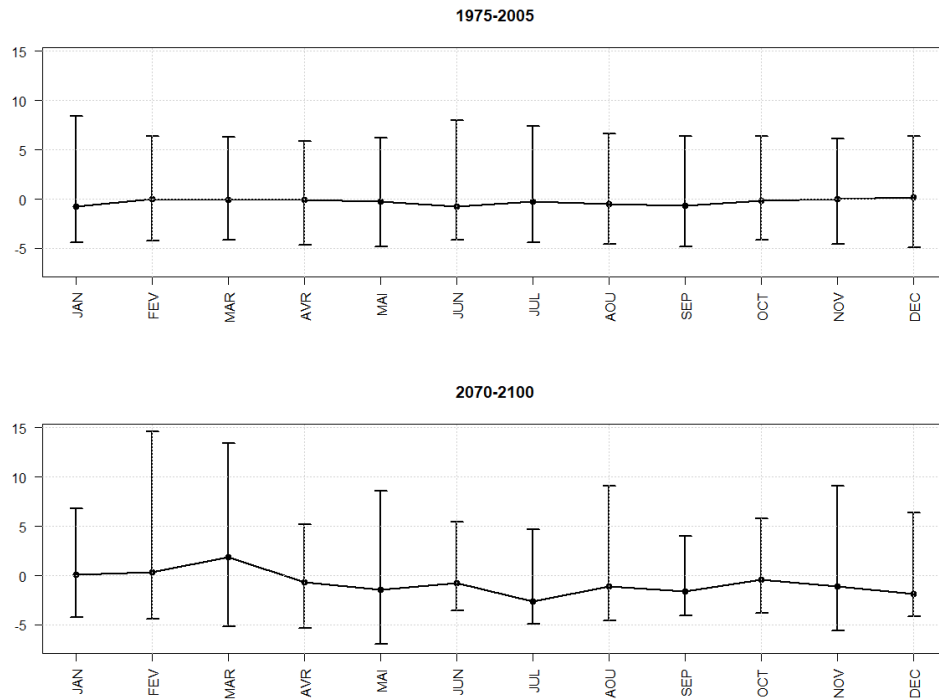


Figure 9: Distributions of the RAI (minimum, median and maximum) per month on the Mediterranean basin - RCP8.5.

the climatic conditions always get dryer. In the four other regions, the climate gets dryer for dry or normal conditions. In humid conditions, either there is no change or they become even wetter.

The index IS increases with drought, and use several variables : temperatures, rainfall and PET. Its mean grows up considerably in each climatic region. This phenomenon is stronger in mountains and weaker in Corsica. The index's distribution is more flat at the end of the century, meaning that the range of values is wider. The seasonality of the index (which is not standardized) is reinforced. The climate's degradation is very clear in July.

These three indexes all lead to a dryer climate at the end of the century in the Mediterranean basin. Mountains regions are more sensitive to this phenomenon, which is stronger in summer. In this pessimistic scenario, droughts become more frequent and more intense.

This master thesis proposes some applications in parametric insurance derived from drought indexes. Both the SWI and SPEI (in a modified form) are used to create protections against the agricultural and hydrologic droughts respectively. Data of the previous part are enriched with two other climate models. For each contract, the pure premium is computed by periode, by model and by climatic region. Then, averages are made between the results of the three models : it is a multi-models approach. The optimistic scenario RCP2.6 will also be studied to evaluate the impact of a worldwide climate policy.

Two contracts are first defined to protect from the agricultural drought. They use the SWI index. The first one proposes a fix amount of money when there is a drought, whereas the second has step rates. For the second contract, the rise of the premiums is given in the following table.

Climate \ Scenario	RCP2.6	RCP8.5
Plains in Corsica	114%	171%
Mountains in Corsica	127%	354%
Mediterranean	131%	293%
Shaded	154%	294%
High mountains	85%	250%

Table 5: Pure premiums' evolution for the second contract, indemnifying soils drought with a step-rate (prices as percentages of the "historical" ones).

The global drying of the climate in a pessimistic scenario entails a rise in the cost of this risk. This is observed for all seasons and regions, in variable proportions. The choice of the socio-economic hypothesis is important as it can limit the premiums' inflation. In an optimistic scenario, agricultural drought could diminish in winter.

Two other contracts, based on the SPEI, are targeting the hydrologic drought. The contract n°3 gives a compensation which is a function of the return time of the index. The last contract uses a proportional approach, considering the magnitude of a drought episod. The third contract allows very important compensations for extreme droughts. Thus, the study of its premiums brings information about the progression of the severe droughts.

Climate \ Scenario	RCP2.6	RCP8.5
Plains in Corsica	382%	823%
Mountains in Corsica	228%	652%
Mediterranean	286%	1 074%
Shaded	305%	1 112%
High mountains	357%	751%

Table 6: Pure premiums' evolution for the third contract, indemnifying hydrologic droughts with a function of the return time of the index (prices as percentages of the "historical" ones).

The blow up of the premiums shows that, even in an optimistic scenario, extreme droughts make headway. This is observable in all the climatic regions. Nevertheless, the difference between RCP2.6 and RCP8.5 stays tremendous. The fourth contract shows that the elevation is an aggravating factor for the progression of moderate droughts.

The SWI index can also be used to reproduce the trigger threshold of the Cat Nat regime. This regime compensates the damages caused by the RGA phenomenon, which occurs only on clay soils. 508 points in the study's perimeter have an average or high exposition to the RGA, they will be the only ones considered for this part. The multi-models approach is repeated, but the intermediate scenario RCP4.5 is included in the study.

The trigger threshold gets worse during the century in the scenarios RCP4.5 and RCP8.5. This means that the conditions to be eligible for compensations by the Cat Nat regime will be more restrictive. Although, the trigger's frequency increases, especially in the pessimistic scenario. If the threshold could not vary with time, this rise would be even stronger, leading to bigger gaps between the RCP trajectories.

As droughts become more intense, the cost of a RGA phenomenon should increase. However, it gets harder to be eligible to the regime ; more and more victimes could not get any compensation. This kind of tension already exists. As it is possible to prevent RGA, the precaution measures must be developed. The evolutions described here really depend on the socio-economic path chosen.

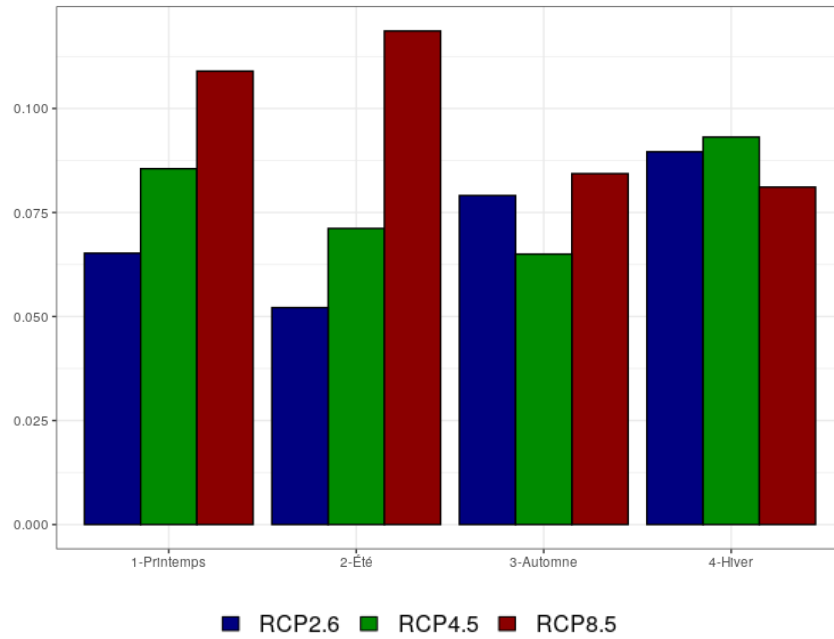


Figure 10: Trigger's frequency of the Cat Nat regime in the XXIst century by season, multi-models approach.

To sum up, the climate change in the French Mediterranean regions involves dryer conditions. In a pessimistic scenario, the warming does not go along with more rainfall. The conditions in summer, that are already dry, get even worse. This affects the soils like the hydrologic network. With the progression of droughts, the cost of insurance at the end of the century could become prohibitive. Moreover, new contracts would be relevant to face an evolving risk.

The existing regimes are already subjected to tensions, they need to evolve. Prevention will be a key, the other is the climate policy. The socio-economic scenario plays a decisive role. An optimistic scenario helps to mitigate the drought hazard, but extreme phenomena will gain ground anyway.

Remerciements

Je souhaite remercier sincèrement toutes les personnes qui m'ont aidé dans la rédaction de ce mémoire. Tout d'abord Christophe Dutang et Quentin Guibert, qui ont toujours été disponibles pour m'accompagner. Frédéric Planchet également, sans qui je n'aurais pas pu travailler sur ce thème qui me tenait à cœur. Je voudrais également remercier Geoffroy Delion, pour m'avoir accordé sa confiance en me recrutant en stage au sein de Prim'Act, puis pour m'avoir permis de travailler dans de bonnes conditions même à la fin de cette période. Je remercie également Maxime Ben Brik et Mathilde Clement pour les conseils qu'ils ont pu me donner en me relisant. Plus largement, l'ensemble de l'équipe de Prim'Act pour leur soutien. Enfin, je me dois de remercier ma famille qui m'a toujours accompagné et motivé, en particulier avec ce mémoire.

Table des matières

Résumé	3
Abstract	4
Note de Synthèse	5
Synthesis note	13
Remerciements	21
Table des matières	23
Liste des sigles utilisés	25
Introduction	27
1 Présentation du risque sécheresse	29
1.1 La sécheresse comme catastrophe naturelle	32
1.2 Sécheresse agricole et assurance	41
1.3 Mesurer la sécheresse	48
2 Aperçu du changement climatique	57
2.1 RCP et portail DRIAS	57
2.2 Présentation des données et séparation des climats	62
2.3 Le climat historique dans le bassin méditerranéen français	70
2.4 Analyse du climat projeté	80
3 La sécheresse en fin de siècle, impacts assurantiels	103
3.1 Perturbations dans les distributions des indices de sécheresse	103

3.2 Applications en assurance paramétrique	113
3.3 Critère météorologique de la sécheresse Cat Nat de 2000 à 2100	125
Conclusion	137
Bibliographie	139
A Informations supplémentaires sur le SWI	141
B Évolution du climat historique sur une courte période	143
C Diagrammes ombrothermiques par zone climatique	145
D Conversion de coordonnées WGS 84 en Lambert 93	147
E Obtention des parangons	149

Liste des sigles utilisés

Dans ce mémoire, certains sigles sont employés fréquemment pour faciliter la lecture. Leurs définitions sont rappelées ici. Par ailleurs, les sigles SWI, SPI, SPEI, RAI, TCI ou encore EDI représentent tous des indices de sécheresse (cf. partie [1.3.1](#)).

ACP : *Analyse en composantes principales.*

BRGM : *Bureau de recherches géologiques et minières.*

CAH : *Classification ascendante hiérarchique.*

CNRM : *Centre national de recherches météorologiques.*

CNULCD : *Convention des Nations Unies sur la lutte contre la désertification.*

DRIAS : *Donner accès aux scénarios climatiques régionalisés français pour l'impact et l'adaptation de nos sociétés et environnement.*

ETP : *Évapotranspiration potentielle.*

ETR : *Évapotranspiration réelle.*

FNGRA : *Fonds national de gestion des risques en agriculture.*

GES : *Gaz à effet de serre.*

GIEC : *Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat.*

MRC : *Multirisques climatiques.*

PAC : *Politique agricole commune.*

PACA : *Provence-Alpes-Côte d'Azur.*

RCP : *Trajectoires représentatives de concentration.*

RGA : *Retrait-gonflement des sols argileux.*

SIM : *Safran-Isba-Modcou.*

TGN : *Tempête-grêle-neige.*

Introduction

Dans un contexte de dérèglement climatique, les communications alarmantes sur les sécheresses futures se multiplient. Force est de constater qu'une progression des sécheresses est déjà bien visible aux quatre coins du globe, y compris en France. En effet, avec quatre années de grande sécheresse sur la période 2018-2022, le territoire est touché dans son intégralité par un enchaînement inédit.

La sécheresse de 2022 laisse ainsi derrière elle des images d'incendies exceptionnels, mais aussi des cultures dévastées, des fleuves qui ressemblent à des torrents ou encore des localités à cours d'eau potable. Cela permet déjà de se faire une idée de la largeur du spectre de la sécheresse. La biodiversité tout comme la santé humaine peuvent également être affectés. Mais la sécheresse est définie en France comme une catastrophe naturelle lorsqu'elle impacte des bâtiments *via* le retrait-gonflement des sols argileux (RGA).

Face à un risque de cette taille, l'assurance contre la sécheresse s'est naturellement développée en France sur différents canaux. Pour le péril RGA, la protection fait partie du régime Cat Nat, qui couvrent tout ce qui est légalement considéré comme une catastrophe naturelle. Les indemnisations en cas d'épisode majeur de sécheresse peuvent alors être pharaoniques, allant jusqu'à plus de deux milliards d'euros en 2003.

Face aux pertes de récolte, le marché offre deux propositions historiques : les calamités agricoles et l'assurance récolte. Enfin, une nouvelle formule d'assurance paramétrique se fait sa place avec une croissance rapide.

Cependant, cette assurance fait face à un risque en évolution, ce qui pose la question de la viabilité de ces dispositifs. En ce qui concerne le RGA, de nombreuses études menées par la CCR [MONCOULON et al. (2018)], la FFA (2015) ou récemment COVÉA (2022) appuient une forte augmentation de la sinistralité à moyen terme (horizon 2040-2050).

Ces études ont été réalisées sur la France entière, mais les régions méditerranéennes pourraient bien être au premier rang de cette détérioration des conditions climatiques. La CNULCD (2022) affirme que le bassin méditerranéen pourrait être l'un des foyers mondiaux de la désertification.

On peut alors se demander, avec une vision plus long terme, quelles sont les perspectives d'évolution de l'assurance sécheresse (au sens large) dans les régions méditerranéennes françaises.

Ce mémoire présentera tout d'abord le risque sécheresse dans sa globalité, et détaillera les différentes formes de protection existantes. Des indices classiques permettant de mesurer la sécheresse seront exposés, tandis que d'autres seront construits. Dans un second temps, une étude du changement climatique sera fournie pour les régions méditerranéennes françaises. Elle permettra ensuite de mesurer l'assèchement du climat à l'aide des indices, et d'en évaluer les conséquences en assurance paramétrique et pour le régime Cat Nat.

Chapitre 1

Présentation du risque sécheresse et du marché de l'assurance contre la sécheresse

Désignant le manque d'eau dans une zone donnée, la sécheresse est bien connue du grand public car elle concerne toute la population lors d'épisodes fréquents et médiatisés. C'est un phénomène naturel dont l'apparition est favorisée par les fortes températures et le manque de précipitations, qui devient un point d'attention particulier avec le réchauffement climatique. Les perspectives sont à l'augmentation en fréquence et en intensité des épisodes de sécheresse, et en France tous les territoires semblent concernés. La sécheresse est un terme global pour désigner trois sous-catégories de sécheresse :

- la **sécheresse météorologique**, qui correspond au déficit prolongé de précipitations. Ce manque est mesuré par comparaison aux valeurs normales de précipitations, qui sont des moyennes historiques (usuellement sur 30 ans) ;
- la **sécheresse édaphique**, plus couramment appelée **sécheresse agricole**, qui qualifie le manque d'humidité des sols en surface. Dans ce cadre les sols considérés sont ceux entre 1 et 2 mètres de profondeur, là où les plantes puisent l'eau nécessaire à leur développement ;
- la **sécheresse hydrologique**, qui illustre quant à elle le niveau insuffisant des cours d'eau, lacs et nappes phréatiques.

Ces différentes sécheresses sont bien sûr liées, mais l'une n'entraîne pas nécessairement les autres. De fortes précipitations peuvent ne pas nourrir les sols correctement. En effet, si ceux-ci sont par exemple très compacts, l'eau ruisselle alors simplement sur le sol et n'y pénètre qu'en petite partie. Et même si l'eau alimente les sols de surface, elle peut être entièrement puisée par une végétation dense et qui a d'importants besoins en eau. La pluie peut aussi traverser le sol, en allant vers le sous-sol et alimente alors les eaux souterraines. Dans ce cas le niveau des cours d'eau en surface met plus de temps à remonter.

Le terme d'évapotranspiration regroupe l'évaporation de l'eau par le sol et la transpiration chez les plantes (soit le rejet dans l'air par les feuilles de la majeure partie de l'eau absorbée au niveau des racines pour refroidir la plante). Le fait de rassembler ces deux phénomènes est essentiellement pratique : il est extrêmement difficile de mesurer indépendamment ces deux grandeurs. Le rapport même

entre évaporation et transpiration est très variable, dépendant des conditions climatiques présentes et antérieures ainsi que de la croissance des végétaux entre autres.

L'évapotranspiration est l'un des facteurs importants qui expliquent la différence entre sécheresse météorologique et agricole. Ce phénomène est une composante majeure du cycle de l'eau et du bilan hydrologique puisque environ deux tiers des précipitations retournent dans l'atmosphère de cette manière. L'eau restante constitue un écoulement de surface et souterrain. Le terme de précipitations efficaces est souvent utilisé pour désigner les précipitations restantes une fois corrigées de l'évapotranspiration.

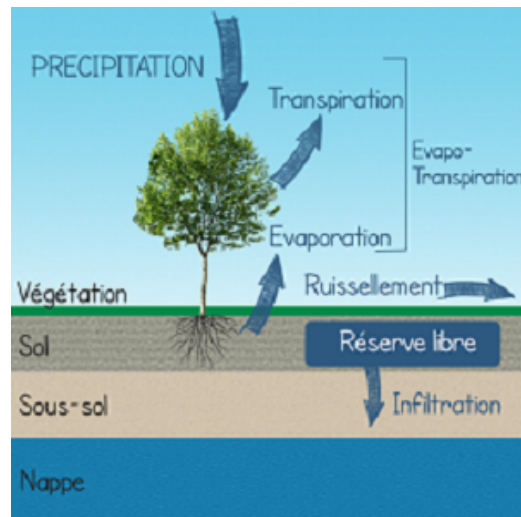


FIGURE 1.1 : Illustration des flux impactant la balance hydrique des sols. Source : [Le Glossaire sur l'Eau, les milieux marins et la biodiversité](#).

L'évapotranspiration est logiquement très dépendante de la nature du sol et de sa végétation. L'évaporation d'un sol nu peut être bien plus importante que ce que l'on imagine. En effet, le micro-relief du sol permet d'augmenter la surface évaporante par rapport aux lacs, à la surface plane. Un sol nu saturé peut ainsi évaporer plus qu'une étendue d'eau à surfaces égales.

Il en va de même pour la transpiration végétale. Les forêts rejettent une grande quantité d'eau dans l'atmosphère, potentiellement plus importante à surface équivalente qu'une étendue d'eau. Ainsi, les grandes forêts sont littéralement sources de « rivières volantes », des flux aériens de vapeur d'eau qui peuvent engendrer des précipitations parfois à des milliers de kilomètres. C'est notamment le cas en Sibérie et en Amazonie. Pour prendre l'exemple d'un arbre bien implanté en France, le chêne adulte peut transpirer jusqu'à 1 000 litres d'eau en une journée. Cela permet alors un certain recyclage de la pluie, puisque cette humidité dans l'air peut participer à la formation de précipitations à d'autres endroits en fonction des vents.

Le couvert végétal interagit également avec les flux d'eau dans le sol avec le mécanisme d'interception. Lors d'un épisode de pluie, les végétaux et plus particulièrement les arbres retiennent une partie de l'eau tombée sur leurs feuilles. Elle s'évapore ensuite et ne rencontre donc pas le sol. En formant des obstacles au ruissellement de l'eau, les végétaux ralentissent ce dernier. Cela favorise l'absorption de l'eau par le sol. Il faut également citer le rôle essentiel des racines qui puisent l'eau du sol pour alimenter les plantes.

L'évaporation et la transpiration sont toutes choses égales par ailleurs plus importantes lorsque la température augmente. Or, lors d'un épisode de sécheresse avec de fortes chaleurs, ces deux flux

d'eau restent relativement faibles en réalité par manque d'eau dans le sol. Dans des conditions sèches, l'évapotranspiration est donc restreinte ce qui peut jouer défavorablement sur les précipitations et renforcer l'intensité de la sécheresse. Cela peut aussi avoir pour effet de l'étendre géographiquement en fonction des vents, qui transportent alors de l'air sec.

Il est important de distinguer l'évapotranspiration réelle du concept d'évapotranspiration potentielle (ETP). Ce dernier désigne l'évapotranspiration théorique d'un sol suffisamment humide et avec un couvert végétal bas, continu et homogène. Ainsi construite, l'ETP varie positivement avec les températures.

Si le manque de pluie et la chaleur sont les principaux facteurs jouant sur la sécheresse, d'autres peuvent avoir un réel impact sur l'humidité des sols. C'est le cas d'une fonte des neiges anormalement faible ou d'une modification artificielle du ruissellement. La sécheresse peut également se manifester bien après un déficit de précipitations, notamment lorsque celui-ci intervient en hiver, la saison de recharge des nappes souterraines. Une étude récente de SCHUMACHER et al. (2022) a également mis en lumière le rôle du vent dans l'extension territoriale des sécheresses.

Lors d'une période de sécheresse, la structure des sols change : ils durcissent. Les pluies ne tombent plus sur une surface meuble, l'eau a une plus forte propension à ruisseler, et nourrit moins les sols. Ce phénomène est accentué par la mort d'une partie du couvert végétal, ce dernier étant primordial pour retenir l'eau avec le mécanisme d'interception.

Un même volume d'eau peut donc nourrir plus ou moins un sol selon son état de sécheresse qui influe sur sa perméabilité, mais aussi selon la vitesse d'arrivée de l'eau. À précipitations équivalentes, des pluies peu intenses et étalées dans le temps auront un impact plus positif sur la qualité des sols qu'un épisode de forte pluie, où l'eau ruissellera davantage.

Les pluies jouent également sur la porosité des sols. Lors d'un épisode de pluie, chaque goutte d'eau qui tombe fragmente des agrégats du sol et les déplace naturellement vers les petits espaces vides du sol (les pores). Une pluie intense aura donc tendance à refermer les pores du sol en formant une croûte de battance, qui bloquera ensuite l'infiltration de l'eau. Cette couche a tendance à se former sur les sols avec une faible stabilité structurale. Les sols argileux sont donc plutôt résistants à ce phénomène.

Un épisode de sécheresse peut avoir des impacts forts et variés. Le premier est le manque d'eau disponible dans les différents circuits. D'une part dans les circuits naturels, entraînant des bouleversements des écosystèmes avec par exemple des rivières à sec, et le phénomène de désertification. D'autre part dans les circuits artificiels, des restrictions dans l'arrosage pour les agriculteurs aux difficultés d'approvisionnement en eau potable.

La sécheresse agricole peut ainsi perturber la croissance végétale, baisser les rendements et mettre en péril le bétail. Par exemple, la sécheresse millénaire en Australie a fait chuter la productivité agricole totale de 18% entre 2002 et 2010 selon l'Organisation Météorologique Mondiale [ZHONGMING et al. (2021)], et est un des facteurs déterminants de l'apparition des méga-feux à l'hiver 2019-2020.

L'année 2022 est marquée par un épisode de sécheresse qui a touché l'intégralité du territoire. Au mois d'août, une centaine de communes se sont retrouvées privées d'eau potable et ont dû recourir à des approvisionnements du fait de la sécheresse hydrologique [TF1 (2022)].

Le domaine de la santé est également fortement impacté par la sécheresse avec plus de 650 000 morts dans le monde à cause de ce phénomène sur la période 1970-2019 d'après la Convention des Nations Unies sur la Lutte Contre la Désertification. Les pays en développement sont les plus exposés [CNULCD (2022)].

Enfin, la sécheresse provoque le phénomène de retrait-gonflement des sols argileux, qui affecte les bâtiments.

Tout cela s'accompagne *a fortiori* de conséquences économiques. Ces pertes sont chiffrées à plus de 249 Mds \$ aux États-Unis depuis 1980 pour 26 épisodes de sécheresse selon l'agence américaine de l'environnement NOAA-NCEI (2020), ce qui montre le coût colossal des sécheresses.

L'impact économique peut être majeur à l'échelle d'un pays, les graves sécheresses en Inde (l'un des pays les plus exposés) auraient ainsi diminué le PIB national de 2 à 5% par an en moyenne d'après le Bureau des Nations Unies pour la Réduction des Risques de Catastrophe [UNDRR (2021)]. Pourtant, la part de l'agriculture dans le PIB indien a considérablement baissé. En 2022, la canicule record dans ce pays l'entraîne dans sa pire sécheresse, et les coûts supportés pourraient donc être encore bien plus importants.

Si c'est un phénomène qui existe depuis toujours, la sécheresse semble se renforcer depuis quelques décennies sous l'effet du réchauffement climatique. Tous les territoires n'ont pas la même exposition à la sécheresse, et le réchauffement climatique n'affecte pas les différentes régions avec la même intensité.

La France pourrait bien être en première ligne face à la progression de la sécheresse. Dans son rapport publié à l'occasion de la COP15 contre la désertification, la CNULCD (2022) alerte sur les conséquences d'un réchauffement global de 3°C d'ici 2100 (ce qui correspond à un scénario intermédiaire). Sous cette hypothèse, les pertes à l'échelle mondiale liées à la sécheresse pourraient être 5 fois supérieures à aujourd'hui. Le bassin méditerranéen et la façade Atlantique de l'Europe seraient alors les régions dont la situation se détériorerait le plus.

La sécheresse est donc un phénomène naturel aux conséquences néfastes, et la question de sa qualification en catastrophe naturelle se pose donc.

1.1 La sécheresse comme catastrophe naturelle

Selon le Code des Assurances (*art. L125-1*), les effets des catastrophes naturelles sont « les dommages matériels directs non assurables ayant eu pour cause déterminante l'intensité anormale d'un agent naturel, lorsque les mesures habituelles à prendre pour prévenir ces dommages n'ont pu empêcher leur survenance ou n'ont pu être prises ». De ce point de vue, une sécheresse extrême est bien une catastrophe naturelle, puisqu'elle paraît irrépressible. Le terme de catastrophe naturelle revêt en France une importance capitale en matière d'assurance. En effet, au titre de la solidarité nationale, un régime spécifique existe quant aux catastrophes naturelles, appelé régime Cat Nat.

1.1.1 L'assurance des catastrophes naturelles

L'assurance catastrophe naturelle est une assurance de biens. Elle intervient lorsque le sinistre est causé par une catastrophe naturelle, au sens du paragraphe précédent. Il doit au préalable y avoir la déclaration d'un arrêté de catastrophe naturelle dans le Journal Officiel. Celui-ci précise les communes, la période, les périls et les dommages concernés. Pour qu'une commune soit reconnue en état de catastrophe naturelle, il faut que le maire en fasse la demande en amont.

En France, les événements en question sont principalement les inondations, les mouvements de terrain, les chocs liés aux vagues et la sécheresse. Tous les phénomènes naturels ne rentrent pas dans ce cadre. Les tempêtes, chutes de grêle ou de neige ne sont pas éligibles à la reconnaissance en état de

catastrophe naturelle.

L'assurance catastrophe naturelle n'est pas obligatoire, elle n'apparaît donc pas systématiquement dans tous les contrats. Toutefois, c'est une extension obligatoire dans les assurances dommages (sauf pour les bateaux). Sans contrat d'assurance couvrant la catastrophe naturelle, il n'y a pas d'indemnisation *a priori*. L'assurance « Cat Nat » est répandue, grâce à sa présence dans les contrats MRH ou tous risques en automobile.

La jouissance de cette garantie impose le paiement d'une surprime uniforme sur le territoire, et dont le montant (exprimé comme un pourcentage de la prime de départ) est fixé par le gouvernement. Elle s'élève à 12% (contre 6 puis 9% auparavant) de la prime dommages en règle générale, et tombe à 6% des primes vol et incendie pour les véhicules terrestres à moteur.

Le régime Cat Nat ne fait donc pas de discrimination entre les individus, pourtant ceux-ci n'ont clairement pas la même exposition aux catastrophes naturelles. Ce dispositif repose donc sur la solidarité nationale.

Légalement, un assureur ne peut refuser la souscription à la garantie catastrophe naturelle. Celle-ci prend alors une forme classique avec franchise et limite. Le plafond de garantie est contractuel, alors que la franchise est réglementaire. Pour les biens personnels, cette dernière s'élève à :

- 380 € pour les habitations ou tout autre bien à usage non professionnel ;
- 1 520 € si le dommage est imputable à un mouvement de terrain consécutif à la sécheresse ou à une réhydratation du sol.

Ces montants sont donc à charge de l'assuré et définis en annexe de l'article A125-1 du Code des Assurances. Cette franchise de base peut être multipliée jusqu'à 4 en fonction du nombre de constatations de catastrophe naturelle pour le même risque sur la commune au cours des 5 dernières années, dans le cas de l'absence de plan de prévention du risque concerné.

Le versement de prestations pour l'assurance catastrophe naturelle peut-être partagé entre l'assureur et un réassureur. La Caisse Centrale de Réassurance (détenue par l'État français) est ainsi habilitée à délivrer une couverture illimitée à l'assureur, l'État faisant office de garant en cas de défaillance de la CCR. Bénéficiant de cet appui important, la CCR détient une grande partie du marché de la réassurance du risque catastrophe naturelle. Son offre unique se décompose en deux sous-traités indissociables : un quote-part à hauteur de 44% et un stop-loss à 200% de la surprime Cat Nat.

Le quote-part est une réassurance proportionnelle, à un paramètre $\theta \in]0, 1[$. De façon simplifiée, le réassureur accepte de payer une part θ du total des sinistres, et perçoit à ce titre la même part θ des primes versées par les assurés. Le stop-loss, ou excédent de pertes, est au contraire un traité non proportionnel. Le paramètre du traité correspond alors à la charge annuelle de sinistres supportable pour l'assureur. Si le total des indemnisations dans l'année dépasse le seuil déterminé par le stop-loss, l'intégralité de l'excédent est à la charge du réassureur.

Un découpage est effectué dans les 56% cédés dans le quote-part, 44% sont effectivement pris en charge par la CCR, et les 12% restants par le Fonds de Prévention des Risques Naturels Majeurs (FPRNM), également appelé Fonds Barnier. En pour de sa garantie à la CCR, l'État français est rémunéré par le biais de dividendes.

Toujours pour se prémunir face à la volatilité de la sinistralité Cat Nat, la CCR et les assureurs peuvent utiliser le mécanisme de provision pour égalisation afin de lisser les résultats. Ces organismes

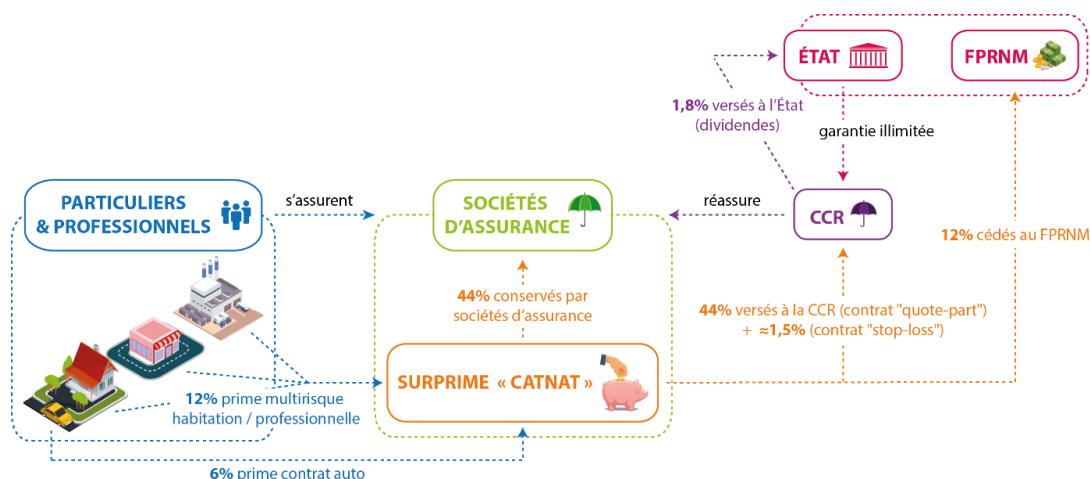


FIGURE 1.2 : Régime Cat Nat schématisé, CAZAUX et al. (2018)

peuvent alors provisionner jusqu'à 75% des bénéfices de chaque exercice, dans la limite de 300% du total des primes encaissées. La partie du résultat qui est affectée à cette provision n'entre dans le calcul de l'impôt sur les sociétés.

Depuis la création de ce régime en 1982, l'État a dû intervenir une fois : en 1999 suite aux passages des tempêtes Lothar et Martin. Précisons que si le péril tempête n'est pas reconnu par le régime Cat Nat, les victimes d'inondations ou de glissements de terrain lors du passage d'une tempête sont prises en charge. Les tempêtes de 1999 ont ainsi eu un impact massif sur le régime Cat Nat.

La sécheresse n'est concernée par l'assurance catastrophes naturelles que lorsqu'elle implique des tassements différentiels sur des sols argileux, et donc le manque de précipitations comme la sécheresse agricole ne peuvent justifier un arrêté de catastrophe naturelle. Ce péril bien spécifique est présenté dans la section ci-après.

1.1.2 Le retrait-gonflement des sols argileux

Une des conséquences de la sécheresse des sols est le phénomène dit RGA : retrait-gonflement des sols argileux. Les sols se composent de sable, d'argile ou de limons, ou de plusieurs de ces sédiments en même temps. Ce qui distingue ces types de sols est leur granulométrie. Selon l'échelle de Wentworth, le sable se compose de toutes les particules entre 1/16e de millimètre et 2 millimètres. Les limons sont plus fins, entre 1/256e et 1/16e de millimètre, alors que les argiles regroupent tout ce qui est encore plus petit.

Les argiles ont naturellement une structure en feuillets, et de l'eau peut se loger entre ces derniers. Les argiles augmentent alors en volume ; le sol argileux gonfle. À l'inverse, les argiles se rétractent lorsqu'elles s'assèchent ; le sol s'affaisse (subsidence).

Ce processus peut être aggravé lorsque la circulation de l'eau dans le sol est perturbée, par la sécheresse ou des activités humaines (pompage, fuites d'eau...). La France est concernée par ce péril, également qualifié de **sécheresse géotechnique**, avec une trentaine de départements ayant majoritairement des sols argileux. La variété dans la composition minéralogique des argiles rend des régions plus ou moins sensibles au phénomène RGA, de même que les différences de climat. Les terrains les plus exposés sont ceux qui reposent sur des argiles dites gonflantes.

Le retrait-gonflement des sols argileux correspond à des mouvements de terrains lents, certes inoffensifs d'un point de vue santé, mais qui peuvent affecter gravement les bâtiments. Dans un cycle saisonnier normal, les variations de teneur en eau du sol n'affectent ce dernier que sur sa partie la plus superficielle, sur moins d'un mètre de profondeur. Mais lorsque des épisodes de sécheresse plus prononcés interviennent, le déficit hydrique du sol peut se sentir à 2 voire 4 mètres de profondeur. Ces mouvements ne sont pas uniformes sous les bâtiments qui font écran à l'évaporation. Des fissurations sont observées à la suite de tassements différentiels si la structure et les fondations ne sont pas assez solides. Lorsqu'elles affectent des éléments porteurs, tout le bâti est mis en danger.

Le péril RGA rentre dans le périmètre du régime Cat Nat évoqué précédemment (cf. 1.1.1) en tant que mouvements de terrain différentiels consécutifs à la sécheresse et à la réhydratation des sols. Toutes les autres conséquences de la sécheresse ne peuvent donner lieu à une indemnisation par la garantie Cat Nat.

Les sols se rétractent sous l'effet de la sécheresse, et s'expandent lorsqu'ils sont hydratés. L'amplitude du changement de volume des sols argileux dépend donc de la variation d'humidité des sols, et non de la sécheresse en elle-même. Cependant, il y a une limite au gonflement des sols qui est la saturation de ces derniers. À un certain niveau, les argiles ont absorbé le maximum d'eau et le sol ne peut gonfler davantage. Or, la saturation des sols est très fréquente en France puisqu'il s'agit d'un pays à climat tempéré (les sols sont donc normalement imbibés). C'est pourquoi la sécheresse est considérée comme le déterminant majeur du péril RGA. En effet, si l'on considère que les sols reviennent régulièrement à saturation (ou à un niveau proche), l'amplitude de l'humidité des sols est déterminée par son minimum, c'est-à-dire par l'importance d'une sécheresse. La réhydratation des sols accentue alors les dommages, mais n'en est pas à l'origine.

La synthèse de l'étude menée par la FFA (2015) donne un aperçu de ce que représente le phénomène RGA actuellement et ses potentielles évolutions dans les prochaines années. Entre 1988 et 2013, ce sont 598 000 sinistres de ce type qui ont bénéficié d'une indemnisation totale de 7,6 Mds €. Cela donne un coût moyen de 12 700 € par sinistre, supérieur à celui des inondations (11 400 €) et bien au-dessus du coût moyen des TGN (Tempête-Grêle-Neige) qui s'élève à 2 600 €. Par ailleurs, alors que les sinistres TGN ou inondations sont nettement plus coûteux quand ils concernent des professionnels, les sinistres RGA eux n'impliquent que des particuliers pour le moment. Le sinistre le plus important de ce type est historiquement l'épisode de sécheresse de 2003, où le coût cumulé des sinistres RGA en France métropolitaine a dépassé deux milliards d'euros.

Impact du réchauffement climatique sur la sécheresse géotechnique, tensions du marché des « Cat Nat »

En s'appuyant toujours sur le document de la Fédération Française des Assureurs, on peut mesurer à quel point le retrait-gonflement des sols argileux est dépendant du réchauffement climatique. Selon les deux modèles climatiques utilisés pour la projection jusqu'en 2040, la période de retour d'un épisode extrême comme celui de 2003 passerait de 20 ans sur la période 1988-2013 à entre 10 et 12 ans dans les projections.

Les effets du dérèglement climatique se font déjà sentir, les années 2018 à 2020 marquent l'enchaînement de 3 épisodes graves de sécheresse, le premier et le dernier dépassant la barre du milliard d'euros de dégâts. La FFA table sur une augmentation de 8 Mds € de la sinistralité RGA entre 2014 et 2039 imputable au seul changement climatique (+13 Mds € au total), contre 5 Mds € pour les inondations, submersions marines et TGN réunis. Le retrait-gonflement des sols argileux, et plus largement la sécheresse, sont donc évidemment des points d'attention quant aux évolutions futures du climat. Le

phénomène est ainsi déjà dans une phase ascendante ; une étude plus récente de COVÉA (2022) évalue le coût cumulé de la sécheresse géotechnique à plus de 15 Mds € sur la période 1989-2020, à comparer aux 7,6 Mds € cités précédemment pour la période 1988-2013.

D'autres périls comme les submersions marines, la grêle, les ouragans sont amenés à progresser rapidement dans les prochaines décennies selon les experts. Le risque Cat Nat dans sa globalité devient un épouvantail pour les assureurs, et pose des questions d'assurabilité. En effet, l'assurance doit se baser sur l'incertain et aujourd'hui des événements climatiques de grandes envergures semblent se répéter (Californie, Floride, Australie...). Cela entraîne une hausse non soutenable des primes, qui amène alors à considérer le risque comme non assurable. L'ACPR (2021), dans son exercice pilote climatique prédit ainsi une augmentation des primes entre 130 et 200% entre 2020 et 2050 pour couvrir des pertes multipliées par 2 à 5 selon les départements.

Face à cette situation, le réassureur bermudien Axis s'est retiré du marché des catastrophes naturelles alors qu'il en était un acteur mondial, justifiant que le changement climatique met en danger sa pérennité.

Inégalités territoriales dans l'exposition au risque RGA

Les conséquences du retrait-gonflement des sols argileux en France sont très inégalement réparties sur le territoire. Le Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM) a ainsi édité une carte (figure 1.4) pour illustrer le niveau d'exposition au phénomène selon 3 niveaux : faible, moyen et fort. On distingue également les zones *a priori* non argileuses. L'exposition dépend ici de deux facteurs : la susceptibilité et la sinistralité.

La susceptibilité illustre la propension du sol à se déformer. Pour cela sont étudiés la lithologie des sols (présence d'argiles, épaisseur, continuité des couches), la minéralogie des argiles (certains minéraux sont plus sensibles à l'hydratation) et enfin les propriétés mécaniques du sol. La susceptibilité peut donc être vue ici comme l'exposition des sols au phénomène RGA.

La répartition géographique de la population étant loin d'être uniforme, la sinistralité vient surpondérer le risque dans les régions plus habitées. Puisque deux phénomènes de la même ampleur peuvent engendrer deux nombres de sinistres sécheresses bien différents selon qu'ils arrivent dans des zones faiblement ou fortement urbanisées, la sinistralité s'appuie sur la concentration des sinistres. Le classement en sinistralité faible correspond à une densité de sinistre au kilomètre carré inférieure à 2. Si celle-ci dépasse 10, une sinistralité forte sera considérée, et une sinistralité moyenne entre ces deux valeurs. Pour créer cet indicateur, le BRGM s'appuie sur une base de données de la Mission Risques Naturels comportant environ 180 000 sinistres sécheresse survenus entre 1989 et 2017 qui ont donné lieu à des indemnisations *via* le régime Cat Nat.

L'exposition est facilement déduite du couple susceptibilité/sinistralité selon le schéma donné ci-dessous par la figure 1.3. 9% des sinistres sont recensés hors zones argileuses, ce qui témoigne des imprécisions de la cartographie. Un tampon de 100 mètres a donc été appliqué autour de chaque formation argileuse. Cela signifie que les régions argileuses ont toutes été artificiellement étendues de 100 mètres dans toutes les directions.

Les sinistres étant toujours hors des zones argileuses ont alors été rattachés à chaque fois à la zone la plus proche, tampon compris. Ces sinistres sont bien le fait du retrait-gonflement des sols argileux, la précision de la susceptibilité donnée par le BRGM ne peut simplement pas être réalisée à une maille assez fine. En effet, elle se base sur des cartes géologiques de France à l'échelle 1/50000, et les zones argileuses très limitées par la taille peuvent ainsi être omises bien qu'elles puissent causer des sinistres

localisés. La méthode du tampon a permis de rattacher 5% des sinistres dans des régions non argileuses *a priori* à des zones d'exposition moyenne ou forte, ces dernières concentrant une très grande majorité des sinistres (93%).

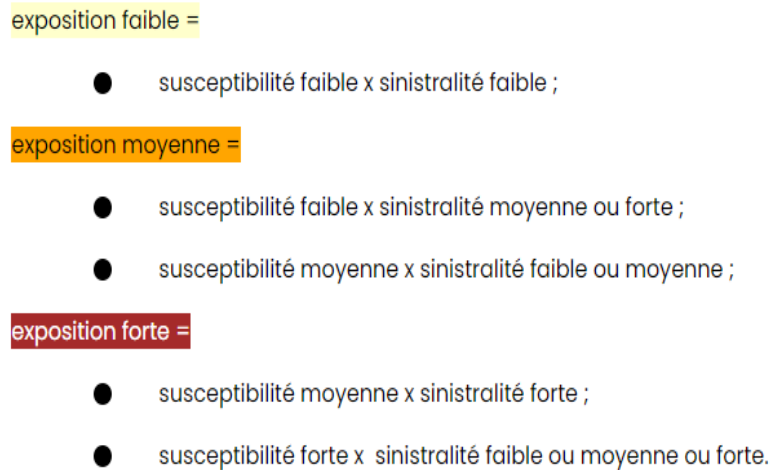


FIGURE 1.3 : Exposition d'un territoire au risque RGA en fonction de la susceptibilité et de la sinistralité. Source : [Géorisques](http://georisques.gouv.fr).

Calcul de la superficie totale pour chaque niveau d'exposition

Le portail georisques.gouv.fr donne accès librement aux données d'exposition des territoires au risque RGA par un fichier de données géographiques de type *shapefile*. Ce format de données est utilisé pour les systèmes d'informations géographiques, et permet de produire facilement des cartographies.

La base nationale a ainsi pu être téléchargée, et compte plus de 100 000 polygones géocodés, chacun désignant un territoire où l'exposition a été classée dans l'une des trois classes de risque pour les sols argileux. Les zones *a priori* non argileuses ne figurent donc pas dans ces données.

Ces données ont été exploitées avec un programme développé sur Python, et agrégées par niveau de risque. Il reste ainsi trois objets de classe *Multipolygon*, chacun correspondant à toutes les zones recensées pour l'un des trois niveaux de risque.

L'aire peut ensuite être calculée pour ces trois objets complexes, puis comparée à la superficie de la France métropolitaine. Différents chiffres existent pour la superficie française, mais nous considérerons la surface géodésique donnée par l'IGN : 551 695 km². Les résultats suivant sont ainsi obtenus :

- 129 545 km² sont en aléa faible, soit 23,5% de l'Hexagone ;
- 192 504 km² sont dans la zone d'exposition moyenne, soit 34,9% du territoire ;
- 73 519 km² sont estimés à risque fort, correspondant à 13,3% de la France métropolitaine ;
- 156 127 km² ne sont rattachés à aucune des zones ci-dessus et forment donc les zones non argileuses *a priori*. Elles couvrent alors un peu plus de 28% du territoire.

*URL : <https://www.georisques.gouv.fr/donnees/bases-de-donnees/retrait-gonflement-des-argiles>

Le territoire métropolitain est donc réellement exposé au risque RGA avec presque la moitié de sa surface en niveau d'aléa moyen ou fort. Cette moitié compte pour 93% des sinistres recensés. Les zones d'exposition moyenne ou forte forment notamment un arc, également appelé croissant argileux, qui partirait du nord-est de la France et rejoindrait la région PACA en passant par la façade Atlantique. La carte construite à partir de l'exposition au retrait-gonflement des sols argileux, disponible sur le portail Géorisques^{*}, est illustrée par la figure 1.4.

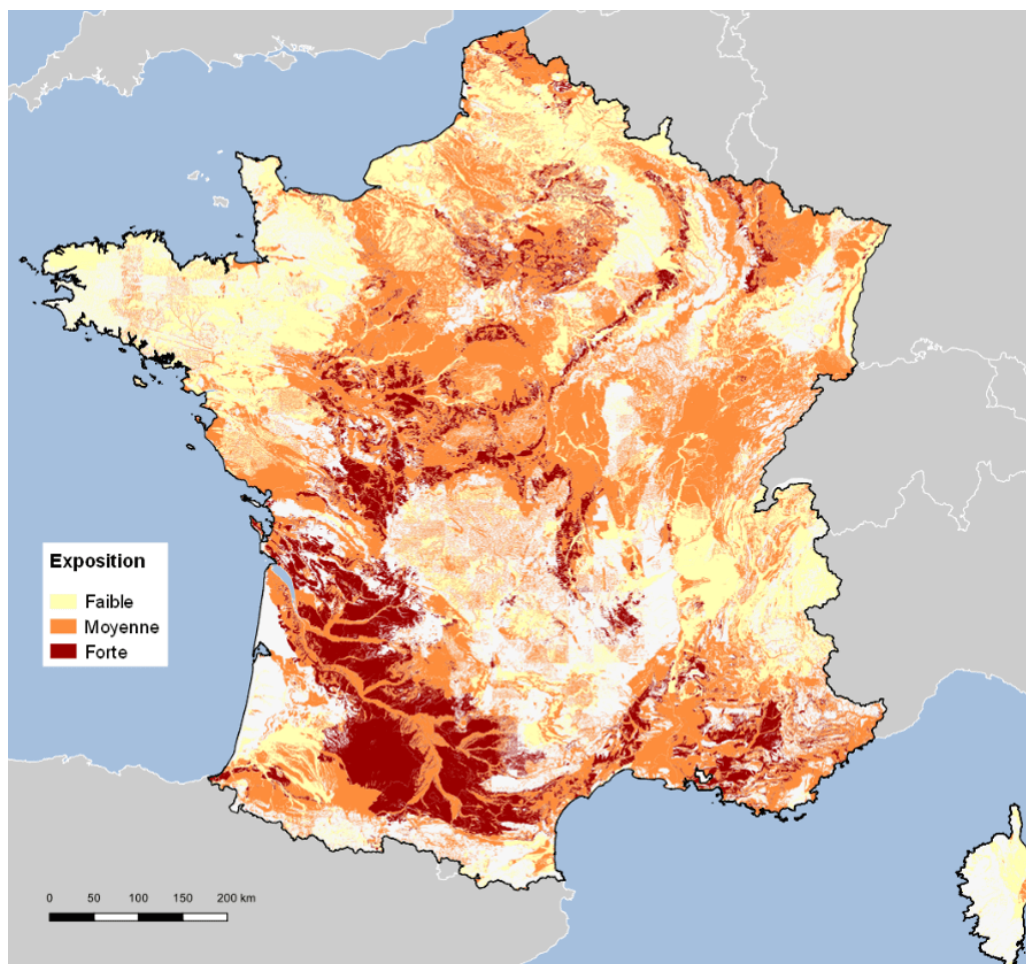


FIGURE 1.4 : Cartographie de l'exposition au risque RGA en France métropolitaine. Source : Géorisques.

Le livre blanc de COVÉA (2022) comporte des projections de la sécheresse géotechnique dans le scénario pessimiste du GIEC (RCP8.5, présenté en 2.1.1). Covéa prédit une hausse de la fréquence d'éligibilité Cat Nat de l'ordre de 70% à horizon 2050. Cette évolution serait particulièrement marquée sur le « croissant argileux », la zone déjà la plus touchée. Ce n'est pas l'existence de fortes disparités spatiales qui pose au fond problème, le régime Cat Nat étant fondamentalement basé sur la mutualisation solidaire, mais plutôt l'augmentation du coût de l'assurance de la sécheresse géotechnique.

*URL : <https://www.georisques.gouv.fr/articles-risques/retrait-gonflement-des-argiles/exposition-du-territoire-au-phenomene>

La reconnaissance en état de catastrophe naturelle pour sécheresse

Les éléments nécessaires à la reconnaissance de l'état de catastrophe naturelle pour sécheresse ont été modifiés 8 fois depuis 1989. Depuis la dernière réforme (2019), 2 critères sont requis pour accepter la demande faite par une commune sinistrée.

Le premier critère, géotechnique, mis en œuvre depuis 1989, nécessite une proportion de sols argileux d'au moins 3% (tous niveaux d'exposition confondus) sur la municipalité selon la cartographie du BRGM.

Le second, météorologique, se base sur l'indice d'humidité des sols SWI (présenté en [1.3.1](#)) et une période de retour minimale. Compte tenu de la difficulté pour obtenir cette valeur, qui nécessite des équipements pointus qu'il faudrait répartir sur tout le territoire, le SWI n'est pas observé localement mais simulé par l'établissement public Météo-France avec le modèle hydro-météorologique Safran-Isba-Modcou (SIM). L'indice est modélisé numériquement au pas de temps journalier sur une grille avec une résolution de 8 kilomètres.

Le processus de construction du critère météorologique à partir du SWI est détaillé en [3.3.1](#). En bref, l'indice retenu est mensuel et correspond à la moyenne des trois dernières moyennes mensuelles du SWI journalier. Le critère météorologique est vérifié si cet indice est anormalement bas (synonyme de sécheresse), et avec une période de retour d'au moins 25 ans.

Une commune classée de cette manière en état de catastrophe naturelle pour un mois le sera systématiquement de façon prolongée sur 3 mois, les sécheresses étant déclarées par saison, avec la classification suivante :

- hiver = janvier-février-mars ;
- printemps = avril-mai-juin ;
- été = juillet-août-septembre ;
- automne = octobre-novembre-décembre.

Un épisode de sécheresse exceptionnel, au sens du régime Cat Nat, au mois de juillet permettra ainsi l'indemnisation de sinistres RGA survenus entre juillet et septembre.

Les arrêtés de catastrophe naturelle sont à l'échelle de la commune pour tous les types de risque. Or, l'indice de sécheresse qui sert au critère météorologique est calculé à une résolution bien différente, selon la grille Safran. 8 981 points terrestres découpent la France en mailles carrées de 8 kilomètres de côté. Cette précision est limitée comparée aux presque 35 000 communes du territoire. Chaque commune est traversée par une, ou plusieurs des mailles. Il suffit que le critère soit vérifié sur l'un des points de simulation pour qu'il le soit finalement sur l'intégralité de la commune.

Le fait de déclencher l'état de catastrophe naturelle au niveau de la commune pose cependant question. Entre 2013 et 2021, une demande sur deux n'a pas abouti sur une reconnaissance en état de catastrophe naturelle. Le découpage administratif ne reflétant pas la nature des sols, des voisins ayant la même exposition au risque retrait-gonflement des sols peuvent ne pas subir le même sort s'ils sont de part et d'autre d'une limite communale.

Par ailleurs, certaines habitations peuvent être localement très touchées sans que l'indemnisation soit possible si la sécheresse n'est pas exceptionnelle à hauteur de la commune. En 2015, la sécheresse en Moselle a ainsi donné lieu à des indemnisations sur 4 communes des 104 demanderesse. Alors que

certaines municipalités sont touchées par des dizaines de cas et essuient un refus, une des communes en état de catastrophe naturelle ne présente elle qu'une habitation touchée.

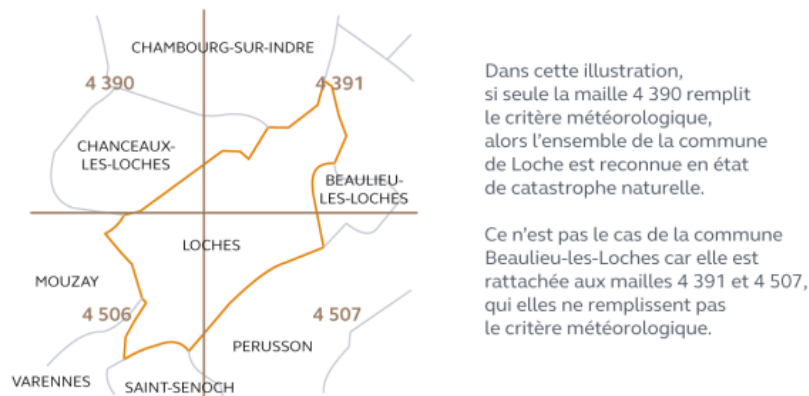


FIGURE 1.5 : Illustration de l'utilisation de la maille dans la reconnaissance en état de sécheresse d'une commune. Source : COUR DES COMPTES (2022).

Ce mécanisme complexe entraîne l'incompréhension des particuliers, voire un sentiment d'injustice devant ce qui devrait être un outil de solidarité nationale. Cette faille dans l'aspect social du système Cat Nat, associée à une augmentation de la sinistralité sécheresse à prévoir avec le réchauffement climatique, et de fortes disparités spatiales inhérentes à la nature des sols amènent à envisager une réforme.

Perspectives d'évolution du régime Cat Nat pour le péril RGA

Le volet RGA du régime Cat Nat pourrait ainsi grandement évoluer. C'est le souhait de la COUR DES COMPTES (2022) dans son rapport sur la question. Elle souligne entre autres le manque de prévention pour un phénomène bien connu, considérant la loi *Évolution du logement, de l'aménagement et du numérique* (ELAN) de 2018 comme la première politique efficace dans ce domaine. Elle prévoit en effet que le vendeur d'un terrain constructible fournisse à l'acheteur une étude géotechnique. En cas d'exposition (moyenne ou forte) au risque RGA, afin de résister aux déformations du sol, le dispositif ELAN requiert pour chaque construction :

- l'imperméabilisation des sols autour de celle-ci et l'utilisation d'écrans antiracines si elle ne peut être assez distante d'arbres ;
- des fondations plus profondes ;
- la rigidification de sa structure.

La Cour des Comptes recommande donc de mettre en place un dispositif de contrôle et sanctions pour veiller à la bonne application de cette loi, ou encore d'accélérer la R&D pour prévenir au mieux les sinistres RGA dans le futur.

D'autres solutions existent déjà, comme l'injection de résine expansive sous les fondations, ou des micropieux pour les renforcer. Le coût de cette opération pourrait cependant être très élevé : dans une proposition de loi visant à réformer le régime d'indemnisation des catastrophes naturelles*, le Sénat

*URL : <http://www.senat.fr/rap/a21-045/a21-0454.html>

évoque le chiffre de 285 milliards d'euros pour équiper de micropieux les 3,8 millions de maisons en aléa RGA fort.

La Cour des Comptes invite enfin à une réflexion sur la qualification même de catastrophe naturelle du phénomène de retrait-gonflement des sols argileux.

Des mesures préventives accrues doivent venir en réponse à l'intensification du phénomène RGA sous l'impact du réchauffement climatique. Elles permettraient de maintenir à flot un régime actuellement sous tension. L'habitat devra de toute façon se montrer plus résilient devant l'aléa sécheresse.

1.2 Sécheresse agricole et assurance

Si la sécheresse des sols peut fragiliser les bâtiments, elle entraîne également le dessèchement des végétaux, en particulier les cultures. L'utilisation de l'eau est limitée lors des épisodes de sécheresse, avec un plan en 4 niveaux (vigilance, alerte, alerte renforcée et crise). Ce dispositif est appliqué par le biais d'arrêtés préfectoraux. Lors d'épisodes de sécheresse sévères, au moment où les cultures manquent le plus d'eau, des restrictions peuvent limiter (alerte) voire interdire (crise) l'usage d'eau pour l'irrigation. Toutefois, la part des cultures irriguées en France est très faible, autour de 5%.

En 2018, la sécheresse liée à la canicule en Europe a provoqué une baisse de la production céréalière de 8% par rapport à la moyenne des cinq années précédentes. Le réchauffement climatique rend ces épisodes plus récurrents. Ceux-ci sont également disproportionnellement plus graves. Les pertes de récoltes liées aux sécheresses en Europe ont ainsi explosé, passant de 2,2% entre 1964 et 1990 à 7,3% sur la période 1991-2015 selon BIANCHI (2021). Même si le rendement des cultures s'est considérablement amélioré entre ces deux périodes, autour de +150%, la sécheresse a gagné du terrain sur les exploitations à un rythme encore plus accru.

Les observations les plus récentes ne vont pas contredire cette tendance haussière, puisque la France a connu un épisode majeur de sécheresse en 2022. Les pertes pour les agriculteurs montent alors jusqu'à 50% selon CADOUX (2022). La répétition et l'accentuation de ces sécheresses pourrait entraîner une désorganisation radicale de toute l'économie par le biais des cultures.

Les agriculteurs sont face à un risque important, et peuvent donc naturellement vouloir s'assurer face aux pertes de récoltes liées à la sécheresse. Contrairement au retrait-gonflement des sols argileux, les exploitants ne peuvent s'appuyer sur le régime Cat Nat pour la sécheresse agricole. Ils se reportent sur l'assurance classique des pertes de récoltes, ou sur le régime des calamités agricoles. L'assurance indiciaire peut également être intéressante.

Les calamités agricoles

Le dispositif des calamités agricoles ressemble sur le fond au régime Cat Nat. L'idée est à nouveau d'indemniser les dommages liés à un événement climatique, cette fois n'importe lequel, en s'appuyant sur la solidarité nationale. Sont donc pris en charge les sinistres liés à la grêle, au gel, au manque de rayonnement solaire, à la sécheresse, aux inondations, *etc.*

À la manière d'une catastrophe naturelle, le caractère de calamité agricole est reconnu par arrêté, ici émanant du ministre chargé de l'agriculture. Pour que ce soit le cas, deux critères restrictifs doivent être remplis, pour un type de culture précis :

- au moins 30%* de la production annuelle perdus par rapport au rendement théorique ;
- un montant de dommages d'au moins 13% par rapport au produit brut de l'exploitation aides comprises.

Cette dernière condition impose que la culture concernée soit importante dans l'activité de l'exploitation, ce qui est inadapté pour les polycultures.

Ce régime est fondé sur une approche forfaitaire, l'estimation des pertes se fait à l'aide de barèmes établis par département. Ces références, construites à partir de moyennes olympiques, contiennent rendements et prix, ainsi que des éléments relatifs aux moyens de production. L'indemnisation d'un agriculteur ne reflète donc pas exactement la perte à l'échelle individuelle. La moyenne olympique est construite comme la moyenne des rendements sur les cinq dernières années après avoir retiré les deux valeurs extrêmes (meilleure et pire années), voir formule 1.1.

Ce régime ne couvre pas les risques assurables, et exclut donc la vigne et les grandes cultures. Toutefois, il a une certaine ambivalence puisque des cultures assurables peuvent rentrer dans le dispositif. C'est le cas par exemple des prairies, prises en charge par les calamités agricoles si elles ne font pas l'objet d'une assurance récolte. Le sinistre est alors généralement mieux indemnisé en calamité agricole que par l'assurance multirisques climatiques, cette dernière se basant sur des pertes d'exploitation qu'elle tend à minimiser.

Pour qu'un arrêté ministériel soit publié, lançant ainsi les indemnisations au titre de calamité agricole, le Comité National de Gestion des Risques en Agriculture (CNGRA) doit émettre son avis après le passage d'une commission d'enquête pour estimer les pertes. La mise en œuvre du fond est assez lourde, et les indemnisations tardent donc à être perçues par les agriculteurs sinistrés, jusqu'à 18 mois après le sinistre.

Le dispositif est financé par le Fonds National de Gestion des Risques en Agriculture (FNGRA), alimenté d'une contribution additionnelle des primes d'assurance et d'une subvention de l'État. Suite à la sécheresse de 2003, le budget des calamités agricoles a explosé, avec une multiplication d'un facteur 4 d'après LEROUX (2022). L'État, qui couvrait alors seul le risque climatique auprès des agriculteurs, organise le déploiement d'une industrie privée de l'assurance en 2005 pour l'assister dans cette tâche. C'est la naissance de l'assurance multirisques climatiques, également appelée assurance récolte.

À la différence de l'assurance récolte, le régime des calamités agricoles ne nécessite pas de s'acquitter d'une lourde prime d'assurance. Ces dernières années, le fonds s'est régulièrement retrouvé en manque de ressources face aux aléas, puisant dans ses réserves. Il est ainsi passé de 384 M € en 2015 à 118 M € en 2017, soit une diminution de quasiment 70%.

L'assurance récolte

L'assurance multirisques climatiques (MRC) ou assurance récolte, porte sur la sécheresse agricole au même titre que tous les autres aléas climatiques, tout comme le régime des calamités agricoles. La principale différence est que l'assurance récolte fonctionne dans un cadre privé, avec des assureurs, là où le dispositif des calamités agricoles est public. La mutualisation n'est donc plus faite à l'échelle nationale entre tous les exploitants. Elle est opérée par l'assureur entre les assurés de son portefeuille.

*Ce seuil passe à 42% en présence d'une aide PAC couplée. La Politique Agricole Commune est menée par l'Union Européenne. Ses aides couplées visent à soutenir des secteurs de l'agriculture en difficulté économique et orientent ainsi la production.

Le ministère de l'agriculture intervient cependant dans la construction des contrats d'assurance récolte en définissant trois niveaux possibles (depuis 2016) :

- Le premier, dénommé contrat socle, est subventionné à 65% par la Politique Agricole Commune (PAC), donc par l'Union Européenne. Il se déclenche à partir de 30% de pertes et dispose d'une franchise au même niveau.
- Le second niveau offre des garanties complémentaires et abaisse la franchise du contrat à 25%, mais est moins bien subventionné (45%).
- Enfin des garanties supplémentaires (rachat de franchise et/ou de seuil...) peuvent être souscrites au dernier niveau, mais celui-ci ne bénéficie pas de subventions européennes.

À chaque fois l'indemnisation correspond au capital assuré (allégé de la franchise). Ce montant est calculé comme le produit de la surface assurée, d'un rendement et d'un prix de référence. L'assurance multirisques climatiques peut s'appliquer aux grandes cultures, à l'arboriculture, à la viticulture et aux prairies (des productions alors qualifiées d'assurables).

Ces contrats sont souscrits par bloc, un bloc représentant un type de culture. Il faut alors que la totalité de la production soit assurée, ou au moins 70% de la superficie pour les grandes cultures. Il est cependant possible d'établir des contrats à l'échelle de l'exploitation. Le contrat couvre alors plusieurs cultures pour une superficie minimum de 80% de la sole assurable. Dans ce cas, la franchise tombe à 20% sur les deux premiers niveaux de contrats.

Certaines exclusions sont prévues dans les contrats MRC classiques, par exemple les pertes liées à des décisions administratives, même si celles-ci sont liées à des événements climatiques. Les pertes faisant suite à une interdiction d'irriguer lors d'un épisode de sécheresse ne sont donc pas indemnisées par le biais de l'assurance récolte. La perte de qualité des récoltes est également hors du périmètre de l'assurance multirisques climatique en général.

Pour établir les pertes de récolte, il faut déjà savoir quel est le rendement de référence. Le rendement de base est généralement calculé selon la moyenne olympique des 5 dernières années que nous notons $\bar{X}^{Oly.}$. Pour une année N et une production X_N , la perte de récolte sera exprimée à l'aide de la formule **1.1**, avec $(X_{(1)}, \dots, X_{(5)})$ la statistique d'ordre des rendements des années passées $(X_{N-1}, \dots, X_{N-5})$.

$$\begin{cases} \text{Perte}_N &= (\frac{X_N}{\bar{X}^{Oly.}} - 1)_- , \\ \bar{X}^{Oly.} &= \frac{X_{(2)} + X_{(3)} + X_{(4)}}{3} . \end{cases} \quad (1.1)$$

La partie négative $(.)_-$ est utilisée dans la définition de la perte pour que la perte soit positive d'une part et d'autre part qu'un excès de rendement par rapport à la norme (une bonne année) donne une perte nulle. Elle est définie comme : $(x)_- = \max(-x, 0)$.

Une option alternative à la moyenne olympique est possible avec la moyenne triennale glissante, le rendement de base est alors calculé comme celui obtenu en moyenne sur les 3 années précédentes.

L'assurance MRC peut couvrir les cultures exclues du dispositif des calamités agricoles (précisément puisque ces dernières sont assurables). Certaines cultures sont éligibles aux deux dispositifs, il n'est alors pas intéressant en règle générale de faire jouer l'assurance MRC puisqu'elle indemnise souvent moins bien. Ceci explique que l'assurance MRC soit très peu répandue sur certaines cultures. En 2019, le taux de diffusion de l'assurance récolte était ainsi de 3,0% pour les arboricultures et 1,2% pour les prairies. En comparaison, les plantes industrielles étaient couvertes pour 39,7% selon la CCR **(2020)**.

Hors prairies, le taux de couverture en 2019 était de 29,7%. Cette diffusion progresse, mais à petit rythme pour atteindre 31,4% en 2020 selon le MINISTÈRE DE L'AGRICULTURE (2022).

Ce n'est pas suffisant pour assurer l'équilibre financier du dispositif d'après KIRSCH (2020). En effet, l'assurance se base sur la mutualisation des risques, un portefeuille trop restreint met donc en danger le système tout entier, qui plus est avec des risques pouvant impacter simultanément de nombreux assurés (avec par exemple une sécheresse généralisée).

Le nombre trop faible d'assurés met aussi en lumière le phénomène d'anti-sélection : les agriculteurs qui s'assurent sont plutôt ceux soumis à des gros risques, les autres préfèrent s'autoassurer. Les assureurs doivent tenir compte de ce phénomène pour ne pas sous-tarifier le produit. Les primes élevées sont alors assez dissuasives pour les exploitants moins risqués, qui peuvent préférer assumer seuls le risque.

Dans ce cadre de l'autoassurance, l'agriculteur assume lui-même son risque. Il peut recourir à un système d'épargne ou à la diversification pour se prémunir des fortes pertes. Une possibilité est ainsi d'augmenter le nombre de cultures à surface équivalente, les différentes plantes n'ayant pas la même exposition aux aléas climatiques. Pour faire face à la volatilité des prix sur le marché, l'agriculteur peut décider d'étirer ses périodes de vente. Ces actions permettent d'atténuer son risque sans recourir à un assureur.

Selon différents experts, il faudrait une couverture de 65% pour atteindre l'équilibre financier. À titre d'exemple, l'assureur Groupama, en tête sur le marché agricole français, est en déficit au global depuis 2005 avec son offre MRC. Le S/P a même atteint 231% en 2016 [CARPON (2022)]. En 2021, la compagnie a essuyé une perte sèche de 200 M € en indemnisant les sinistrés, notamment à cause d'un épisode de gel tardif faisant suite à une période de redoux précoce. Plus de 80% des assurés faisant de la viticulture avaient alors déclaré un sinistre.

Pour atténuer ces pertes, les assureurs peuvent être tentés d'augmenter leurs tarifs pour être en phase avec le risque. Par ailleurs, les mauvaises récoltes étant récurrentes ces dernières années, le rendement de référence diminue et donc les indemnités s'amoindrissent. Le taux de prime (rapport entre cotisations et capital assuré) augmente logiquement, rendant l'assurance d'autant moins intéressante.

Peu populaire chez les agriculteurs, l'assurance MRC a connu une nette croissance après que les grandes cultures et la vigne soient éjectées des calamités agricoles (respectivement en 2009 et 2011).

En 2013, l'enveloppe de la PAC pour les subventions a alors été dépassée, ce qui a conduit le ministère en charge de l'agriculture à diminuer cette année-là les taux de prise en charge pour certaines cultures *a posteriori*. Des agriculteurs n'ont alors pas été indemnisés selon la grille de base lors de la souscription, engendrant une perte de confiance dans le système et un retrait massif des exploitants sur plusieurs années. 23% des assurés MRC en 2015 ont ainsi résilié leur contrat l'année suivante selon KIRSCH (2020). Cependant, la multiplication des aléas climatiques observée depuis a amené un regain d'intérêt pour l'assurance MRC.

Les exploitants reprochent toujours à l'assurance récolte le montant trop important de ses primes, alors même que les assureurs sont déficitaires sur ces contrats. Il faut relier cela au seuil de déclenchement de l'assurance MRC (30% pour un contrat sur un type de culture) qui est considéré comme trop haut par les agriculteurs.

Vers un nouveau système

Parce que cet assemblage qui combine assurance MRC et calamités agricoles, deux systèmes parallèles voire concurrents, semble atteindre ses limites, une réforme est nécessaire. Celle-ci est connue dans ses contours avec la loi du 2 mars 2022 d'orientation relative à une meilleure diffusion de l'assurance récolte en agriculture et portant réforme des outils de gestion des risques en agriculture. Cette loi dessine un nouveau dispositif unique à trois étages pour l'assurance climatique agricole :

- pour les risques de faible intensité, une prise en charge par l'agriculteur ;
- pour les risques d'intensité moyenne, une mutualisation avec l'assurance récolte, l'État proposant des aides pour les primes ;
- pour les risques catastrophiques, solidarité nationale avec une garantie directe pour toutes les cultures. L'indemnisation se fera *via* le FNGRA, mais les conditions seront moins favorables pour les exploitants n'ayant pas souscrit une assurance MRC.

L'objectif principal est d'augmenter la part des surfaces agricoles assurées en France, qui s'élève aujourd'hui à 30% seulement. Les ambitions à horizon 2030 de surfaces assurées MRC par type de culture sont affichées dans une annexe au projet de loi.

	Données pour 2020	Objectif cible pour 2030
Céréales, oléagineux, protéagineux, plantes industrielles	33 %	60 %
Vignes	34 %	60 %
Arboriculture	3 %	30 %
Prairies	1 %	30 %
Légumes (industrie et marché du frais)	28 %	60 %
Horticulture	3 %	30 %
Plantes à parfum, aromatiques et médicinales	6 %	30 %

FIGURE 1.6 : Parts des surfaces agricoles assurées en multirisques climatiques par type de culture en 2020, et objectifs pour 2030. Source : ASSEMBLÉE NATIONALE et SÉNAT (2022).

Ce nouveau régime universel d'indemnisation des pertes de récoltes résultant d'aléas climatiques entrera en vigueur le 1^{er} janvier 2023. Le partage du risque se fera toujours entre les exploitants, les assureurs et l'État. Le gouvernement s'engage avec une enveloppe annuelle de 600 M € pour faire fonctionner le dispositif.

En ce qui concerne le deuxième étage du nouveau régime, des changements sont à prévoir dans l'assurance MRC. Les assureurs proposant ce type de contrat devront suivre un nouveau cahier des charges avec un barème de prix par production, ou encore des mesures de prévention qui réduiraient les primes des agriculteurs.

La loi rend possible une baisse de la franchise à 20% et une hausse des aides de l'État qui pourraient aller jusqu'à 70%, soit les taux les plus avantageux permis par le droit européen (règlement dit « Omnibus »).

Pour établir le rendement de référence, le choix entre la moyenne olympique utilisée précédemment et la moyenne triennale glissante est conservé (l'option la plus favorable pour l'exploitant sera retenue). Cette réforme simplifiera les démarches pour les agriculteurs, qui n'auront plus à s'adresser qu'à un guichet unique pour les indemnités.

L'assurance climatique en agriculture gagnera sûrement en importance avec cette réforme, mais elle devra soutenir la comparaison avec une nouvelle forme de contrats.

L'assurance paramétrique

L'assurance paramétrique, ou assurance indicielle, est un nouveau type de contrat qui indemnise non pas à la suite d'un sinistre mais selon les valeurs prises par un indice ou un paramètre (par exemple, si la température excède 35°C). Ce n'est donc pas un contrat d'assurance à proprement parler, l'assurance indicielle s'apparente plus à un produit dérivé.

Dans le cadre du risque sécheresse, souscrire un contrat d'assurance paramétrique peut être intéressant pour se couvrir, la sécheresse étant logiquement corrélée à des facteurs météorologiques. Cette assurance est alors complètement parallèle aux calamités agricoles et à l'assurance récolte.

Mais pour que ce contrat joue un rôle d'assurance, il est nécessaire qu'il y ait un réel lien entre les variations de l'indice considéré et les pertes. En effet, l'assurance paramétrique reposant sur un indice et non un sinistre, l'indemnité peut être bien inférieure à la perte subie par l'assuré, voire il peut y avoir un sinistre sans aucune indemnisation. Même si l'assuré se couvre en partie avec un contrat d'assurance indicielle, il conserve forcément un risque résiduel appelé **risque de base**. Ce terme vient de la finance, où il illustre le risque qu'il reste sur l'évolution du cours d'un actif lorsqu'il est couvert (de façon imparfaite).

Dans le cas de l'assurance paramétrique agricole, le risque de base peut être relié à la mauvaise corrélation entre l'indice sur lequel porte le contrat aux récoltes. Il peut également avoir une dimension plus spatiale, car les différentes parcelles de l'agriculteur n'ont pas forcément exactement les mêmes conditions climatiques et la même structure de sol que le point où les données sont relevées.

Un vrai travail doit être effectué pour réduire le risque résiduel. Il s'agit de trouver les variables les plus pertinentes pour expliquer les sinistres et ainsi construire une assurance paramétrique adéquate. Dans tous les cas, la situation où l'assuré ferait face à des pertes supérieures à l'indemnité touchée ne peut être complètement éliminée. C'est le propre de l'assurance paramétrique, qui est toujours couplée au risque de base.

Les contrats d'assurance paramétrique peuvent prendre plusieurs formes. L'indemnisation peut être simplement forfaitaire : un montant défini à l'avance est donné à l'assuré lorsque l'indice sur lequel porte le contrat atteint une certaine valeur. L'indemnisation peut également être corrélée à la magnitude de l'anomalie, par exemple avec une indemnisation par paliers. Cette option correspond en fait à la superposition de plusieurs contrats forfaitaires portant sur le même indice pour différents seuils de déclenchement. Enfin, l'indemnisation peut être complètement proportionnelle à l'écart entre l'indice et une valeur seuil (avec la condition que l'indice soit au-delà de la limite). Ces trois types de contrats sont illustrés avec la figure [1.7](#).

Des contrats plus complexes peuvent être construits, par exemple avec une indemnisation qui est

une fonction (non forcément linéaire) de l'écart entre l'indice et un seuil, ou encore un dédommagement lorsque l'indice sort de sa zone d'évolution normale. Dans ce dernier cas, l'assuré se couvre face à la hausse et face à la baisse de l'indice en espérant que cela traduise les risques auxquels il fait face.

Les prestations sont généralement exprimées en pourcentage de la valeur assurée. Dans le cas d'une police paramétrique proportionnelle, une limite est souvent placée sur l'indemnisation. Celle-ci peut émaner de la définition de l'indice sous-jacent (qui peut avoir des bornes), ou bien d'une clause intégrée au contrat.

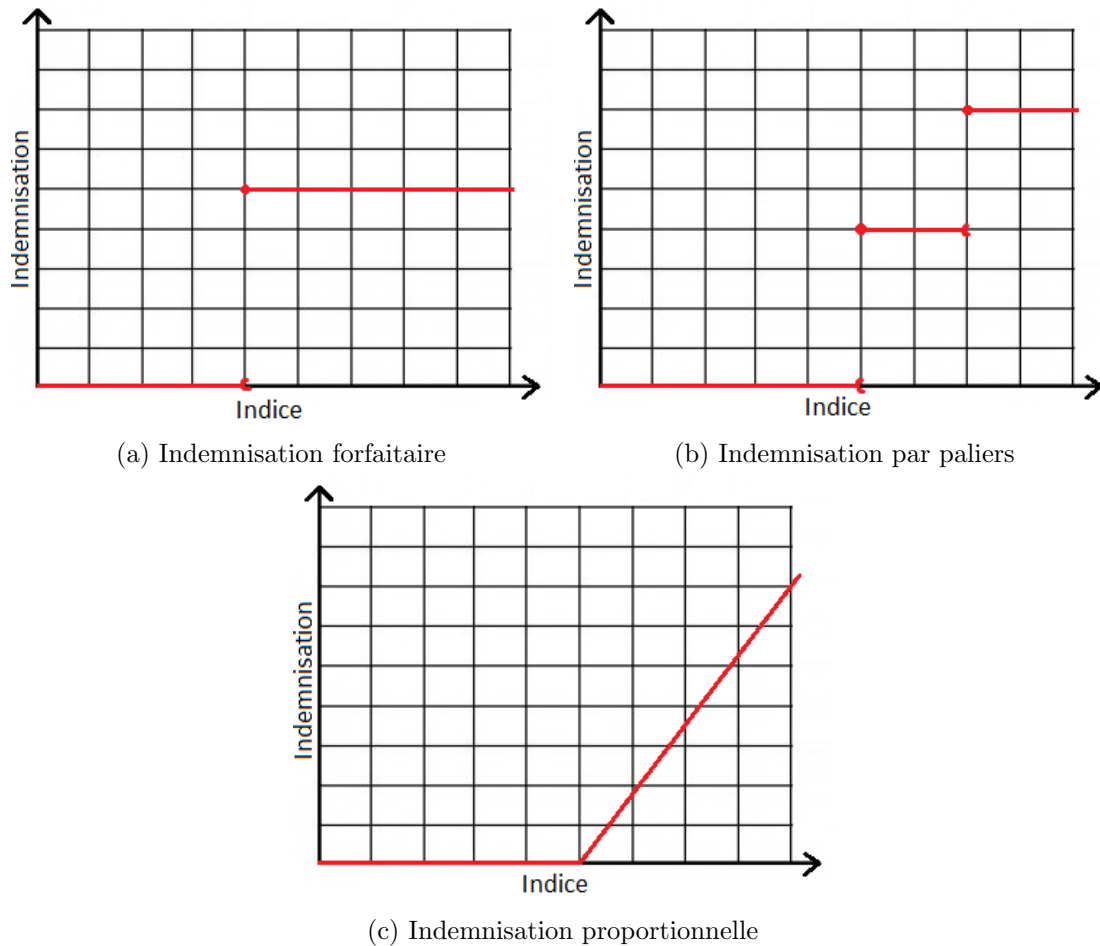


FIGURE 1.7 : Exemples d'indemnisations par rapport à un indice pour différents types d'assurance paramétrique.

Les assurés voient dans ce type de contrat l'avantage d'une indemnisation claire et objective. La gestion classique des sinistres en assurance peut être source de tensions, notamment si l'assuré n'est pas d'accord avec l'évaluation de l'assureur. Ces situations conflictuelles sont évitées ici puisque tout repose sur la valeur d'un indice émanant d'un tiers de confiance (Météo-France par exemple). Sans expertise, cela permet aussi d'accélérer le processus d'indemnisation. C'est aussi plus simple pour l'assureur du point de vue logistique, il peut alors répercuter la baisse des frais sur le tarif pour le rendre plus attractif.

L'assurance paramétrique présente aussi l'avantage d'être par construction imperméable à l'anti-sélection et à l'aléa moral. L'aléa moral est un changement de comportement de l'assuré avant ou après sa souscription (on distingue alors aléa moral *ex-ante* et *ex-post*). Le terme d'anti-sélection reflète le fait que les individus qui souscrivent une assurance sont souvent ceux qui savent qu'ils sont plus

risqués, et qui ont donc d'autant plus besoin d'être couverts. Ces deux phénomènes ne se retrouvent pas en assurance paramétrique car l'indemnisation est clairement indépendante du profil de l'assuré et de son comportement. Elle ne se base que sur un indice purement objectif.

Sur le terrain du risque climatique en agriculture, l'assurance paramétrique offre par ailleurs une plus grande flexibilité que la MRC, qui est très réglementée.

En revanche, lorsqu'un agriculteur a recours à une assurance indicielle, il peut subir des pertes sans recevoir aucune indemnisation si le paramètre n'a pas eu un comportement assez irrégulier. Il est directement soumis au risque de base, d'autant que la simplicité de l'assurance paramétrique peut être insuffisante face à la complexité des organismes vivants dont dépend l'agriculteur.

Il est intéressant avec l'assurance paramétrique de trouver des indices très corrélés avec la sécheresse pour mieux se couvrir.

1.3 Mesurer la sécheresse

Mesurer la sécheresse sur le terrain est souvent laborieux. Pour quantifier ce phénomène à l'aide de paramètres météorologiques plus faciles à obtenir, de nombreux indices ont été créés. La partie suivante liste, sans être exhaustive, certains des indices les plus utilisés. À l'exception du KBDI, ils sont tous exprimés sans unité.

1.3.1 Indices de sécheresse communs

SWI

Le *Soil Wetness Index* est un indice de sécheresse des sols très répandu. Il est notamment utilisé dans le régime Cat Nat pour mesurer l'intensité des sécheresses (voir parties [1.1.2](#) et [3.3.1](#)). Le SWI donne la proportion de l'eau disponible pour les plantes par rapport au niveau de saturation. Il est exprimé de la façon suivante, en notant W la teneur en eau du sol, W_f la teneur en eau au point de flétrissement et W_c la capacité du champ (ces termes sont définis en annexe [A](#)).

$$\text{SWI} = \frac{W - W_f}{W_c - W_f}. \quad (1.2)$$

Globalement, le SWI désigne la proportion de l'eau utilisable par les plantes à un instant t par rapport au niveau à saturation, et est en général compris entre 0 et 1. Selon Météo-France, on peut considérer un sol comme sec si le SWI est inférieur à 50%, et très humide au-dessus de 80%. Sur le site du DRIAS (présenté en [2.1.2](#)), le seuil pour définir un sol comme sec est placé à 40%. Des détails complémentaires sur le SWI sont placés en annexe [A](#). Le SWI est généralement calculé au pas de temps journalier, mais il peut être mensualisé en moyennant sur le mois. Dans ce cas, il sera ici noté $\overline{\text{SWI}}$.

SPI

Le *Standardized Precipitation Index* est tout comme le SWI très largement utilisé. En revanche, il permet de mesurer plus efficacement la sécheresse météorologique que la sécheresse des sols puisqu'il ne se base que sur les précipitations. Cependant, l'humidité du sol réagit relativement vite aux anomalies

de précipitations. Cet indice présente donc l'avantage d'un calcul plus facile, car nécessitant moins de données, mais n'est pas totalement impertinent pour étudier la sécheresse agricole.

Le calcul du SPI se fait avec un historique de précipitations assez profond, idéalement 50-60 ans d'après GUTTMAN (1994). Il faut également choisir la profondeur de l'indice, c'est-à-dire sur quelle échelle de temps doit-être évaluée la sécheresse. Pour la sécheresse agricole, les périodes suggérées sont 1, 3 ou 6 mois (les indices correspondants sont notés respectivement SPI-1, SPI-3 et SPI-6).

Pour illustrer la construction du SPI, supposons que nous voulons calculer le SPI-3 du mois de mars 2022. Pour faire cela, il faut comparer la quantité de pluie tombée en janvier-février-mars 2022 à celles des mêmes mois pour les années précédentes. Une estimation est faite pour la distribution de ces valeurs observées. Ce faisant, nous pouvons déterminer à quel quantile se situe l'hiver 2022 par rapport à la distribution choisie censée approximer la pluviométrie hivernale (la loi Gamma est retenue en général). Le SPI sera alors la valeur de ce quantile pour la loi normale centrée réduite $\mathcal{N}(0, 1)$. Cette méthode de construction point par point permet de facilement comparer les valeurs entre différentes zones.

Pour des périodes de SPI limitées (par exemple 1 et 3 mois), la saisonnalité peut avoir un impact important. Les précipitations étant plus limitées en été par exemple, un petit décalage de pluviométrie à la baisse peut avoir un impact nettement plus fort sur l'indice que le même phénomène en hiver.

SPEI

Le *Standardized Precipitation-Evapotranspiration Index* est un raffinement du SPI évoqué ci-dessus. En effet, là où le SPI ne prend en compte que les précipitations, et est donc plutôt relatif à la sécheresse météorologique, le SPEI prend en compte le phénomène d'évapotranspiration pour mieux estimer le bilan hydrique des sols. La méthodologie retenue pour le SPEI est rigoureusement la même que pour le SPI, à la différence près que l'on considère les précipitations diminuées de l'évapotranspiration potentielle plutôt que les précipitations brutes. Il est possible de calculer SPI et SPEI sur R [R CORE TEAM (2021)] à l'aide du package SPEI développé par BEGUERÍA et VICENTE-SERRANO (2017). La loi qui estime les précipitations efficaces n'est alors plus de type Gamma. Ce package utilise par exemple la loi log-logistique.

S'il n'est pas possible de fournir les données d'évapotranspiration, une estimation peut être faite. La plus simple est sûrement celle obtenue à partir de la formule de Thornthwaite, qui ne nécessite que les températures et la latitude. Pour un mois m donné, la variable \bar{T}_m est définie comme la moyenne interannuelle des températures (en °C) de ce mois. Un indice thermique mensuel i_m est alors calculé par $i_m = (\frac{\bar{T}_m}{5})^{1,514}$. I désigne la somme des 12 indices thermiques mensuels. Enfin, un facteur correctif F , autour de 1, fonction du mois m et de la latitude ϕ rentre dans le calcul. Dans l'hémisphère Nord, il est décroissant en fonction de la latitude. À latitudes égales, le facteur est nettement plus élevé en été qu'en hiver. Tout cela vise à refléter la force avec laquelle les rayons solaires transmettent leur énergie à la Terre. Celle-ci dépend de l'angle d'incidence à leur arrivée. L'évapotranspiration potentielle pour le mois m est alors donnée par :

$$ETP_m = 16 \left(\frac{10\bar{T}_m}{I} \right)^{0,016I+0,5} \times F(m, \phi). \quad (1.3)$$

D'autres formules bien plus complexes existent également pour estimer l'ETP, par exemple celle de FAO-Penman-Monteith (voir figure 2.3).

SSWI

Le *Standardized Soil Wetness Index* est basé sur le SWI classique. Il projette, avec la même méthode que le SPI, le SWI classique sur une distribution normale centrée réduite. Le SSWI adopte donc le même pas de temps que le SWI, et peut ainsi être mensualisé. Il est alors noté $\overline{\text{SSWI}}$. Pour différentes valeurs de $\overline{\text{SSWI}}$, les périodes de retour sont calculables (voir tableau 1.1, valable également pour les autres indices standardisés SPI et SPEI), en gardant à l'esprit que l'indice est basé sur l'historique d'un point donné et sur un mois donné. Là où les valeurs de $\overline{\text{SWI}}$ ne sont pas forcément comparables, l'indice $\overline{\text{SSWI}}$ permet de confronter l'humidité des sols pour différents lieux et saisons.

SSWI	Intensité du phénomène	Temps de retour
-0,5	Sécheresse très légère	> 3 ans
-0,75	Sécheresse légère	> 4 ans
-1	Sécheresse modérée	> 6 ans
-1,5	Sécheresse sévère	> 15 ans
-2	Sécheresse extrême	> 43 ans

TABLE 1.1 : Temps de retour d'épisodes de sécheresse sur un mois donné pour des valeurs remarquables de SSWI (similairement SPI/SPEI).

PDSI

Le *Palmer Drought Soil Index* est un autre indice de sécheresse des sols prenant en compte l'humidité de ces derniers, et donc plus complexe à mettre en place. L'indice est défini mensuellement, et par récurrence. Pour un mois m , on a :

$$PDSI_m = 0,897 \times PDSI_{m-1} + Z_m/3, \quad (1.4)$$

avec Z_m un autre indice mensuel qui mesure l'anomalie en humidité. Ce dernier est calculé comme suit à partir d'un facteur de poids K , des précipitations mensuelles P_m et d'une valeur CAFEC (appropriée au climat pour les conditions existantes) P_c^m , qui illustre la balance hydrique des sols. Les entrées P_m et P_c^m sont exprimées en millimètres.

$$Z_m = K \times (P_m - P_c^m). \quad (1.5)$$

La variable P_c^m est calculée à partir de l'évapotranspiration potentielle, de la recharge du sol potentielle PR, du ruissellement potentiel PRO et de la perte potentielle dans le sol PL. Ces grandeurs sont exprimées en millimètres, et sont modulées par des coefficients climatiques qui dépendent du mois. Le terme « potentiel » induit l'utilisation de modèles hydrologiques complexes pour calculer les valeurs nécessaires au calcul de P_c^m .

$$P_c^m = \alpha_m \text{ETP}_m + \beta_m \text{PR}_m + \gamma_m \text{PRO}_m - \delta_m \text{PL}_m. \quad (1.6)$$

Le PDSI est centré, au sens où la valeur normale est à 0. La sécheresse est à considérer lorsque les valeurs sont négatives, plus le PDSI s'éloigne de 0 plus le phénomène est sévère. Une valeur inférieure à -3 caractérise un épisode de sécheresse extrême. Il est possible de le calculer sur R [R CORE TEAM (2021)] à l'aide d'un package développé par ZHONG et al. (2018).

KBDI

Le *Keetch-Byram Drought Index*, a été créée à la base pour prévenir les feux de forêts aux États-Unis. Il varie de 0 à 800 et doit se comprendre comme le déficit en eau disponible dans le sol (en centièmes

de pouce). Le KBDI se calcule à partir des précipitations et températures.

Cet indice est défini de façon journalière par récurrence. Il faut calculer pour un jour j donné un facteur de sécheresse, noté DF . Celui-ci utilise la température maximale quotidienne en degrés Celsius, notée $Tmax$, et R la moyenne annuelle de précipitations en centimètres.

$$DF_j = \frac{(800 - KBDI_{j-1})(0,968e^{0,0875Tmax_j+1,5552} - 8,3)}{1000(1 + 10,88e^{-0,0174R})}. \quad (1.7)$$

L'indice KBDI du jour j est calculé à partir de ce facteur et de la valeur du jour précédent. Les précipitations (en cm) du jour P_j et des derniers jours consécutifs de pluie $\sum P_i$ sont également intégrés au calcul.

$$KBDI_j = \begin{cases} KBDI_{j-1} & \text{si } P_j = 0 \text{ et } Tmax_j \leq 6,78, \\ KBDI_{j-1} + DF_j & \text{si } P_j = 0 \text{ et } Tmax_j > 6,78, \\ KBDI_{j-1} + DF_j & \text{si } P_j > 0 \text{ et } \sum P_i \leq 0,51, \\ KBDI_{j-1} + DF_j - 39,37 \sum P_i & \text{si } P_j > 0 \text{ et } \sum P_i > 0,51. \end{cases} \quad (1.8)$$

L'initialisation du KBDI se fait à 0 pour un jour où le sol est supposé à saturation. On peut estimer que c'est le cas lorsque les précipitations sur une semaine excèdent 15 centimètres. S'il est relativement facile de le calculer, le peu de données nécessaires peut laisser penser que le KBDI est trop simpliste. Par ailleurs, il présente l'inconvénient d'avoir été calibré sur une région bien précise [sud-est des États-Unis, JANIS et al. (2002)], et sa formule aurait donc été différente s'il avait été construit dans une autre région comme la France.

EDI

L'*Effective Drought Index* est un autre indicateur de sécheresse s'appuyant sur peu de données, défini par BYUN et WILHITE (1996). Seules les précipitations journalières sont nécessaires à son calcul. Cet indice est standardisé, les valeurs entre -1 et 1 correspondent à des conditions normales alors qu'un EDI en-deçà de -1,5 signifie une sécheresse sévère, et extrême en-dessous de -2.

Une version simplifiée de l'EDI est présentée ici. En supposant que le niveau d'humidité d'un sol ne dépend que des précipitations sur la dernière année (glissante), on calcule tout d'abord pour un jour j donné les précipitations cumulées valides, notées EP_j . Elles correspondent à une pondération des précipitations journalières sur la dernière année, les pluies les plus récentes étant celles qui ont le plus d'importance.

L'EDI s'obtient alors par une standardisation. On note P_k le volume de précipitations k jours avant le jour j de calcul de l'indice, et μ_j^{EP} (resp. σ_j^{EP}) la moyenne (resp. l'écart-type) des précipitations cumulées valides EP_j à la même date calendaire. Ces dernières valeurs sont usuellement calculées sur un historique de 30 ans. La standardisation permet de facilement comparer les valeurs de deux régions différentes.

$$EP_j = \sum_{n=1}^{365} \left[\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n P_{j+1-k} \right], \quad (1.9)$$

$$EDI_j = \frac{EP_j - \mu_j^{EP}}{\sigma_j^{EP}}. \quad (1.10)$$

RAI

Le *Rainfall Anomaly Index* est un indice qui peut être mensuel ou annuel. C'est un indice simple qui ne se base que sur les précipitations, et qu'il est possible de comparer entre différentes zones géographiques. Il est centré, les valeurs négatives correspondant à la sécheresse et les positives à un excès d'humidité. L'équation [1.11](#) permet de calculer le RAI pour un mois m donné, avec :

- P_m les précipitations sur le mois étudié ;
- \bar{P}_m les précipitations mensuelles moyennes du mois m historiquement ;
- \bar{M}_m les précipitations mensuelles moyennes pour les dix mois m les plus pluvieux historiquement ;
- \bar{X}_m les précipitations mensuelles moyennes pour les dix mois m les moins pluvieux historiquement.

$$\text{RAI}_m = 3 \frac{P_m - \bar{P}_m}{\bar{M}_m - \bar{P}_m} \mathbb{1}_{P_m > \bar{P}_m} - 3 \frac{P_m - \bar{P}_m}{\bar{X}_m - \bar{P}_m} \mathbb{1}_{P_m < \bar{P}_m}. \quad (1.11)$$

Les mois secs ont un RAI négatif. Plus la sécheresse est marquée plus l'indice sera fortement négatif, mais il est difficile de fixer des seuils pour des phénomènes extrêmes puisqu'ils sont en fait très dépendant de la profondeur d'historique. La période de 30 ans peut être utilisée, les historiques basés sur des données récentes uniquement étant ici à proscrire.

Par construction, la valeur normale (*ie.* pour un mois respectant parfaitement les normales pluviométriques) du RAI est de 0. Ce n'est en revanche pas nécessairement la valeur moyenne. Le RAI n'est pas un indice centré, même si la valeur 0 marque le tournant entre conditions sèches et humides.

Indice d'aridité de Martonne

Cet indice, noté ici I , a originellement été conçu pour mesurer simplement, à partir des précipitations et températures, le degré d'aridité d'une région. Il peut être calculé mensuellement ou annuellement. Pour un mois donné m , l'indice est calculé comme suit, avec P_m le total de précipitations mensuelles (en mm) et T_m la température moyenne mensuelle en degrés Celsius.

$$I_m = \frac{12P_m}{T_m + 10}, \quad (1.12)$$

L'indice annuel est calculé similairement, en retirant le facteur 12.

Les régions hyper-arides, ou déserts absolus, comme la Vallée de la Mort ou le désert d'Atacama, possèdent un indice en-dessous de 5. La France métropolitaine appartient plutôt aux régions semi-humides, caractérisées par un I entre 20 et 30, et celles humides avec des valeurs supérieures à 30. Cet indice n'est pas en tant que tel un indicateur de sécheresse, puisqu'un territoire humide en période de sécheresse aura un indice I plus élevé que qu'une zone aride même si cette dernière fait face à un excès de précipitations par rapport à la normale. En revanche, nous pourrions utiliser cet indice en comparant sa valeur à la distribution historique (par exemple de la même manière que dans le calcul du SPI en [1.3.1](#)). Une sécheresse serait alors caractérisée par un indice anormalement bas par rapport à l'historique.

TCI

Le *Temperature Condition Index* est un indice de température et peut apporter des indications quant à l'état de sécheresse d'un sol. Dans le cadre de ce mémoire, le TCI sera défini mensuellement par :

$$\text{TCI}_m = \frac{T_{max} - T_m}{T_{max} - T_{min}} \times 100, \quad (1.13)$$

avec m le mois d'étude, T_m la température moyenne relevée ce même mois, T_{max} et T_{min} respectivement la plus haute et la plus basse température sur l'historique pour ce mois-ci.

Selon la méthodologie choisie, si le mois d'étude compte dans les données historiques alors le TCI variera entre 0 (mois le plus chaud historiquement) et 100 (mois le plus froid historiquement). Si au contraire on considère le mois d'étude hors de l'historique alors le TCI pourrait dépasser ces bornes. Un TCI négatif signifierait alors un mois plus chaud que tout ce qui a été enregistré historiquement.

Le véritable TCI que l'on retrouve dans la littérature reprend bien cette formule mais n'utilise pas les mêmes températures. En effet, c'est la température de brillance du sol qui intervient normalement et non la température de l'air. La température de brillance est récupérée par satellite, et correspond à la température qu'il faudrait à un corps noir pour émettre la même luminance que le sol observé. Pour cette utilisation, la bande spectrale utilisée se situe dans les infrarouges. Le TCI peut également être défini avec la température du sol en surface, car celle-ci est en fait liée à la température de brillance. Dans certaines situations (qui ne seront pas détaillées ici mais que le lecteur intéressé par les concepts physiques pourra facilement retrouver car la documentation est accessible), la température de brillance est simplement le produit de la température et de l'émissivité, qui est comprise entre 0 et 1.

Autres indices usuels

Le rapport à la normale des précipitations est très utilisé en météorologie. Cela consiste simplement à prendre les précipitations d'un mois donné et à les diviser par les précipitations moyennes observées pour ce même mois sur une période de référence (usuellement 30 ans). Un mois moyen aura un ratio proche de 1, les valeurs inférieures traduisent le manque de précipitations, d'autant plus important que le ratio se rapproche de 0. Comme le SPI, il manque de complexité pour vraiment capturer la sécheresse agricole.

Le rapport P/EP, entre précipitations et évapotranspiration paraît plus pertinent dans cette perspective puisqu'il permet de mesurer de façon simplifiée la balance hydrique des sols en étudiant uniquement les apports par la pluie et les pertes aériennes. Pour évaluer l'état de sécheresse d'un sol (et non le climat local), il faut alors comparer l'indice mesuré à des références historiques. En effet, cet indice est sinon utilisé comme celui de Mertonne pour déterminer le degré d'aridité d'une zone géographique. Le climat semi-humide correspond par exemple à un P/EP compris entre 0,5 et 0,65.

L'indice de Gaussen n'est pas un indice de sécheresse à proprement parler, mais plutôt un indicateur de sécheresse inhérente au climat normal d'une région. Il s'agit de tester la condition de sécheresse $P < 2T$, où P représente les précipitations (en mm) et T la température moyenne (en °C), pour chacun des 12 mois. Les données utilisées ne sont pas celles d'une seule année puisqu'elles doivent représenter les normales, ce qui nécessite une certaine profondeur d'historique. Cet indicateur est surtout visuel avec les diagrammes ombrothermiques (2.4.9), et permet à Gaussen de définir le climat méditerranéen (et de le nuancer).

Une zone géographique possède alors un climat méditerranéen lorsque celle-ci vérifie la condition de sécheresse $P < 2T$ est vérifiée pour 1 à 8 mois de l'année. Le climat méditerranéen est alors

subdivisé en quatre sous-climats :

- le climat subméditerranéen, avec 1 ou 2 mois secs ;
- le climat mésoméditerranéen, avec 3 ou 4 mois secs ;
- le climat thermoméditerranéen, avec 5 ou 6 mois secs ;
- le climat xérothermoméditerranéen, avec 7 ou 8 mois secs.

Une autre classe d'indices existe pour la sécheresse et est très utilisée en assurance. Il s'agit d'indicateurs basés sur la réflectance du sol. On retrouve notamment le NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*), calculé comme la différence entre l'indice de réflexion du sol dans le proche infrarouge et dans le rouge (mesurées par satellite) que l'on divise par la somme des deux. Cette division sert à standardiser l'indice sur une échelle de 0 (sol nu) à 1 (couvert végétal maximal). Cet indice est répandu car il est très corrélé à la présence de végétation et à l'état de cette dernière. En effet, les chlorophylles, vitales pour les plantes, absorbent une partie du rayonnement solaire (le rouge et le bleu, ce qui leur donne une couleur verte) pour produire de la biomasse. En revanche elles n'ont pas la même sensibilité aux infrarouges, qui sont donc davantage réfléchis. C'est sur ce constat que le NDVI est basé.

D'autres indices dérivent du NDVI, par exemple le *Vegetation Condition Index* (VCI) qui reprend la formule du TCI mais où la variable en entrée est le NDVI et non plus une température. Cela permet d'isoler les variations dues au climat de celles dues aux écosystèmes, et ainsi de comparer plus facilement les valeurs entre différentes zones géographiques. Le SVI est quant à lui une version standardisée au sens statistique du NDVI point par point, ce qui le rapproche dans son utilisation du VCI. Enfin, le *Vegetation Health Index*, ou VHI, est une moyenne du VCI et du TCI.

1.3.2 Proposition de nouveaux indices de sécheresse

Les indicateurs présentés précédemment font face à un dilemme d'optimisation entre simplicité d'utilisation (peu de données requises, formule explicite classique) et efficacité (bien capter les sécheresses). Certains indicateurs sont ainsi inutilisables en pratique et d'autres font intervenir des facteurs ne pouvant expliquer qu'en partie la sécheresse. Il serait intéressant de combiner les forces d'indices simples à calculer et basés sur trop peu de variables pour donner une fine estimation de la sécheresse des sols.

Le TCI et le RAI sont retenus car ils sont très simples à calculer et basés respectivement sur les températures et les précipitations. Le rapport P/EP est également accessible et permettrait de faire intervenir l'évapotranspiration dans l'indice créé. Températures, précipitations et évapotranspiration potentielle sont des données facilement disponibles. Enfin, nous nous appuyons sur le nombre de jours où la température maximale dépasse les 30°C au cours des 60 derniers jours, cette variable étant significative de la sinistralité sécheresse Cat Nat selon ARNAUD (2016).

L'indice proposé ici est purement théorique puisqu'il ne peut être calibré sur des données qui permettent historiquement de mesurer l'intensité des sécheresses. Comme la sécheresse est un phénomène long, que ce soit pour le retrait-gonflement des sols argileux ou la sécheresse agricole, construire un indice mensuel paraît pertinent.

En ce qui concerne le nombre de jours où les 30°C sont atteints sur les 60 derniers jours, le délai de 60 jours est remplacé par 2 mois (le mois d'étude et celui qui précède), en vue de définir un indice mensuel et non journalier. Cet indicateur est absolu, et une température de 30°C n'a pas la même

importance selon le moment de l'année. En France ce seuil est régulièrement franchi en été, plus ou moins souvent selon les régions, mais il peut aussi être dépassé plus exceptionnellement hors période estivale. Le record national pour un mois d'avril est ainsi de 33,2°C à Cazaux en Aquitaine, alors qu'en novembre 1985 le thermomètre a atteint 31,4°C en Corse à Solenzara. Ces phénomènes sont certes plus rares dans la moitié nord de la France mais existent tout de même ; 31,1°C sont relevés à Saint-Maur-des-Fossés (région parisienne) en avril 2018.

L'objectif ici est donc de donner plus de poids à ces pics de chaleur. Nous proposons donc d'incorporer le terme $N_m e^{|m-8|}$ dans notre indice, où m correspond au mois étudié et

$$N_m = \# \{j \mid T_{max_{jour\ j}} \geq 30, \text{ jour } j \in \{\text{mois } m, \text{mois } m-1\}\}, \quad (1.14)$$

avec T_{max} représentant la température maximale quotidienne en degrés Celsius. N_m est donc le nombre de jours où le thermomètre a pu dépasser les 30°C au cours du mois m et du précédent. L'utilisation de l'exponentielle vise à mettre réellement en lumière les épisodes anticipés ou tardifs de chaleur. Les mois de juillet et d'août étant les plus chauds de notre climat, il est logique de considérer le huitième mois comme celui où le terme de correction atteint son minimum.

La partie positive d'un nombre est définie par $(x)_+ = \max(x, 0)$. Le TCI apparaîtra sous la forme $\sqrt{(200 - TCI_m)_+}$, cela permet de garder un facteur toujours de même signe sans rogner sur les valeurs de TCI négatives qui pourraient apparaître dans les projections. Comme N_m , il se base sur les températures (moyennes cette fois et non maximales). Comme les températures apparaissent déjà ailleurs, et qu'elles sont corrélées à l'évapotranspiration qui rentrera également dans le calcul, il est naturel de vouloir moduler l'impact du TCI dans l'indice. C'est dans ce sens que la racine carrée est utilisée.

Le RAI apportera une information sur les anomalies de précipitations en intervenant sous la forme $(5 - RAI_m)_+$. Cette formule permettra de garder un signe positif sur ce terme, et l'indice doit être corrélé négativement au RAI puisque ce dernier varie dans le même sens que les précipitations.

Enfin, le rapport P/EP permet d'avoir une bonne idée de la balance hydrique des sols en intégrant l'évapotranspiration, un facteur primordial dans la compréhension des sécheresses. Le rapport sera calculé sur le mois d'étude (P_m/EP_m) mais aussi sur les 12 derniers mois (P_m^*/EP_m^*). Cela permet de tenir compte des nouveaux changements dans l'humidité des sols mais aussi de l'impact d'épisodes récents de sécheresse (par exemple une recharge hivernale insuffisante), puisque ce phénomène est assez long.

L'évapotranspiration potentielle (ETP) sera utilisée ici pour plus de simplicité. Pour faire varier le coefficient dans le même sens que les précédents, nous utiliserons plutôt ETP_m/P_m et ETP_m^*/P_m^* .

Le rapport ETP_m/P_m est très volatile comparé à ETP_m^*/P_m^* . Cela s'explique par la présence de mois avec des très faibles précipitations, en particulier les mois d'été en Méditerranée, qui vont de paire avec une forte ETP. Pour réguler les grandes variations du rapport, le logarithme népérien $\ln()$ est utilisé. La partie positive permettra de s'assurer que l'on évite les valeurs négatives de cette fonction dans le cas où le rapport est inférieur à 1, c'est-à-dire lorsque les précipitations sont plus importantes que l'évapotranspiration potentielle. Pour alléger la formule, la fonction $\ln_+ = (\cdot)_+ \circ \ln$ est introduite.

L'indice de sécheresse mensuel proposé ici et noté IS se calcule donc avec la formule [1.15](#). Tous ses termes sont pensés pour avoir une corrélation positive avec la sécheresse. Ainsi défini, l'indice IS devrait être petit (il est positif par construction) dans des conditions humides, et grand lors d'épisodes de sécheresse.

$$IS_m = N_m e^{|m-8|} + \sqrt{(200 - TCI_m)_+} (5 - RAI_m)_+ \left(\ln_+ \left(\frac{ETP_m}{P_m} \right) + \frac{ETP_m^*}{P_m^*} \right). \quad (1.15)$$

Cet indice n'est défini que pour $P_m > 0$. Pour une utilisation lorsque cette condition n'est pas remplie (ce qui est possible en France), plusieurs options sont disponibles pour étendre la définition de l'indice IS :

- mettre un seuil minimum $p > 0$ aux précipitations, et utiliser alors $\max\{p, P_m\}$ au lieu de P_m ;
- utiliser une fonction bornée (et continue) en lieu et place de \ln , « qui croît lentement » pour préserver l'esprit de l'indice. Cette fonction est prolongeable par continuité en $+\infty$. Ces conditions sont par exemple vérifiées par arctan.

Même si le périmètre géographique de ce mémoire est restreint, des différences de climat à l'échelle régionale pourraient avoir un fort impact sur cet indice. Ainsi, deux régions avec la même valeur IS pourraient être dans deux stades différents de sécheresse. Cela pourrait être le cas en comparant par exemple la Bretagne et la Corse. Le nombre de jours où la température dépasse 30°C n'a alors plus vraiment la même signification, de même que les rapports entre évapotranspiration potentielle et précipitations qui peuvent définir le degré d'aridité d'une région.

Pour remettre toutes les régions sur un pied d'égalité et favoriser l'utilisation de l'indice, une nouvelle version est définie en s'inspirant fortement de la précédente. La variable Δ_m est définie comme $N_m - N_m^{hist}$. C'est donc l'écart à la normale historique du nombre de jours sur les deux derniers mois où la température maximale a dépassé les 30°C . Cette variable est ensuite convertie en un facteur $\tilde{\Delta}_m = e^{\Delta_m - 1}$.

Un traitement est également appliqué au dernier terme de l'équation [1.15](#) qui fait intervenir l'ETP. γ_m^* est défini comme la normale historique de cette variable. Le nouvel indice \tilde{IS} s'écrit alors :

$$\tilde{IS}_m = \tilde{\Delta}_m e^{|m-8|} \sqrt{(200 - \text{TCI}_m)_+} (5 - \text{RAI})_+ \frac{\ln_+ \left(\frac{\text{ETP}_m}{P_m} \right) + \frac{\text{ETP}_m^*}{P_m^*}}{\gamma_m^*}. \quad (1.16)$$

Une autre option est envisageable pour assurer la comparabilité entre différentes régions. L'indice \tilde{IS} normalise les composantes de IS , mais il est possible d'imaginer un indice \widehat{IS} qui effectuerait la normalisation directement sur l'indice IS .

La variable IS , calculée pour le mois m d'une année a est notée IS_m^a . Avec des observations $\{IS_m^a, a \in A\}$ sur une large période de référence A pour un point donné, pour connaître l'état de sécheresse d'un sol pour l'année b et le mois m , l'indice suivant peut être utilisé :

$$\widehat{IS}_m^b = F(IS_m^b), \quad (1.17)$$

avec F la fonction de répartition empirique de $\{IS_m^a, a \in A\}$. Ainsi, \widehat{IS} est compris entre 0 et 1. Il place l'observation par rapport aux valeurs de référence sur ce point. Un \widehat{IS} de 0 signifie que ce niveau de sécheresse, au sens de l'indice IS , n'avait pas été atteint auparavant pour ce mois de l'année. Autrement dit, \widehat{IS} correspond à un niveau de quantile de l'indice IS pour un endroit donné, ce qui permet de confronter facilement les valeurs pour différentes zones géographiques.

Chapitre 2

Changement climatique dans les régions méditerranéennes françaises

La sécheresse dépend directement des conditions climatiques. Or, ces dernières évoluent dans un sens laissant penser à une progression du risque sécheresse. Ce chapitre étudie le changement climatique dans les régions méditerranéennes françaises. Pour cela, des projections climatiques sont téléchargées puis analysées sur R [R CORE TEAM (2021)].

2.1 Scénarios du GIEC et projections climatiques disponibles sur le portail DRIAS

Le changement climatique observable actuellement est anthropique, causé par les émissions de gaz à effet de serre. À partir de ce constat, les projections climatiques requièrent des hypothèses sur les émissions futures, et donc sur la trajectoire globale que suivra l'humanité. Les scénarios RCP sont bâtis dans ce sens.

2.1.1 Les scénarios RCP

Le GIEC (Groupement d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat) est un groupe créé en 1988 à la suite d'une initiative politique internationale. Il dépend de l'Organisation Météorologique Mondiale et du Programme des Nations Unies pour l'Environnement, et regroupe la quasi-totalité des pays du monde (195 en 2022). Sa mission est d'évaluer de façon objective le réchauffement climatique et de synthétiser les connaissances sur ce sujet. Le GIEC coordonne donc des scientifiques, climatologues et socio-économistes du monde entier pour fournir des rapports de la plus grande qualité à l'attention des décideurs politiques.

Le GIEC a défini quatre scénarios socio-économiques appelés RCP (*Representative Concentration Pathway*) pour autant de trajectoires de forçage radiatif sur une période s'étendant de 2006 à 2300. Ces scénarios sont présentés dans le cinquième rapport du GIEC (2014), usuellement appelé « AR5 ».

Chaque RCP est défini par des hypothèses sur la quantité émise de gaz à effet de serre (GES). Ces trajectoires englobent ainsi un large éventail de possibilités en termes d'efforts sur la réduction des émissions de GES. Le forçage radiatif représente la balance entre les rayonnements entrants et

sortants du système terrestre, plus précisément au niveau du sommet de la troposphère (couche de l'atmosphère en contact avec le sol). Un forçage radiatif positif signifie donc un réchauffement du système.

Le GIEC prend pour référence l'année 1750, le forçage exprimé par la suite n'est donc pas vraiment la différence entre l'énergie entrante et sortante du système Terre, mais plutôt l'écart avec la valeur de cette grandeur en 1750, soit avec l'ère préindustrielle. Les RCP sont dénommés d'après leur niveau de forçage radiatif (en W/m^2) atteint en 2100 :

- **RCP2.6** : ce scénario, le plus optimiste, évoque un monde à très faibles émissions où le point culminant serait atteint avant 2050, suivi par un déclin ;
- **RCP4.5** et **RCP6.0** : dans ces trajectoires intermédiaires les émissions de GES sont stabilisées avant la fin du XXI^e siècle ;
- **RCP8.5** : scénario le plus pessimiste où les activités humaines continuent sans réel changement, souvent appelé *business as usual*.

Pour situer l'état du monde actuel, ces valeurs sont comparables avec les $2,9 W/m^2$ en 2013 selon l'observatoire national sur les effets du réchauffement climatique. Le climat terrestre possède une très forte inertie facilement identifiable sur les RCP4.5 et 6.0, où les émissions de GES se sont stabilisées en 2100 mais où le réchauffement se poursuit, comme l'illustre la figure 2.1.

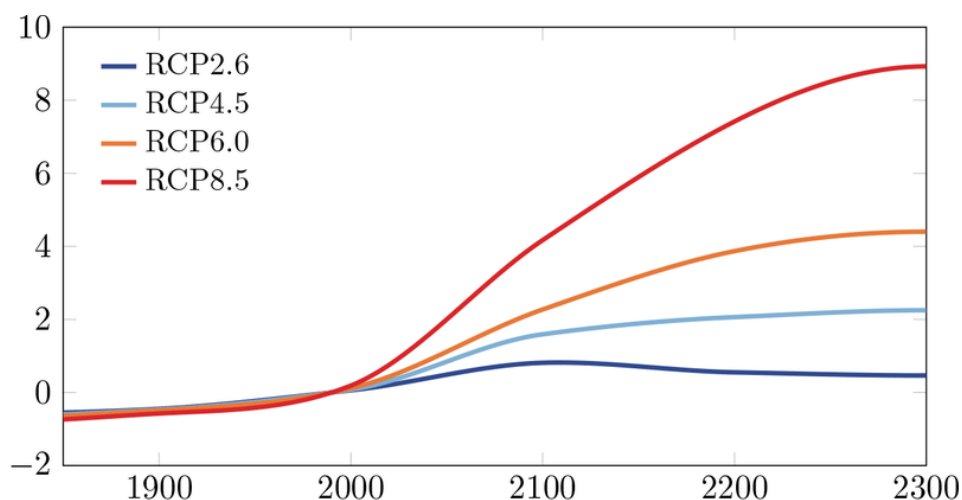


FIGURE 2.1 : Réchauffement moyen (en °C) en Antarctique pour les différents scénarios RCP. Source : GOLLEDGE et al. (2015)

Les trajectoires RCP ont été construites par les experts du GIEC en s'appuyant sur 300 scénarios de la littérature scientifique. Le RCP8.5 est ainsi dépassé en termes d'émissions de GES et de forçage par environ 10% de ces scénarios. Le RCP2.6 est au même niveau dans les trajectoires à faibles émissions. Ce dernier est d'ailleurs le seul à contenir le réchauffement global sous les 2°C par rapport au niveau préindustriel, seuil retenu par exemple dans les accords de Paris lors de la COP21 en 2015.

Les scénarios RCP sont utilisés par de nombreux modèles climatiques pour fournir des projections.

2.1.2 Données climatiques du DRIAS

Le projet DRIAS (Donner accès aux scénarios climatiques Régionalisés français pour l'Impact et l'Adaptation de nos Sociétés et environnement) a donné naissance en 2012 à un portail web [Drias les futurs du climat](#)^{*}. Développé par Météo-France avec l'appui de laboratoires français de modélisation du climat (CERFACS, CNRM, IPSL) et du ministère du développement durable. Il s'inscrit dans le premier plan national d'adaptation au changement climatique en donnant au grand public l'accès gratuit à des projections climatiques sur le territoire français par des cartes ou des données brutes.

Le DRIAS utilise différents modèles climatiques, et chacun d'entre eux repose sur deux composantes : un modèle climatique global et un modèle climatique régional.

Le modèle global vise à représenter numériquement les interactions entre océans, continents et atmosphère sur toute la planète. L'espace géographique y est découpé en mailles grossières de l'ordre de la centaine de kilomètres. Le modèle s'appuie sur des équations mathématiques qui régissent les interactions physiques. Ce type de modèle ne peut pas reproduire fidèlement le relief, le trait de côte ou l'occupation des sols ce qui limite l'étude des événements extrêmes et les études d'impact.

Cela justifie l'utilisation d'un modèle régional associé au modèle global. Celui-ci permet de modéliser de façon plus précise une zone du globe avec une résolution généralement autour de 10 kilomètres. Ce modèle part des résultats du modèle global et résout explicitement la dynamique et la physique du système régional. On parle alors de désagrégation dynamique.

Une autre option possible, dite désagrégation statistique, repose sur la recherche de relations entre les variables locales et globales. Ces deux approches peuvent être utilisées séparément ou combinées. Le modèle régional se sert des évolutions de l'atmosphère à grande échelle (température, vent, pression...) en sortie du modèle global pour simuler des phénomènes locaux, les orages par exemple.

Le modèle régional est guidé par le modèle global au sens où il ne doit pas s'écarter de la trajectoire globale. Ce guidage se traduit mathématiquement par l'introduction d'une variable de relaxation dans les équations des variables météorologiques. À chaque fois il faut alors déterminer un coefficient de guidage qui ne doit pas être trop fort sinon le modèle régional n'aura aucune liberté et ne simulera pas de phénomènes de petite échelle, mais pas trop faible sinon le modèle régional sera trop indépendant du modèle global.

Les modèles climatiques ne sont pas aléatoires. Cependant, les résultats obtenus sont dépendants des conditions initiales du système. Pour calibrer un modèle climatique, de nombreuses simulations sont donc nécessaires.

Par rapport à des modèles de prévision, les modèles climatiques ne sont pas du tout rappelés par des observations. Le système climatique évolue totalement librement, il reçoit de l'énergie par le rayonnement solaire et en perd sous forme de rayonnement infrarouge vers l'espace. Le climat simulé est le résultat de la balance entre ces rayonnements, le forçage radiatif.

Des échanges d'énergie bien modélisés sont donc primordiaux quant au bon fonctionnement des modèles climatiques. Les modèles présentés ici, utilisés sur différentes trajectoires socio-économiques, ne tiennent compte que de variations du forçage radiatif liées à l'activité humaine. Autrement dit, ils ne prévoient pas les variations naturelles de l'énergie globale du système Terre. Celles-ci peuvent être dues par exemple aux fluctuations du rayonnement solaire ou aux nuages de fumée, associés à l'activité volcanique et aux feux de forêts, qui bloquent la lumière du Soleil.

*Lien vers la plateforme : <http://www.drias-climat.fr/>

Pour éviter d'utiliser des observations tenant compte de ces variations naturelles de forçage radiatif et des projections l'omettant, les données historiques disponibles sur le DRIAS n'ont d'historique que le nom. Elles sont en fait issues de simulations sur le passé, les modèles tournant comme pour les projections mais avec les émissions de GES d'époque. Sans cette précaution, un biais serait introduit.

Le cœur du projet DRIAS est la mise à disposition gratuite de projections climatiques. Celles-ci sont disponibles selon différentes trajectoires socio-économiques : les RCP (voir 2.1.1). Le RCP6.0 n'apparaît pas ici, mais 8 modèles modélisent le climat futur dans le scénario RCP2.6. Ils sont respectivement 10 et 12 pour les RCP4.5 et RCP8.5. Les données historiques sont disponibles pour les 12 modèles mais n'ont pas forcément la même profondeur.

À chaque fois les projections commencent en 2006 et s'étendent jusqu'en 2099 ou 2100. Trois horizons de temps sont distingués par le DRIAS : proche pour la période 2021-2050, moyen de 2041 à 2070 et enfin lointain pour les années ultérieures. La période historique s'arrête en 2005 et commence en 1950, 1951 ou 1970 selon les modèles.

Les modèles régionaux ont fonctionné sur le même domaine couvrant l'Europe avec une résolution de 12 kilomètres dans le cadre du projet Euro-Cordex. Ces modèles régionaux sont eux-mêmes contrôlés par des modèles globaux issus du programme mondial CMIP5.

Cependant les données du DRIAS sont disponibles sur la grille SIM2 qui quadrille le territoire français avec une résolution de 8 kilomètres. La méthode de correction ADAMONT, mise en œuvre par Météo-France, a été retenue pour le changement de grille.

Nom de la simulation	Institution	GCM	RCM	Scénarios	Périodes disponibles
CNRM-CERFACS-CNRM-CM5_CNRM-ALADIN63	CNRM	CNRM-CM5	ALADIN63	RCP8.5, RCP4.5, RCP2.6	1951-2100
MPI-M-MPI-ESM-LR_CLMcom-CCLM4-8-17	CLMcom	MPI-ESM	CCLM4-8-17	RCP8.5, RCP4.5, RCP2.6	1950-2100
MOHC-HadGEM2-ES_ICTP-RegCM4-6	ICTP	HadGEM2	RegCM4-6	RCP8.5, —, RCP2.6	1970-2099
ICHEC-EC-EARTH_SMHI-RCA4	SMHI	EC-EARTH	RCA4	RCP8.5, RCP4.5, RCP2.6	1970-2100
IPSL-IPSL-CM5A-MR_IPSL-WRF381P	IPSL	IPSL-CM5A	WRF381P	RCP8.5, RCP4.5, —	1951-2100
NCC-NorESM1-M_GERICS-REMO2015	GERICS	Nor-ESM1	REMO2015	RCP8.5, —, RCP2.6	1950-2100
MPI-M-MPI-ESM-LR_MPI-CSC-REMO2009	CSC	MPI-ESM	REMO2009	RCP8.5, RCP4.5, RCP2.6	1970-2100
MOHC-HadGEM2-ES_CLMcom-CCLM4-8-17	CLMcom	HadGEM2	CCLM4-8-17	RCP8.5, RCP4.5, —	1950-2099
ICHEC-EC-EARTH_KNMI-RACMO22E	KNMI	EC-EARTH	RACMO22E	RCP8.5, RCP4.5, RCP2.6	1950-2100
IPSL-IPSL-CM5A-MR_SMHI-RCA4	SMHI	IPSL-CM5A	RCA4	RCP8.5, RCP4.5, —	1970-2100
CNRM-CERFACS-CNRM-CM5_KNMI-RACMO22E	KNMI	CNRM-CM5	RACMO22E	RCP8.5, RCP4.5, RCP2.6	1950-2100
NCC-NorESM1-M_DMI-HIRHAM5	DMI	Nor-ESM1	HIRHAM5 v3	RCP8.5, RCP4.5, —	1951-2100

FIGURE 2.2 : Récapitulatif des données climatiques disponibles sur le DRIAS.

Tous ces modèles simulent les sept variables quotidiennes suivantes : températures moyenne, minimale et maximale, humidité spécifique près de la surface, précipitations totales et neigeuses, vitesse du vent. Parmi les variables les plus intéressantes pour modéliser la sécheresse, l'évapotranspiration potentielle fait l'objet d'un traitement très spécifique ici. Elle est calculée à partir de la formule de Penman-Monteith avec des coefficients définis pas la FAO, l'Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture (figure 2.3). Cette formule est compliquée et utilise de nombreux paramètres en entrée : températures, humidité, vent, altitude, latitude, jour de l'année et rayonnement global.

Les aérosols ont un impact réel sur le rayonnement et ne sont pas pris en charge de la même

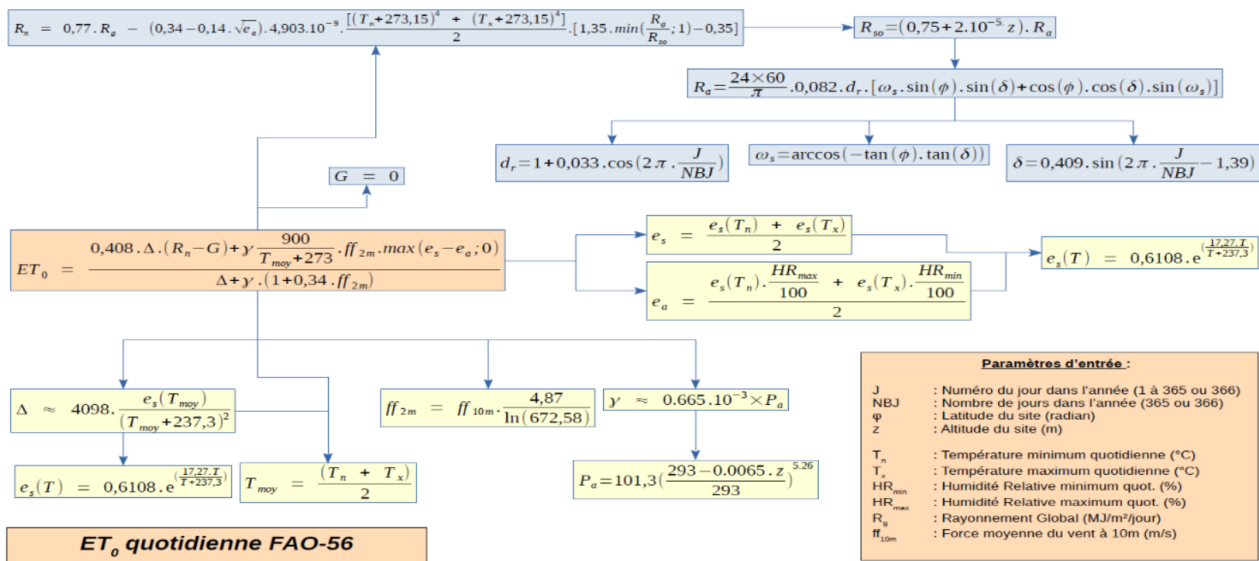


FIGURE 2.3 : Procédure de calcul de l'ETP selon la formule FAO-Penman-Monteith.

façon selon les modèles climatiques. Ces particules fines en suspension dans l'air affectent le climat *via* différents phénomènes physiques. Ils peuvent tout d'abord réfléchir les rayons du Soleil, ce qui tend à refroidir le climat. À l'inverse certains aérosols vont absorber une grande partie de l'énergie qui leur parvient. L'effet est alors contraire : l'air se réchauffe.

Les conséquences de la présence d'aérosols dans l'atmosphère peuvent être plus complexes, en ralentissant par exemple le cycle de l'eau lorsque des nuages sont proches d'une zone à forte concentration en aérosols. Ils peuvent également retomber sur des surfaces blanches telles que la banquise, altérant alors l'albédo et réchauffant ainsi la surface.

De ces divers effets, le mécanisme de refroidissement est généralement celui qui est prépondérant, même si cela dépend en réalité du type d'aérosol en question. Comme les gaz à effet de serre, il existe des aérosols naturels (sel marin, nuage de fumée suite à une éruption...) mais aussi des aérosols anthropiques. Les émissions de ces derniers ont nettement augmenté depuis la révolution industrielle tout comme les gaz à effet de serre. Les aérosols jouent ainsi un rôle majeur contre le réchauffement global du climat.

Cette protection commence à être mise en lumière puisque les émissions d'aérosols sont en baisse, notamment à cause des problèmes qu'ils causent : sur la santé, sur les écosystèmes (avec par exemple des pluies acides) ou encore le trou dans la couche d'ozone.

Le GIEC donne une idée de la proportion du réchauffement global occulté par les émissions d'aérosols : entre l'ère pré-industrielle et 2019 le forçage radiatif dû à l'accroissement des émissions de GES est de 3,8 W/m², alors que pour les émissions d'aérosols cette valeur tombe à -1,1 W/m². Selon NABAT et al. (2014), la baisse des émissions d'aérosols est responsable pour 23% de l'augmentation des températures en Europe entre 1980 et 2012.

La plupart des modèles présents sur le portail DRIAS supposent un niveau d'aérosols dans l'atmosphère constant dans le temps, mais il est évolutif pour certains modèles qui sont donc plus justes quant à la variable de rayonnement.

Les deux modèles régionaux avec forçage en aérosols variant au cours du temps sont ainsi ceux qui prédisent une augmentation du rayonnement, les autres simulent des changements faibles voire négatifs.

Les trois modèles climatiques qui utilisent les modèles régionaux ALADIN63 et RACMO22E sont donc les seuls où le rayonnement est vraiment utilisé tel quel dans le calcul de l'évapotranspiration potentielle. La variable est même disponible au téléchargement. Pour les autres, le rayonnement global R_g est approximé par $0,175 \times R_a \times \sqrt{T_x - T_n}$ en se basant sur la formule de Hargreaves, où R_a est le rayonnement extraterrestre lié au couple latitude/longitude et au jour de l'année, T_x et T_n sont respectivement les températures maximale et minimale du jour.

Tous les modèles climatiques proposés sur le portail DRIAS sont associés au modèle hydrologique SIM2 de Météo-France pour obtenir de nouvelles variables qui dépendent des interactions entre le sol et l'eau. Les données initiales sont ainsi complétées par l'évapotranspiration réelle (ETR), l'équivalent en eau du manteau neigeux, deux variables d'écoulement (drainage et ruissellement), et l'indice d'humidité des sols SWI. Ces données sont disponibles sur un module différent du site (onglet 'Eau') et présentent une légère différence sur le découpage annuel, qui est effectué en années hydrologiques et non en années calendaires. Le changement d'année se fait alors entre juillet et août.

Les données du DRIAS peuvent ainsi être utilisées pour étudier le changement climatique en France.

2.2 Présentation des données climatiques utilisées et séparation de la zone étudiée en régions homogènes

2.2.1 Présentation des données climatiques et de la zone d'étude

L'objectif de ce chapitre est d'appréhender au mieux le changement climatique. Une vue plus globale du phénomène sera nécessaire avant de s'intéresser plus spécifiquement à la sécheresse dans le dernier chapitre. Cette première analyse permettra de saisir quels facteurs climatiques vont jouer sur l'humidité des sols.

Pour travailler sur le changement climatique, les données disponibles sur le portail DRIAS (*cf.* [2.1.2](#)) seront utilisées sur deux fenêtres temporelles de même longueur : 1975-2005 (période de référence, données « historiques ») et 2070-2100 (période de projection). L'approche retenue est d'abord d'analyser le climat de base sur la période de référence, puis celui futur en relevant au mieux les différences entre les deux.

Les données exploitées sont fournies avec un pas de temps journalier, et la France comporte 8 981 points sur la grille de simulation SIM2. La variabilité naturelle du climat impose d'analyser des périodes assez larges (souvent 30 ans en météorologie) afin de réellement saisir le climat en limitant l'influence de sa variabilité. Le volume de données devient donc très rapidement important, et l'interface du DRIAS limite chaque commande à 20 000 000 de lignes.

S'il était initialement prévu d'étudier la France entière, cette option a été écartée pour limiter le nombre de données, et donc le nombre de téléchargements à réaliser sur le portail. Le choix a été fait de restreindre géographiquement la zone d'étude, sur une partie du pays particulièrement exposée au changement climatique. Cela semble plus pertinent que de réduire la largeur des périodes de simulation ou le nombre de variables, puisque cela pourrait réellement altérer la qualité de l'analyse climatique.

L'étude se concentre donc sur les anciennes régions administratives Corse, PACA et Languedoc-Roussillon (respectivement 141, 495 et 435 points soit 1 071 points sur les 8 981). En effet, le bassin méditerranéen est régulièrement sujet d'alertes à l'échelle mondiale de la part des climatologues. Il pourrait être le théâtre d'un assèchement radical à cause du changement climatique. L'ensemble de ces trois régions sera par la suite abusivement désigné par bassin méditerranéen. La zone étudiée est sensible au péril RGA ; les régions PACA et Languedoc-Roussillon font partie du croissant argileux (voir figure 1.4).

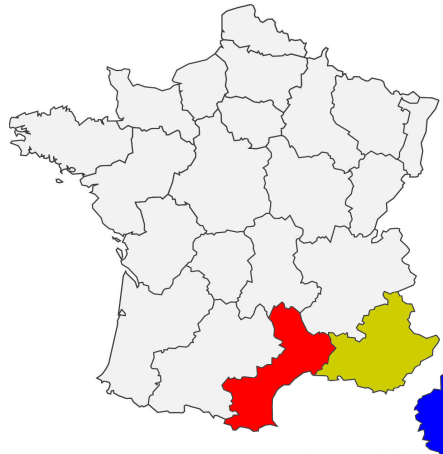


FIGURE 2.4 : Régions étudiées du territoire français.

Les données utilisées ici sont issues des simulations du modèle climatique CNRM-ALADIN63 - CNRM-CERFACS-CNRM-CM5 (couplé au modèle hydrologique SIM2), qui sera dénommé par la suite CNRM-Aladin. Ce modèle est retenu car il est le seul à ne pas sous-estimer l'effet aggravant de la baisse en concentration des aérosols sur le climat (en particulier, il fait partie des modèles avec une concentration en aérosols évolutive). Pour autant, ce n'est pas un modèle qui simule un très fort réchauffement comparé aux autres (voir figure 2.5).

Pour chacun des 1 071 points sont recensées, au pas de temps quotidien, 10 variables climatiques en plus des 6 variables qui identifient une ligne (la date avec jour, mois, année et la position géographique avec latitude, longitude et altitude) :

- les températures maximale, moyenne et minimale ($^{\circ}\text{C}$) ;
- les précipitations totales (mm) ;
- l'humidité de l'air (g/kg) ;
- l'évapotranspiration potentielle et réelle (mm) ;
- le drainage (mm) ;
- le ruissellement (mm) ;
- le SWI (utilisé dans le chapitre 3).

Si tous les points étudiés sont assez proches géographiquement parlant (dans le sud-est de la France), il n'en reste pas moins qu'ils n'ont pas tous le même climat. En effet, certains points sont en montagne (jusqu'à 2 700 m d'altitude), d'autres sur le littoral. La distinction entre climat

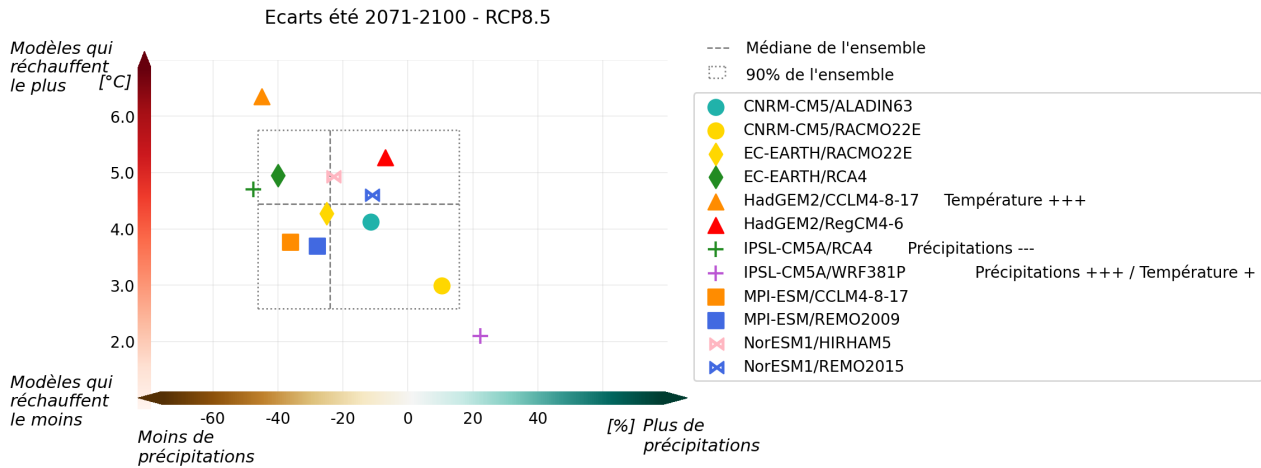


FIGURE 2.5 : Variations dans les températures et précipitations globales en saison estivale de fin de siècle pour les différents modèles disponibles sur le DRIAS. Source : [DRIAS](#).

méditerranéen et climat montagnard apparaît donc naturelle, par exemple en séparant deux zones selon une courbe de niveau basée sur une altitude seuil.

Procéder de la sorte négligerait le fait que le climat dépend d'autres paramètres que l'altitude, et les potentielles nuances climatiques.

Par ailleurs, un découpage géographique n'est pas forcément la meilleure option, puisque deux points proches peuvent avoir des différences assez nettes de climat. C'est notamment le cas en montagne, où les températures et précipitations sont très variables pour deux points situés sur les deux versants d'une même montagne (ubac *vs.* adret, versant au vent *vs.* versant sous le vent).

L'étude complète du climat sur les trois régions administratives montre certaines disparités, et il peut être judicieux de parfois regarder les phénomènes de façon agrégée, en regroupant les points qui ont le même climat (sur la période de référence).

Ce problème de *clustering* sera résolu avec la méthode de Classification Ascendante Hiérarchique (CAH). La faible rapidité de cette dernière n'est pas compatible avec le volume important des données climatiques. À partir des données utilisées pour l'analyse du climat dans les régions méditerranéennes sur la période de référence, une Analyse en Composantes Principales (ACP) sera réalisée. Celle-ci projettera les données sur un espace avec une dimension considérablement amoindrie en perdant le moins d'information possible, ce qui permettra l'utilisation de la CAH avec un temps de calcul très raisonnable.

2.2.2 Réduction du volume des données avec une ACP

Les données de départ sont globalement celles de la partie [2.3](#). Certaines variables qui ne sont pas véritablement caractéristiques d'un climat ont été exclues. Ainsi, pour chacun des 1 071 points de l'étude, les variables suivantes sont utilisées : températures moyennes, précipitations et humidité quotidiennes, puis latitude, longitude et altitude.

La période de référence comporte 10 958 jours, du 1^{er} août 1975 au 31 juillet 2005. Les données prennent ainsi la forme d'une matrice X de dimension $1\ 071 \times 32\ 877$. Ce tableau peut être lu de la

façon suivante :

- chaque ligne de X regroupe les relevés météorologiques d'un point et ses coordonnées ;
- chaque colonne de X donne pour un certain jour les valeurs prises par une variable climatique dans les différents points de simulation, ou bien des informations quant à la position de ces derniers.

La première étape de l'analyse en composantes principales est de standardiser X selon ses colonnes. Ces dernières forment l'ensemble $\{X^j | 1 \leq j \leq 32\ 877\}$. La matrice Y , de même dimension que X , est ainsi définie par colonne selon la formule [2.1](#)

$$\forall 1 \leq j \leq 32\ 877, Y^j = \frac{X^j - \mu_j}{\sigma_j}, \quad (2.1)$$

avec μ_j la moyenne de X^j et σ_j son écart-type. La matrice-variance de l'analyse est alors définie comme $V = Y^T Y$. Cette matrice est symétrique définie positive (car Y n'est pas triviale), donc diagonalisable. Ses valeurs propres (toutes positives) sont alors triées par ordre décroissant.

Le vecteur associé à la plus grande valeur propre est celui qui explique au mieux l'inertie du nuage de points initial, c'est-à-dire celui qui conserve le plus d'information. La seconde valeur propre est associée à un vecteur propre orthogonal au premier et qui explique au mieux l'inertie restante du nuage. Le processus peut se poursuivre de telle sorte qu'à l'arrivée les données sont parfaitement représentées. En notant λ_α les valeurs propres de V et ψ_α les vecteurs propres associés, on a :

$$V\psi_\alpha = \lambda_\alpha\psi_\alpha, \lambda_\alpha \geq 0. \quad (2.2)$$

$$\psi_{\alpha_1}^T \psi_{\alpha_2} = \mathbb{1}_{\{\alpha_1 = \alpha_2\}}. \quad (2.3)$$

L'objectif de l'ACP est de garder seulement quelques axes qui expliquent une forte partie de l'inertie du nuage. Ces axes sont dirigés par les vecteurs propres de la matrice V associés aux plus grandes valeurs propres. Les vecteurs propres sont appelés axes factoriels une fois qu'ils sont rendus unitaires. Les nouvelles coordonnées des points du nuage sur chaque axe sont appelées composantes principales.

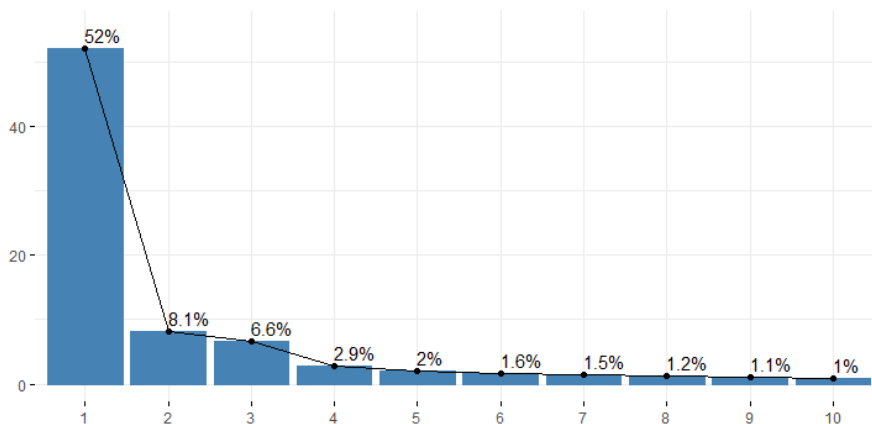


FIGURE 2.6 : Inertie expliquée par chaque axe factoriel

Il s'agit de réduire considérablement la dimension des données, ici 32 877 initialement, en perdant le moins d'information possible. La décomposition spectrale de la matrice V donne les résultats de la figure 2.6. Le premier axe factoriel explique environ la moitié de l'inertie du nuage. Il y a ensuite un décrochage, les deuxième et troisième axes ayant des inerties relatives de 8,1 et 6,6%. Les axes suivants sont ensuite moins importants, pesant moins de 3% de l'inertie totale à chaque fois.

Pour avoir un bon compromis entre qualité de représentation et faible volume, nous conservons les trois premiers axes factoriels, notés par la suite ψ_1, ψ_2, ψ_3 . Ainsi, pour chaque point de simulation, le climat « historique » n'est plus caractérisé que par 3 variables, combinaisons linéaires des 32 877 précédentes. Malgré cette réduction drastique de leur volume, les données ont conservé les deux tiers de leur information (66,7%).

Une rapide étude des contributions des variables à l'inertie de chacun des trois premiers axes factoriels permet de se faire une idée de ce à quoi ces derniers correspondent. La contribution de la variable j à l'inertie de l'axe α est simplement égale à $(\psi_\alpha)_j^2$, où $(\psi_\alpha)_j$ est la j^e coordonnée du vecteur ψ_α .

Pour le premier axe factoriel ψ_1 , les 15 variables à la contribution la plus forte sont toutes des températures. En revanche, avec une contribution par variable inférieure à 0,006% sur ce « Top 15 », les autres variables entrent forcément en jeu également et de façon non négligeable. L'addition de toutes les contributions des températures quotidiennes donne une contribution totale de 55%. Les précipitations ne participent que pour 4% à l'axe ψ_1 , les variables d'humidité de l'air pour 41%. **L'axe qui explique plus de la moitié de l'inertie du nuage de départ est donc basé sur les températures et l'humidité de l'air.**

Sur le second axe ψ_2 , la variable la plus contributive est la longitude. Mais avec une contribution de 0,03%, elle s'avère marginale par rapport aux autres variables qui suivent, toutes concernant l'humidité, si elles sont prises dans leur ensemble. Ainsi, la contribution globale de l'humidité au deuxième axe factoriel est de 50%. Les précipitations jouent également un rôle important avec un poids de 37% dans la constitution de ψ_2 , les températures sont plus en retrait avec 13%.

Pour le dernier axe factoriel retenu, les 15 variables les plus importantes (avec une contribution de 0,03%) sont toutes des variables de précipitations. Ces dernières sont concentrées entre janvier et août. Le même raisonnement que précédemment en agrégeant par variable montre que les précipitations sont importantes dans la construction de l'axe ψ_3 avec un poids de 46%, mais l'humidité également avec 40%. La contribution des variables de température n'est que de 14%.

L'ACP rend possible la représentation en 3D du climat historique pour les 1 071 points étudiés (figure 2.7). Graphiquement, deux masses semblent bien distinctes. La plus petite des deux est l'ensemble des points de Corse, caractérisée par une valeur faible sur le deuxième axe factoriel mais forte sur le troisième. L'autre groupe a une forme de « U » et rassemble les points de Languedoc-Roussillon et de PACA. Chacune de ces régions forme une barre du « U », la jonction étant constituée de points tous de très faible altitude.

Visuellement, des climats assez différents d'une région à l'autre sont identifiés, même si les zones littorales de PACA et Languedoc-Roussillon ont elles des climats très semblables. Un découpage plus scientifique va être réalisé selon la méthode CAH.

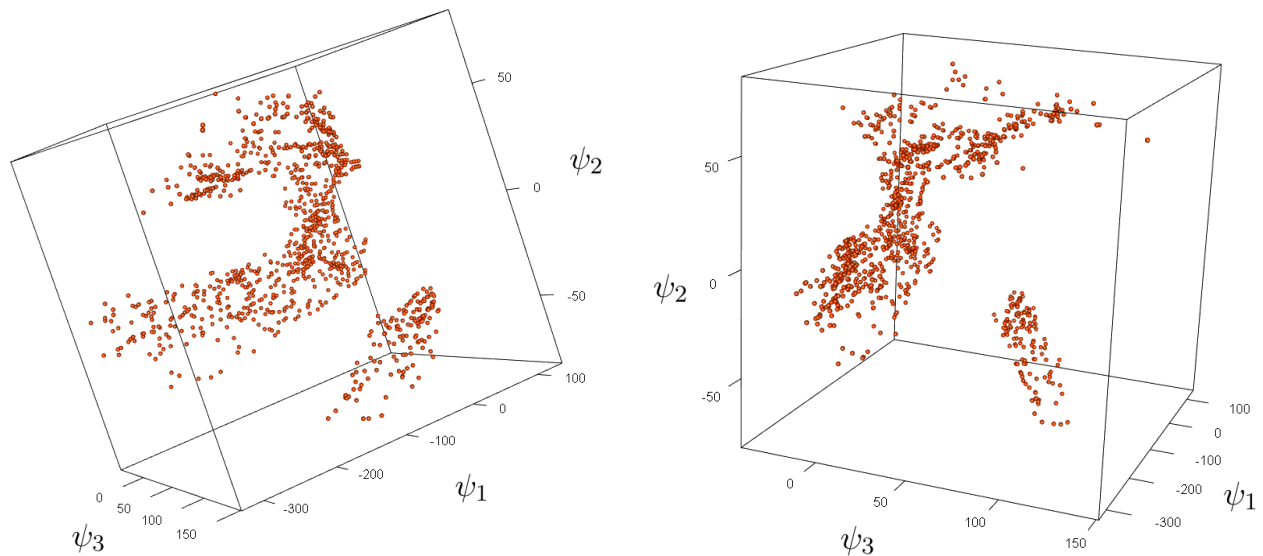


FIGURE 2.7 : Représentation du climat des 1 071 points après ACP.

2.2.3 Séparation des points en classes homogènes avec une CAH

La Classification Ascendante Hiérarchique (CAH) est une méthode de *clustering* très répandue. En partant d'une partition en singletons de l'ensemble de départ, les groupes sont agrégés deux à deux jusqu'à ne former qu'une unique classe regroupant tous les points. Une fois la hiérarchie faite, il faut sélectionner le nombre de classes. Il est souvent choisi visuellement à l'endroit d'un saut dans la perte d'homogénéité, c'est-à-dire dans la variance intra-classe (ou inter-classe).

Deux classes sont assemblées lorsqu'elles satisfont un critère d'optimalité, en l'occurrence une distance inter-classes à minimiser. Ce critère repose donc sur la définition d'une distance entre points, et d'une distance entre classes.

Pour calculer la distance entre deux points, les deux choix suivants sont ceux privilégiés dans la grande majorité des cas :

- la distance euclidienne, définition usuelle de la distance avec $d(x, y) = \sqrt{\sum_i (x_i - y_i)^2}$;
- la distance Manhattan, qui représente la distance (au sens euclidien) que l'on parcourrait d'un point à un autre en suivant les lignes d'un quadrillage, définie par $d(x, y) = \sum_i |x_i - y_i|$.

Sans motif spécifique justifiant l'utilisation de la distance Manhattan, la distance euclidienne sera privilégiée ici.

Il reste à définir la distance inter-classes D , qui mesure la proximité ou non de deux groupes de points. Ce n'est pas vraiment une distance au sens mathématique du terme comme l'est la distance inter-points, mais une mesure de dissimilarité. Pour deux ensembles A et B , les distances inter-classes usuelles sont par exemple :

- le **lien min** (ou simple), qui définit la distance entre les deux ensembles comme celle « au meilleur des cas » : $D(A, B) = \min_{a \in A, b \in B} d(a, b)$. L'usage de cette mesure a tendance à produire des groupes de forme allongée avec un effet de chaîne ;

- le **lien max** (ou complet), qui définit la distance entre les deux ensembles comme celle « au pire des cas » : $D(A, B) = \max_{a \in A, b \in B} d(a, b)$. L'usage de cette mesure permet des classes plus circulaires mais donne beaucoup d'importance aux points extrêmes ;
- le **lien moyen**, qui définit la distance entre les deux ensembles comme celle obtenue en moyenne : $D(A, B) = \frac{1}{\#A\#B} \sum_{a \in A, b \in B} d(a, b)$. Cette mesure donne autant d'importance à tous les points ;
- le **lien des centroïdes**, qui définit simplement la distance entre deux ensembles A et B comme celle entre les deux barycentres (respectivement g_A et g_B) : $D(A, B) = d(g_A, g_B)$. Cette mesure présente l'inconvénient d'utiliser les centres de gravité et non les points directement ;
- le **lien de Ward**, qui définit la distance entre les deux ensembles comme celle entre leurs barycentres avec une pondération par la taille : $D(A, B) = \frac{\#A \#B}{\#A + \#B} d(g_A, g_B)^2$. Ainsi définie, D mesure l'augmentation de la variance intra-classe pour une certaine agrégation. De ce point de vue, cette méthode peut paraître plus rigoureuse, ce qui explique qu'elle soit la référence dans cet exercice. En revanche, elle fait intervenir comme pour le lien centroïde les centres de gravité et non les points. Elle possède également l'inconvénient de biaiser fortement la séparation en grappes avec à peu près le même nombre d'éléments.

Compte tenu des observations précédentes sur le nuage représenté dans la figure 2.7, l'usage de certaines de ces distances est exclu.

Le lien min tout d'abord, puisqu'avec ce dernier aucun partitionnement ne fera des classes mélangeant Corse et continent. De plus, son utilisation exclurait certains points montagneux, ce qui n'est pas souhaitable.

La méthode des centroïdes ne sera pas utilisée non plus car l'usage des barycentres ne prend pas beaucoup de sens ici. En effet, le climat sur les trois régions étudiées ne forme clairement pas un ensemble convexe sur la représentation. En conséquence, un barycentre, en reflétant un climat moyen, pourrait en réalité illustrer un climat improbable sur la zone d'étude. Cette situation a d'autant plus de chances de se produire que l'on réduit le nombre de classes, or l'objectif est clairement ici de se retrouver avec un nombre faible de groupes.

Pour la même raison la méthode de Ward peut être écartée, d'autant plus qu'elle pousserait vers des groupes de même taille ce qui n'est pas forcément souhaitable ici. Il y a par exemple beaucoup plus de points en plaine qu'en montagne sur la zone d'étude, et la Corse compte beaucoup moins de points que les deux autres régions.

Les options du lien moyen et du lien max ont été étudiées plus en profondeur. Dans les deux cas, un découpage en deux classes est possible (plaine/montagne), mais celui-ci paraît trop simpliste. Un nombre de classes supérieur ou égal à trois est privilégié. Le lien complet propose également un découpage à quatre classes où la Corse joue un rôle similaire aux autres régions. Le lien moyen donne lui un climat à cinq classes qui sépare la Corse, découpée en deux zones, du continent, où les deux autres régions se partagent trois climats. Compte tenu des différences qui peuvent être observées au niveau du climat entre la Corse et les régions PACA et Languedoc-Roussillon (voir partie 2.3), **le lien moyen est préféré avec un découpage en cinq classes.**

Ces cinq *clusters*, sont représentés dans l'espace après ACP (figure 2.9), puis cartographiés pour en faciliter l'interprétation (figure 2.10).

La Corse est séparée en deux climats qui ne sont pas présents dans les autres régions de l'étude. Ces deux climats seront qualifiés simplement de **climats corse de plaine et de montagne**. En effet, le premier *cluster* regroupe des points dont l'altitude maximale est de 632 m (283 m en moyenne),

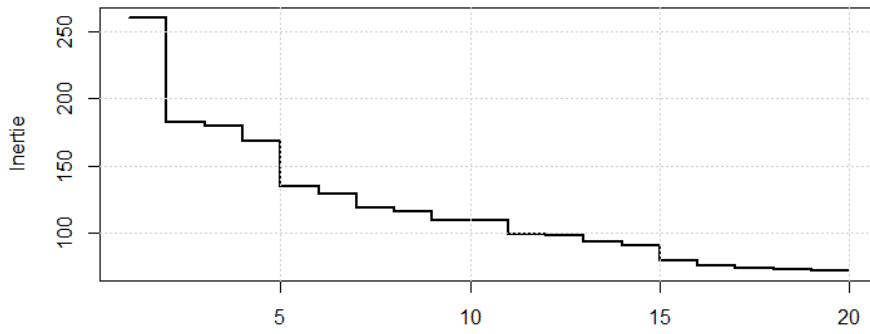


FIGURE 2.8 : Inertie en fonction du nombre de classes avec le lien moyen.

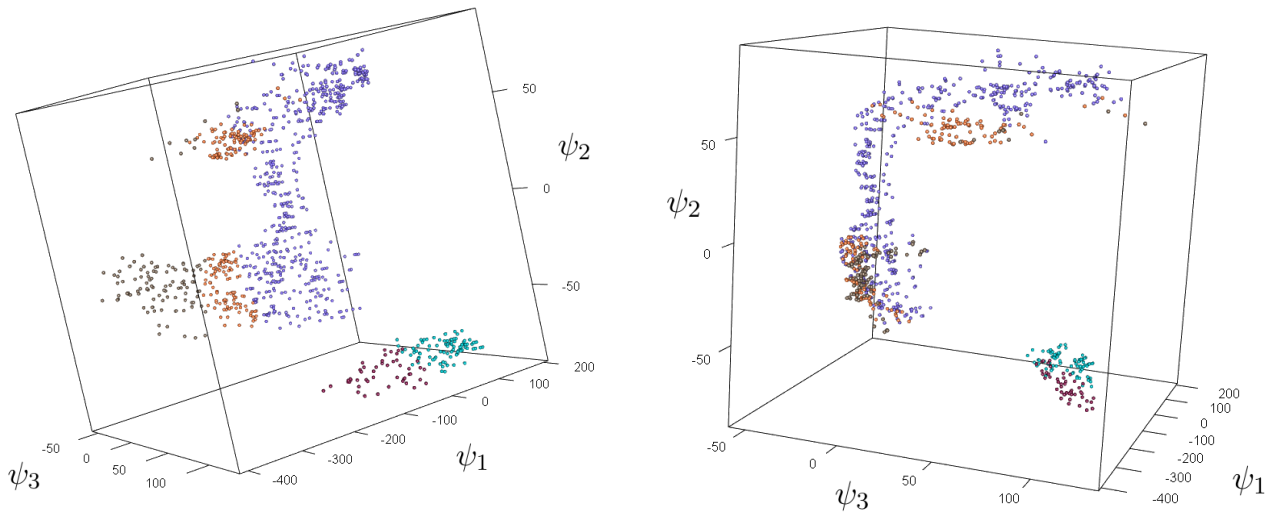


FIGURE 2.9 : Regroupement des 1 071 points en cinq groupes homogènes, vision espace ACP.

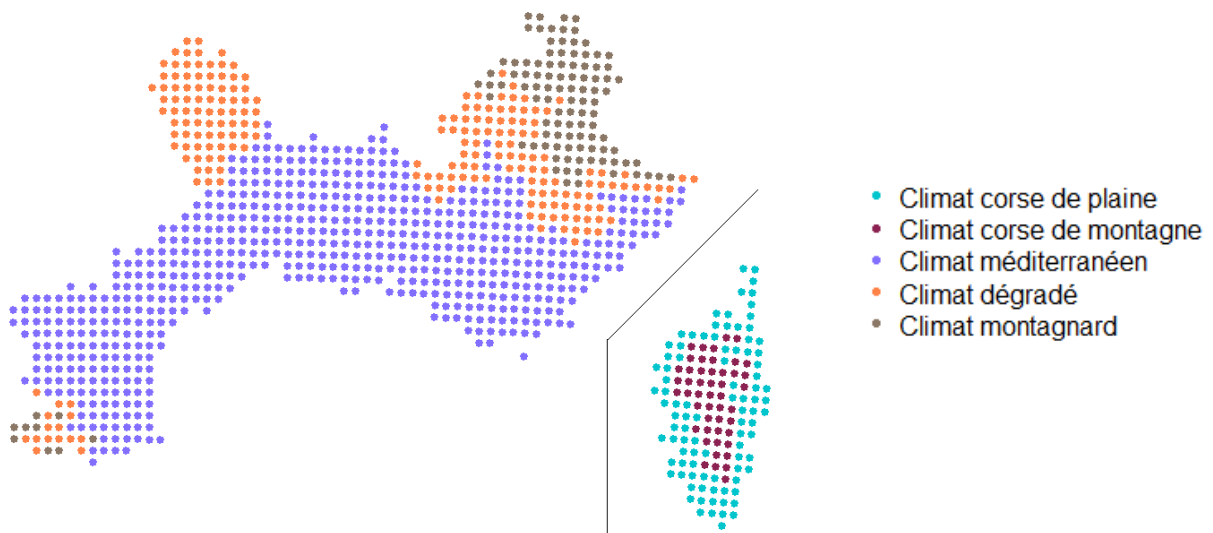


FIGURE 2.10 : Regroupement des 1 071 points en cinq groupes homogènes, vision cartographie de la grille.

alors que le point le plus bas rattaché au second groupe est à 600 m. En moyenne, les points au climat corse de montagne sont à 1 050 m d'altitude. Ils sont au nombre de 48 et situés dans le centre de la Corse, pour 93 rattachés au climat corse de plaine, localisé en périphérie de celui de montagne. La séparation entre Corse et continent, flagrante sur la figure 2.9, est expliquée par son insularité. La Corse est entourée par la Méditerranée, ce qui influence fortement son climat.

Les régions Languedoc-Roussillon et PACA sont elles divisées selon trois groupes homogènes en climat. Le premier regroupe 618 points (330 en Languedoc-Roussillon et 288 en PACA), soit une grande partie de ces deux régions. Le point le plus haut de cette classe culminant à 1 150 m, ce *cluster* ne peut être qualifié de plaine continentale. Mais avec une altitude moyenne de 313 m, cette région correspond au **climat méditerranéen**. La distribution de l'altitude des points de ce groupe est très similaire que l'on s'intéresse à ceux de la région PACA ou à ceux de Languedoc-Roussillon.

Le second groupe rassemble 204 points : 96 en Languedoc-Roussillon (dans les Cévennes et les Pyrénées-Orientales) et 108 en PACA (dans le sud des Alpes). Ils vont de 715 à 1 761 m d'altitude, avec une moyenne à 1 119 m. Plus des trois quarts de ces points sont sous la barre des 1 250 m. Les distributions par région de l'altitude des points concernés sont là encore homogènes. C'est donc une zone de moyenne montagne ce qui explique qu'elle a un **climat dégradé**, situé entre le climat méditerranéen des points plus bas et celui montagnard des points plus hauts.

En effet, le dernier groupe rassemble 108 points, en grande majorité dans les Alpes et de haute montagne. Ils vont de 1 428 à 2 716 m d'altitude, avec une moyenne supérieure à 2 000 m. La région PACA compte 99 points rattachés à ce *cluster*, contre 9 en Languedoc-Roussillon, plus précisément dans les Pyrénées-Orientales. Ces points sont donc exposés à un **climat montagnard** et l'influence de la Méditerranée y est moins nette.

2.3 Climat historique des régions méditerranéennes françaises

Caractériser au mieux le climat historique au sein des régions Corse, PACA et Languedoc-Roussillon permettra dans un second temps de mieux appréhender l'évolution à prévoir pour la fin de siècle dans un scénario pessimiste .

Le modèle climatique utilisé ici est CNRM-Aladin. Pour obtenir des résultats plus cohérents avec le climat actuel tout en gardant une profondeur d'historique suffisante (30 ans), les premières années proposées sur le portail DRIAS (cf. 2.1.2) sont exclues. La période d'étude est la suivante : du 1^{er} août 1975 au 31 juillet 2005.

Les données étant téléchargées par région sur le site du DRIAS, 6 tableaux sont exploités (3 régions et 2 périodes d'étude pour chacune d'entre elles) de 15 colonnes. En réalité, la limite de volumétrie imposée lors de la commande des données requiert de multiplier les téléchargements. De la liste de variables présentée en 2.2.1, seul le SWI est exclu puisqu'il sera étudié ultérieurement comme mesure de sécheresse.

La volumétrie des données « historiques » est la suivante : 1 545 078 lignes pour la Corse, 4 766 730 pour le Languedoc-Roussillon et 5 424 210 pour PACA. Ces lignes correspondent aux données quotidiennes pour chaque point sur les 10 958 jours constituant la période d'étude.

2.3.1 Températures

Sur l'ensemble de la période de référence, les températures moyennes régionales sont les suivantes : 10,2°C en PACA, 11,9°C en Languedoc-Roussillon et 13,1°C en Corse. Cela donne une température moyenne sur le bassin méditerranéen de 11,3°C. La différence de température entre régions s'explique notamment par leurs différences de climat illustrées en [2.10](#).

En se basant sur le découpage en cinq zones, la température moyenne est de 14,5°C pour le climat corse de plaine et 10,4°C pour celui de montagne. Le climat méditerranéen, qui regroupe plus de la moitié des points étudiés, a une température moyenne de 13,2°C. Le contraste est net avec le climat montagnard et sa moyenne de 3,6°C. Le climat dégradé se situe logiquement entre les deux avec 8,1°C.

Les trois régions sont toutefois proches sur les températures maximales simulées : 42,8°C en PACA, 41,6°C en Corse et 42,7°C en Languedoc-Roussillon. En s'intéressant aux records de froid, des écarts sont en revanche relevés : -14,1°C en Corse contre -22,2°C en Languedoc-Roussillon et même -27,0°C en PACA. Ces températures extrêmement basses peuvent déconcerter, mais elles s'expliquent par l'altitude. Les points les plus élevés par région sont respectivement à 1 747 m en Corse, 2 420 m en Languedoc-Roussillon et 2 716 m en PACA.

Une approche possible pour analyser des températures brutes comme ici est de corriger l'effet de l'altitude sur la température, soit ajouter 6,5°C par kilomètre d'altitude de façon linéaire selon le modèle atmosphérique ISA. Cela corrige les températures les plus basses à -6,9°C en Corse, -14,9°C en PACA et -13,4°C en Languedoc-Roussillon. Encore une fois, si ces températures semblent extrêmement froides, elles sont bien pertinentes. En 1956, une vague de froid exceptionnelle venue de Sibérie a été responsable de la plupart des records de froid de la région : par exemple -17°C ont ainsi été relevés à Montpellier, pourtant une ville littorale, et -28°C au Mont Aigoual dans les Cévennes.

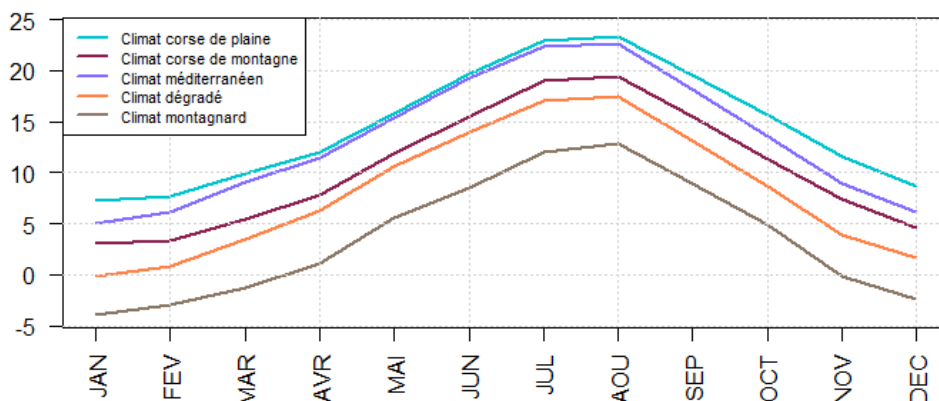


FIGURE 2.11 : Températures normales mensuelles (en °C) obtenues par zone climatique sur l'« historique ».

Pour les cinq zones climatiques, le schéma des températures mensuelles normales au cours de l'année est le même (figure [2.11](#)). Elles suivent une pente ascendante de janvier à juillet, se stabilisent au mois d'août avant un déclin marqué jusqu'à la fin de l'année. Les variations sont relativement homogènes entre les cinq climats. Les écarts-types des cinq séries de normales saisonnières sont assez

proches les uns des autres. La Corse bénéficie cependant de températures particulièrement douces, en janvier et février notamment.

Les températures varient de façon importante en fonction des saisons, mais les fluctuations inter-annuelles sont mesurées comme l'illustre la figure 2.12). Toujours sur ce graphique, une tendance au réchauffement est particulièrement visible. Cette observation est exacerbée par la valeur anormalement faible prise par l'année 1975. La période 1975-1985 est en fait même froide dans sa globalité en comparant avec les années précédentes.

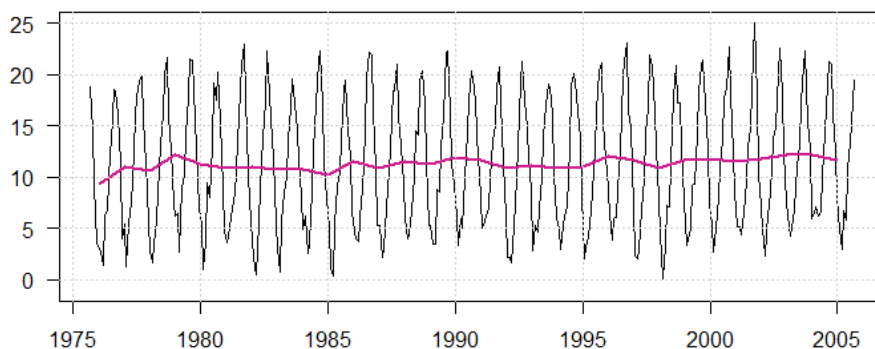


FIGURE 2.12 : Séries mensuelle et annuelle des températures moyennes (en °C) dans le bassin méditerranéen sur l'« historique ».

Le réchauffement de 1951 à 2005 a en effet fait l'objet d'une brève étude en annexe B. Là où un réchauffement de l'ordre de $0,2^{\circ}\text{C}$ était observé entre les périodes 1951-1975 et 1976-2005, il se rapproche de $+1^{\circ}\text{C}$ en comparant 1975-1985 à 1995-2005. La température moyenne sur le bassin méditerranéen passe alors de $10,8$ à $11,7^{\circ}\text{C}$. Si ces chiffres semblent être la cause de fluctuations d'échantillonnage du fait de la variabilité du climat, il faut néanmoins souligner que la tendance observée en réalité est bien à un réchauffement depuis le début de l'ère industrielle. Celui-ci s'est d'ailleurs considérablement accéléré à la fin des années 1970 et semble poursuivre à vitesse constante depuis (voir illustration 2.13).

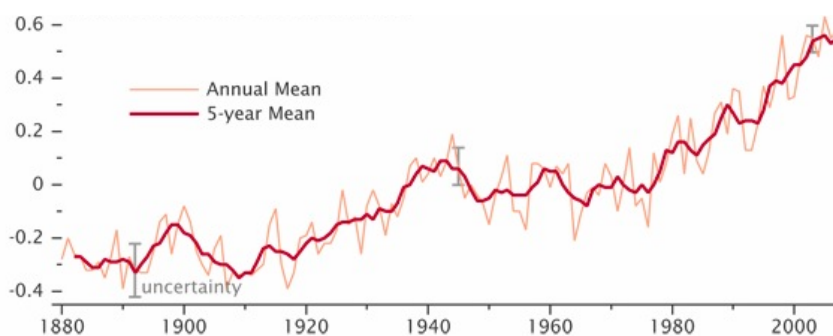


FIGURE 2.13 : Observations historiques de la température terrestre annuelle et moyenne glissante sur 5 ans. Source : NASA.

2.3.2 Précipitations

Les précipitations représentent le seul apport d'eau dans le sol. Elles sont donc primordiales quant à leur humidité. Les précipitations sont ici exprimées selon la hauteur d'eau en millimètres, c'est à dire en litres au mètre carré.

La pluviométrie annuelle « historique » est en moyenne de 954 mm en Corse et 934 mm en Languedoc-Roussillon. Elle est moins importante en PACA avec 883 mm. Sur l'ensemble de la zone étudiée, ce sont donc en moyenne 913 mm de précipitations par an qui sont simulés de 1975 à 2005.

Les précipitations sont globalement croissantes avec l'altitude. Là où les précipitations annuelles sont de 843 mm pour le climat corse de plaine et 835 mm pour le climat méditerranéen, on obtient 1 171 mm pour le climat corse de montagne et 1 114 mm pour le climat montagnard sur le continent. Les points affectés au climat dégradé reçoivent en moyenne 1 014 mm de pluie par an.

Sur une journée, les précipitations maximales observées sont de 177 mm en PACA et 246 mm en Languedoc-Roussillon. En Corse, le seuil des 30 cm est dépassé sur un seul jour de la simulation mais sur plusieurs points. Le maximum est alors de 355 mm.

Par rapport au climat océanique, majoritaire en France, le climat méditerranéen amène plus ou moins la même quantité de précipitations mais celles-ci sont nettement moins bien réparties dans l'année. Il y a ainsi un plus faible nombre de jours de pluie par an dans le bassin méditerranéen que dans le reste de la France.

La normale « historique » est de 128 jours de pluie par an pour le groupe de points au climat méditerranéen. C'est nettement moins que pour les autres points continentaux de la zone d'étude (163 jours pluvieux pour le climat dégradé comme le climat montagnard). Les données pour la Corse vont dans le même sens mais la pluie y est plus fréquente (148 jours par an en plaine contre 169 en montagne). La moyenne sur tous les points étudiés est de 142 jours de pluie par an.

Le modèle climatique simule cependant parfois de très faibles précipitations qui ne pourraient être relevées en station. En-dessous de 0,2 mm, on parle ainsi seulement de traces de pluie. Différentes normes coexistent pour définir la limite à partir de laquelle un jour est considéré comme pluvieux.

En se restreignant aux pluies qui dépassent 1 mm sur une journée, le nombre de jours de pluie par an baisse considérablement. Sur le continent, il passe à 83 pour le climat méditerranéen, 117 pour le climat montagnard et 114 pour le climat dégradé. En Corse, ce sont en moyenne 110 jours de « vraie » pluie qui sont relevés en moyenne en montagne et 87 en plaine.

Par rapport aux températures, les précipitations d'une année à l'autre sont très fluctuantes. La moyenne annuelle sur le bassin méditerranéen pour les 30 ans de données varie ainsi de 686 à 1 191 mm. Caractéristiques du climat méditerranéen, on retrouve dans les données « historiques » des périodes très pluvieuses. Ainsi, la Corse dépasse deux fois (à chaque fois en septembre) le seuil mensuel des 400 mm de pluie en moyenne régionale. C'est nettement plus que les 117 mm attendus normalement. À l'inverse, toujours en Corse, le mois de septembre le plus sec dans les données n'a engendré que 8 mm de pluie.

Les mois les plus pluvieux sont ceux de fin d'année, à partir de septembre (figure 2.14). En Corse, de plus fortes variations sont observées dans les normales entre mois secs et pluvieux que dans les autres régions étudiées. L'écart-type mesuré sur la série des 12 normales est de 32 mm pour le climat corse de plaine et 42 mm pour le climat corse de montagne, contre 21 à 23 mm pour les autres *clusters*.

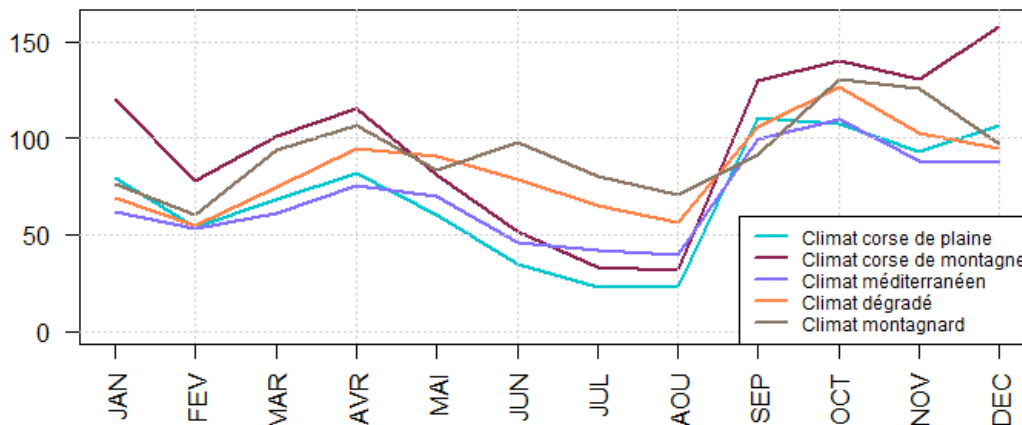


FIGURE 2.14 : Précipitations normales mensuelles (en mm) obtenues par zone climatique sur l'« historique ».

2.3.3 Humidité

L'humidité est ici celle de l'air proche du sol (à 2 m), et exprimée en grammes d'eau par kilogramme d'air. Sur les données « historiques », elle s'établit en moyenne à 7,4 g/kg en Corse, 6,3 g/kg en PACA et 6,9 g/kg en Languedoc-Roussillon.

L'homogénéité est très nette lorsque l'on regarde l'humidité maximale relevée dans chaque région : 19,2 g/kg en Corse et en PACA, 19,3 en Languedoc-Roussillon. Les différences sont plus notables en regardant les plus petites valeurs, si l'on raisonne en écarts relatifs. En effet, le minimum est de 0,2 g/kg en PACA, le double en Languedoc-Roussillon et 0,7 g/kg en Corse.

Ces différences peuvent s'expliquer par le fait que les plus faibles valeurs proviennent des points les plus élevés (en saison hivernale), et la région PACA est celle qui dispose des points les plus hauts entre les trois. Des points sont également en haute altitude en Languedoc-Roussillon, mais aucun en Corse ne dépasse les 1 800 m. À l'inverse, les valeurs maximales d'humidité sont obtenues en saison estivale sur des points de bord de mer.

Tout cela s'explique en grande partie par la corrélation positive qu'il y a entre l'humidité de l'air et sa température. Plus l'air est chaud, plus il peut contenir d'eau. Lorsque l'air arrive à saturation en eau, cette dernière se condense et des gouttes se créent. C'est ce processus qui est à l'origine de la formation des nuages.

Cette explication aide à interpréter les moyennes d'humidité relevées par *cluster*. Elles vont de 4,5 g/kg pour le climat montagnard à 8,0 g/kg pour le climat de plaine corse. Le climat méditerranéen se situe à 7,2 g/kg et le climat dégradé à 5,9 g/kg. Pour les montagnes corses l'humidité moyenne est de 6,4 g/kg.

Les courbes d'humidité annuelle à l'échelle régionale ont, malgré des tracés bien distincts, des fluctuations quasi-identiques. Ainsi, une très forte corrélation positive est visible entre les différentes régions au niveau de l'humidité. Elle est de 94% entre la région PACA et les deux autres régions, et légèrement plus faible (86%) entre la Corse et le Languedoc-Roussillon.

L'humidité de l'air est également sujette à une forte saisonnalité, dont la forme sur une année reprend celle des températures. Cela se retrouve dans les normales mensuelles, où le passage d'une zone climatique à une autre ressemble à un décalage vertical de la courbe, qui conserve toujours une

forme en cloche. Une rapide étude des écarts-types des différentes séries des 12 normales montre que l'humidité varie cependant moins dans les zones montagneuses qu'en plaine, que ce soit pour la Corse (2,1 contre 2,6 g/kg) ou pour le continent (1,8 contre 2,4 g/kg). Cette plus faible volatilité en altitude s'explique en grande partie par l'humidité plus faible qui y est observée.

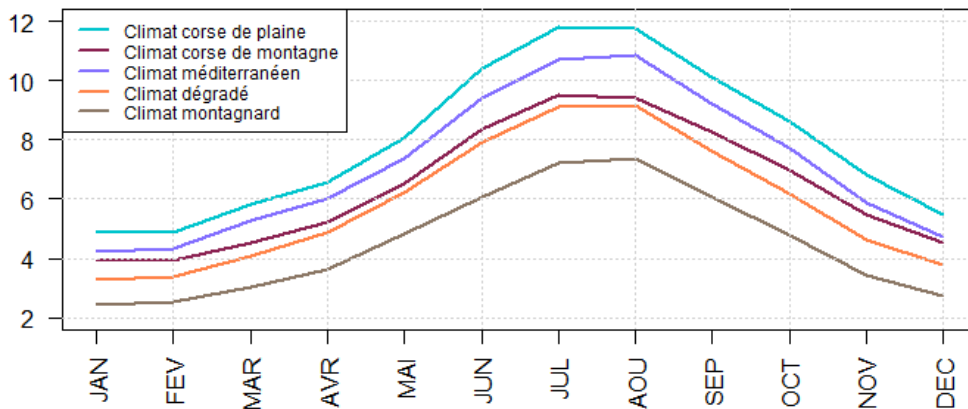


FIGURE 2.15 : Normales mensuelle d'humidité de l'air (en g/kg) obtenues par zone climatique sur l'« historique ».

2.3.4 Évapotranspiration potentielle

L'évapotranspiration potentielle simulée entre 1975 et 2005 est en moyenne de 856 mm par an, plus précisément 817 mm en Corse, 852 mm en PACA et 872 mm en Languedoc-Roussillon. Si ces valeurs restent comparables, de vraies différences sont relevées sur les valeurs extrêmes. Au maximum, l'ETP journalière est de 9,5 mm en Corse contre 12,7 mm en PACA et 12,3 mm en Languedoc-Roussillon. La Corse va moins loin dans les extrêmes que les deux autres régions puisque la borne inférieure y est de 0,1 mm contre 0,01 mm en PACA et encore moins en Languedoc-Roussillon.

Si l'on s'intéresse aux groupes homogènes de points, l'ETP annuelle moyenne est de 941 mm pour le climat méditerranéen, 757 mm pour le climat dégradé et 605 mm pour le climat montagnard. L'ETP étant croissante avec la température, sa diminution avec l'altitude est plutôt logique. La même tendance est observée pour la Corse avec une ETP annuelle de 867 mm en plaine contre 721 mm en montagne.

À l'échelle du bassin méditerranéen, l'ETP annuelle varie de 793 à 923 mm. L'amplitude de l'ETP annuelle est donc bien moins importante que celle des précipitations, qui était d'environ 500 mm.

La corrélation positive est observable sur les séries régionales de l'ETP annuelle (figure 2.16), mais elle est toutefois moins parfaite que pour l'humidité. En effet, elle est de 62% entre Languedoc-Roussillon et Corse. L'ETP annuelle en PACA est quant à elle corrélée à 80% avec celle en Corse et à 87% avec celle de la région Languedoc-Roussillon.

L'ETP admet une saisonnalité qui ressemble à celle des températures et de l'humidité. Sur les normales mensuelles, les variations d'un mois à l'autre sont légèrement atténuées en Corse par rapport au continent. L'écart-type entre les 12 normales de saison est ainsi de 38 mm pour le climat de plaine corse, contre 46 mm pour le climat méditerranéen. Visuellement, les courbes ont la même forme en cloche que pour l'humidité (figure 2.15) mais ici elles peuvent se croiser symétriquement en début et

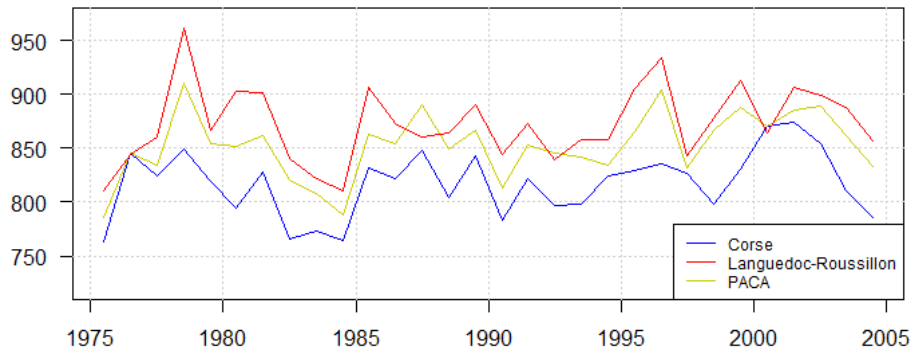


FIGURE 2.16 : ETP annuelle (en mm) par région sur l'« historique ».

en fin d'année. L'ETP est logiquement plus forte dans les régions plus chaudes, c'est-à-dire ici pour le climat méditerranéen et le climat corse de plaine.

2.3.5 Évapotranspiration réelle

La variable d'évapotranspiration réelle représente les flux d'eau de la surface vers l'atmosphère. Si elle est pour la quasi-intégralité le fait de l'évaporation de l'eau au niveau du sol et de la transpiration végétale, d'autres phénomènes rentrent en jeu dans son calcul, par exemple la sublimation de la neige.

L'ETR est simulée à hauteur de 553 mm par an dans le bassin méditerranéen entre 1975 et 2005. Une plus forte ETR est constatée en Languedoc-Roussillon (580 mm) qu'en Corse et PACA (respectivement 543 et 532 mm). Les séries annuelles par région de l'ETR témoignent d'une corrélation positive nette mais imparfaite comme pour l'ETP. Les coefficients de corrélation varient ainsi de 62 à 69% selon les régions choisies.

Au niveau des cinq *clusters*, l'ETR moyenne par an va de 470 mm pour le climat montagnard à 593 mm pour le climat dégradé. L'ETR du climat méditerranéen est donc en moyenne annuelle plus faible que pour le climat dégradé, avec 557 mm. C'est le contraire de ce qui avait été noté pour l'ETP.

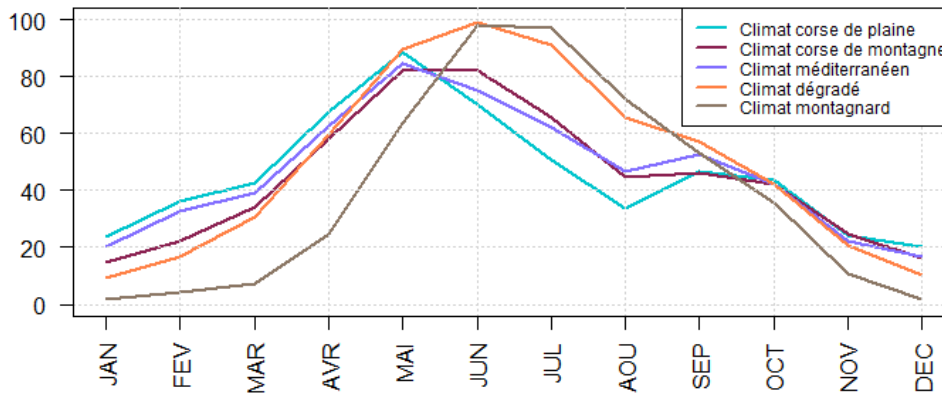
Il peut être intéressant de comparer directement ces valeurs avec celles obtenus précédemment pour l'ETP avec le rapport ETR/ETP, directement calculé ici sur les moyennes annuelles. Ce rapport est de 63% pour le climat corse de plaine et 59% pour le climat méditerranéen. Il est plus grand pour les *clusters* qui regroupent des points plus élevés : 74% pour le climat corse de montagne, 78% pour les climats montagnard et dégradé. Cet écart doit s'interpréter comme une plus grande sécheresse des sols dans les zones de plaine.

Pour valider cela, une étude des normales mensuelles peut être effectuée. Ces dernières sont illustrées dans la figure 2.17a. Graphiquement, les motifs sont plus complexes que pour l'ETP. La seule région qui conserve la forme de cloche visible pour l'ETP est le climat dégradé, celui qui a l'ETR la plus forte à l'année. Le maximum est cependant atteint plus tôt dans l'année que pour l'ETP, avec 99 mm en juin. Le fait que l'ETR décroisse ensuite, ce qui est contraire aux variations de l'ETP, montre l'état de sécheresse des sols.

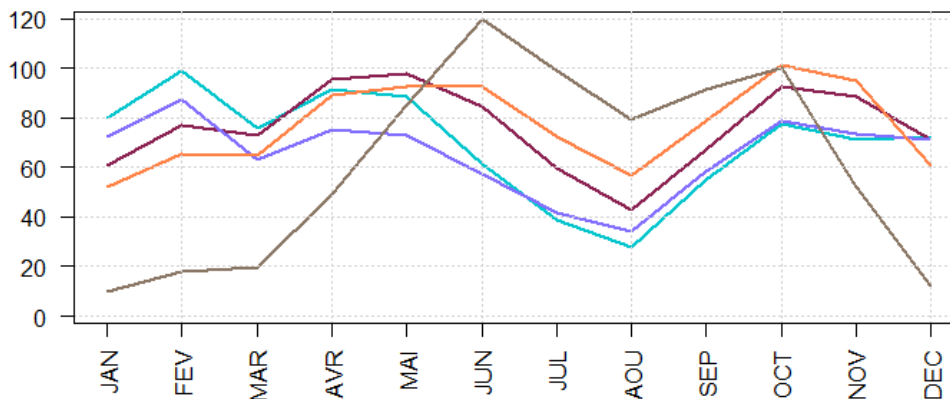
Pour le climat montagnard, l'ETR est extrêmement faible de novembre à mars. Ceci peut être facilement expliqué par les températures moyennes négatives à cette période (cf. figure 2.11). Dans cette situation, l'eau s'évapore beaucoup moins et reste souvent piégée à l'état solide. La sublimation de la neige lors des périodes plus chaudes n'est pas étrangère à la forte ETR visible pour ces mois-là

dans le climat montagnard, qui peut même dépasser l'ETP (rapport ETR/ETP supérieur à 100% dans la figure 2.17b).

Pour les climats corse de plaine et méditerranéen, les normales mensuelles ont un aspect bimodal. La baisse de l'ETR visible entre mai et août témoigne de la sécheresse habituelle des sols à cette période. Cela se traduit par un rapport ETR/ETP qui descend pour le mois d'août à 34% pour le climat méditerranéen et même 28% pour le climat corse de plaine (figure 2.17b). Le climat corse de montagne se situe entre ces deux climats de plaine et celui dégradé au niveau de la forme de la courbe.



(a) Normales mensuelle d'évapotranspiration (en mm) sur l'« historique ».



(b) Rapport (en %) entre normales mensuelles d'évapotranspiration réelle et potentielle sur l'« historique ».

FIGURE 2.17 : Normales mensuelle d'évapotranspiration par zone climatique sur l'« historique » et rapport avec les normales d'évapotranspiration potentielle.

L'ETR peut prendre des valeurs négatives, jusqu'à -2 mm par jour ici. Ces valeurs négatives signifient qu'il y a également des flux d'eau de l'air vers le sol hors précipitations. En particulier ils sont ici plus importants que l'évaporation et la transpiration notamment. Lorsque la température se refroidit rapidement la nuit, l'air peut arriver à saturation en eau. Celle-ci se condense alors, formant la rosée. Dans ce cas, c'est bien le phénomène inverse à celui d'évaporation qui se produit. Dans des conditions froides où l'évapotranspiration est quasi-nulle, la variable ETR peut donc descendre sous 0.

À l'opposé, l'ETR peut atteindre 15 mm pour une seule journée. C'est au-dessus du maximum atteint par l'ETP. Bien que contre-intuitive, cette situation est en fait possible puisque l'ETP fait l'hypothèse d'un couvert végétal bas et continu, assimilable à du gazon. La transpiration est alors bien moins importante qu'avec des arbres. Ce n'est pas le cas de l'ETR, ce qui explique ce décalage visible

lorsque les sols sont très humides.

2.3.6 Drainage

Le drainage correspond à l'infiltration de l'eau du sol dans le sous-sol par gravité. Tout comme l'évapotranspiration, cela vient diminuer la quantité d'eau présente dans les sols superficiels. Pour que le drainage soit fort, il faut d'abord que les sols soient saturés en eau. L'intensité du drainage dépend ensuite de la nature du sol. Les sols argileux responsables du péril RGA sont par exemple plus prompts à retenir l'eau que les sols sableux.

Sur l'ensemble de la zone étudiée, ce sont en moyenne 232 mm d'eau qui traversent le sol par an. Ce nombre cache des valeurs journalières étalées, de 0 à 137 mm.

Le drainage sur l'« historique » est croissant avec l'altitude, tout comme les précipitations. Le climat méditerranéen a ainsi une normale annuelle de 189 mm contre 268 mm pour le climat dégradé et 315 mm pour le climat montagnard. La même observation peut être faite sur la Corse, mais le niveau de drainage y est plus important. Ce sont en effet 481 mm qui partent dans le sous-sol par an pour le climat corse de montagne, et 211 mm en plaine corse.

Les régions montagneuses de Corse ont donc un drainage très fort, qui pèse pour 41% des précipitations. Cette valeur est comprise entre 23 et 28% pour les quatre autres groupes de points.

L'étude du drainage annuel pour les différentes régions entre 1975 et 2005 montre une corrélation positive mais imparfaite entre ces dernières. La région PACA est corrélée sur cette variable à 68% avec la Corse et 62% avec le Languedoc-Roussillon. Ce coefficient tombe à 46% entre ces deux dernières régions.

La courbe des 12 normales mensuelles de drainage forme une parabole orientée vers le haut pour les climats corse de plaine et méditerranéen. Les mois de janvier et décembre sont ceux avec les plus grandes valeurs, supérieures à 30 mm. Le creux se situe en août avec seulement 0,4 mm de drainage en moyenne sur les points du climat corse de plaine.

Pour le climat corse de montagne, la forme de la courbe est légèrement différente. Les normales présentent également une forme parabolique mais seulement entre avril et décembre, et avec une pente beaucoup plus marquée. Sur l'hiver, le drainage est à un niveau haut. Le climat dégradé se place alors en intermédiaire entre ce climat et ceux de plaine décrits précédemment.

Enfin, le climat montagnard donne une forme radicalement différente des autres. Contrairement aux autres climats étudiés, le drainage est ici faible de décembre à mars. Cette différence peut s'expliquer par la nature des précipitations, essentiellement neigeuses, qui restent donc en surface et ne traversent le sol qu'en faible proportion. Un pic est ensuite atteint en mai avec un drainage normal de 91 mm. À partir de ce point, la courbe reprend la forme classique parabolique pour descendre en août jusqu'à 5 mm, puis remonter jusqu'en octobre.

Les remarques évoquées juste avant sur le climat montagnard se confirment en rapportant les normales mensuelles de drainage à celles de précipitations. Pour les trois mois d'hiver, le rapport se situe autour de 10%. À l'inverse, en pleine fonte des neiges, il peut être supérieur à 100%. C'est le cas au mois de mai, où le drainage moyen représente 109% des précipitations normales. Le rapport évolue de façon beaucoup plus régulière pour les autres climats, toujours avec un creux en août et un maximum atteint en décembre-janvier.

La variabilité dans les normales mensuelles du drainage est donc beaucoup plus forte en altitude.

L'écart-type est de 26 mm pour le climat montagnard et 29 mm pour le climat corse de montagne. Les autres zones climatiques ont en comparaison un écart-type entre 12 et 15 mm.

2.3.7 Ruissellement

Le ruissellement représente également une perte des précipitations. Il intervient lorsque l'eau reste à la surface et ne pénètre pas le sol. Le ruissellement est en moyenne de 128 mm par an sur l'ensemble de la zone étudiée.

Ce total peut en fait être dépassé sur un jour : le ruissellement maximal simulé est de 180 mm. Un fort ruissellement implique des inondations. En regardant les conditions climatiques qui apportent des ruissellement extrêmement forts, ce sont des épisodes de fortes précipitations mais le ruissellement d'un jour donné peut être plus important que les pluies du même jour. Cela est dû à la circulation de l'eau ruisselante par gravité (typiquement qui descend la vallée).

En distinguant par région climatique, les moyennes annuelles de ruissellement sont de 89 mm pour le climat méditerranéen, 152 mm pour le climat dégradé et 329 mm pour le climat montagnard. Le ruissellement est plus modéré en Corse avec 82 mm par an en plaine et 155 mm en montagne. Si les régions de montagne sont plus pluvieuses qu'en plaine (cf. partie 2.3.2), cela n'explique pas ces différences. En effet, le rapport entre ruissellement annuel moyen et précipitations annuelles moyennes est de 30% dans la climat montagnard contre 11% pour le climat méditerranéen.

Une relation positive existe donc entre ruissellement et altitude. Celle-ci cache en fait l'influence de la pente sur le ruissellement. Les zones montagneuses ont un profil plus escarpé que les régions de plaine, et l'eau a tendance naturellement à s'écouler sur la surface d'un sol en pente. La vitesse de l'eau est alors croissante avec la pente, et plus celle-ci est grande moins le sol peut absorber l'eau en surface. Inversement, la végétation ralentit l'écoulement de l'eau en faisant obstacle, et favorise donc l'infiltration de l'eau dans le sol.

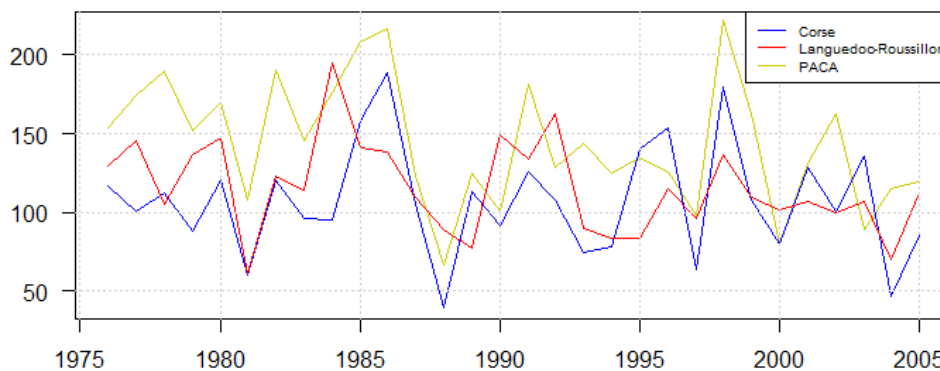


FIGURE 2.18 : Ruissellement annuel (en mm) à l'échelle régionale sur l'« historique ».

En regardant les séries annuelles de ruissellement par climat (figure 2.18), on note une fois de plus une corrélation positive mais imparfaite. Elle vaut 40% entre la Corse et le Languedoc-Roussillon. La région PACA est corrélée au niveau du ruissellement annuel à 66% avec la Corse et 50% avec le Languedoc-Roussillon.

La spécificité du climat montagnard sur le ruissellement se retrouve sur ses normales mensuelles. Elles sont très fortement croissantes en début d'année, allant jusqu'à dépasser le seuil de 100 mm pour le mois d'avril. Le ruissellement est alors aussi important que les précipitations. Le déclin est ensuite

fort jusqu'en juin. Encore une fois, la fonte des neiges et la pente expliquent cette observation.

Les formes des courbes de normales pour les quatre autres climats sont assez similaires entre elles, et beaucoup plus plates. Les normales mensuelles restent toutes sous les 30 mm, et le minimum est observé en juillet-août, lorsque les précipitations sont minimales.

Cette singularité du climat montagnard par rapport aux autres se retrouvent dans l'écart-type entre les normales mensuelles, qui est ici de 31 mm contre 4 à 9 mm pour les autres zones.

2.4 Description du climat de fin de siècle dans un scénario pessimiste et analyse des évolutions

Cette partie fait l'analyse du climat futur pour la même zone géographique, et s'attache à étudier au mieux les évolutions par rapport aux données de la période de référence illustrées en [2.3](#).

Les projections sont à horizon de temps lointain avec le scénario *business as usual* afin de voir au mieux les effets du changement climatique sur la base des données disponibles. Ce choix permet également de se démarquer des études moyen-terme déjà menées : MONCOULON et al. ([2018](#)), CCR ([2015](#)), FFA ([2015](#)), COVÉA ([2022](#)). La période d'étude, toujours de 30 ans, s'étend du 1^{er} août 2070 au 31 juillet 2100.

Cela signifie que la comparaison à venir n'est pas celle entre le climat actuel et le climat en 2100, mais bien entre le climat de la fin du XX^e siècle et de la fin du XXI^e, dans un scénario pessimiste.

L'étude du climat actuel est rendue complexe par le changement rapide du climat et la variabilité de celui-ci. C'est encore davantage le cas avec les données disponibles sur le site du DRIAS puisque les années ultérieures à 2005 font l'objet de trajectoires socio-économiques. Si ces scénarios qui divergent au fur et à mesure du temps sont proches les premières années, l'évolution de plus en plus rapide du climat fait qu'une étude des données entre 2006 et 2022 ne reflètera pas vraiment la situation de la dernière année. Ce phénomène est même visible sur les données « historiques » (voir annexe [B](#)). Ainsi, l'étude du climat actuel requiert de s'intéresser aux années ultérieures de projections, pour lesquelles le choix de trajectoire commence à avoir un sérieux impact comme l'ont illustré de précédentes études : MONCOULON et al. ([2018](#)) et CCR ([2015](#)).

La volumétrie des projections sur la période 2070-2100 est la suivante : 1 544 937 lignes pour la Corse, 4 766 295 pour le Languedoc-Roussillon et 5 423 515 pour PACA. Ces lignes correspondent aux données quotidiennes pour chaque point sur les 10 957 jours de projection. Le scénario étudié est le RCP8.5.

2.4.1 Températures

Les températures régionales évoluent vers les valeurs moyennes suivantes : 14,4°C en PACA, 16,9°C en Corse et 15,9°C en Languedoc-Roussillon. Le réchauffement est donc très important : la température moyenne du bassin méditerranéen passe à 15,3°C soit une hausse de 4°C.

Le réchauffement est encore plus marqué au niveau des températures extrêmes. Les plus faibles simulées sont de -22,2°C en PACA, -16,9°C en Languedoc-Roussillon et -9,2°C en Corse. L'évolution de cette variable est donc de l'ordre de +5°C pour les trois régions. Le maximum de la série des températures minimales quotidiennes est également intéressant. Il est maintenant de 37,0°C quand

dans l'historique le record était à 28,8°C. Des nuits extrêmement chaudes apparaissent donc, et ce phénomène est observable dans toutes les régions.

Le pic de chaleur record prend environ 6°C en Corse et en PACA, pour culminer à 47,6°C et 48,5°C respectivement. Les 50°C sont avoisinés en Languedoc-Roussillon avec une maximale simulée à 49,7°C, soit une hausse de 7°C par rapport au record sur les données de référence.

En regardant la température moyenne par zone climatique, le réchauffement global est légèrement plus important en montagne. Sur le continent, il est de l'ordre de +4°C pour la zone rattachée au climat méditerranéen, et un demi-degré de plus pour les climats montagnard et dégradé. La température moyenne sur la zone montagnarde est alors de 8,1°C, ce qui était celle du climat dégradé sur la période de référence.

La progression des températures est en revanche légèrement atténuée en Corse avec une hausse de 4°C en montagne, et 3,6°C en plaine. Néanmoins, la température moyenne sur la zone montagneuse corse devient identique à celle de la région de plaine sur l'« historique ». Point par point, le réchauffement va de +3,2 à +5,0°C par rapport à la période de référence (figure 2.19).

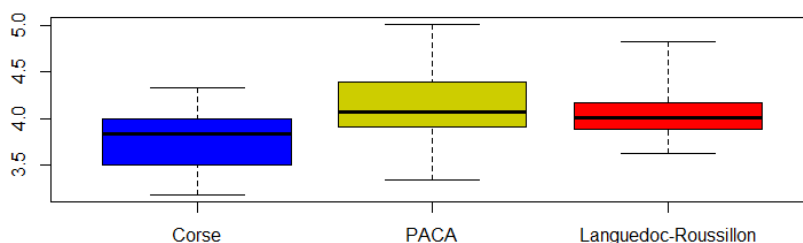


FIGURE 2.19 : Réchauffement (en °C) sur les points étudiés - comparaison entre l'« historique » et le RCP8.5.

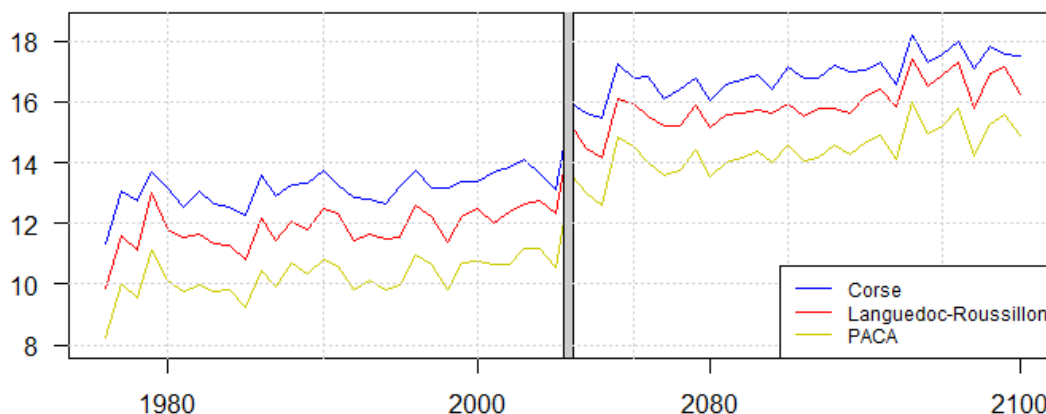


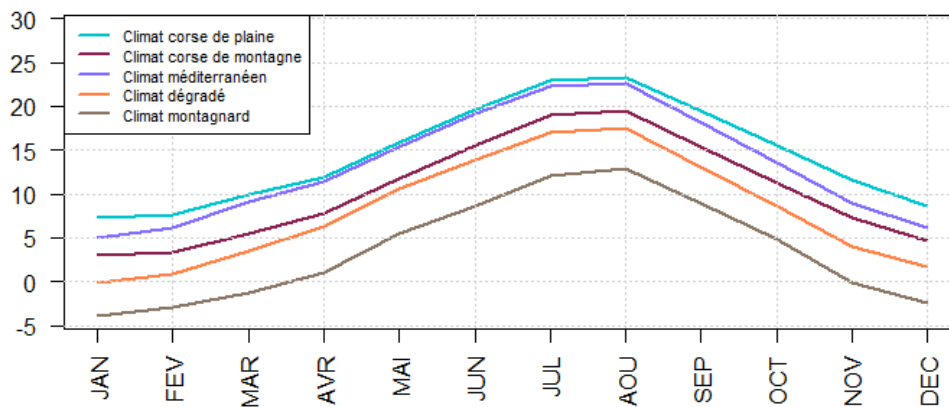
FIGURE 2.20 : Températures moyennes par an (en °C) - « historique » et RCP8.5.

Les températures n'évoluent pas de la même manière au cours de l'année. Le réchauffement est ainsi plus marqué sur le mois de juillet, où il dépasse les 5°C en moyenne sur le bassin méditerranéen. À l'inverse, l'augmentation n'est « que » de 2,7 à 3,3°C pour le mois de décembre selon les régions. La hausse des températures est globalement plus mesurée entre décembre et mars, et plus forte en été.

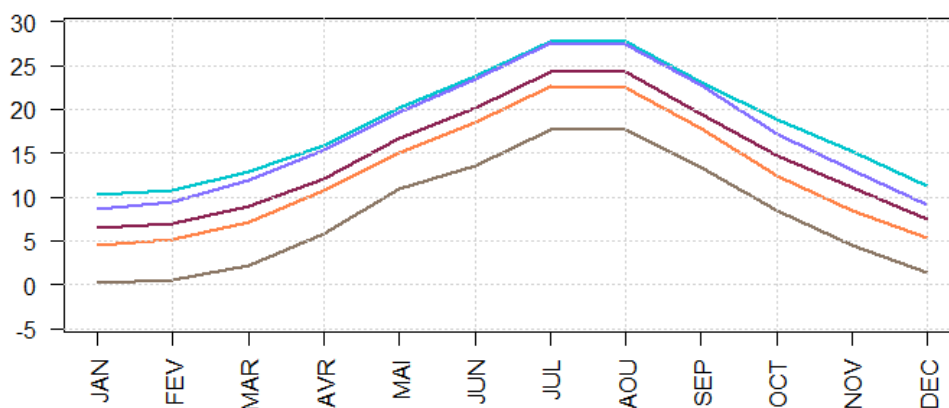
Les changements les plus radicaux sur les nouvelles normales mensuelles interviennent sur les points en altitude. La plus forte hausse est de 8,3°C en moyenne sur les 3 mois d'été pour un point de

montagne (2 625 m d'altitude) situé dans le massif des Écrins. Pour le mois d'août le réchauffement observé y est même de 9,5°C. Dans tous les points et pour tous les mois, la température moyenne s'élève d'au moins 2,3°C par rapport à la période de référence.

Les normales mensuelles sont représentées par climat dans la figure 2.21b. Par rapport à celles définies entre 1975 et 2005 (figure 2.21a), le mois d'août n'est plus le plus chaud (juillet est au même niveau). Les courbes ne se croisent pas mais se décalent toutes nettement vers le haut, soulignant un réchauffement net pour tous les climats et tous les mois. Aucune normale de température n'est négative, alors que c'était le cas pour cinq mois de l'année pour le climat montagnard. L'impact de la saisonnalité est plus fort que sur l'« historique » ; l'écart-type entre les douze normales mensuelles varie globalement de 6°C sur la période de référence à 7°C entre 2070 et 2100 sur les différentes zones climatiques, qui sont très homogènes sur ce point.



(a) 1975-2005



(b) 2070-2100

FIGURE 2.21 : Températures normales mensuelles (en °C) obtenues par zone climatique - « historique » et RCP8.5.

Pour aller plus loin, nous étudions pour chaque point et chaque mois l'évolution du quantile $q_{299/300}$ des températures moyennes journalières. Cette valeur correspond ainsi pour un point donné à la température relevée sur un jour anormalement chaud pour le mois en question (période de retour 10 ans). Nous comparons donc ici un phénomène rare d'ordre décennal sur deux fenêtres réduites en temps (du fait de l'évolution rapide du climat). Ainsi, l'interprétation sur les progressions extrêmes de cet indicateur doit être nuancée.

L'évolution la plus faible du $q_{299/300}$ est relevée en Corse avec $+0,7^{\circ}\text{C}$ (au mois de décembre), mais cette valeur pourrait être due par exemple à la présence de plusieurs extrêmes pics de chaleur en décembre sur cette localité sur la période de référence. À l'inverse, on observe en juillet une évolution record localement en PACA, avec un accroissement de $12,7^{\circ}\text{C}$ de notre indicateur. Mais cela pourrait tout à fait être lié cette fois à une absence de phénomène exceptionnel entre 1975 et 2005. Il reste intéressant de souligner qu'en moyenne sur le bassin méditerranéen, les pics de chaleur d'ordre décennal progressent relativement peu en décembre (autour de $+3^{\circ}\text{C}$) comparé à l'été, et notamment au mois de juillet où l'évolution va de $+6,2^{\circ}\text{C}$ en moyenne en Corse à $+8,0^{\circ}\text{C}$ en Languedoc-Roussillon.

Les records de température progressent d'au moins 2°C pour chaque point par rapport à la période de référence. Ils gagnent localement plus de 10°C , voire 13°C (en haute montagne pour la région PACA et en plaine dans l'extrême sud de la région Languedoc-Roussillon).

En s'intéressant aux températures moyennées sur le mois, les records de chaleur sont également tous battus, de $0,6$ à $12,5^{\circ}\text{C}$ (dans les deux cas en montagne). La progression est moins forte en janvier, et maximale en mai. La hausse est en moyenne de $4,3^{\circ}\text{C}$ sur le bassin méditerranéen. Les mois records de froid progressent également (légèrement moins), en moyenne de $+4,0^{\circ}\text{C}$. Aucun record de froid à l'échelle mensuelle de la période de référence n'est battu sur les projections. Le réchauffement est en revanche plus homogène dans l'année pour les mois records de froid que pour ceux records de chaleur.

Un autre moyen de constater l'augmentation des températures est de regarder à quoi correspond un jour très chaud au sens du climat « historique » lorsque l'on se place dans celui projeté. Pour tous les points de la grille, le quantile $q_{99\%}$ sur la série « historique » des températures moyennes journalières est relevé, en filtrant sur un mois choisi au préalable. Cette valeur est ensuite comparée à la série analogue sur la période 2070-2100, en regardant en particulier à quel niveau de quantile elle correspond. Plus ce dernier diminue, moins la valeur de référence (*ie.* un jour très chaud dans le climat historique) correspond à un jour chaud dans le climat projeté. La période de retour du phénomène étudié ici est plutôt de l'ordre de 3 ans, son observation sur une fenêtre de 30 ans est donc plus robuste que pour un événement à la fréquence décennale.

Une baisse du niveau de quantile est observée dans tous les cas, mais une fois de plus cet effet est plus prononcé en été que lors des périodes plus fraîches (*cf.* figure 2.22). Le nouveau niveau de quantile s'établit *a minima* à 97%. Ce décalage minimum est obtenu localement pour le mois de décembre. À l'inverse la déformation dans la distribution des températures est telle qu'un jour très chaud sur l'historique devient un jour froid dans le climat de fin de siècle. Un niveau de 16% est ainsi observé pour le mois d'août. Cet extrême est encore une fois atteint en haute altitude dans le massif des Écrins.

En moyennant à l'échelle régionale, le décalage le plus faible observé est en Corse pour le mois de janvier, avec une correspondance du quantile $q_{99\%}$ « historique » au quantile $q_{90\%}$ sur les projections. Le changement le plus fort intervient pour la région PACA en juillet, où l'ex-quantile à 99% est maintenant plutôt une médiane : c'est en moyenne le quantile à 50%. Ce phénomène est même très homogène sur la région en juillet puisque le point avec le plus faible décalage fait correspondre le quantile à 64% des projections avec le $q_{99\%}$ de la période de référence.

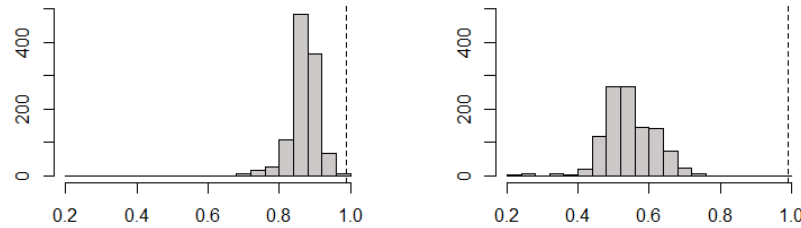


FIGURE 2.22 : Distribution de la nouvelle position dans le RCP8.5 du quantile à 99% dans la série des températures journalières historiques pour un mois donné (janvier à gauche, juillet à droite).

Il est possible d'adopter une approche similaire pour les températures moyennes mensuelles. Trois valeurs d'intérêt sont retenues dans la distribution « historique » de cette variable pour chaque point et chacun des mois de l'année : les quantiles $q_{75\%}$, $q_{90\%}$ et $q_{95\%}$. Ils correspondent respectivement à des périodes de retour de 4, 10 et 20 ans. La période de retour de N années ne doit pas être comprise ici comme « un mois tous les N ans » mais plutôt comme « une fois tous les N ans pour le mois choisi ».

Sur cette simulation climatique selon le RCP8.5, pour tous les mois de l'année il existe toujours des endroits où le relevé correspondant à un mois chaud avec une période de retour 4 ans devient froid à tel point qu'il n'est pas simulé entre 2070 et 2100. D'avril à octobre, ce phénomène est même observé dans les trois régions administratives de l'étude. L'ex-quantile à 75% se retrouve au plus haut au niveau du quantile $q_{40\%}$ sur les projections.

Cela va dans le même sens avec l'ex-quantile à 90%, qui au mieux devient proche de la normale ($q_{57\%}$), et est parfois inférieur à la valeur minimale relevée dans les projections. Pour la période de retour de 20 ans, la moyenne régionale du nouveau quantile est toujours en-dessous de la médiane. Cela signifie donc que ce qui était un mois exceptionnellement chaud entre 1975 et 2005 est, à l'échelle régionale, un mois plutôt froid, voire extrêmement froid entre 2070 et 2100. Ces observations sont illustrées sur le bassin méditerranéen par la figure 2.23. L'effet est plus fort au printemps et en été que lors de la saison hivernale. Sur un mois comme juillet où le réchauffement semble atteindre son paroxysme, une large majorité des points en Corse et en PACA n'ont que des températures mensuelles supérieures au quantile à 95% dans la distribution historique. C'est en revanche un phénomène très local pour la région Languedoc-Roussillon.

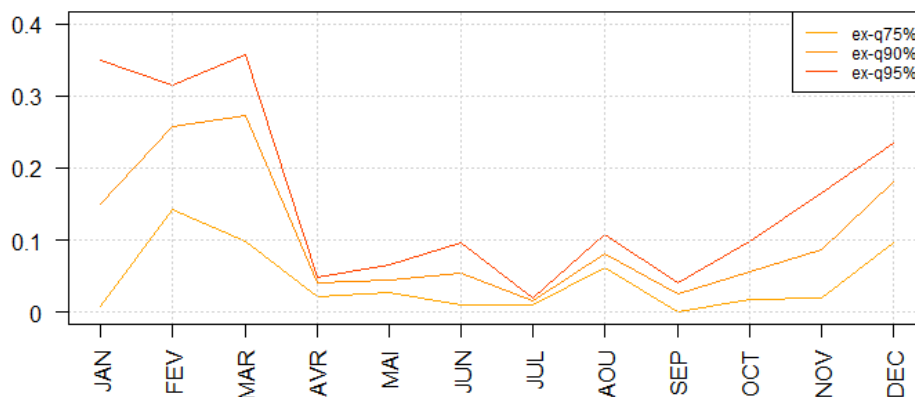


FIGURE 2.23 : Positions moyennes sur le bassin méditerranéen des quantiles historiques à 75, 90 et 95% dans la distribution des températures mensuelles projetées selon le scénario RCP8.5.

Sur l'ensemble du bassin méditerranéen, les quantiles $q_{75\%}$, $q_{90\%}$ et $q_{95\%}$ correspondent en moyenne sur les projections aux quantiles $q_4\%$, $q_{11\%}$ et $q_{16\%}$ respectivement. Les mois chauds pour l'« historique » entre $q_{75\%}$ et $q_{95\%}$, qui représentaient 20% de la distribution sont maintenant des mois froids et plus rares, avec une fréquence de 12% (entre $q_4\%$ et $q_{16\%}$).

L'étude des températures permet donc de conclure à un réchauffement net pour tous les points de simulation, et pour tous les mois de l'année. Ce phénomène n'est pas uniforme géographiquement ; les points en altitude y sont plus sensibles. De même la hausse n'est pas identique d'un mois à un autre ; les mois d'été se réchauffent clairement plus que les mois d'hiver.

Par ailleurs, les températures anormalement élevées progressent encore plus vite que les normales. Cela signifie que l'amplitude thermique ne va pas seulement augmenter entre les mois d'été et d'hiver, mais aussi entre les jours normaux et les jours chauds.

Le réchauffement est visible au sein même de la période 2070-2100 (voir figure 2.24). La température moyenne simulée dans le bassin méditerranéen sur la première décennie de la période est de 14,7°C, à comparer aux 16,0°C obtenus sur les dix dernières années de simulation. Cette hausse spectaculaire de 1,3°C en seulement 20 ans est comparable à celle réellement observée en France sur l'ensemble du XX^e siècle, et témoigne donc du potentiel emballement du réchauffement dans un scénario *business as usual*.

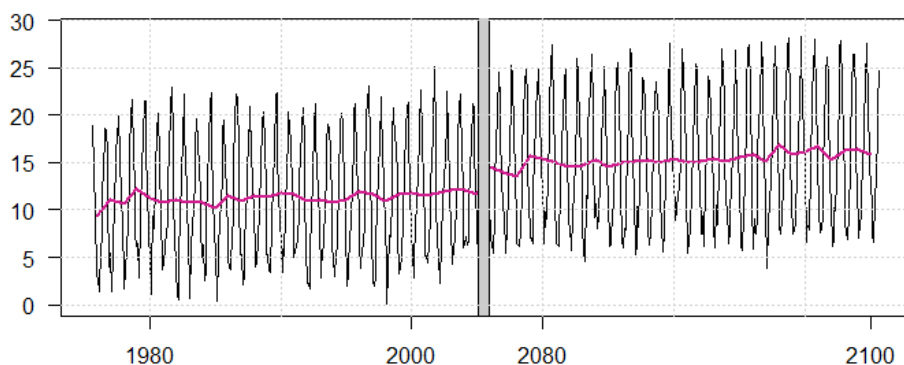


FIGURE 2.24 : Températures mensuelles et annuelles du bassin méditerranéen sur l'« historique » et à horizon lointain selon le RCP8.5.

Seuils de température

Le réchauffement sur le bassin méditerranéen peut être illustré à l'aide d'indicateurs simples à seuil. Par exemple, il est possible d'étudier les pics de chaleur où la température maximale dépasse la barre des 40°C. Même si ce genre de phénomène reste rare sur le bassin méditerranéen à horizon lointain (2 jours par an en moyenne), cela représente une évolution majeure par rapport à la période de référence où cette valeur était de 0,02 jour par an en moyenne. L'apparition de forts pics de chaleur est visible sur les trois régions. Parmi les cinq zones climatiques, seule celle du climat méditerranéen connaît en moyenne plus d'un jour de « pic de chaleur » par an, avec 3 jours par an. Ce phénomène apparaît pour les climats corse de montagne et dégradé, alors qu'il n'existait pas sur la période de référence.

En se focalisant sur les jours chauds où la température moyenne dépasse les 30°C, le même constat tombe, avec une hausse très nette et homogène sur le bassin méditerranéen. La fréquence de ces jours

chauds passe ainsi à 11 jours par an en moyenne sur le bassin méditerranéen, alors que sur les données « historiques » elle était plutôt de 0,1 jour par an. Pour le climat corse de montagne, cette situation se produit 4 jours par an en moyenne sur les projections, soit une fréquence multipliée par 100 par rapport à la période de référence. La progression relative est encore plus importante pour le climat dégradé où la température moyenne dépasse les 30°C en moyenne une fois par an entre 2070 et 2100. Il faut également souligner que cette situation devient possible dans le climat montagnard, bien qu'elle soit exceptionnelle (relevée 4 fois pour les 108 points concernés en 30 ans).

De la même manière, l'étude de seuils sur la température minimale informe sur le réchauffement potentiel au cours des nuits. Les nuits tropicales, où la température ne descend pas sous les 20°C, sont de plus en plus récurrentes en été dans le nord de la France alors qu'elles ne concernaient auparavant que les régions plus au sud. Selon la simulation climatique du modèle CNRM-Aladin, le phénomène devrait progresser dans les régions méditerranéennes.

Toujours en comparant le scénario *business as usual* aux données simulées sur la période 1975-2005, le nombre de nuits tropicales passerait de 13 à 55 par an. Les projections en donnent même 81 par an en moyenne en Corse, à comparer aux 22 de l'« historique ». La progression est alors nette en plaine (95 nuits tropicales par an en moyenne contre 30 sur la période de référence) mais aussi en montagne (53 nuits tropicales par an contre 8 en fin de XX^e siècle). Le climat méditerranéen est impacté de la même manière en gagnant 55 nuits tropicales par an pour en avoir 72 en moyenne. La hausse est spectaculaire pour le climat dégradé, passant de 0,2 à 15 nuits tropicales par an en moyenne. Ce phénomène apparaît également dans le climat montagnard à hauteur de 2,5 fois par an, alors qu'il était complètement marginal sur l'« historique ».

Si l'on pousse le curseur en considérant un seuil à 25°C sur la température minimale, des nuits très chaudes émergent dans la zone méditerranéenne. Elles sont très marginales sur l'« historique », en moyenne une tous les 8 ans si l'on considère tous les points du bassin méditerranéen. En revanche, à horizon lointain et dans un scénario pessimiste, il y a 12 nuits très chaudes par an dans le bassin méditerranéen en moyenne. Comme pour les nuits tropicales, la Corse est plus exposée avec en plaine 24 nuits très chaudes par an en moyenne, contre une tous les deux ans sur la période de référence. Les points rattachés au climat de montagne corse sont aussi touchés avec 10 nuits très chaudes par an. Alors que ce phénomène était très rare sur le climat méditerranéen entre 1975 et 2005 (presque d'ordre décennal), il devient récurrent en été, à hauteur de 16 fois par an en moyenne. Même si elles sont rares (0,5 fois par an), les nuits très chaudes apparaissent dans le climat dégradé. C'est également le cas pour le climat montagnard, mais cela reste exceptionnel.

Le seuil à 0°C pour la température minimale caractérise les jours de gel. Ces derniers se raréfient sur l'ensemble de la zone d'étude : de 54 par an en moyenne sur l'« historique » à 21 sur les projections. L'effet est encore plus net pour la plaine Corse où les jours de gel, rares sur la période de référence (7 par an en moyenne), ne sont plus observés que 0,6 fois par an dans les projections. Pour le climat corse de montagne comme pour le climat méditerranéen, la fréquence des jours de gel est divisée par cinq. Les climats dégradé et montagnard perdent à horizon lointain respectivement 63 et 71 jours de gel par an en comparant aux simulations sur 1975-2005.

Le sort est identique pour les jours sans dégel, c'est-à-dire ceux où la température maximale est négative. La fréquence moyenne des jours sans dégel tombe en-deçà du seuil d'une occurrence par an pour le climat corse de montagne, contre 7,5 fois par an sur l'« historique ». Cette baisse est visible dans les mêmes proportions pour le climat dégradé, qui passe de 18 à 3 jours sans dégel par an. Enfin, le climat montagnard perd 47 jours de dégel par an pour n'en compter que 30 par an en moyenne en fin de siècle.

L'étude se poursuit avec la variable N_m définie plus tôt (cf. 1.3.2). Pour chaque point d'une région et chaque mois, le nombre de jours où la température maximale dépasse 30°C sur ce mois-ci et le précédent est calculé. Une moyenne est ensuite faite pour chacune des zones climatiques, sur l'« historique » et sur les projections. La variable N_m croît remarquablement sur les cinq groupes de points. Pour la période juin-juillet, la variable N_7 passe de 5 à 27 en moyenne pour le climat corse de plaine. La maximale atteint alors les 30°C presque la moitié du temps. Pour le climat dégradé, l'évolution est encore plus forte relativement, puisque sur l'« historique », les 30°C étaient dépassés en moyenne une seule fois sur juin-juillet. Les projections selon le RCP8.5 donnent ici une normale de 15 pour N_7 dans ce *cluster*.

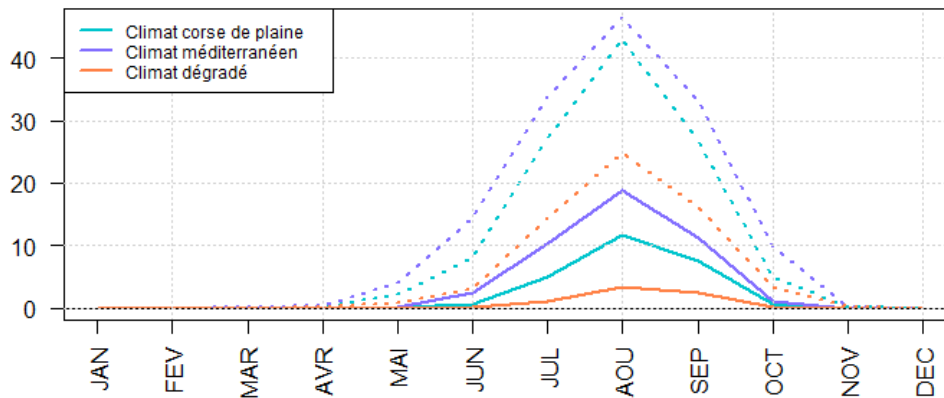


FIGURE 2.25 : Normales pour la variable N_m - « historique » en trait plein et RCP8.5 en pointillés.

Les normales de N_m gardent la même forme que sur l'« historique », avec un maximum atteint pour la période juillet-août (figure 2.25). La variable N_8 passe ainsi en moyenne de 19 à 47 pour le climat méditerranéen et de 3 à 25 pour le climat dégradé. L'augmentation est légèrement plus accentuée en Corse. Les normales de N_8 qui étaient de 12 en plaine et 3 en montagne sur les données de référence passent respectivement à 43 et 19 sur les projections. Si les jours où les 30°C sont atteints étaient exceptionnels dans la zone du climat montagnard sur la période de référence, ce n'est plus vraiment le cas sur les projections. N_8 évolue dans ce sens de 0,04 en moyenne « historique » à 2,26 en moyenne sur la période 2070-2100.

La variable N_m est par construction bornée, mais la limite supérieure, synonyme de deux mois où la température dépasse chaque jour les 30°C , n'est jamais atteinte sur l'historique. En revanche cette situation devient possible dans le climat futur avec le scénario RCP8.5 pour le couple juillet-août. Enfin, il devient normal en fin de siècle que le thermomètre puisse dépasser les 30°C en mai et en septembre.

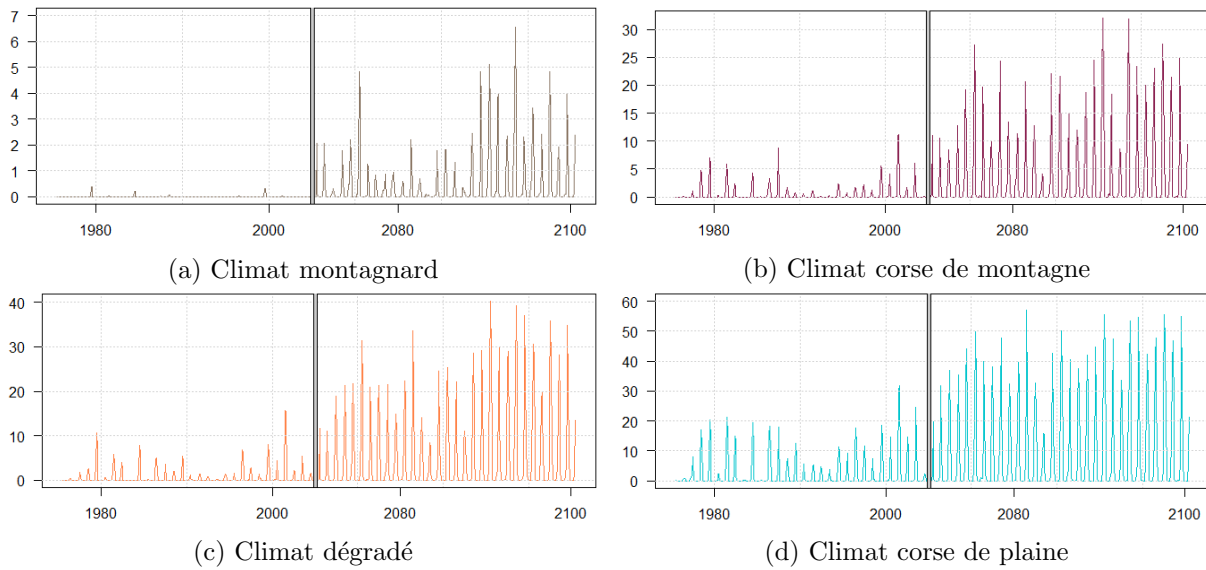


FIGURE 2.26 : Évolution de la variable N_m moyenne dans différentes zones climatiques : « historique » et projections RCP8.5.

2.4.2 Précipitations

Sur cette simulation afférente au scénario *business as usual*, la pluviométrie annuelle moyenne entre 2070 et 2100 est de 933 mm en Corse, 824 mm en PACA et 941 mm en Languedoc-Roussillon. Les précipitations annuelles baissent donc respectivement de 21 mm en Corse et 59 mm en PACA. Elles sont en revanche stables en Languedoc-Roussillon (+7 mm). La région qui a la plus faible pluviométrie moyenne est la plus affectée par la baisse des précipitations dans ce scénario, avec une diminution de 7%. Globalement, la pluviométrie sur le bassin méditerranéen passe à 886 mm par an en moyenne, soit une légère baisse de 3%.

En distinguant par groupes homogènes en climat, une baisse des précipitations est constatée sur toutes les zones. Elle est de l'ordre de 2-3% pour l'ensemble des *clusters*, sauf pour le climat montagnard. La diminution est en effet plus marquée pour ce dernier, qui perd plus de 100 mm de précipitations par an, passant de 1 114 m sur l'« historique » en moyenne à 1 004 à horizon lointain.

Ces observations ne reflètent pas le climat global de la Terre, puisque c'est plutôt une hausse des précipitations qui est prévue, celle-ci étant directement liée à la hausse des températures qui engendre une accélération du cycle de l'eau. Cependant, de grandes disparités spatiales sont attendues, et l'Europe du Sud devrait être l'une des régions où les précipitations vont diminuer, ce qui rendra cette région plus sèche.

Cela n'empêchera toutefois pas les épisodes pluvieux intenses caractéristiques (et problématiques) du climat méditerranéen. Ceux-ci pourraient même gagner en intensité : les précipitations quotidiennes maximales relevées sont en augmentation. Elles sont de 214 mm en PACA (+38 mm), 264 mm en Languedoc-Roussillon (+18 mm) et 379 mm en Corse (+25 mm).

Les projections présentent une plus forte variabilité des précipitations annuelles que les données « historiques ». L'écart-type de la série des précipitations annuelles moyennées sur le bassin méditerranéen est ainsi de 132 mm sur la période de référence contre 141 mm à horizon lointain.

Une très forte baisse des précipitations est observable au sein même de la période 2070-2100. En

effet, la pluviométrie annuelle moyenne sur la première décennie (941 mm) est nettement plus élevée que sur la dernière (844 mm). Cependant, l'interprétation de cette baisse est délicate puisque les précipitations (même annuelles sur une large région) sont très variables. Les années entre 2070 et 2080 sont très humides même en comparant à la période 1975-2005.

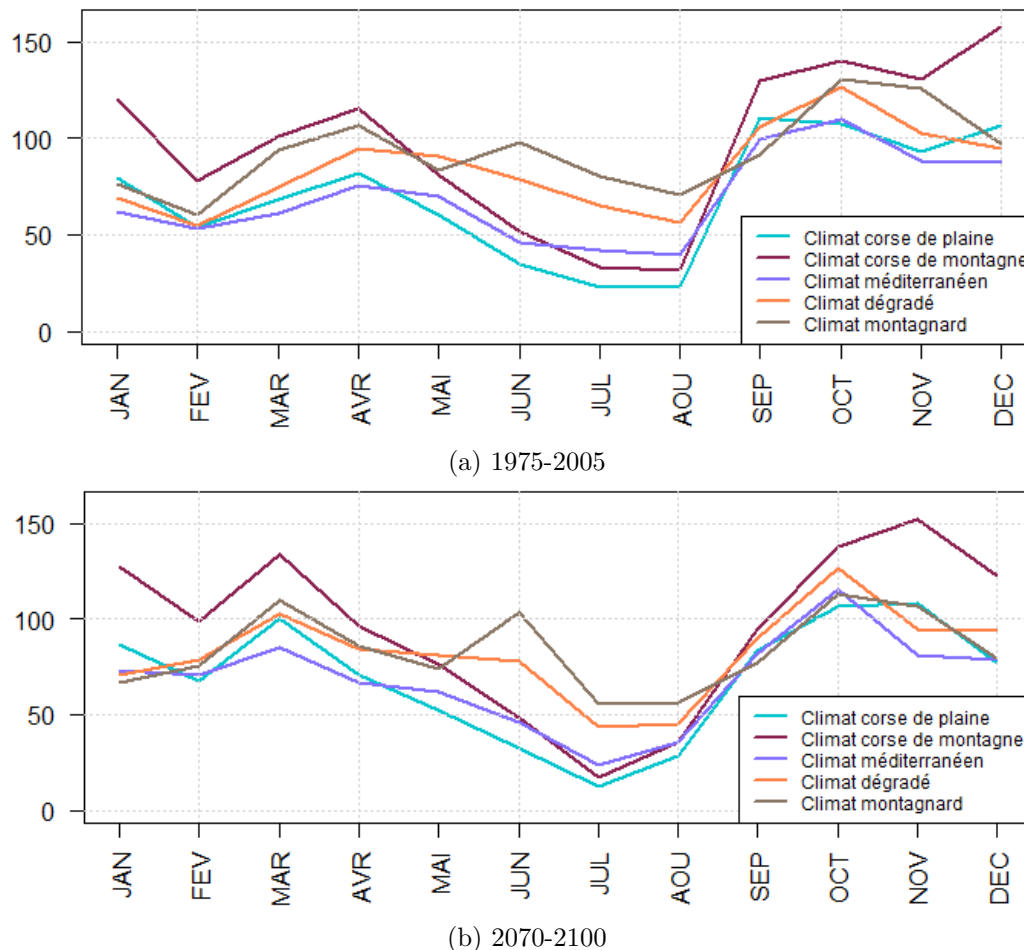


FIGURE 2.27 : Normales mensuelles de précipitations (en mm) par zone climatique - « historique » et RCP8.5.

La figure 2.27b donne les courbes des normales mensuelles de précipitations pour les cinq zones climatiques. Celles-ci se déforment légèrement par rapport à l'historique. Les précipitations augmentent notamment en février-mars (jusqu'à +46% pour le mois de mars), une légère baisse est visible au printemps et à l'automne mais la diminution est plus drastique en été. Un creux se forme en juillet, où les normales perdent entre 31 et 49%. Le mois de septembre, qui symbolisait le retour des pluies sur l'« historique » (figure 2.27a), n'est plus un mois très humide. Pour le climat montagnard, les normales mensuelles de juillet à janvier perdent toutes au moins 13%.

Par ailleurs, la fréquence des jours pluvieux recule de façon homogène de 8 à 12% selon les zones considérées. Le même constat peut être fait en ne regardant que les jours où les précipitations quotidiennes dépassent le seuil de 1 mm. La baisse est alors dans les mêmes proportions que pour les épisodes de pluie « toutes quantités confondues », à l'exception du climat corse de montagne où elle est un peu plus marquée. La normale passe alors de 110 à 93 jours de « vraie » pluie par an.

En distinguant selon les différents mois de l'année, la fréquence des précipitations évoluent dans

le même sens que leur volume. Le nombre moyen de jours de pluie sur le bassin méditerranéen est stable par rapport à l'« historique » pour le mois de février, et en augmentation en mars (d'un jour). Il baisse pour tous les autres mois.

Le mois de juillet est celui où la fréquence des jours de pluie diminue le plus ; les trois régions perdent plus ou moins trois jours de pluie. En Corse, cela correspond à une baisse de plus de deux tiers de la fréquence historique.

Les variations dans les précipitations entre mois secs et pluvieux sont globalement stables. En effet, la mesure de l'écart-type sur la série des 12 normales mensuelles pour chacun des cinq climats ne révèle pas de changement net.

L'étude des pluies intenses (quantiles à 99% des séries journalières en filtrant sur le mois) fait ressortir des variations très changeantes selon le mois et la région. Sur le bassin méditerranéen, la tendance est à la baisse en juillet (-6 mm) et en septembre (-8 mm). Elle est en revanche clairement à la hausse en hiver, avec +6 mm en janvier, +10 en février et +11 mm en mars. Sur des épisodes pluvieux très importants, d'ordre décennal, les observations sont identiques dans leur qualité.

Pour se faire une meilleure idée de l'évolution à la baisse des précipitations, l'analyse porte maintenant sur les mois secs (au sens de la sécheresse météorologique, voir [1](#)), avec périodes de retour de 4, 10 et 20 ans. Pour chaque point, les quantiles à 5, 10 et 25% sont retenus dans la série des précipitations mensuelles « historiques » pour chacun des mois de l'année. Les places de ces valeurs d'intérêt dans la série analogue à horizon lointain sont ensuite relevées. Une fois les nouveaux quantiles obtenus, des moyennes sont établies à l'échelle régionale.

Les quantiles se décalent, témoignant d'un climat avec des mois plus secs. Le quantile à 25% sur l'« historique » migre ainsi vers 32% en moyenne sur les projections. Le quantile à 10% (resp. 5%) de référence correspond lui à celui à 16% (resp. 10%) à horizon lointain. Cela signifie qu'en moyenne sur le bassin méditerranéen, un mois sec en termes de précipitations avec période de retour 20 ans sur l'« historique » correspond entre 2070 et 2100 à un mois sec avec période de retour 10 ans. La fréquence de ces mois exceptionnellement secs double donc en un siècle.

Ce décalage n'est pas uniformément réparti dans l'année. Le mois de mars devenant plus humide, il est logique d'observer dans les trois régions une évolution dans le sens inverse. Le quantile de référence à 25% pour le mois de mars correspond ainsi en moyenne à celui à 20% en Languedoc-Roussillon, 18% en PACA et même 16% en Corse.

À l'inverse, le mois de juillet s'assèche considérablement. Un mois de juillet plutôt sec sur l'historique (période de retour de 4 ans *ie.* 1 mois de juillet sur 4) correspond sur la période 2070-2100 à un mois de juillet normal comme l'illustre la figure [2.28](#). Une analyse à l'échelle régionale montre que ce phénomène est plus net en PACA et Corse qu'en Languedoc-Roussillon : le quantile à 25% sur l'historique devient respectivement celui à 60, 64 et 45%.

Pour un mois de juillet encore plus sec, avec une période de retour 10 ans, le changement est plus visible en région PACA avec un quantile $q_{10\%}$ sur la période de référence qui correspond dans les projections à $q_{44\%}$, c'est-à-dire à un mois relativement normal. Enfin, l'évolution dans la distribution des précipitations pour ce mois-ci en PACA suggère qu'un mois de juillet extrêmement sec « historiquement », avec une période de retour de 20 ans, n'est plus qu'un mois de juillet très légèrement sec avec une période de retour de 3 ans.

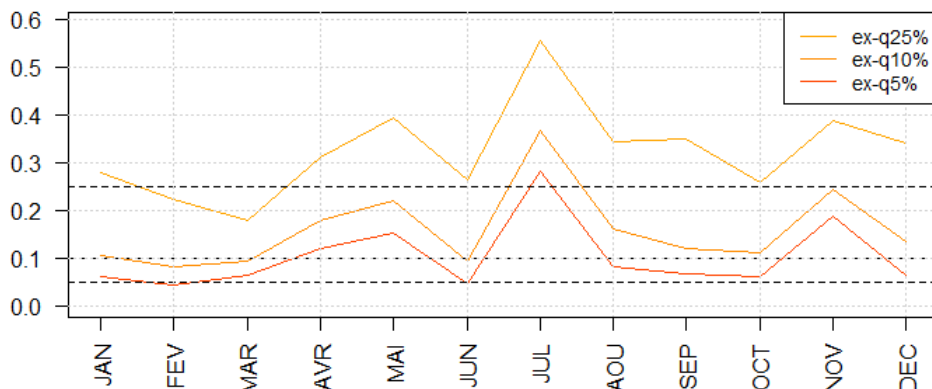


FIGURE 2.28 : Positions moyennes sur le bassin méditerranéen des quantiles historiques à 25, 10 et 5% dans la distribution des précipitations mensuelles - RCP8.5.

Le cumul des pluies par épisode pluvieux est calculé en sommant les précipitations journalières sur les jours consécutifs de pluie. En moyenne, il augmente en Corse (+5%) et en Languedoc-Roussillon (+7%). La progression est du même ordre sur le quantile à 90%, avec respectivement +6 et +7%. Elle est légèrement plus forte pour le quantile à 95%, avec +9% dans les deux régions. En regardant encore plus loin dans la queue de distribution du cumul des pluies, une augmentation encore plus nette est visible sur le quantile à 99%. Elle est de 14% en Corse et 13% en Languedoc-Roussillon. La région PACA est en revanche stable à tous les échelons.

Ce procédé a été réalisé pour différents niveaux de quantile, les résultats à l'échelle du bassin méditerranéen sont illustrés par la figure 2.29. Les pluies faibles baissent en intensité. C'est également le cas des pluies moyennes, contrairement aux fortes pluies qui gagnent en puissance.

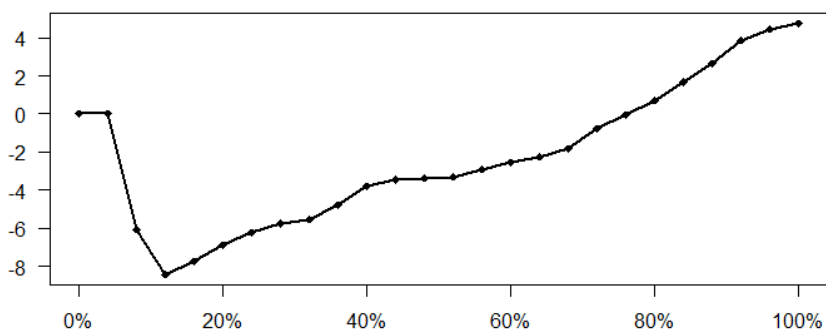


FIGURE 2.29 : Évolution (en %) des précipitations par épisode de pluie pour différents niveaux de quantiles par rapport à l'« historique » - RCP8.5.

Les précipitations diminuent donc plus en fréquence qu'en volume, et la saisonnalité se renforce. Cela témoigne d'une plus mauvaise répartition des pluies dans le bassin méditerranéen. Cela favorise la sécheresse des sols ; à précipitations égales un épisode court et intense nourrit moins les sols que des pluies plus légères mais plus régulières.

2.4.3 Humidité

Dans la simulation effectuée par le modèle CNRM-Aladin, l'humidité de l'air est en moyenne de 8,9 g/kg en Corse, 7,5 g/kg en PACA et 8,4 g/kg en Languedoc-Roussillon à horizon lointain. Cela correspond à une augmentation de l'ordre de 20% dans ces trois régions. Cette hausse est à relier à celle des températures.

L'humidité maximale relevée progresse nettement elle aussi : 24,6 g/kg en Corse, 22,4 g/kg en PACA et 23,1 g/kg en Languedoc-Roussillon. L'humidité minimale double quant à elle avec respectivement 1,3, 0,4 et 0,8 g/kg.

Une très forte corrélation positive est observée au niveau de l'humidité annuelle par région. Elle est cependant légèrement en retrait par rapport à l'« historique », variant de 80 à 91%. L'humidité moyenne augmente d'ailleurs assez notablement entre 2070 et 2100. Elle passe de 7,9 g/kg sur la première décennie de projection à 8,3 g/kg sur la dernière. Cette montée est visible sur les trois régions.

La hausse de l'humidité est assez homogène sur les différents *clusters*. Le climat corse de plaine possède ainsi entre 2070 et 2100 une humidité moyenne de 9,5 g/kg. L'humidité du climat dégradé est elle similaire à celle observée pour le climat méditerranéen sur la période de référence. La progression est relativement plus importante pour le climat montagnard, avec une humidité moyenne passant à 5,8 g/kg (contre 4,5 g/kg sur l'« historique »).

L'humidité moyenne évolue de +1,1 g/kg à +1,7 g/kg selon le point étudié. L'étude des écarts relatifs montre une évolution très concentrée autour de +21%. La hausse de l'humidité moyenne est donc plutôt homogène sur le bassin méditerranéen et peut être assimilée à un changement d'échelle.

Les normales mensuelles par région, à l'échelle du bassin méditerranéen, augmentent de 15% (pour le mois d'août) à 26% (en novembre). Les mois qui se réchauffent le plus (période estivale), ne sont pas ceux qui connaissent la plus forte augmentation dans les normales d'humidité. Pourtant, la hausse des températures augmente la capacité de l'air à contenir de l'eau. Ce phénomène est encore plus marqué sur des températures déjà élevées. L'air s'assèche donc (relativement) sur les mois chauds dans le RCP8.5.

2.4.4 Évapotranspiration potentielle

L'ETP simulée sur la période de projection est en moyenne annuelle de 1 018 mm en PACA (+166 mm par rapport à 1975-2005), 943 mm en Corse (+126 mm) et 1 062 mm en Languedoc-Roussillon (+190 mm). La hausse va donc de 15 à 22% selon la région considérée. La progression de l'ETP journalière record est également nette : au maximum 14,4 mm sont relevés en PACA, 15,4 mm en Languedoc-Roussillon et 12,4 mm en Corse.

En distinguant selon les cinq zones climatiques, l'ETP moyenne évolue à chaque fois à la hausse. La progression est de l'ordre de 15% pour les deux *clusters* concernant la Corse, avec une normale de 996 mm en plaine et 841 mm en montagne par an. La tendance est plus marquée (de l'ordre de +20%) sur les climats montagnard et méditerranéen avec respectivement 730 et 1 128 mm par an. Il en va de même pour l'ETP annuelle du climat dégradé, avec 931 mm soit +23% par rapport à l'« historique ». Le changement climatique entraîne donc une élévation de l'ETP, légèrement plus marquée sur le continent qu'en Corse.

La corrélation se renforce entre les trois régions au niveau de leur ETP annuelle. Elle vaut sur les projections entre 77 et 95%. Un écart s'est en revanche créé entre les séries (figure 2.30).

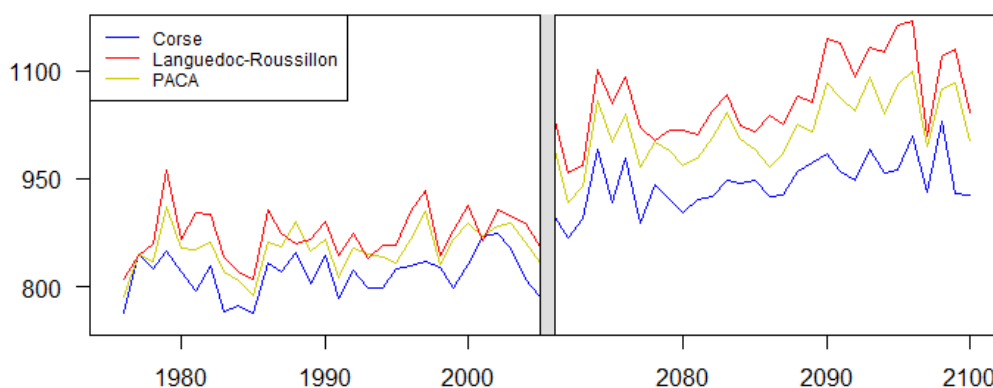


FIGURE 2.30 : Évapotranspiration potentielle annuelle (en mm) par région - « historique » et RCP8.5.

Sur l'ensemble du bassin méditerranéen, l'ETP annuelle varie de 927 à 1 116 mm selon les années. L'augmentation est nette sur les deux bornes par rapport à la période de référence. La tendance à la hausse est visible au sein même de la fenêtre 2070-2100 ; l'ETP annuelle moyenne sur le bassin méditerranéen est de 994 mm sur 2070-2080 contre 1 067 mm entre 2090 et 2100.

Au niveau local, l'ETP annuelle augmente de 82 à 269 mm. Cette hausse est néanmoins assez homogène en termes de variations relatives.

Enfin, en analysant plus finement les données par mois, les normales d'ETP sur le bassin méditerranéen augmentent par rapport à l'« historique » de 12% pour le mois de mars à 24% en novembre. En distinguant par zone climatique, les effets de la saisonnalité sont toujours atténués en Corse par rapport au continent. Les courbes de normales mensuelles de janvier à décembre gardent la même forme. **L'ETP évolue nettement à la hausse pour tous les mois de l'année et toutes les zones climatiques par rapport à la période de référence.**

2.4.5 Évapotranspiration réelle

Le modèle climatique donne à horizon lointain une ETR de 590 mm par an dans le bassin méditerranéen. Dans le détail, ce sont 563 mm d'eau du sol qui retournent dans l'air par an en PACA, 583 mm en Corse et 622 mm en Languedoc-Roussillon. Cette augmentation de 6 ou 7% est clairement plus faible que celle observée sur l'ETP (voir 2.4.4).

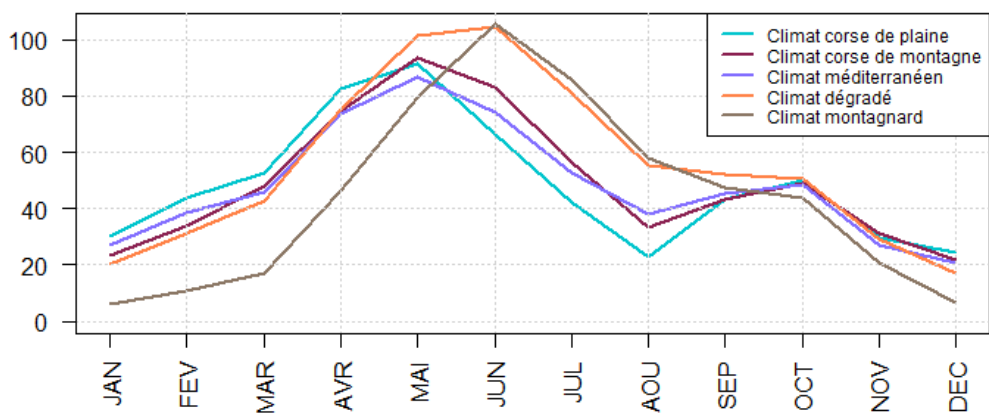
En discriminant par zone climatique, la normale annuelle d'évapotranspiration va de 527 mm par an pour le climat montagnard à 661 mm pour le climat dégradé. L'ETR est désormais plus forte dans les régions montagneuses de Corse qu'en plaine corse et continentale. L'ETR progresse clairement à deux vitesses. Dans les régions plutôt montagneuses (le climat dégradé est inclus), l'augmentation de l'ETR est de l'ordre de 11-12%. Elle est plus faible en plaine (+6% sur le littoral corse et +4% pour le climat méditerranéen).

Là où la corrélation de l'ETP annuelle entre les trois régions étudiées se renforce par rapport à la période de référence, cette tendance n'est pas identifiable pour la variable ETR. En effet, la Corse se décroche des autres régions puisque le coefficient de corrélation passe à 45% avec la région PACA et 41% avec le Languedoc-Roussillon. La dépendance augmente au contraire entre les deux

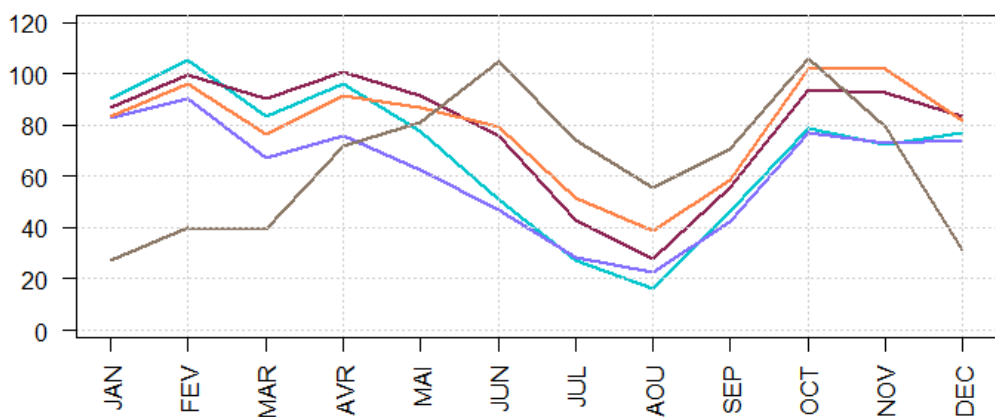
régions continentales, avec un coefficient de corrélation porté à 76%. Les différences d'évolution dans les corrélations sur l'ETP et l'ETR semblent montrer que le niveau d'humidité des sols diverge entre les régions continentales et la Corse.

L'étude du rapport ETR/ETP permet justement de mettre en évidence des sols plus secs, en particulier sur le continent. En effet, ce rapport recule dans les cinq zones climatiques. Pour la Corse, il passe à 58% en plaine (-5% par rapport à l'« historique ») et 70% en montagne (-4%). La baisse est plus marquée sur le continent, avec un passage à 51% pour le climat méditerranéen (-8%). Pour le climat dégradé l'ETR représente sur les projections 71% de l'ETP (-7%), et 72% pour le climat montagnard (-6%).

Les normales mensuelles sur les projections sont calculées pour les cinq zones climatiques. Les courbes de janvier à décembre sont représentées sur la figure 2.31a. Globalement, une montée de l'ETR est visible en début d'année civile par rapport à l'« historique ». Les normales décroissent ensuite un peu plus tôt que sur la référence, jusqu'à atteindre un creux en été encore plus bas qu'avant. L'aspect bimodal des courbes se renforce.



(a) Normales mensuelle d'évapotranspiration (en mm) à horizon lointain - RCP8.5.



(b) Rapport (en %) entre normales mensuelles d'ETR et d'ETP à horizon lointain - RCP8.5.

FIGURE 2.31 : Normales mensuelle d'évapotranspiration par zone climatique sur la période 2070-2100 et rapport avec les normales d'évapotranspiration potentielle.

Là où graphiquement le climat montagnard présentait un pic à 120% dans le rapport ETR/ETP du mois de juin sur l'« historique », les normales d'ETR ne peuvent surclasser celles d'ETP à horizon lointain (figure 2.31b). Le creux en août est renforcé, avec un rapport ETR/ETP qui descend jusqu'à 16% en plaine corse. La même observation est faite pour les autres *clusters* avec 22% pour le climat

méditerranéen, 28% pour le climat corse de plaine, 39% en zone de climat dégradé et 55% pour le climat montagnard. Le recul est alors de 11 à 24% selon les régions.

La tendance globale est à une hausse de l'ETR sur les mois froids, mais une baisse de l'ETR sur les mois chauds (alors que l'ETP augmente). **Les évolutions conjointes de l'ETP et de l'ETR laissent penser à des conditions climatiques plus sèches en été.**

2.4.6 Drainage

Le drainage baisse dans un scénario pessimiste, et s'établit en moyenne à 197 mm par an sur le bassin méditerranéen en fin de siècle. En séparant les zones climatiques, le drainage annuel perd entre 10 et 20% par rapport à l'« historique ». Le contraste s'accroît en Corse entre plaine (168 mm) et montagne (431 mm). Les évolutions vont dans le même sens sur le continent.

Le drainage, rapporté aux précipitations, est stable sur le climat montagnard. Pour les quatre autres zones, ce rapport est en baisse (de 3 à 5%).

L'étude des normales mensuelles montre que la baisse du drainage est concentrée sur les mois entre mai et décembre. Le drainage perd même plus de 50% sur le bassin méditerranéen de juin à septembre.

Les courbes des normales mensuelles de janvier à décembre, déclinées pour chacune des cinq zones climatiques, montrent ainsi un aplatissement par rapport à l'« historique ». Le même constat peut être dressé sur les normales mensuelles du rapport entre drainage et précipitations. À chaque fois l'aplatissement est synonyme d'élargissement de la période de l'année avec un très faible drainage (où les sols sont donc secs).

2.4.7 Ruissellement

Tout comme le drainage, le ruissellement diminue fortement à l'échelle du bassin méditerranéen par rapport à la période de référence. Il vaut en moyenne 98 mm par an entre 2070 et 2100 sur la zone étudiée. Cette baisse de 23% n'est pas visible sur le ruissellement maximal simulé, qui est de 211 mm sur une journée.

Les variations dans le ruissellement ne sont pas homogènes entre *clusters*, quoique toutes dans le même sens. Le ruissellement ne perd que 4 mm pour le climat corse de plaine, mais 38 mm dans les régions montagneuses de Corse. Sur le continent aussi la baisse est assez faible en plaine (-6 mm pour le climat méditerranéen) mais forte en montagne (respectivement -55 mm pour le climat dégradé et -132 mm pour le climat montagnard). Le ruissellement diminue ainsi de 4% en plaine corse mais de 40% pour le climat montagnard.

Le rapport entre ruissellement et précipitations dans leurs normales annuelles est de 10% pour le climat méditerranéen et 20% pour le climat montagnard. La légère baisse du ruissellement en plaine est du même ordre que celle visible pour les précipitations. Ce rapprochement ne suffit pas à expliquer la totalité de la baisse du ruissellement en montagne.

Une rapide étude de la fréquence d'atteinte du seuil de 1 par l'indice SWI (*cf.* 1.3.1) est faite sur l'« historique » et sur les projections pour chacune des zones climatiques. Il en ressort que la zone montagnarde voit sa fréquence de saturation des sols baisser fortement, de 14 à 9%. C'est un argument supplémentaire au ralentissement du ruissellement. En effet, les sols peuvent absorber l'eau lorsqu'ils ne sont pas saturés et celle-ci ruisselle donc moins. Cependant, le même phénomène apparaît sur la

zone montagneuse corse, où les sols sont saturés en moyenne 12% du temps entre 2070 et 2100 contre 17% « historiquement ». La perte de ruissellement est cependant moins importante sur cette région (-25%) que pour le climat montagnard.

Un facteur supplémentaire jouant sur le ruissellement est la végétation. Celle-ci ralentit l'eau ruisselante et favorise donc son absorption par le sol. Or, la baisse des précipitations (neigeuses) et la hausse des températures qui concernent tout particulièrement la région montagnarde pourrait avoir un effet positif sur la végétation. Cela concernerait essentiellement les points de haute altitude, qui historiquement ont des conditions plutôt hostiles, et pourrait apporter l'explication complémentaire manquante à la baisse du ruissellement dans le climat montagnard.

Les normales mensuelles sur les projections montrent que la baisse du ruissellement est surtout portée par les mois froids, qui concentrent une grande partie du ruissellement de l'année. Cela se traduit sur le climat montagnard par une très forte baisse de l'écart-type entre les normales mensuelles. Cette valeur est de 13 mm sur les projections contre 31 mm sur la période de référence.

2.4.8 Balance hydrique des sols

Une bonne manière de résumer les variations des différents flux d'eau qui impactent les sols est de dresser un bilan de ceux-ci. La balance hydrique des sols représente dans ce sens les gains (ou pertes lorsqu'elle est négative) en eau des sols à faible profondeur. Elle est modélisée comme la différence entre les flux entrants et sortants. Il s'agit ici de la différence entre les précipitations et la somme de l'évapotranspiration, du drainage et du ruissellement. Les activités humaines peuvent en réalité perturber la balance hydrique des sols, par exemple l'arrosage constitue un deuxième flux entrant. En notant P les précipitations, ETR l'évapotranspiration réelle, D le drainage, et R le ruissellement, la balance hydrique des sols s'écrit donc

$$\text{Bal.} = P - ETR - D - R. \quad (2.4)$$

La balance hydrique des sols sur l'ensemble du bassin méditerranéen est en moyenne quasiment nulle (très légèrement positive, de l'ordre de +1 mm par an et par point) sur l'« historique » comme sur les projections.

Cette stabilité cache des changements dans les flux qui se compensent, illustrés ci-dessous (figure 2.32). Comme évoqué dans les parties précédentes, les précipitations annuelles moyennes sont en légère baisse, de 913 à 886 mm sur le bassin méditerranéen, mais les flux sortants diminuent également. C'est le cas du ruissellement et du drainage, qui baissent de façon plus importante. L'évapotranspiration est quant à elle en augmentation par rapport à la situation de référence. Le rapport P/ETR (en considérant les normales globales sur le bassin méditerranéen) croît ainsi de 61% sur la période de référence à 67% en fin de siècle. La baisse du drainage n'est pas anodine, puisqu'elle pénalise le rechargement des eaux souterraines, lesquelles sont parfois exploitées.

Même si la balance hydrique des sols est globalement équilibrée, elle varie d'une année hydrologique à l'autre (figure 2.33), pour parfois dépasser en moyenne sur le bassin méditerranéen 50 mm en valeur absolue. Le même schéma se répète tout au long de la série, alternant baisse et hausse de la balance hydrique. La raison de ce motif réside dans la propension du sol à absorber de l'eau. À la suite d'une période plutôt humide, les sols absorbent moins l'eau ; celle-ci ruisselle plus et la balance hydrologique des sols en est diminuée. À l'inverse, pour des sols plutôt secs les flux d'eau sortants sont très réduits et les pluies rechargent davantage les sols. La balance hydrique des sols présente donc un retour à l'équilibre.

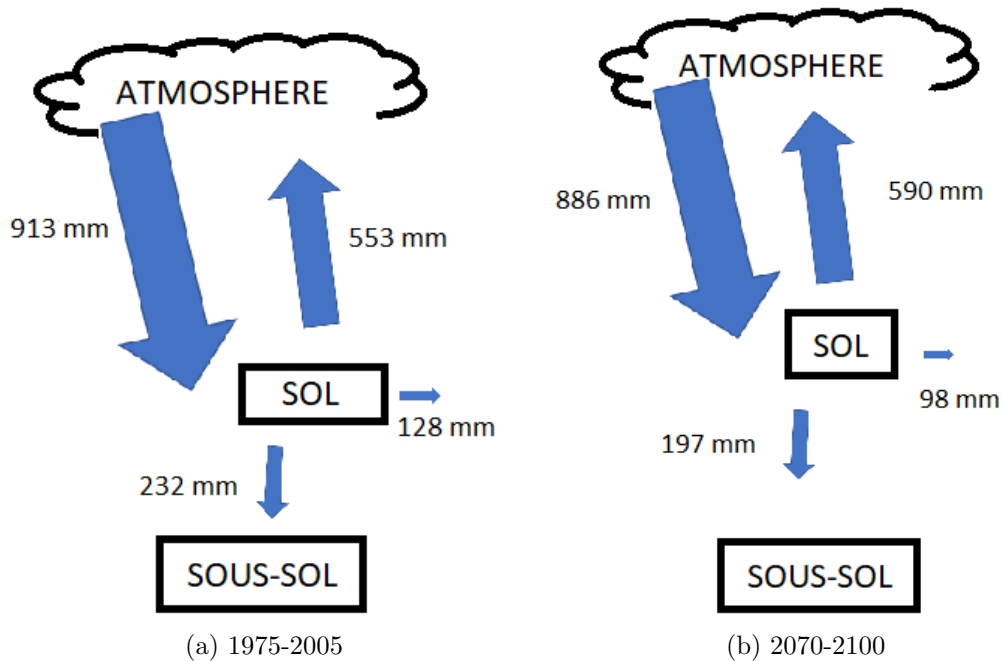


FIGURE 2.32 : Flux d'eau annuels moyens (précipitations, évapotranspiration, ruissellement, drainage) sur le bassin méditerranéen schématisés en conservant les proportions - historique et RCP8.5.

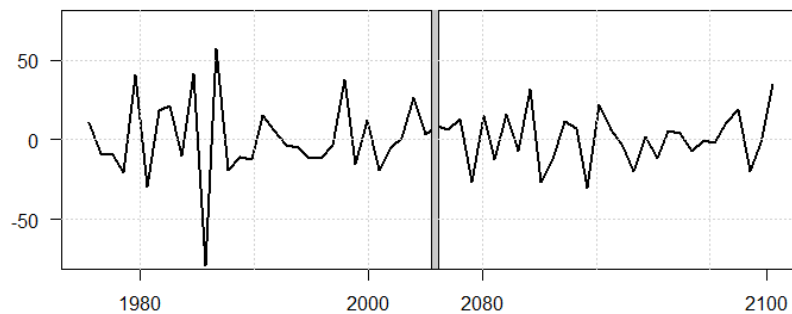


FIGURE 2.33 : Balance hydrique annuelle des sols moyenne sur le bassin méditerranéen, en mm - « historique » et RCP8.5.

La balance hydrique des sols possède une saisonnalité, bien marquée sur la figure [2.34](#). Sur la période de référence, un assèchement des sols est visible d'avril à août. La force de cet assèchement est maximale en mai. Les mois d'été sont pourtant moins pluvieux et plus chauds, le ralentissement de la baisse de la balance hydrique à partir de juin signifie donc que les sols sont déjà secs, et ne peuvent plus fournir l'eau qu'ils seraient censés perdre s'ils étaient humides. Les sols ne perdent ainsi que 11 mm d'eau en août en moyenne, contre 44 mm en mai. Les sols se rechargent très nettement à partir de septembre, en moyenne de 36 mm jusqu'en décembre. La stabilité de la balance hydrique sur les mois de janvier à mars, pourtant assez humides et froids (ce qui ne favorise pas l'évapotranspiration), montre qu'en général les sols sont complètement rechargés en eau en fin d'année civile.

À horizon lointain, les normales mensuelles de la balance hydrique des sols reprennent la même forme. L'assèchement d'avril à juillet est en revanche renforcé, plus uniforme. Les pertes d'eau du mois d'août sont divisées par deux par rapport à l'« historique ». C'est le signe de conditions plus sèches puisque le climat est moins humide en août dans les projections que sur les données de référence.

La recharge lors du mois de septembre diminue légèrement, mais elle est compensée par l'augmentation de la balance hydrique des sols sur les trois mois d'hiver. Cette hausse est notamment due à de plus fortes précipitations en mars, et à la recharge incomplète des sols en fin d'année.

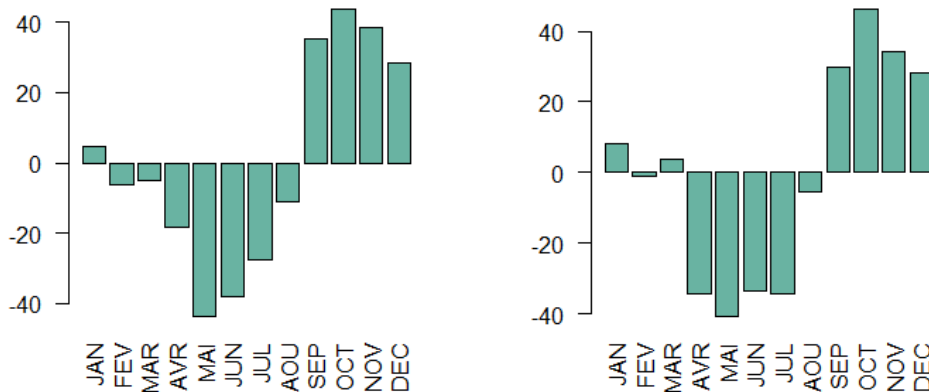


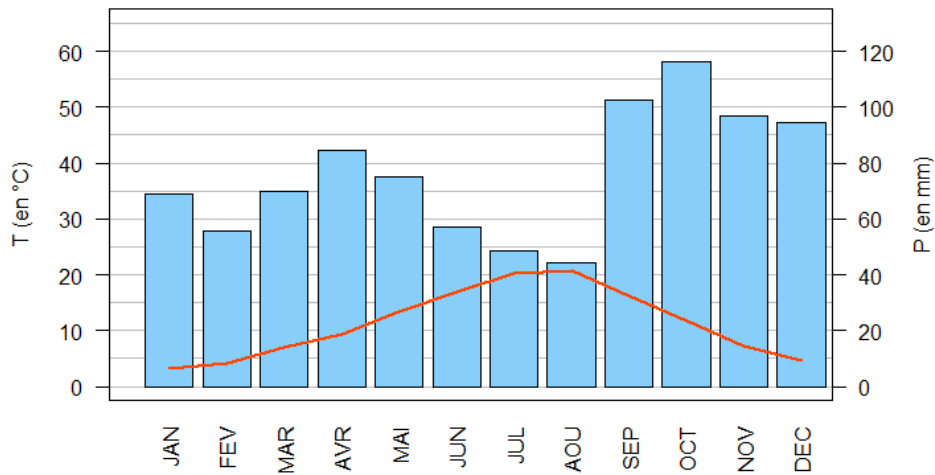
FIGURE 2.34 : Normales mensuelles (en mm) de la balance hydrique des sols dans le bassin méditerranéen - « historique » à gauche et RCP8.5 à droite.

2.4.9 Diagrammes ombrothermiques

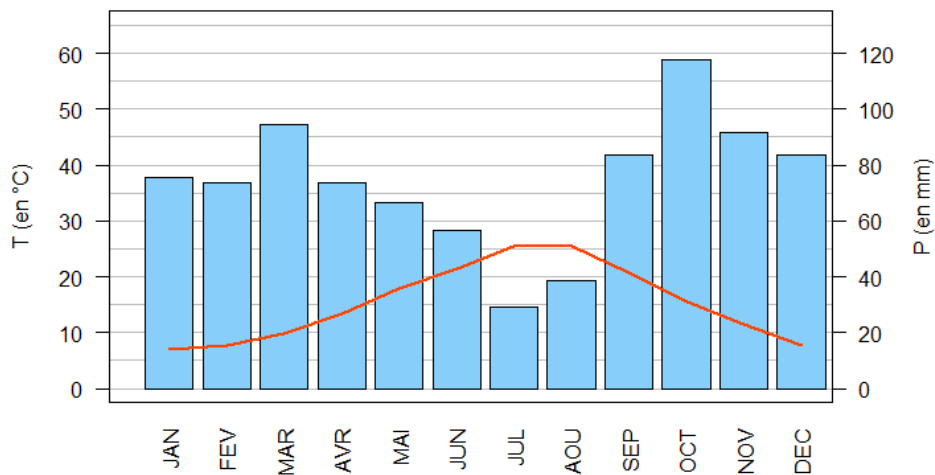
La hausse des températures et les variations dans le régime des précipitations peuvent être visualisées conjointement dans un diagramme ombrothermique. Ce diagramme a été pensé par Gaussen et Bagnouls, deux botanistes, pour mettre en évidence les périodes de sécheresse dans le climat méditerranéen. Le diagramme donne deux informations au pas de temps mensuel : la température en degrés Celsius (illustrée par une courbe), et les précipitations en millimètres (sous forme d'histogramme). Pour représenter les deux variables simultanément, l'échelle retenue est $P = 2T$. La sécheresse (au sens de Gaussen, partie 1.3.1) est alors visualisée par un dépassement de l'histogramme des précipitations par la courbe des températures.

Ce diagramme est réalisé à partir des données climatiques en moyennant températures et précipitations mensuelles sur l'ensemble de la zone étudiée, pour l'« historique » puis à horizon lointain. Le résultat est illustré sur la figure 2.35. Entre 1975 et 2005, les précipitations sont plus importantes en fin d'année, alors qu'en juillet et août elles sont beaucoup plus faibles. Les températures étant les plus élevées pour ces deux mois-ci, la courbe se retrouve alors au niveau de l'histogramme, mais la condition $P < 2T$ n'est pas vérifiée. Le climat moyen sur l'ensemble des régions Corse, PACA et Languedoc-Roussillon n'est alors pas méditerranéen au sens de Gaussen.

Dans la simulation proposée par le modèle CNRM-Aladin dans le scénario pessimiste, la baisse des précipitations de mai à décembre est bien visible graphiquement, particulièrement en juillet. La courbe des températures se déplaçant vers le haut, une sécheresse est mise en évidence sur les mois de juillet et d'août dans le climat normal de fin de siècle. Le climat moyen sur l'ensemble du périmètre géographique de l'étude devient donc un climat méditerranéen (plus précisément subméditerranéen) selon l'indice de Gaussen.



(a) 1975-2005

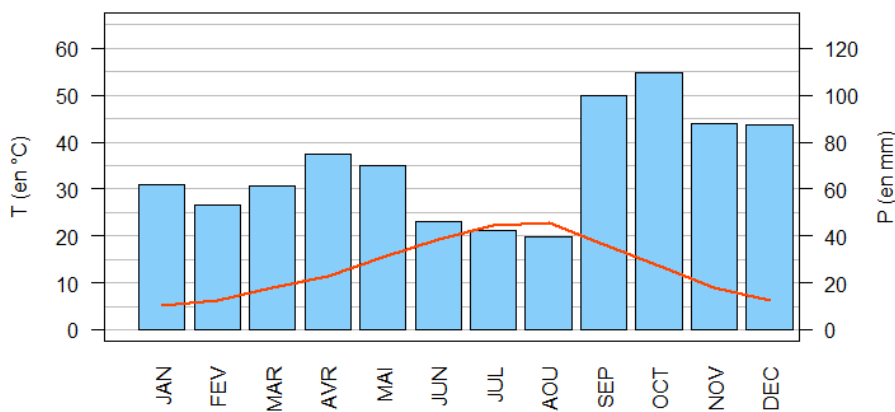


(b) 2070-2100

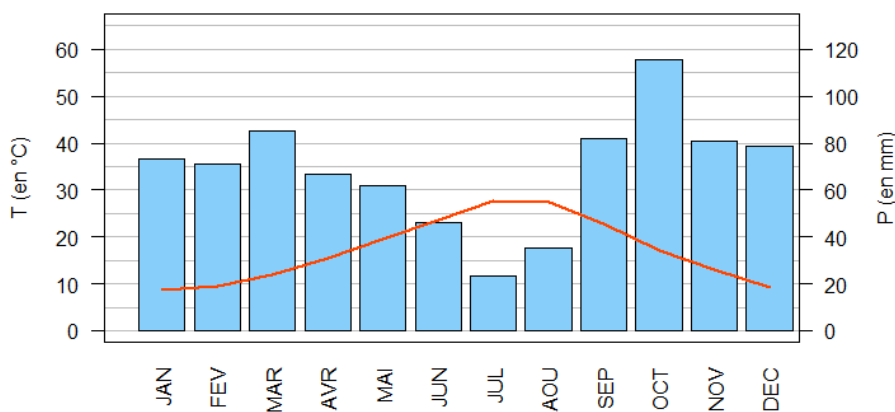
FIGURE 2.35 : Diagrammes ombrothermiques pour le bassin méditerranéen : « historique » et projections RCP8.5.

Si ces diagrammes illustrent bien la potentielle modification du climat à l'échelle du bassin méditerranéen, cette zone géographique est découpée en cinq zones homogènes en climat. Pour isoler les changements sur chacune des zones climatiques, les mêmes diagrammes sont réalisés par *cluster*.

Pour le groupe de points rattachés au climat méditerranéen, le diagramme ombrothermique sur la période 1975-2005 met en évidence deux mois secs, soit un climat subméditerranéen au sens de Gaussen (figure 2.36). En revanche, le mois de juin vérifie la condition de sécheresse $P < 2T$, ce qui fait basculer cette zone à horizon lointain dans le climat mésoméditerranéen.



(a) Climat méditerranéen « historique » : 1975-2005



(b) Climat méditerranéen futur : 2070-2100

FIGURE 2.36 : Diagrammes ombrothermiques du climat méditerranéen sur la période « historique » puis à horizon lointain selon le scénario RCP8.5.

Le climat dégradé était, sur la période de référence, très loin de remplir la condition de sécheresse de Gaussen, même en été. Dans le RCP8.5, il pourrait être classé comme climat méditerranéen puisque le critère serait rempli pour le mois de juillet. Le climat corse de plaine conserve lui son étiquette de climat mésoméditerranéen avec trois mois secs par an. Le climat montagnard ne possède aucun mois sec au sens de Gaussen, que ce soit sur l'« historique » ou les projections. Enfin, le climat corse de montagne reste à deux mois secs par an, et est donc un climat subméditerranéen sur les deux périodes étudiées. Pour ces quatre zones, les diagrammes ombrothermiques sont placés en annexe **C**.

Les diagrammes ombrothermiques réalisés à l'échelle de la zone climatique présentent globalement les mêmes évolutions :

- Une hausse des précipitations en début d'année ;
- Une baisse des précipitations à partir d'avril ;
- Une hausse des températures sur toute l'année, particulièrement forte en été.

2.4.10 Synthèse

Les observations sur le changement climatique dans le bassin méditerranéen, à horizon lointain et dans un scénario pessimiste, se résument dans le tableau [2.1](#).

Variable	Évolution	Commentaires
Températures	++	Phénomène plus marqué en montagne, en été, ou dans des conditions anormalement chaudes.
Précipitations	-	Diminution nette pour le climat montagnard, hausse des précipitations en hiver et forte baisse en été.
Humidité de l'air	++	Augmentation uniforme.
ETP	++	Augmentation uniforme.
ETR	+	Faible progression en plaine, hausse concentrée sur l'automne et l'hiver.
Drainage	--	Diminution plus marquée en plaine, et en été.
Ruissellement	--	Très forte baisse en montagne, visible surtout en hiver.

TABLE 2.1 : Résumé de la comparaison entre données « historiques » et à horizon lointain dans le RCP8.5 pour le bassin méditerranéen.

Chapitre 3

Perspectives d'évolution de l'assurance contre la sécheresse en fin de siècle

Alors que le chapitre précédent a donné un aperçu du changement climatique sur le bassin méditerranéen, celui-ci vise à illustrer son impact sur les sécheresses. Pour cela, les mêmes données sont utilisées (modèle CNRM-Aladin, climat « historique » de 1975 à 2005 et futur selon le scénario RCP8.5 entre 2070 et 2100, régions PACA, Corse et Languedoc-Roussillon). Il est tout d'abord naturel de s'intéresser à l'évolution de mesures de sécheresse. Les analyses présentées dans ce chapitre ont été réalisées sur R [R CORE TEAM (2021)].

3.1 Perturbations dans les distributions des indices de sécheresse

Plusieurs indices de sécheresse vont être étudiés afin de quantifier l'assèchement des régions méditerranéennes françaises. Ces indices sont présentés dans la partie 1.3.

Pour économiser en temps de calcul, ces indices ne sont pas calculés sur chacun des 1 071 points de la grille SIM situés dans le périmètre géographique de l'étude, mais directement sur les cinq régions homogènes en climat. Les données utilisées pour chaque zone climatique sont alors des moyennes régionales.

3.1.1 Étude de l'indice RAI

L'étude porte ici sur l'évolution du RAI calculé mensuellement pour chacun des cinq climats (*cf.* 2.10). Cet indice fait intervenir les pluies uniquement. Pour obtenir des résultats facilement interprétables, la période 1975-2005 est retenue pour former les précipitations historiques, et ce quel que soit l'horizon de temps sur lequel le RAI est calculé.

La comparaison entre données « historiques » et projetées, en regardant l'ensemble des zones climatiques, montre tout d'abord une baisse du RAI. L'indice passe en moyenne de -0,10 sur la période 1975-2005 à -0,25 entre 2070 et 2100. Cette baisse est synonyme d'un assèchement du point de vue météorologique. En distinguant chacune des zones climatiques, le RAI moyen se révèle stable pour quatre des cinq régions entre période de référence et horizon lointain. Seul le climat montagnard voit une dégradation assez nette de la valeur moyenne de l'indice, qui passe de -0,09 à -0,65.

Les valeurs extrêmes s'écartent de 0. Le RAI atteint au minimum -5,8 sur l'« historique », mais peut descendre à -7,6 à horizon lointain. Le RAI maximal passe de 12,2 sur la période 1975-2005 à 24,6 dans les projections. Pour les deux horizons de temps, la valeur minimale est atteinte plutôt dans le début de période (1979 et 2074), alors que le maximum est obtenu plutôt en fin de période (2005 et 2092). Ces valeurs extrêmes sont issues des climats corse de plaine et méditerranéen.

Pour chaque zone climatique, les valeurs extrêmes du RAI s'écartent par rapport à la valeur centrale 0. L'amplitude du RAI croît donc dans tous les cas. Sans traiter uniquement les valeurs extrêmes, le RAI devient plus volatile à horizon lointain que sur l'« historique ». Ce phénomène est visible sur toutes les zones sauf pour le climat montagnard. Pour les autres régions, l'écart-type du RAI simulé progresse entre 23 et 37% en comparant les périodes 1975-2005 et 2070-2100.

La présence de RAI avec une grande valeur absolue peut inciter à regarder la médiane plutôt que la moyenne. Cette quantité diminue de -0,32 sur l'« historique » à -0,90 pour les projections. Alors que les médianes sont homogènes entre zones climatiques sur la période de référence (entre -0,27 et -0,37), elles le sont moins sur les projections, variant de -0,67 à -1,04. La baisse est ainsi prononcée dans les cinq régions climatiques. Le climat corse de plaine est celui où le RAI médian se détériore le plus.

Plutôt que de regarder quelques valeurs d'intérêt, les évolutions de la distribution complète de l'indice peuvent être décrites à l'aide d'un outil graphique simple. Ce mémoire présente une forme revue du diagramme quantile-quantile afin de comparer deux distributions de fonctions de répartition F et G , la première jouant le rôle de référence. Pour chaque niveau $\alpha \in]0, 1[$, le quantile correspondant sur la distribution de référence q_α^F est calculé. La quantité \tilde{q}_{alpha}^G représente alors le niveau de quantile sur la distribution G de la valeur obtenue pour le quantile de niveau α de F . On appelle Q la fonction $\alpha \mapsto \tilde{q}_{alpha}^G$:

$$\forall \alpha \in]0, 1[, Q(\alpha) = G(q_\alpha^F). \quad (3.1)$$

Autrement dit, $Q = G \circ F^{-1}$, où F^{-1} est le pseudo-inverse de F . Dans le cas où les deux distributions sont identiques, la fonction modélisée est donc l'identité sur $]0, 1[$. La représentation graphique de la fonction Q permet de bien visualiser les différences entre les distributions F et G .

Ce graphique est réalisé pour comparer, dans chaque zone climatique, le RAI projeté (2070-2100, scénario RCP8.5) au RAI de référence (1975-2005). La fonction Q est alors construite pour $\alpha = 1\%, 2\%, \dots, 99\%$. Pour le climat montagnard, la courbe obtenue est au-dessus de la première bissectrice sur toute sa longueur (figure 3.1b). Cela signifie que pour un niveau fixé de RAI, le quantile associé est toujours plus élevé dans les données projetées que dans celles « historiques ». La distribution du RAI se décale vers le droite, les sols sont donc plus secs en fin de siècle (au sens du RAI), quelles que soient les conditions climatiques.

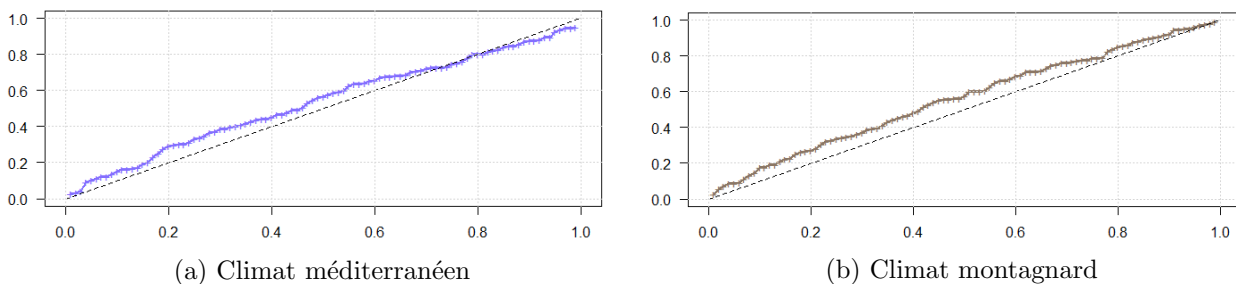


FIGURE 3.1 : Représentation de la fonction Q pour comparer les distributions projetées et « historique » du RAI - RCP8.5.

Dans les quatre autres zones, la fonction Q prend une allure similaire, différente de celle du climat montagnard. La figure 3.1a illustre par exemple les résultats obtenus pour le climat méditerranéen. Comme précédemment, le graphe de la fonction Q est tout d'abord au-dessus de la première bissectrice. Cependant, les courbes se croisent (au niveau $\alpha = 73\%$), et ensuite Q est inférieure à la fonction identité. Par rapport aux données de référence, le RCP8.5 montre donc une baisse du RAI (soit un assèchement) pour les mois secs et normaux. À l'inverse, à horizon lointain, les mois plus humides le sont encore davantage que sur l'« historique ». La distribution du RAI s'aplatit donc ; la relative stabilité du RAI moyen cache alors une plus grande dispersion de celui-ci, synonyme de détérioration du régime de précipitations puisque ces dernières sont plus concentrées.

Pour voir si ces changements dans la distribution du RAI sont uniformément répartis dans l'année, les valeurs prises par l'indice sont maintenant distinguées selon le mois. Pour un mois et un climat donnés, les valeurs d'intérêt suivantes sont retenues dans la série des 30 RAI calculés : le minimum, le maximum et la médiane (préférée à la moyenne qui est influencée par les valeurs extrêmes). Le résultat est illustré dans la figure 3.2 pour le climat dégradé.

Pour les cinq zones climatiques, des traits communs nets existent lors de la comparaison entre données projetées et « historiques », par exemple la forte augmentation du RAI médian pour le mois de mars. À l'inverse il baisse partout pour les mois d'avril, mai, juillet, septembre, octobre et décembre.

Une hausse du RAI maximum est observée dans les cinq zones pour les mois de février et mars. Le phénomène inverse est visible pour avril et septembre. Le RAI minimal évolue lui de façon hétérogène d'un *cluster* à l'autre, mais une diminution est à noter en mai. Pour le climat dégradé, cette observation peut être étendue aux mois d'avril, juillet et novembre (figure 3.2).

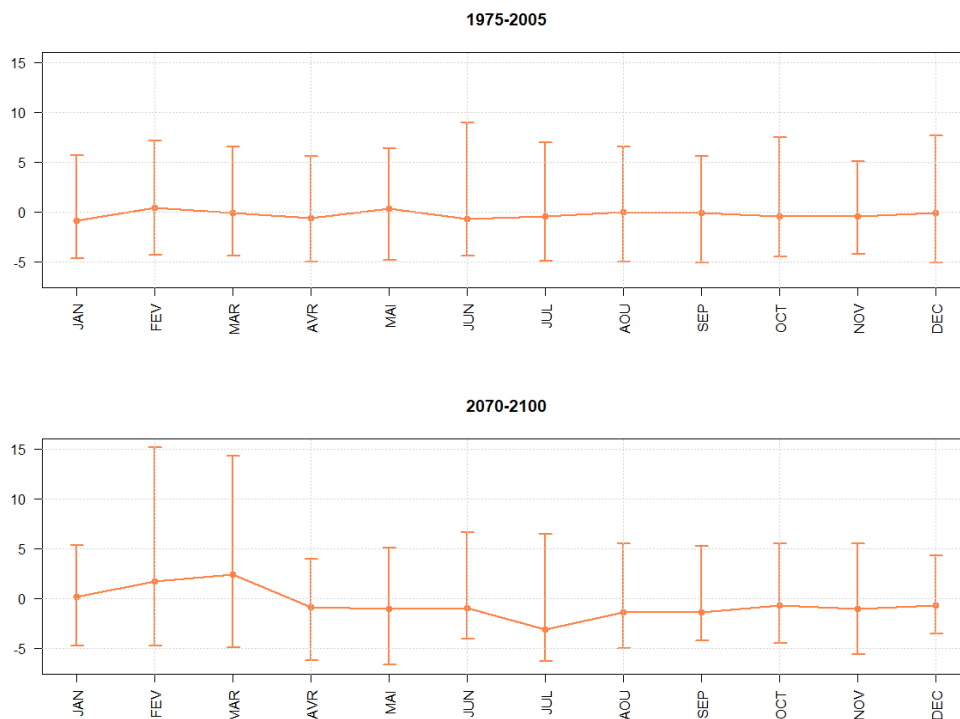


FIGURE 3.2 : Distribution du RAI (minimum, médiane et maximum) selon le mois pour le climat dégradé - « historique » et RCP8.5.

Toutes ces évolutions se retrouvent donc à l'échelle du bassin méditerranéen en faisant une moyenne pondérée (par le nombre de points) des résultats obtenus pour les cinq groupes (figure 3.3). La dégradation est très nette pour le mois de juillet, où la médiane passe de $-0,2$ sur la période de référence à $-2,7$ sur la période 2070-2100. Sur ce même mois, la médiane est de $-2,4$ pour le climat méditerranéen mais descend entre $-2,8$ et $-3,1$ pour les autres régions climatiques.

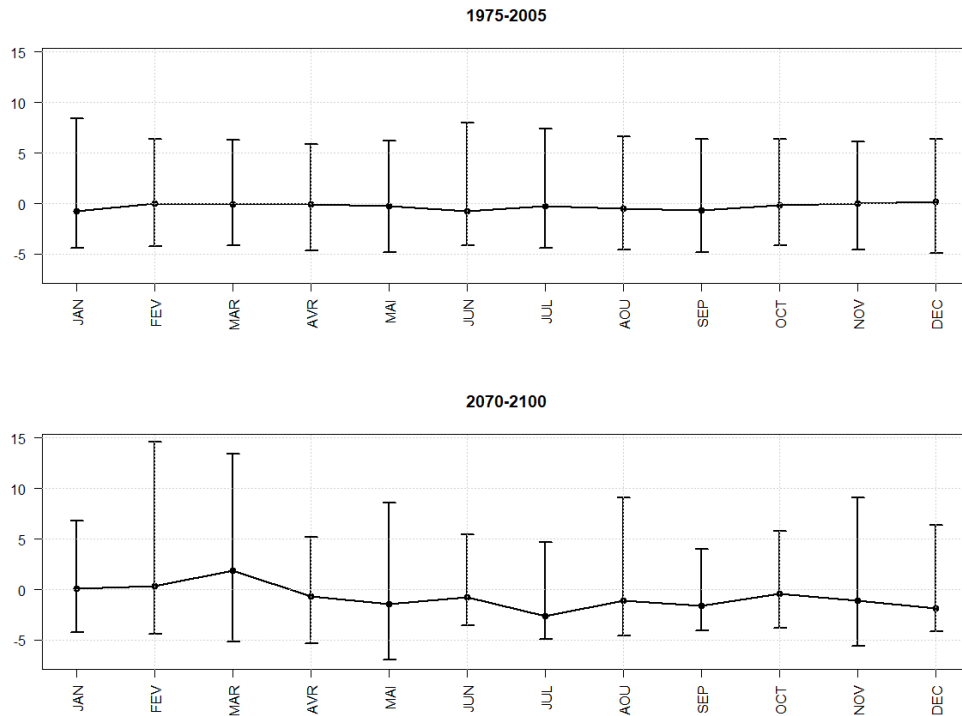


FIGURE 3.3 : Distribution du RAI (minimum, médiane et maximum) selon le mois en moyennant (avec pondération) sur l'ensemble des cinq zones climatiques - « historique » et RCP8.5.

Toujours sur le mois de juillet, le RAI moyen à horizon lointain est moins bas en Corse que sur le continent. Cela implique que les précipitations pour les mois de juillet très humides progressent plus en Corse que dans les autres régions.

Pour interpréter ces déformations dans la distribution du RAI, il peut être intéressant d'effectuer un classement par décile. Pour chacun des *clusters*, les déciles $\{q_\alpha, \alpha = 10\%, \dots, 90\%\}$ sont relevés pour la série « historique » du RAI. On pose par ailleurs $q_{0\%} = -\infty$ et $q_{100\%} = +\infty$.

À partir de ces quantiles, il est possible de trier les RAI projetés selon 10 classes. La première regroupe les valeurs inférieures au premier décile « historique ». La deuxième classe rassemble les valeurs d'indice comprises entre les deux premiers déciles obtenus sur la période de référence. La troisième classe correspond aux nombres situés entre le deuxième et le troisième décile, *etc.* La classe n°10 regroupe les valeurs supérieures au quantile à 90% parmi les RAI de référence. Formellement, si la classe i est notée C_i , et que les quantiles $q_{0\%}, \dots, q_{100\%}$ sont renommés d_0, \dots, d_{10} , alors

$$\forall i \in [1, 10], C_i = \{\text{RAI}^{proj.} \mid d_{i-1} < \text{RAI}^{proj.} \leq d_i\}. \quad (3.2)$$

Ces différentes classes correspondent chacune à un certain niveau d'humidité. Pour reprendre les termes utilisés dans le tableau 1.1, on peut par exemple dire qu'un mois dont le RAI appartient à la

classe C_1 présente une sécheresse sévère, une sécheresse modérée pour la classe C_2 , légère pour C_3 , et très légère pour C_4 . La classe C_5 correspond à des mois normaux plutôt secs. Les interprétations des classes C_6 à C_{10} sont obtenues par symétrie, où le caractère humide remplace celui de sec. Les périodes de retour de la table 1.1 ne sont en revanche plus d'actualité; la classe C_1 correspond par exemple à une période de retour supérieure à 10 ans, et entre 5 et 10 ans pour la classe C_2 .

Par construction, pour chacun des cinq *clusters*, chaque classe posséderait une fréquence de 10% si le RAI simulé entre 2070 et 2100 possédait la même distribution que sur la période de référence. Ce n'est pas le cas ici (figure 3.4b). Pour le climat montagnard, la classe C_1 est nettement surpondérée avec un poids de 18%. La période de retour des sécheresses (météorologiques) sévères, qui était de 10 ans « historiquement », passe alors à 5,6 ans. Cet effet est compensé par une baisse de l'importance des classes 7 à 10, c'est-à-dire une diminution de la fréquence des mois humides.

Les quatre autres zones climatiques présentent quant à elles le même schéma, à savoir des mois secs plus fréquents (sans que ce phénomène soit concentré sur les sécheresses sévères), et des mois humides et normaux (au sens de la période de référence) plus rares. La classe C_{10} , qui correspond aux mois avec une humidité « sévère », déroge à cette règle en étant nettement surpondérée (figure 3.4a pour le climat corse de montagne).

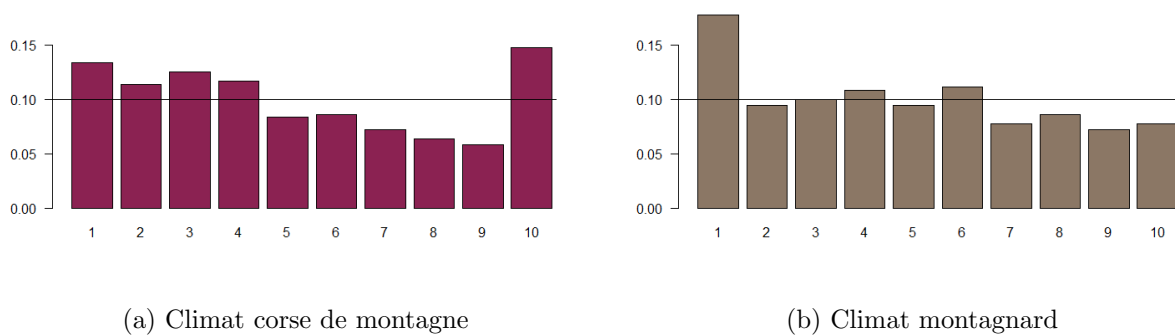


FIGURE 3.4 : Fréquences d'apparition des classes C_1, \dots, C_{10} pour différentes zones climatiques - RCP8.5.

L'étude de l'autocorrélation ne soulève pas de brusque changement entre période de référence et horizon lointain. Il n'y a pas de motif particulier sur le RAI lorsqu'il est vu comme une série temporelle; l'autocorrélation est très faible.

3.1.2 Étude de l'indice EDI

L'EDI est un indice de sécheresse basé sur les précipitations uniquement, comme le RAI. À la différence de ce dernier, les pluies sur un an rentrent dans le calcul, et non seulement les précipitations sur un mois. Cette profondeur dans la définition de l'indice permet de mieux caractériser un épisode de sécheresse.

L'indice est défini au pas de temps journalier, et à l'échelle du *cluster* avec une méthodologie similaire à celle utilisée pour le RAI (partie 3.1.1). Pour chacun des groupes de points, l'indice est calculé sur l'« historique » (30 juillet 1976-31 juillet 2005) et à horizon lointain (31 juillet 2071-31 juillet 2100). L'indice n'est pas défini sur les 364 premiers jours de chaque période.

L'EDI correspond à une standardisation de précipitations efficaces (équation 1.10). Pour mieux

observer les potentiels changements dans la distribution de l'indice entre « historique » et projections, la même standardisation est retenue pour les deux séries. En l'occurrence, il s'agit de celle utilisée pour la période de référence. Pour un jour j , l'EDI à cette date correspondra donc aux précipitations efficaces de ce même jour, retranchées de leur moyenne « historique » ($\mu_j^{EP,H}$), et divisées par leur écart-type « historique » ($\sigma_j^{EP,H}$) :

$$EDI_j = \frac{EP_j - \mu_j^{EP,H}}{\sigma_j^{EP,H}}. \quad (3.3)$$

Ainsi défini, l'EDI n'est plus nécessairement centré et réduit sur la période 2071-2100. En faisant une moyenne des observations sur tous les *clusters*, avec une pondération par la taille, l'EDI moyen sur l'horizon lointain est ainsi de -0,13 sur le bassin méditerranéen.

La détérioration de la moyenne semble croître avec l'altitude. En effet, elle est plus modérée en plaine corse et continentale, avec un EDI moyen de -0,08 dans les projections. En moyenne montagne, cette valeur passe à -0,12 en Corse et -0,13 pour le climat dégradé. Pour le cinquième *cluster* qui regroupe les points de haute montagne, la moyenne chute à -0,47.

Les changements dans les valeurs extrêmes (minimum et maximum) sont hétérogènes d'une région climatique à l'autre, et de toute façon difficilement interprétables puisqu'il faudrait un nombre considérable de simulations climatiques pour avoir une vision robuste de ces quantités. Une forte hausse de l'EDI maximal peut cependant être relevée en Corse. Cet indicateur passe de 4,4 sur l'« historique » à 11,1 sur les projections pour le climat littoral de l'île, et de 4,3 à 8,9 pour les montagnes corses. Sur le continent, la valeur minimal de l'indice se détériore dans les trois régions climatiques. La baisse est alors de l'ordre de 10%.

Pour chacun des *clusters*, la série « historique » de l'EDI présente un écart-type de 1 par construction. Ce n'est pas forcément le cas de la série projetée. L'indice est ainsi nettement plus volatile sur le climat méditerranéen avec un écart-type de 1,31. La distribution de l'EDI est en revanche plus resserrée pour le climat montagnard, avec un écart-type de 0,83. Avec une moyenne qui diminue, cela indique qu'il devient plus rare que les sols soient relativement humides dans cette zone. Les trois autres climats donnent un écart-type compris entre 1,06 et 1,10.

Pour analyser l'évolution de l'indice à travers l'intégralité de sa distribution, la fonction Q définie en 3.1 est utilisée. La représentation graphique de cette fonction permet d'identifier des déformations inégales dans la distribution de l'indice selon le *cluster* considéré :

- pour le climat montagnard, la fonction Q est nettement supérieure à l'identité sur $]0, 1[$ (figure 3.5a). Les précipitations efficaces sur un horizon d'un an se dégradent fortement. Ce phénomène est particulièrement visible sur les jours légèrement secs sur la période de référence, qui deviennent légèrement humides sur les projections. En effet, la valeur « historique » du quantile à 40% de l'EDI pour le climat montagnard correspond au quantile à 61% de la série de l'EDI entre 2071 et 2100 sur cette même zone ;
- pour le climat méditerranéen, la fonction Q est d'abord au-dessus de la première bissectrice, puis la croise en $\alpha = 76\%$, et reste alors légèrement en dessous de cette droite (figure 3.5b). Les conditions normales et sèches (au sens de l'EDI) s'assèchent donc. En revanche, les conditions humides le deviennent encore davantage. Ces observations vont dans le sens d'une baisse de la moyenne et d'une augmentation de l'écart-type de l'EDI ;
- pour les trois autres climats, une situation intermédiaire est observée. La fonction Q est toujours au-dessus de l'identité dans un premier temps, puis très proche de cette dernière (cf. figure 3.5c).

Dans ce cas, les jours secs (selon l'indice) s'assèchent encore davantage alors qu'il n'y a pas de vrai changement sur les jours humides.

Une moyenne (pondérée par la taille des *clusters*) des fonctions Q afférentes aux cinq zones climatiques est illustrée sur la figure 3.5d. La représentation graphique rappelle alors celle du climat méditerranéen, ce qui n'est pas surprenant puisque cette zone est celle qui concentre le plus de points (618 sur les 1 071).

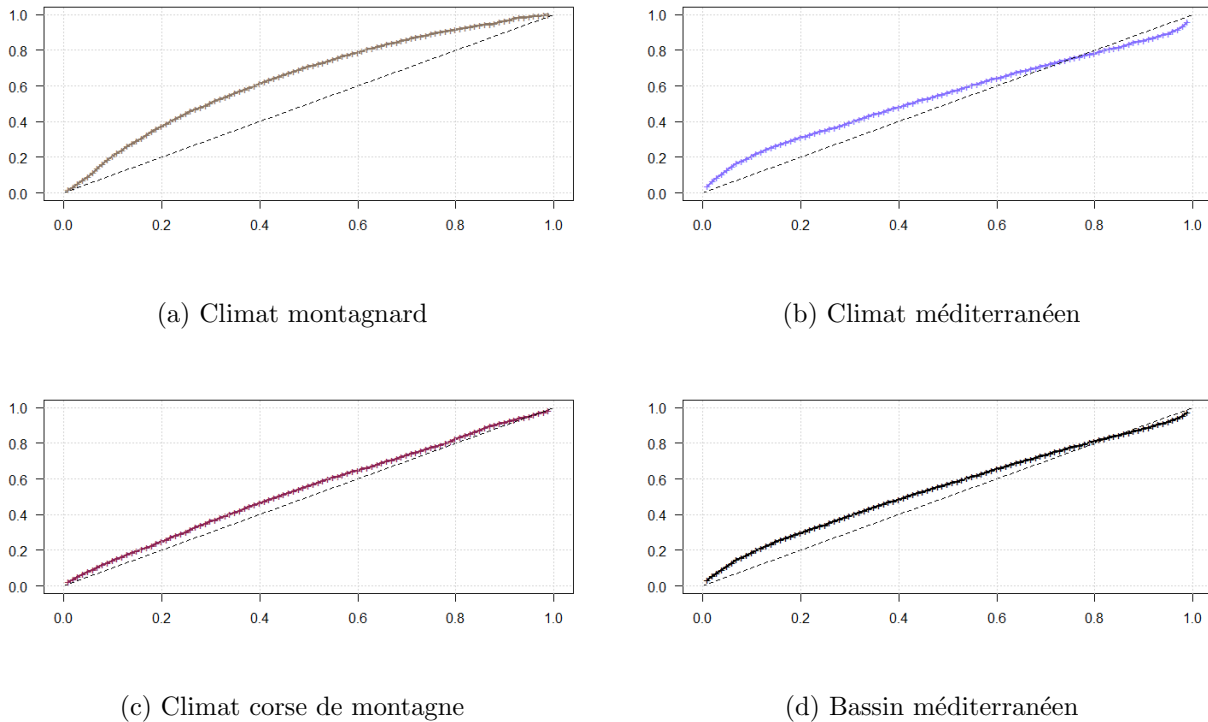


FIGURE 3.5 : Représentation de la fonction Q pour comparer les distributions « historique » de l'EDI et projetée selon le RCP8.5.

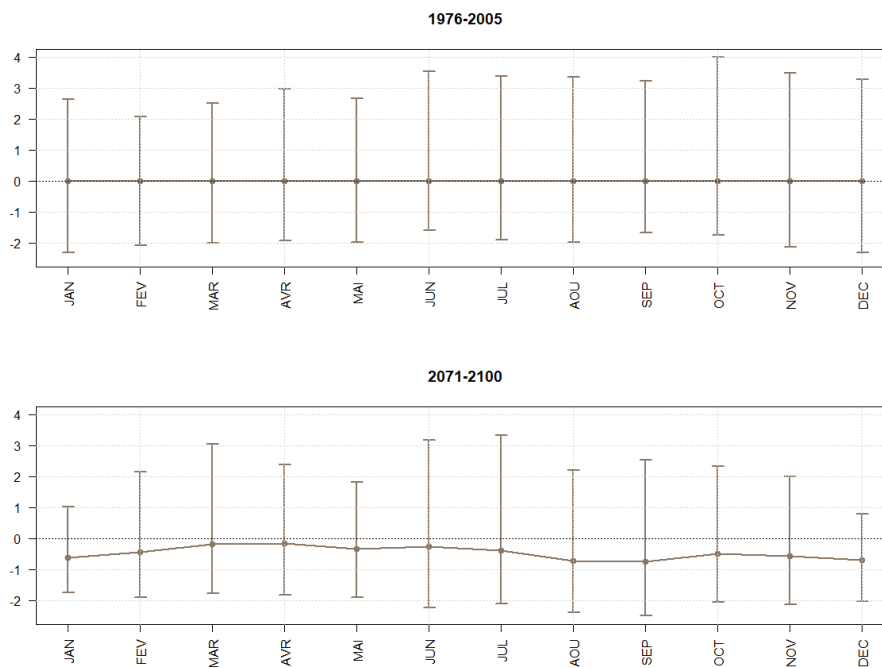
Les valeurs de l'EDI peuvent être triées selon le mois afin de voir si ces évolutions sont uniformément réparties dans l'année. Par construction, l'EDI est centré au global sur la période de référence mais aussi en étudiant les séries mensuelles. En effet, le processus de standardisation est réalisé par date calendaire.

Cette observation est visible sur la figure 3.6a. En passant à la période de projection, la valeur moyenne de l'indice baisse sur le second semestre pour tous les climats. Ce phénomène est beaucoup plus marqué sur le continent qu'en Corse. L'EDI moyen augmente néanmoins sur les mois de mars et avril, sauf dans le cas du climat montagnard où la dégradation intervient sur tous les mois de l'année (figure 3.6b).

En utilisant une moyenne pondérée par la taille des *clusters*, la courbe des normales pour le bassin méditerranéen est très proche de celle observée pour le climat dégradé (figure 3.6a). Les sécheresses météorologiques progressent en été et en automne, voire sur toute l'année en haute montagne.



(a) Climat dégradé



(b) Climat montagnard

FIGURE 3.6 : Distribution de l'EDI (minimum, moyenne et maximum) selon le mois pour différents climats - « historique » et RCP8.5.

Pour identifier ces sécheresses et en mesurer la force, il est possible d'utiliser les seuils définis en [1.3.1](#) pour caractériser des conditions normales, sèches ou humides avec différents degrés d'intensité. Huit classes peuvent alors être formées :

- la classe C_4 (resp. C_5) lorsque l'EDI est compris entre -1 et 0 (resp. entre 0 et 1), qui correspond à des conditions normales légèrement sèches (resp. légèrement humides) ;
- la classe C_3 (resp. C_6) lorsque l'EDI est compris entre -1,5 et -1 (resp. entre 1 et 1,5), qui correspond à des conditions de sécheresse (resp. humidité) modérée ;
- la classe C_2 (resp. C_7) lorsque l'EDI est compris entre -2 et -1,5 (resp. entre 1,5 et 2), qui correspond à des conditions de sécheresse (resp. humidité) sévère ;
- la classe C_1 (resp. C_8) lorsque l'EDI est inférieur à -2 (resp. supérieur à 2), qui correspond à des conditions de sécheresse (resp. humidité) extrême.

Pour chacun des *clusters*, les fréquences de ces huit classes sont calculées sur la période de référence et à horizon lointain. Une moyenne (en pondérant avec la taille des *clusters*) est ensuite réalisée pour obtenir des fréquences à l'échelle du bassin méditerranéen. Ces dernières sont représentées sous la forme d'histogrammes sur la figure 3.7.

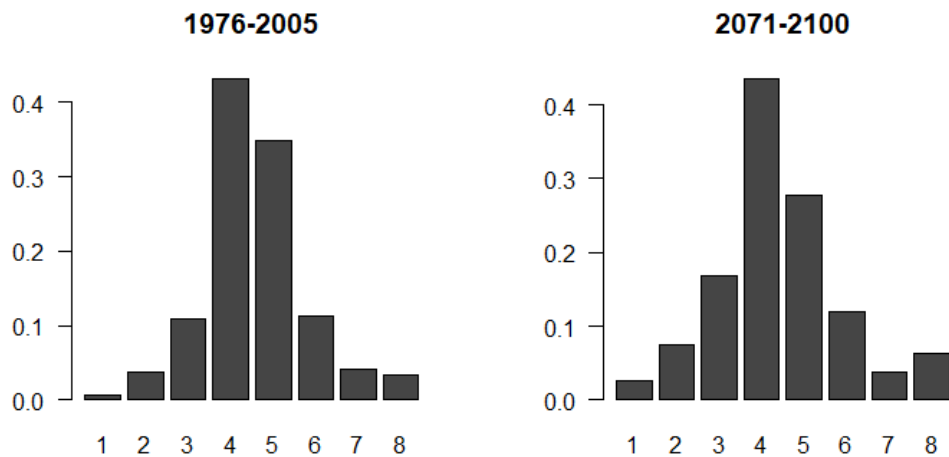


FIGURE 3.7 : Fréquences d'apparition des classes C_1, \dots, C_8 à l'échelle du bassin méditerranéen - RCP8.5.

La comparaison de la période 2071-2100 à celle de référence révèle tout d'abord une baisse de la fréquence de la classe C_5 (normale humide), qui passe de 35 à 28%. Au niveau des conditions humides, le changement notable intervient sur la queue de distribution. La fréquence de la classe C_8 passe de 3,4 à 6,2%.

La progression des conditions sèches est très claire. La sécheresse modérée, qui intervenait un jour sur neuf sur l'« historique » devient plus régulière à horizon lointain puisqu'elle concerne alors un sixième des journées. La période de retour des sécheresses sévères est réduite de moitié, pour atteindre 13 jours. La fréquence de dépassement du seuil de -2 pour l'EDI est de 0,006% sur les données « historiques », contre 0,025% à horizon lointain dans ce scénario pessimiste. La période de retour de ces conditions sèches extrêmes passe alors de 161 à 39 jours.

Une analyse à l'échelle du *cluster* amène peu ou prou les mêmes conclusions. La progression des conditions extrêmement humides est en revanche spécifique au climat méditerranéen. Le climat montagnard amène (une fois de plus) à des conclusions différentes des autres zones, avec un histogramme

qui se déplace entièrement vers la droite (figure 3.8). Ce décalage, perceptible sur toute la distribution de l'indice (voir 3.5a) impacte les fréquences d'apparition de chaque classe. Contrairement à ce qui était visible à l'échelle du bassin méditerranéen, les classes qui correspondent à des conditions humides (C_5 à C_8) perdent radicalement en fréquence. Pour la classe C_5 , qui reflète des conditions souhaitables d'humidité, la baisse s'établit à 40%. Concernant les sécheresses, les classes C_1 et C_3 doublent en fréquence. L'augmentation est de 84% pour les sécheresses sévères.

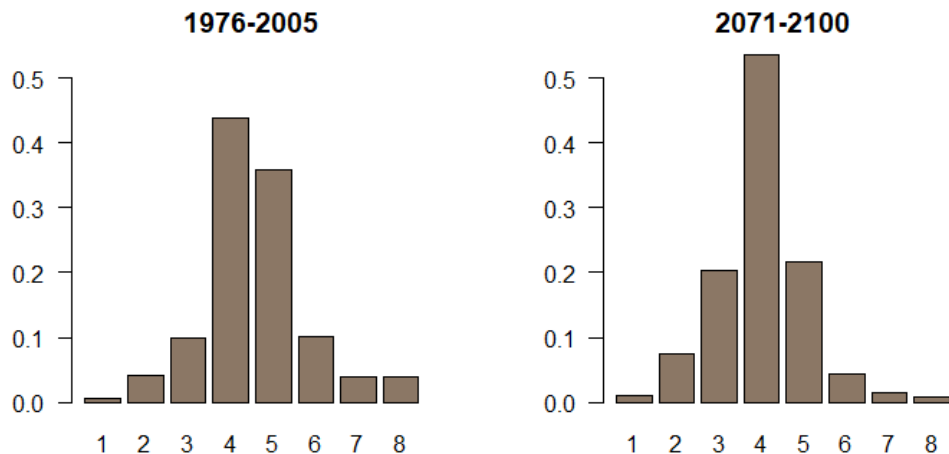


FIGURE 3.8 : Fréquences d'apparition des classes C_1, \dots, C_8 pour le climat montagnard - RCP8.5.

3.1.3 Étude de l'indice IS

Par rapport aux deux indices étudiés précédemment, l'indice mensuel IS construit en 1.3.2 fait intervenir plusieurs variables météorologiques : précipitations, évapotranspiration potentielle, températures moyennes et maximales. Cet indice a été pensé pour être croissant avec la sécheresse.

Comme certains termes sont calculés sur une année glissante dans la formule 1.15 (P_m^* et ETP_m^*), l'indice n'est pas défini pour les 11 premiers mois de la série. Sur l'« historique », il est donc calculé à partir de juillet 1976, et en commençant en juillet 2071 pour l'horizon lointain.

L' IS moyen par région sur la période de référence va de 52 pour le climat montagnard à 142 pour le climat corse de plaine. Avec le scénario RCP8.5, ces moyennes s'étendent sur la période 2071-2100 de 103 à 237. L'ordre entre les cinq *clusters* est préservé, mais un rapprochement net s'opère entre le climat corse de plaine et le climat méditerranéen (pour lequel la valeur moyenne de l'indice passe de 128 à 235). L'augmentation de la moyenne est plus importante sur le continent qu'en Corse. Elle est aussi plus importante proportionnellement avec l'altitude. Les moyennes de l'indice varient nettement d'une région à l'autre, ce qui est normal puisqu'il n'est pas normalisé.

En pondérant les moyennes par la taille des *clusters*, on peut approcher la valeur moyenne de l'indice sur le bassin méditerranéen : 110 sur la période de référence, et 200 à horizon lointain.

Alors que la valeur minimum de l'indice reste dans tous les cas à 0, le maximum et les quartiles augmentent fortement. Pour la zone montagneuse de Corse, le maximum évolue en revanche assez peu, passant de 1 160 à 1 207 dans le scénario RCP8.5.

L'*IS* est donc plus dispersé, ce qui se voit au niveau de l'écart-type, en hausse lui aussi. La volatilité augmente légèrement plus sur le continent (avec à peu près un facteur 2) qu'en Corse (ou elle augmente de 57% en plaine et 70% en montagne).

Il est possible de regarder pour chaque zone climatique et chaque mois quelles sont les valeurs extrêmes prises par l'indice *IS* ainsi que la médiane. Le minimum croît pour les mois de juin à septembre, particulièrement en juillet (cf. figure 3.9a pour le climat méditerranéen). Le maximum augmente également, mais pour des mois différents selon le *cluster* étudié.

Une hausse est également notée globalement pour la médiane, hormis pour le mois de mars que l'on sait plus humide (voir 2.4.2). Cette progression est particulièrement nette au mois de juillet (figure 3.9a).

Les mêmes constats peuvent être dressés directement à l'échelle du bassin méditerranéen. Les valeurs d'intérêt sont obtenues avec une moyenne pondérée par la taille des *clusters*, et représentées dans la figure 3.9b. Ce graphique montre que l'indice *IS* possède une saisonnalité. Celle-ci se déforme, et devient plus importante à horizon lointain dans un scénario pessimiste. Les conditions les plus sèches interviennent plutôt en août sur la période de référence. Ce pic se retrouve en juillet dans les projections. Cette observation sur l'indice *IS* va dans le même sens que ce qui avait été relevé pour le *Rainfall Anomaly Index* (figure 3.3).

Les analyses sur ces trois indices tendent toutes vers un assèchement global du climat dans le bassin méditerranéen. Les régions de montagne sont plus sensibles, et le phénomène est maximal en été.

Cet assèchement peut être étudié sous un autre prisme en s'intéressant maintenant à des applications en assurance paramétrique.

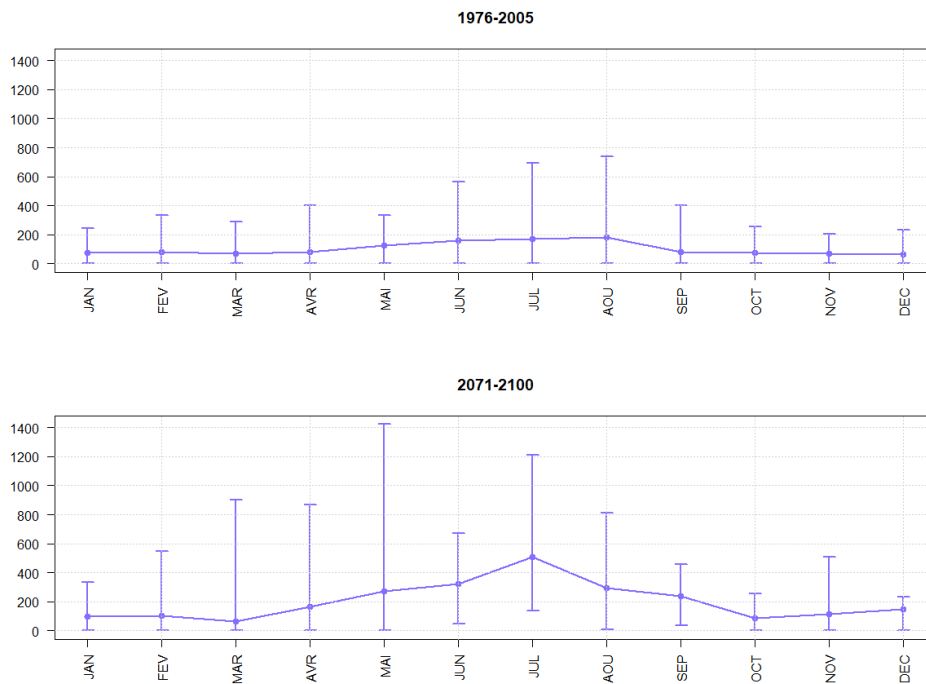
3.2 Application à des contrats d'assurance paramétrique avec une approche multi-modèles

Les parties précédentes ont montré que le climat pourrait considérablement s'assécher sur le bassin méditerranéen au cours du XXI^e siècle. L'objectif est ici de quantifier ces changements à travers des applications en assurance paramétrique.

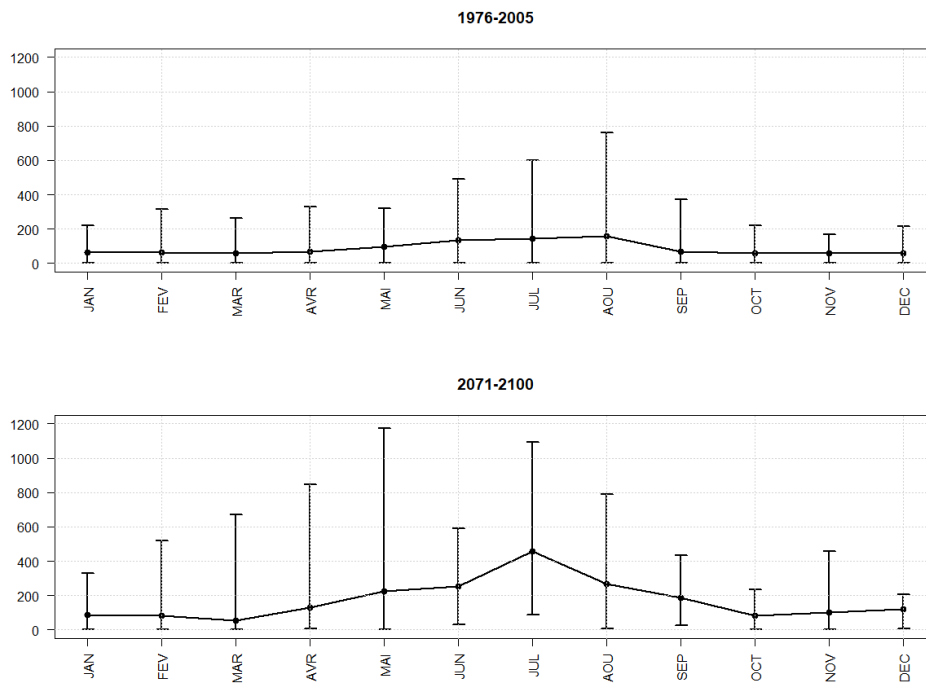
En s'appuyant sur les données disponibles sur le portail DRIAS, une comparaison est réalisée sur des exemples de contrats entre les deux fenêtres temporelles évoquées précédemment : « historique » (1975-2005) et horizon lointain (2070-2100). Les scénarios optimiste (RCP2.6) et pessimiste (RCP8.5) sont retenus pour observer l'évolution potentielle des contrats avec un spectre le plus large possible.

Pour avoir des résultats plus robustes, les trois modèles climatiques à concentrations en aérosols évolutives disponibles sur le portail DRIAS vont être utilisés (avec le même poids). Ces modèles sont :

- KNMI-RACMO22E - CNRM-CERFACS-CNRM-CM5, dénommé par la suite CNRM-Racmo ;
- KNMI-RACMO22E - ICHEC-EC-EARTH, dénommé par la suite EC-Racmo ;
- CNRM-ALADIN63 - CNRM-CERFACS-CNRM-CM5, dénommé par la suite CNRM-Aladin et déjà utilisé précédemment.



(a) Climat méditerranéen



(b) Bassin méditerranéen

FIGURE 3.9 : Distribution de l'indice IS (minimum, médiane et maximum) selon le mois pour le climat méditerranéen et sur l'ensemble de la zone d'étude - « historique » et RCP8.5.

Cela permettra de manipuler plus de données, et donc de réduire les fluctuations d'échantillonnage.

Le mécanisme de l'assurance indicielle est décrit en [1.2](#). Le contrat d'assurance paramétrique doit avoir une cible bien définie, et permettre à son détenteur de réellement réduire son exposition au risque sécheresse.

Dans la continuité de ce qui a été réalisé précédemment dans ce mémoire, la zone géographique étudiée est le bassin méditerranéen (français). Pour un contrat donné portant sur un indice calculable à partir des variables climatiques disponibles sur le DRIAS ([2.2.1](#)), la prime pure (*ie.* le niveau moyen de prestations) peut être estimée, sur l'« historique » et à horizon lointain.

3.2.1 Couvertures contre le manque d'humidité des sols à l'aide du SWI

Les agriculteurs sont très exposés à la sécheresse des sols. Dès lors, l'indice d'humidité des sols SWI (*cf.* [1.3.1](#)) pourrait être utilisé dans le cadre d'une assurance paramétrique à destination des exploitants agricoles.

Deux contrats différents qui portent sur le SWI* sont proposés à l'étude. Pour réduire les temps de calcul nécessaires à l'obtention de primes pures, ces dernières ne seront pas estimées pour chacun des 1 071 points. Au lieu de cela, cinq points, dits parangons, seront retenus. Ces points sont les plus représentatifs de chacune des cinq régions homogènes en climat (*cf.* annexe [E](#)).

Contrat 1 : approche forfaitaire

Dans un premier temps, un contrat très simple est proposé. Il consiste en une indemnisation forfaitaire lorsque les sols ont été secs sur une période donnée. Pour essayer de capter l'exposition au risque sécheresse d'un agriculteur sur une culture donnée, le contrat sera défini par saison (les saisons sont délimitées simplement comme en [1.1.2](#)). Pour une saison donnée, les sols seront considérés secs lorsque le SWI moyen sur la période est en-dessous d'un seuil α . Si cette condition est remplie, le bénéficiaire du contrat touche 10 000 €. En notant \widehat{SWI} la valeur moyenne de l'indice SWI sur la saison considérée, l'indemnisation I en euros est donc obtenue par :

$$I = 10\,000 \times \mathbb{1}_{\widehat{SWI} < \alpha} . \quad (3.4)$$

Pour chacun des cinq points géographiques et chaque saison, la prime pure d'un tel contrat est calculée. Il est alors possible d'estimer une prime pure uniforme à l'échelle du bassin méditerranéen avec une moyenne pondérée (par la taille des *clusters*) des primes locales.

Ces primes pures uniformes, vues comme des fonctions de α , sont illustrées sur la figure [3.10](#) pour les quatre saisons. Graphiquement, la courbe rouge est toujours au-dessus de celle noire, ce qui témoigne d'un assèchement global des sols quelle que soit la saison avec le RCP8.5. Pour le scénario RCP2.6, à l'exception de la saison hivernale, le même constat peut être dressé mais dans une moindre mesure. En hiver, les sols sont plus humides dans le scénario optimiste que sur la période de référence puisque la courbe bleue est en dessous de la noire.

Dans le scénario pessimiste, la prime peut augmenter très fortement par rapport au tarif « historique ». Par exemple, le contrat qui indemnise au printemps lorsque le SWI moyen est inférieur au seuil $\alpha = 0,6$ voit sa prime passer de 1 944 à 3 730 €.

*Notons que sur l'ensemble du bassin méditerranéen, le SWI moyen obtenu avec l'approche multi-modèles est de 0,60 sur la période de référence, contre 0,61 à horizon lointain dans le scénario optimiste et 0,53 dans le *business as usual*.

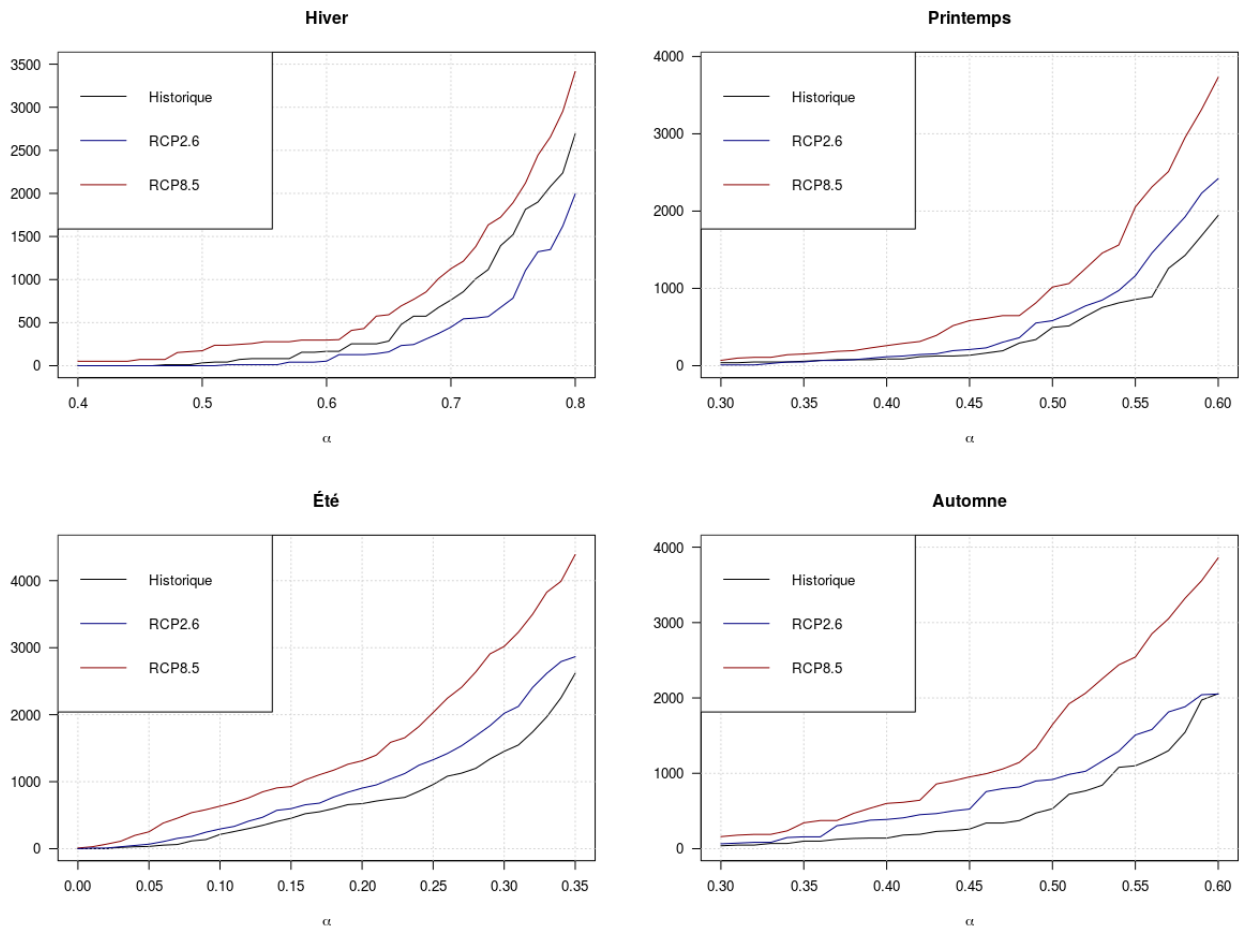


FIGURE 3.10 : Prime pure uniforme du contrat n°1 pour chaque saison en fonction du seuil de déclenchement α .

En distinguant selon la région climatique (c'est-à-dire selon le paragon étudié), il est possible d'apporter quelques éléments supplémentaires. Pour le climat corse de plaine, la sécheresse agricole en été n'est quasiment plus assurable dans un scénario pessimiste. En effet, la prime pure s'y élève à 2 111 € pour un seuil $\alpha = 0,05$ contre 333 € « historiquement » et 778 € dans le RCP2.6. En élevant le seuil à 0,09, la prime qui s'élevait à 1 222 € dans la situation « historique » dépasse à horizon lointain les 5 000 € sous le scénario RCP8.5. Dans ce cas, le SWI moyen est inférieur à ce seuil dans plus de la moitié des été simulés. L'augmentation reste significative dans le scénario optimiste, même si elle est plus mesurée, avec une prime pure de 2 111 € à horizon lointain. Enfin, pour un seuil $\alpha = 0$, la prime pure n'est pas nulle (111 €) dans le scénario *business as usual*. Les sols peuvent alors se retrouver secs au point que l'humidité des sols moyenne sur une saison entière ne permette pas aux plantes de puiser de l'eau.

Cette détérioration en Corse en été n'est pas cantonnée au littoral. Pour un seuil $\alpha = 0,2$, la prime pure passe ainsi de 1 333 à 6 222 € sur le paragon du climat corse de montagne. Pour les deux points étudiés en Corse, la dégradation en été est bien moindre sur le RCP2.6.

En automne, une forte augmentation de la prime est à souligner pour le climat montagnard dans le scénario RCP8.5. Pour un seuil $\alpha = 0,4$, elle passe ainsi de 111 à 889 €. Ce seuil n'est pas atteint dans

le scénario optimiste, la prime pure est donc nulle sur le scénario RCP2.6. En modifiant la valeur de α à 0,5, le tarif « historique » de 333 euro passe à 778 € dans le RCP2.6, et 2 222 € dans le scénario pessimiste.

Enfin, dans le RCP8.5, des sols peuvent être véritablement secs en hiver pour les climats corse de plaine, dégradé et montagnard. Pour ces derniers, la prime pure est alors strictement positive pour $\alpha = 0, 4$, ce qui n'est jamais le cas dans le RCP2.6 et l'« historique ».

Pour aller plus loin, le seuil α^* est défini pour chaque saison comme celui où la prime pure uniforme « historique » est de 250 €. En utilisant les quatre seuils α^* simultanément, il est possible de définir un nouveau contrat comme somme des contrats saisonniers d'une année. Ce contrat « quatre saisons » a par construction une prime pure de 1000 € (ou proche puisque l'on travaille avec un nombre limité de données) en moyenne sur le bassin méditerranéen. Les α^* retenus sont de 0,475 (resp. 0,105, 0,450 et 0,620) pour le printemps (resp. l'été, l'automne et l'hiver).

Sa prime à horizon lointain est simplement obtenue en sommant les primes des contrats saisonniers. La prime pure du contrat 1 est calculée pour chaque saison, chaque scénario et chaque zone climatique. Le tableau 3.1 donne alors les primes du contrat « quatre saisons », obtenues par sommation.

Climat \ Scénario	Historique	RCP2.6	RCP8.5
Corse de plaine	7 000 €	7 888 €	14 333 €
Corse de montagne	1 111 €	667 €	5 222 €
Méditerranéen	333 €	556 €	889 €
Dégradé	556 €	889 €	2 444 €
Montagnard	667 €	667 €	2 111 €

TABLE 3.1 : Primes pures « historique » et à horizon lointain (2070-2100) par zone climatique de la version quatre saisons du contrat n°1.

Climat \ Scénario	RCP2.6	RCP8.5
Corse de plaine	113%	205%
Corse de montagne	60%	470%
Méditerranéen	167%	267%
Dégradé	160%	440%
Montagnard	100%	316%

TABLE 3.2 : Reformulation des primes pures du tableau 3.1 en pourcentages des tarifs de référence.

Ce tableau montre la différence majeure entre les tarifs à horizon lointain selon le scénario socio-économique. Cet écart est particulièrement visible sur le parangon du climat corse de montagne. La situation géographique a un fort impact puisque les tarifs varient nettement d'une région à l'autre, y compris sur la période de référence.

Le contrat n°1 peut être utile à un agriculteur qui ferait le constat suivant : « Si l'humidité moyenne des sols sur toute la saison est inférieure à un certain seuil, il n'y aura aucune récolte ». Cependant, des conditions sèches n'affectent pas les cultures de façon binaire. Elles peuvent entraîner un rendement inférieur à la normale sans que cela aille jusqu'à l'absence de récolte. Cela amène à considérer un contrat d'assurance paramétrique proportionnel.

Contrat 2 : approche proportionnelle

Le contrat n°2 est toujours fondé sur le SWI et un seuil α de sécheresse. L'approche du contrat souscrit pour une saison est encore retenue, mais cette fois-ci différents montants peuvent être versés au bénéficiaire en cas de sécheresse. L'indemnisation est en effet proportionnelle au plus grand nombre de jours consécutifs où l'indice journalier SWI descend en dessous du seuil α , en comptant 1 000 € par jour. En notant n le nombre de jours de la saison considérée, l'indemnisation I s'exprime comme suit :

$$I = 1\,000 \times \max \left\{ 1 \leq k \leq n \mid \exists J \in \llbracket 1, n - k \rrbracket, \max_{j \in \llbracket J, J+k \rrbracket} SWI_j < \alpha \right\} . \quad (3.5)$$

Pour une saison donnée, il semble raisonnable de supposer que l'impact de 14 jours consécutifs de sécheresse sera beaucoup plus néfaste pour les cultures que deux semaines « isolées » de sécheresse. Cela justifie le choix d'utiliser le nombre de jours secs consécutifs. L'indemnisation est proportionnelle à une quantité qui ne peut prendre qu'un nombre fini de valeurs. Ainsi, le contrat peut être assimilé à une indemnisation par paliers (figure 1.7).

Les primes pures sont dans un premier temps établies par parangon, chacun de ces cinq points représentant une zone climatique. La prime pure du contrat n°2 pour le printemps, vue comme une fonction du paramètre α , affiche une claire hausse à horizon lointain par rapport à la période de référence, et ce même dans le scénario optimiste. Par exemple, pour le climat dégradé et $\alpha = 0,4$, la prime passe de 290 à 710 € dans le RCP2.6. Ce phénomène est plus marqué dans le scénario RCP8.5, où la prime à horizon lointain s'élève à 1 239 €. Une explosion de la prime est relevée pour le climat montagnard et $\alpha = 0,6$. Cette dernière est de 251 € en situation « historique », mais respectivement 740 et 1 939 € en fin de siècle avec les scénarios RCP2.6 et RCP8.5.

Les primes pures du contrat estival ressemblent fortement à celles du printemps, à la différence près que les conditions sont nettement plus sèches. Ainsi, à niveau de prime équivalent, le seuil α est nettement plus bas en été que pour toutes les autres saisons. Le tarif « historique » pour le climat montagnard et un seuil $\alpha = 0,35$ est de 122 €, mais 596 € dans le RCP2.6 et même 2 520 € sous le scénario pessimiste. En plaçant le seuil à 0,05, la prime pure pour le climat corse de montagne va de 292 € « historiquement » à 1 863 € en fin de siècle dans le *business as usual* (contre 534 € avec le RCP2.6).

En automne, les différences entre scénarios sont moins importantes. Le RCP2.6 se retrouve assez proche de la référence. Ce constat ne s'applique cependant pas au climat montagnard, sur lequel la prime pure augmente très nettement avec le forçage radiatif. Pour le seuil $\alpha = 0,4$, elle passe ainsi de 272 € à 439 € à horizon lointain dans le RCP2.6, et même 1 428 € dans le RCP8.5. À l'inverse de tout ce qui a été observé par ailleurs, la prime pure possède en Corse une dépendance linéaire en α , et ce quel que soit le scénario. Ce n'est pas le cas en général (voir figure 3.11). Cela participe à une plus grande homogénéité des primes pures d'un point à un autre par rapport aux autres saisons.

Similairement à ce qui a été constaté avec le contrat n°1 (cf. figure 3.10), les primes baissent globalement en hiver dans le scénario optimiste, mais augmentent dans le *business as usual*. Avec $\alpha = 0,6$, le tarif « historique » est de 183 € pour le climat méditerranéen, contre 78 € avec le RCP2.6 et 396 € pour le RCP8.5 sur la période 2070-2100. Pour le parangon du climat montagnard et le même seuil, la prime de référence s'établit à 342 €, mais grimpe à 737 € dans le scénario pessimiste. Elle reste stable *a contrario* avec le RCP2.6, à 332 €.

Ces tarifs peuvent être uniformisés à l'échelle du bassin méditerranéen avec le même procédé que pour le contrat 1. La prime pure uniforme correspond alors à une moyenne des cinq primes pures

calculées sur les parangons, qui sont pondérées par la taille des *clusters*. Cette prime pure uniforme est calculée par saison, pour un seuil α donné.

La figure 3.11 illustre cette prime pure uniforme (vue comme une fonction de α) pour chaque scénario et chaque saison. Graphiquement, l'assèchement des sols peut être identifié quelle que soit la saison dans le RCP8.5 avec une hausse des primes. Ce phénomène n'est pas évident en comparant situations « historique » et projetée selon le RCP2.6. L'inflexion de la courbe visible en été au-delà du seuil $\alpha=0,4$ est due au fait que l'indemnisation, et *a fortiori* la prime, sont bornées.

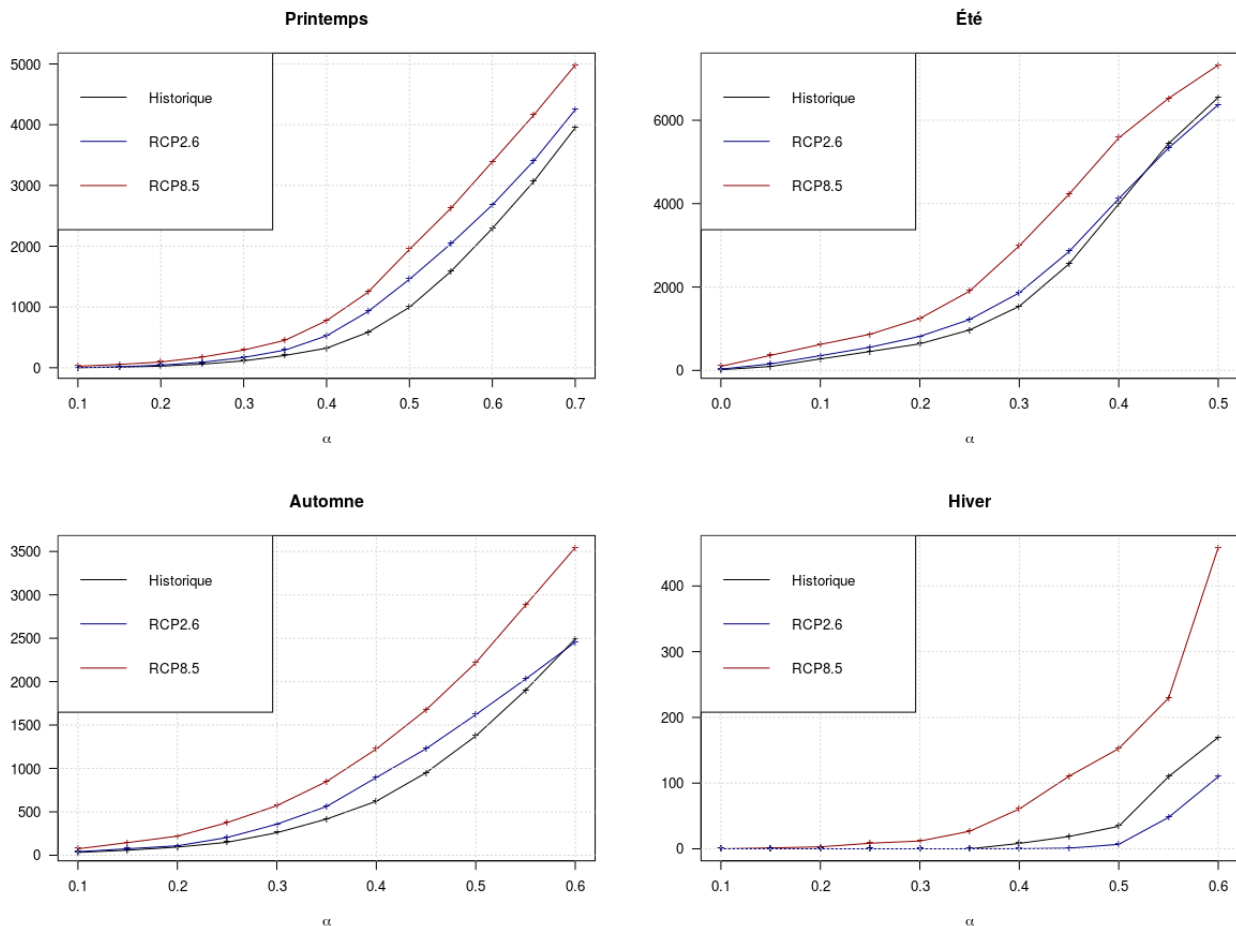


FIGURE 3.11 : Prime pure uniforme du contrat n°2 pour chaque saison en fonction du seuil de déclenchement α .

Comme lors de la précédente application, une version « quatre saisons » est dérivée du contrat n°2. Le processus de construction est rigoureusement le même. Les α^* retenus sont de 0,370 (resp. 0,095, 0,295 et 0,620) pour le printemps (resp. l'été, l'automne et l'hiver). Les tarifs sont alors donnés dans le tableau 3.3. Par rapport aux résultats obtenus pour le premier contrat, la hausse des primes est plus nette entre RCP2.6 et situation « historique ».

Climat \ Scénario	Historique	RCP2.6	RCP8.5
Corse de plaine	6 664 €	7 567 €	11 391 €
Corse de montagne	1 766 €	2 237 €	6 253 €
Méditerranéen	254 €	333 €	744 €
Dégradé	742 €	1 144 €	2 180 €
Montagnard	542 €	462 €	1 356 €

TABLE 3.3 : Primes pures « historique » et à horizon lointain (2070-2100) par zone climatique de la version quatre saisons du contrat n°2.

Climat \ Scénario	RCP2.6	RCP8.5
Corse de plaine	114%	171%
Corse de montagne	127%	354%
Méditerranéen	131%	293%
Dégradé	154%	294%
Montagnard	85%	250%

TABLE 3.4 : Reformulation des primes pures du tableau 3.3 en pourcentages des tarifs de référence.

Ainsi, l'assèchement global du climat dans un scénario pessimiste entraîne à horizon lointain une augmentation substantielle des primes en assurance paramétrique contre la sécheresse des sols. Ce phénomène est visible quelle que soit la saison et le point considéré, dans des proportions plus ou moins importantes. En revanche, la trajectoire socio-économique a un réel impact sur la hausse des primes, qui peut être limitée par rapport au RCP8.5. Dans un scénario optimiste, la sécheresse agricole pourrait même reculer en hiver.

3.2.2 Couvertures contre la sécheresse hydrologique avec l'indice SPEI-6

La partie précédente définit des contrats d'assurance paramétrique à destination d'agriculteurs, exposés à la sécheresse des sols. De manière analogue, il est possible de construire des couvertures indicelles face à la sécheresse hydrologique. De nombreux acteurs sont en effet susceptibles de rechercher ce genre de protection. Les entreprises qui exploitent des barrages hydroélectriques peuvent ainsi être ciblées assez naturellement. Avec les arrêtés préfectoraux qui restreignent l'utilisation de l'eau en période de sécheresse, les stations de lavage pour véhicules ou les municipalités sont également touchées par la sécheresse hydrologique.

Les polices d'assurance paramétrique doivent être basées sur un indice qui réplique bien les sécheresses hydrologiques. Les indices SPI et SPEI sont régulièrement utilisés dans ce cadre. JOETZJER (2011) a justement comparé la capacité de ces deux indices à capter les sécheresses hydrologiques, et évalue leur utilisation en vision prospective. Sur la base d'observations sur les fleuves Danube et Mississippi, le SPI-6 (c'est-à-dire utilisant une profondeur de 6 mois pour les précipitations, cf. 1.3.1) s'avère plus efficace que le SPEI-6, mais la corrélation entre sécheresses hydrologiques et sécheresses selon le SPI reste imparfaite.

Par rapport au changement climatique, l'étude conclut que le SPI-6 a tendance à sous-estimer les sécheresses futures, notamment puisqu'il ne prend pas en compte la hausse de l'évapotranspiration. Néanmoins, le SPEI-6 se trompe davantage en surestimant fortement les sécheresses futures. En effet, le SPEI est basé sur l'ETP, qui devrait croître sensiblement plus vite que l'ETR avec l'assèchement du climat (tableau 2.1). L'ETR fait partie des variables climatiques proposées sur le portail DRIAS,

l'indice SPEI-6 sera donc calculé ici à partir des précipitations efficaces (*ie.* retranchées de l'ETR).

Le SPEI est obtenu sur R [R CORE TEAM (2021)] à l'aide du package SPEI développé par BEGUERÍA et VICENTE-SERRANO (2017). Pour chacun des trois modèles climatiques étudiés, et chaque point de la grille SIM dans le bassin méditerranéen (1 071 points), le SPEI est obtenu avec le processus suivant :

1. calcul des précipitations efficaces journalières ;
2. agrégation des précipitations efficaces à l'échelle mensuelle ;
3. application d'une convolution rectangulaire pour faire correspondre à chaque mois les précipitations efficaces mensuelles moyennes sur 6 mois glissants ;
4. ajustement d'une distribution log-logistique* aux précipitations efficaces « historiques » (faite sur chacun des 12 mois indépendamment, ce qui préserve de toute saisonnalité) ;
5. obtention du SPEI (sur l'« historique » ou les projections) en faisant une correspondance quantile-quantile entre la loi log-logistique estimée pour le mois considéré et la loi normale $\mathcal{N}(0, 1)$;
6. le SPEI est ramené à 5 en valeur absolue† lorsque des valeurs infinies sont constatées (le signe est conservé).

Les étapes 3 à 5 sont exécutées directement par la fonction *spei()* de la librairie éponyme. Des exemples d'assurance paramétrique peuvent être définis en s'appuyant sur l'indice calculé selon la procédure ci-dessus.

Avant cela, des observations simples peuvent être fournies à l'aide du SPEI-6. Sur la période de référence, l'indice prend une valeur moyenne de 0,01. À horizon lointain, le climat global est légèrement plus humide dans le scénario optimiste : la valeur moyenne de l'indice passe à 0,06 avec le RCP2.6. En revanche, l'assèchement est net dans le scénario *business as usual*, avec une valeur moyenne de -0,32.

La figure 3.12 illustre l'évolution de l'indice SPEI-6 selon le scénario pour quelques points parangons (voir annexe E) avec le modèle CNRM-Aladin.

*Fonction de répartition de la forme : $F(x) = \frac{x^\beta}{\alpha^\beta + x^\beta}$, pour $\alpha, \beta, x > 0$.

†Le seuil de 5 a été choisi en se basant sur les constats suivant : les trois modèles climatiques fournissent quelques valeurs de SPEI entre -4 et -5, mais un seul des modèles fournit des valeurs en-dessous du seuil -5. De plus, la probabilité pour une loi normale centrée réduite d'être inférieure à -5 est très faible : 3×10^{-7} .

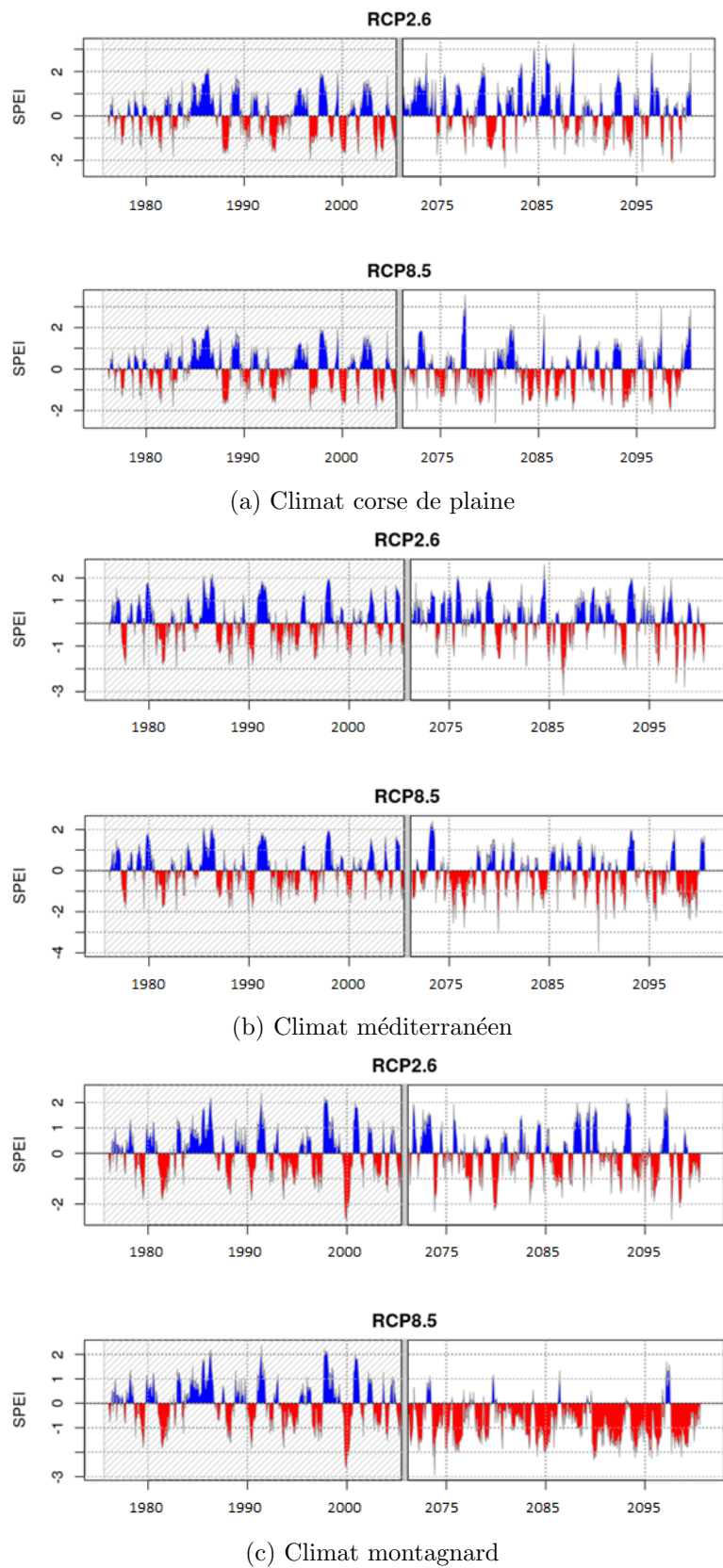


FIGURE 3.12 : Indice SPEI-6 simulé par le modèle CNRM-Aladin sur l'historique et à horizon lointain pour différents parangons des zones climatiques.

Contrat 3 : indemnisation en fonction de l'intensité d'une sécheresse

Le contrat n°3 fixe un niveau d'indemnisation en fonction de l'intensité de la sécheresse hydrologique, définie par la valeur de l'indice SPEI-6. Une prestation est versée par l'assureur dès lors que l'indice atteint le seuil de -1,5 (sécheresse sévère selon le tableau 1.1). L'indemnisation n'est pas directement proportionnelle à la valeur de l'indice (l'intensité de la sécheresse), mais à la période de retour associée. Lorsque le SPEI-6 a une valeur $s < -1,5$, l'indemnisation en euros I est obtenue par la formule 3.6. La fonction I est représentée sur la figure 3.13. Le contrat est défini annuellement, avec une couverture identique sur tous les mois de l'année.

$$I = \frac{1\,000}{\sqrt{\mathbb{P}(Z < s)}}, Z \sim \mathcal{N}(0, 1). \quad (3.6)$$

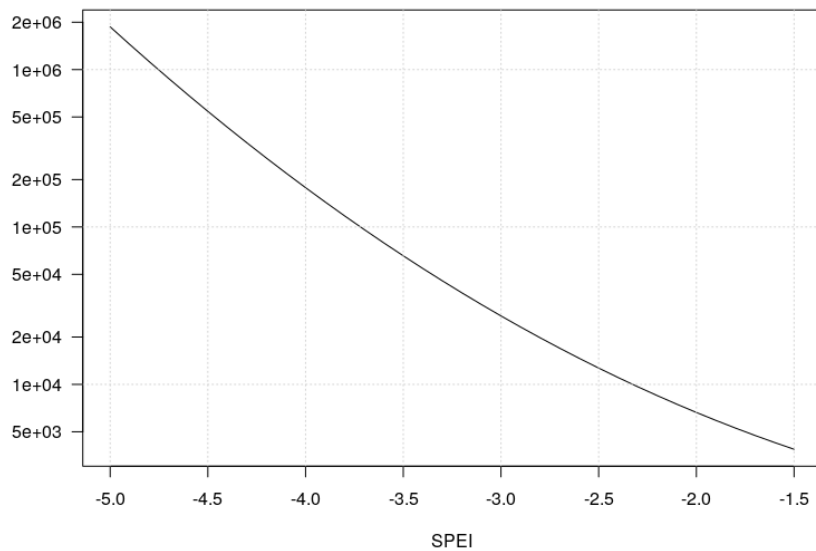


FIGURE 3.13 : Indemnisation en euros du contrat 3 pour chaque saison en fonction de la valeur de l'indice SPEI-6.

Ainsi défini, le contrat n°3 a une prime pure (annuelle) sur l'ensemble du bassin méditerranéen de 4 054 €. Cette prime triple à horizon lointain dans le scénario RCP2.6 (12 278 €), mais elle est décuplée avec la trajectoire pessimiste (40 089 €). La prime peut être différenciée selon la zone climatique, ce qui permet d'aboutir à la grille 3.5. L'écart très net entre les primes de chaque scénario est alors bien visible quel que soit le groupe de points considéré.

Climat \ Scénario	Historique	RCP2.6	RCP8.5
Corse de plaine	4 632 €	17 723 €	38 135 €
Corse de montagne	6 580 €	14 996 €	42 924 €
Méditerranéen	3 776 €	10 795 €	40 555 €
Dégradé	3 786 €	11 562 €	42 088 €
Montagnard	4 538 €	16 223 €	34 067 €

TABLE 3.5 : Primes pures « historique » et à horizon lointain (2070-2100) par zone climatique du contrat n°3.

Climat \ Scénario	RCP2.6	RCP8.5
Corse de plaine	382%	823%
Corse de montagne	228%	652%
Méditerranéen	286%	1 074%
Dégradé	305%	1 112%
Montagnard	357%	751%

TABLE 3.6 : Reformulation des primes pures du tableau 3.5 en pourcentages des tarifs de référence.

Plutôt que de se baser sur l'intensité d'une sécheresse pour un mois donné, il peut être intéressant de s'appuyer sur la force d'un épisode de sécheresse vu dans sa globalité.

Contrat 4 : indemnisation en fonction de la magnitude d'une sécheresse

Avec le SPEI, la magnitude d'une sécheresse est définie comme la somme des valeurs de l'indice en période de sécheresse. Cet intervalle commence lorsque l'indice atteint le seuil de -1, et se termine lorsqu'il redevient positif. On propose alors un contrat d'assurance paramétrique qui indemnise proportionnellement à la magnitude M d'une sécheresse. L'indemnisation I en euros est donnée par :

$$I = -10\,000 \times M. \quad (3.7)$$

Par définition, l'indemnisation est donc d'au moins 10 000 €. Ce contrat, comme le précédent, est souscrit annuellement avec la même couverture pour chaque mois.

À l'échelle du bassin méditerranéen, la prime pure d'un tel contrat est de 2 851 € sur l'« historique », et baisse très légèrement sur la période 2070-2100 avec le RCP2.6 (2 710 €). Dans le RCP8.5, la prime s'élève en revanche à 5 689 €.

Ces tarifs peuvent être déclinés par zone climatique. Les résultats sont rassemblés dans le tableau 3.7. Par rapport à ce qui a été décrit à l'échelle du bassin méditerranéen, la légère diminution de la prime dans le scénario optimiste n'est pas visible en montagne, où elle augmente même. Sur le RCP8.5, la hausse est moins prononcée pour les climats de plaine. Pour le climat montagnard en revanche, la prime pure triple pour devenir de loin la plus haute des cinq zones.

Climat \ Scénario	Historique	RCP2.6	RCP8.5
Corse de plaine	2 862 €	2 704 €	4 827 €
Corse de montagne	2 889 €	3 007 €	6 522 €
Méditerranéen	2 842 €	2 593 €	4 929 €
Dégradé	2 881 €	2 750 €	6 625 €
Montagnard	2 822 €	3 177 €	8 643 €

TABLE 3.7 : Primes pures « historiques » et à horizon lointain par zone climatique du contrat n°4.

Par rapport au contrat n°3, cette police ne propose pas de très grosse indemnisation pour compenser les sécheresses exceptionnelles.

Climat \ Scénario	RCP2.6	RCP8.5
Corse de plaine	94%	169%
Corse de montagne	104%	226%
Méditerranéen	91%	173%
Dégradé	95%	230%
Montagnard	113%	306%

TABLE 3.8 : Reformulation des primes pures du tableau 3.7 en pourcentages des tarifs de référence.

Ainsi, la hausse des primes visible ici montre la progression du risque sécheresse à horizon lointain dans un scénario pessimiste. Cette accroissement du risque est net dans toutes les zones climatiques, mais l'altitude semble être un facteur aggravant. Le contrat précédent prévoit quant à lui une forte progression des sécheresses extrêmes à horizon lointain, et ce même dans un scénario optimiste. La différence entre RCP2.6 et RCP8.5 reste cependant majeure.

En parallèle, quelques statistiques simples peuvent être fournies sur les sécheresses. Sur la période de référence, on observe en moyenne 25 périodes de sécheresse (qui commencent par un SPEI inférieur à 1, et se terminent lorsqu'il redevient positif) sur une fenêtre de 30 ans. Dans le RCP2.6, il n'y a pas plus de sécheresses à horizon lointain (24 en 30 ans). En revanche, elles augmentent en fréquence dans le RCP8.5 : en moyenne 32 sur 30 ans.

Ces observations peuvent s'étendre à la magnitude moyenne de ces sécheresses. Celle-ci est de 3,3 « historiquement » et à horizon lointain dans le scénario optimiste. En revanche, avec le *business as usual*, la magnitude moyenne des sécheresses monte à 4,8, soit une hausse de 43% par rapport à la référence. Ces constats vont dans le sens des déductions faites à partir des tarifs des contrats 3 et 4.

Les indices de sécheresse ne sont pas utilisés qu'en assurance paramétrique. Le SWI peut être exploité d'une façon différente à celles présentées avec les contrats 1 et 2. C'est le cas par exemple du régime Cat Nat, où le SWI est primordial au moment de la reconnaissance en état de catastrophe naturelle pour sécheresse.

3.3 Évolution du critère météorologique de la sécheresse Cat Nat au XXI^e siècle selon différents RCP

Cette partie vise à montrer les potentielles évolutions d'un critère essentiel à la reconnaissance en état de catastrophe naturelle pour mouvements de terrain consécutifs à la sécheresse. L'établissement de l'arrêté, au niveau communal, permet alors aux assurés de demander le remboursement des dommages aux bâtiments dûs à des mouvements de retrait-gonflement des sols argileux (RGA).

Le mécanisme de reconnaissance d'une commune en état de catastrophe naturelle pour sécheresse est abordé plus largement en 1.1.2. Il repose sur la vérification de deux critères :

- géotechnique, pour établir si le sol est bien argileux et donc exposé au péril RGA ;
- météorologique, pour avérer une sécheresse des sols.

Dans un contexte de changement climatique, le critère météorologique pourrait varier selon la trajectoire socio-économique. Dans cette partie, les trois scénarios disponibles sur le DRIAS (RCP2.6, RCP4.5 et RCP8.5) sont à l'étude.

3.3.1 Définition du critère météorologique

Le modèle hydrométéorologique SIM de Météo-France est utilisé par le DRIAS en complément des modèles climatiques (voir 2.1.2). Il fournit pour chacun des 8 981 points de la grille éponyme, et de façon quotidienne, une simulation de l'indice d'humidité des sols SWI (présenté en 1.3.1).

À partir des données journalières, une moyenne simple sur chaque mois renvoie un SWI mensuel, noté $\overline{\text{SWI}}$. Cela revient à dire, pour n_m le nombre de jours du mois m , et $\text{SWI}_{j,m}$ la valeur de l'indice pour le j^{e} jour de mois m , que l'indice mensualisé pour le mois m s'exprime de la façon suivante

$$\overline{\text{SWI}}_m = \frac{1}{n_m} \sum_{j=1}^{n_m} \text{SWI}_{j,m}. \quad (3.8)$$

La sécheresse étant un phénomène long, des données mensuelles ne suffisent pas forcément à illustrer le phénomène RGA. L'option retenue par l'État est l'utilisation d'une autre série mensuelle, dont la valeur pour un mois donné serait la moyenne de son $\overline{\text{SWI}}$ et de ceux des deux mois précédents. Ainsi, l'indice retenu $\overline{\text{SWI}}^{\text{Cat}}$ pour un mois donné est en fait la moyenne des trois dernières moyennes mensuelles du SWI journalier.

$$\overline{\text{SWI}}_m^{\text{Cat}} = \frac{\overline{\text{SWI}}_m + \overline{\text{SWI}}_{m-1} + \overline{\text{SWI}}_{m-2}}{3}. \quad (3.9)$$

Sur la base de cet indice $\overline{\text{SWI}}^{\text{Cat}}$, le critère météorologique demande une période de retour supérieure ou égale à 25 ans, sur un historique de 50 ans. Avec une vision portant sur les quantiles, cela correspondrait à un quantile d'ordre 4% ou moins. Le critère compare donc une valeur calculée pour un mois et une année donnés aux valeurs des 49 années précédentes pour ce même mois. Le dernier indice $\overline{\text{SWI}}^{\text{Cat}}$ devra alors être le plus faible, ou la deuxième plus petit de la série pour que l'indemnisation des sinistrés ait lieu au titre du régime Cat Nat. Mathématiquement, le critère est vérifié pour le mois m de l'année N si

$$\overline{\text{SWI}}_{m,N}^{\text{Cat}} \leq \overline{\text{SWI}}_{m,(2)}^{\text{Cat}}, \quad (3.10)$$

où $\overline{\text{SWI}}_{m,(2)}^{\text{Cat}}$ est la deuxième plus petite valeur de l'historique avec une profondeur de 50 ans, c'est-à-dire de l'ensemble $\{\overline{\text{SWI}}_{m,N}^{\text{Cat}}, \dots, \overline{\text{SWI}}_{m,N-49}^{\text{Cat}}\}$.

Ce critère est défini mensuellement, mais les arrêtés de catastrophe naturelle pour sécheresse sont publiés par saison (cf. 1.1.2). L'édition d'un arrêté est alors conditionnée au fait qu'une commune vérifie les critères sur au moins l'un des trois mois de la saison considérée.

3.3.2 Sélection de points exposés au péril RGA

Les 1 071 points de la grille SIM situés dans les régions Corse, PACA et Languedoc-Roussillon ne sont pas nécessairement soumis au risque RGA. Dans la mesure où la grande majorité des sinistres interviennent dans des zones d'exposition moyenne ou forte (cf. 1.3), il peut être intéressant d'obtenir l'exposition de chacun des points.

L'arrêté de catastrophe naturelle est établi par commune. Le critère géotechnique est alors la présence de sols argileux, peu importe le niveau d'exposition, sur le territoire de la municipalité. Les sols argileux (observés dans la cartographie du BRGM) doivent alors couvrir au moins 3% de la superficie totale.

Le DRIAS ne permet pas d'obtenir des données par commune, mais sur des points équitablement répartis sur le territoire selon la grille SIM. Il n'est donc pas possible de reproduire exactement le critère géotechnique, mais une approximation en est proposée afin de déterminer la présence d'une sécheresse « Cat Nat » à l'échelle du point de simulation.

Le critère géotechnique est alors considéré comme vérifié ici lorsque le point appartient à une zone d'exposition moyenne ou forte selon la cartographie du BRGM (figure 1.4). Le critère météorologique reste identique.

Pour analyser l'exposition de chacun des points au risque RGA, les données de la partie 1.1.2 sont utilisées. Il s'agit alors de tester pour chacun des points son appartenance à la zone d'exposition forte ou moyenne. Ces traitements sont réalisés sur Python.

Les zones homogènes en exposition, représentées par des objets au format *Multipolygon*, utilisent les coordonnées du système Lambert 93 (projections sur un cône afin de pouvoir faire des cartes). Les points de la grille SIM sont eux identifiés avec les coordonnées GPS classiques issues du système géodésique WGS84 (sans projection). Ces deux différents systèmes sont illustrés dans la figure 3.14

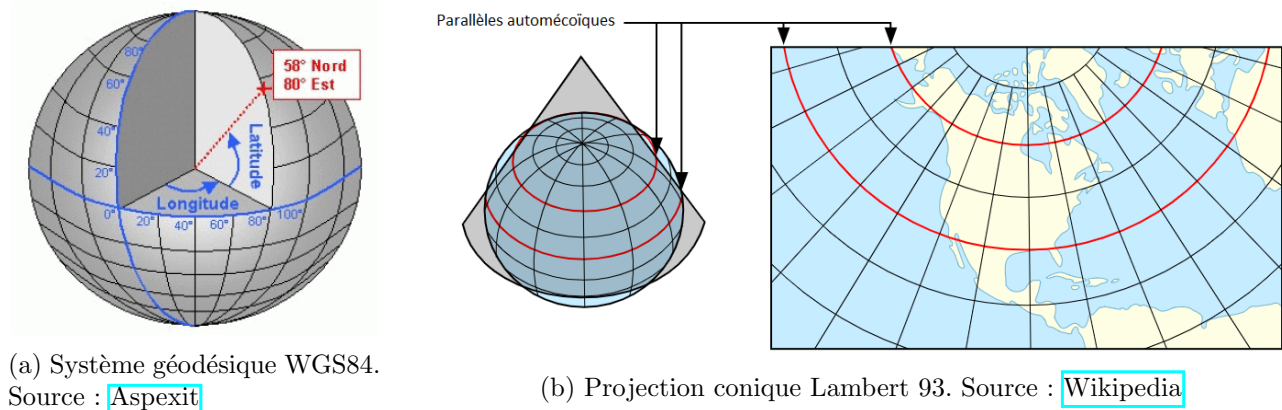


FIGURE 3.14 : Illustrations des systèmes WGS84 et Lambert 93.

Il faut convertir les coordonnées des 1 071 points de l'étude dans le référentiel Lambert 93. Le processus est détaillé en annexe D. Les résultats sont résumés dans le tableau 3.9

RÉGION	EXPOSITION NULLE	EXPOSITION FAIBLE	EXPOSITION MOYENNE	EXPOSITION FORTE
Corse	67%	30%	3%	0%
Languedoc-Roussillon	38%	11%	33%	18%
PACA	34%	9%	40%	17%

TABLE 3.9 : Niveaux d'exposition des différentes régions au risque RGA avec la grille SIM.

Les résultats de ce tableau sont en accord avec la cartographie du BRGM (figure 1.4), à savoir une Corse relativement épargnée par le risque RGA alors que les régions PACA et Languedoc-Roussillon sont traversées par le « croissant argileux ».

Les trois régions présentent des points *a priori* hors zones argileuses, et d'autres soumis significativement au retrait-gonflement des sols argileux (exposition forte ou moyenne). Il est alors possible d'isoler ces 508 points (4 en Corse, 223 en Languedoc-Roussillon et 281 en PACA, voir carte 3.15), sur lesquelles la modélisation du critère Cat Nat est pertinente.

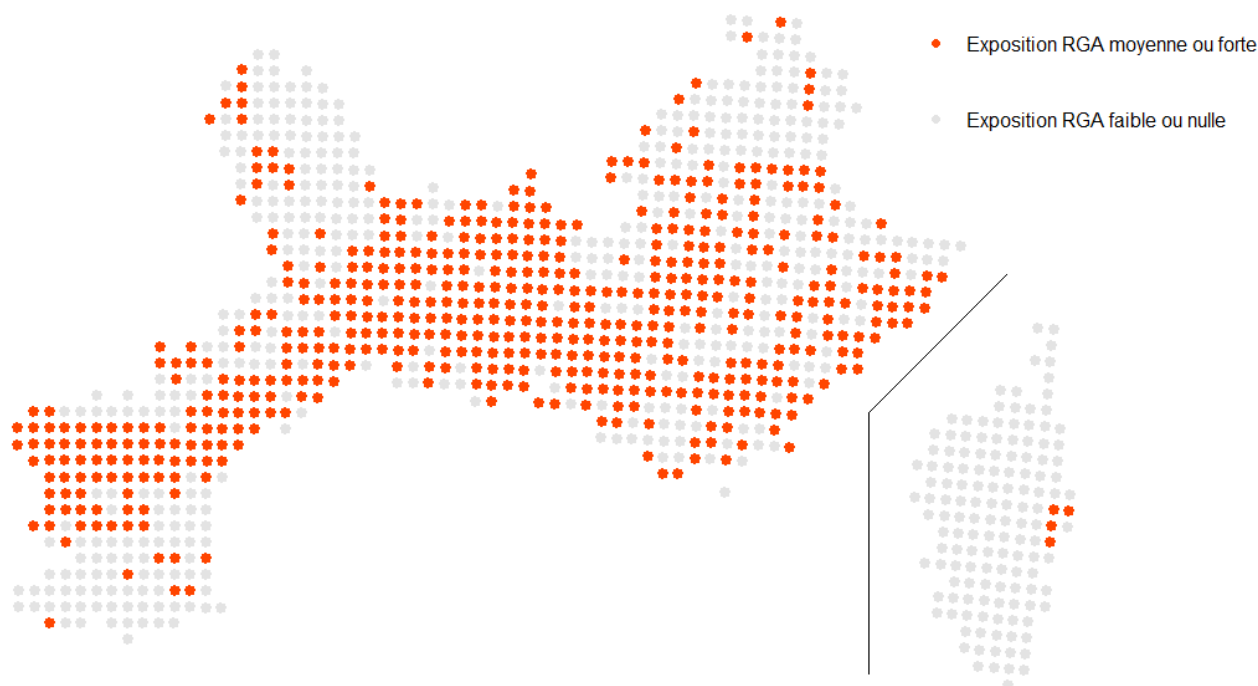


FIGURE 3.15 : Cartographie des points de l'étude exposés significativement au risque RGA.

3.3.3 Évolution du critère Cat Nat sur les points sensibles au RGA

Premiers résultats avec le modèle CNRM-Aladin

Pour chacun des 508 points vulnérables au risque RGA, le SWI est simulé quotidiennement entre le 1^{er} août 1951 et le 31 juillet 2100. Dans un premier temps, les données sont issues du modèle climatique CNRM-Aladin. Elles sont traitées de façon indépendante par scénario RCP.

En suivant la procédure établie en [3.3.1](#), il est possible de mensualiser les SWI puis d'obtenir les indices $\overline{\text{SWI}}^{\text{Cat}}$ qui servent de base à la reconnaissance d'une sécheresse « Cat Nat ». Compte tenu des données utilisées, le $\overline{\text{SWI}}^{\text{Cat}}$ est calculable à partir d'octobre 1951.

Il est dès lors possible de calculer pour chaque point de simulation le seuil de déclenchement du critère météorologique pour chaque mois à partir d'octobre 2000. Le critère n'est pas défini sur les dates antérieures puisqu'il requiert une profondeur d'historique de 49 ans.

Pour chaque mois où cette valeur fait sens, la moyenne (sur les 508 points) du seuil de déclenchement est calculée. Cette série temporelle présentant une forte saisonnalité, elle est annualisée (en moyennant pour chaque année les valeurs obtenues sur les mois concernés). Les années 2000 et 2100 sont exclues puisque incomplètes.

La série annuelle de 2001 à 2099 est représentée, par scénario, sur la figure [3.16](#). Les données climatiques antérieures à août 2005 sont identiques quel que soit le scénario considéré (données « historiques », voir [2.1.2](#)). Il est donc normal que les trois courbes des scénarios RCP2.6, RCP4.5 et RCP8.5 soient identiques de 2001 à 2004. Elles restent assez proches jusque dans les années 2030. Elles n'ont en revanche plus le même comportement par la suite, à mesure que les données « historiques » communes

sont de moins en moins utilisées dans les critères :

- pour le scénario RCP2.6, le seuil de déclenchement moyen du critère baisse assez brutalement dans les années 2040. Cela signifie qu'un épisode important de sécheresse est simulé. Par la suite, ce critère est stable avant de remonter à horizon lointain jusqu'à retrouver son niveau d'avant sécheresse. Le rebond du seuil moyen de déclenchement en fin de siècle signifie que les sécheresses extrêmes le sont moins qu'en milieu de siècle (les conditions s'améliorent) ;
- pour le scénario RCP4.5, le seuil moyen de déclenchement baisse notablement dans la décennie 2030. Comme pour le scénario précédent, une forte sécheresse après 2040 amène le seuil vers un plateau bas. Il continue de diminuer dans les années 2060, et reste stable par la suite ;
- pour le scénario RCP8.5, le seuil moyen de déclenchement montre moins de fortes sécheresses que dans les autres scénarios dans un premier temps. La courbe décline de façon linéaire jusqu'à croiser la courbe du scénario RCP2.6 avant 2080. La décroissance est ensuite beaucoup plus marquée, mais toujours régulière, jusqu'à la fin de siècle où la situation se détériore au point d'être pire que dans le scénario RCP4.5. Cette forme de courbe bien différente des deux précédentes montre un scénario où les sécheresses extrêmes se répètent et sont de plus en plus graves. Il n'y a donc pas de fortes sécheresses isolées qui créent visuellement des décrochages.

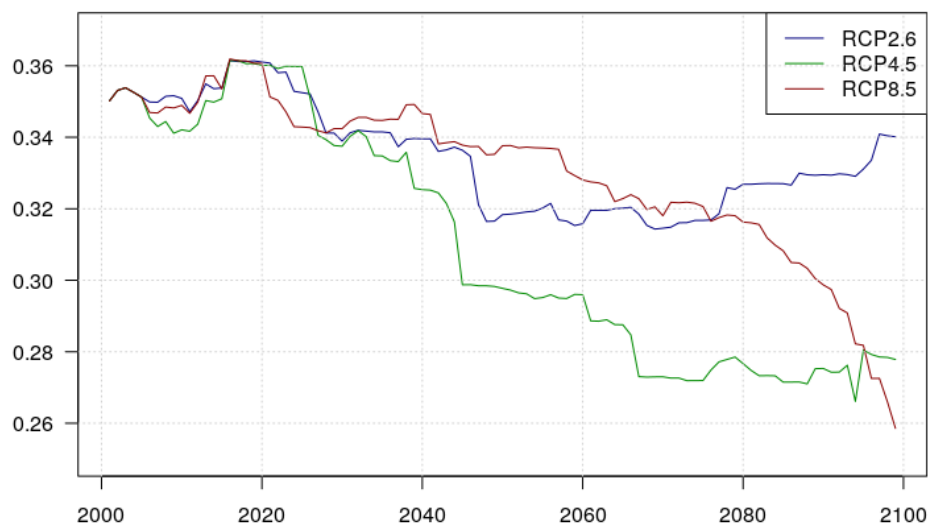


FIGURE 3.16 : Seuil moyen de déclenchement du critère météorologique par an selon différents scénarios RCP, de 2001 à 2099.

La moyenne sur l'ensemble des points et de la période d'étude du seuil de déclenchement du critère météorologique est donc logiquement plus faible sur le scénario RCP4.5, avec une valeur de 0,31. Elle est plus forte dans les deux autres scénarios, avec 0,33 pour le scénario RCP8.5 et 0,34 pour la trajectoire la plus optimiste.

Ce classement entre les trois scénarios est alors dépendant de l'agencement des sécheresses au cours du XXI^e siècle. L'indice sous-jacent au critère (SWI^{Cat}) est en effet en moyenne plus faible dans le scénario *business as usual* que dans les autres. Cette moyenne s'établit à 0,53 pour le scénario RCP8.5 contre respectivement 0,54 et 0,56 dans les RCP4.5 et RCP2.6.

Pour un mois donné (à partir d'octobre 2000), il est possible de vérifier si le critère météorologique

est rempli sur chacun des points. Cette information est ensuite convertie à l'échelle temporelle de la saison pour correspondre au mieux avec le système Cat Nat.

Le critère est rempli pour une saison en un point donné s'il est vérifié pour l'un des trois mois, ou plus, de la dite saison. Par construction, si le $\overline{\text{SWI}}^{\text{Cat}}$ est supposé être la réalisation de variables aléatoires i.i.d. pour un mois choisi*, alors la vérification du critère a une propriété i.i.d sans distinguer le mois. C'est-à-dire, en notant C_m l'évènement : « le critère est vérifié pour le mois m », les évènements $(C_m)_m$ sont indépendants et équiprobables. Le critère a alors une probabilité égale à 4% d'être vérifié. On note S l'évènement « le critère est vérifié pour une saison », et C_1, C_2, C_3 les équivalents pour les trois mois de la saison. Dans le cadre i.i.d, on obtient facilement la probabilité de S (équation 3.11).

$$\begin{aligned}
 \mathbb{P}(S) &= \mathbb{P}(C_1 \cup C_2 \cup C_3) \\
 &= 1 - \mathbb{P}(C_1^c \cap C_2^c \cap C_3^c) \\
 &= 1 - \mathbb{P}(C_1^c)\mathbb{P}(C_2^c)\mathbb{P}(C_3^c) && \text{(indépendance)} \\
 &= 1 - (1 - \mathbb{P}(C_1))^3 && \text{(même loi)} \\
 &= 1 - 0,96^3 \\
 &\approx 0,115.
 \end{aligned} \tag{3.11}$$

Ce calcul n'est pas valide ici puisque le cadre i.i.d. n'est pas respecté. En effet, si le premier mois d'une saison est particulièrement humide, les sols ont assez peu de chances d'être secs dans les deux mois suivants ; la sécheresse est un phénomène long. Ce constat peut être réécrit de la façon suivante :

$$\mathbb{P}(C_2|C_1^c) < \mathbb{P}(C_2). \tag{3.12}$$

C'est dans ce sens que le $\overline{\text{SWI}}^{\text{Cat}}$ a été construit en prenant compte de l'humidité des sols sur trois mois. La définition de l'indice amène *de facto* une corrélation positive entre les valeurs d'une même saison.

Il faut également souligner les interactions inter-annuelles qui peuvent elles aussi avoir un impact sur $\mathbb{P}(S)$. D'une part, certains épisodes de sécheresse peuvent durer plus d'une année en cas de mauvaise recharge hivernale. Ce mécanisme a un impact positif sur la corrélation entre l'humidité des sols de deux années consécutives, et *a fortiori* sur la vérification du critère. D'autre part, la réalisation en l'an N d'une sécheresse exceptionnelle abaisse le seuil de déclenchement du critère météorologique. Ce dernier est plus difficilement vérifié les années suivantes, et l'effet sur la corrélation est cette fois négatif.

Tous ces éléments montrent qu'il n'est pas possible de considérer l'indépendance ici. Dans le cadre d'une corrélation parfaite avec $C_1 = C_2 = C_3$, la valeur de $\mathbb{P}(S)$ obtenue change considérablement (équation 3.13). Cette hypothèse ne tient pas également, on le vérifie facilement sur les données.

$$\begin{aligned}
 \mathbb{P}(S) &= \mathbb{P}(C_1 \cup C_2 \cup C_3) \\
 &= \mathbb{P}(C_1) \\
 &= 0,04.
 \end{aligned} \tag{3.13}$$

*C'est-à-dire pour un point donné, les $\overline{\text{SWI}}^{\text{Cat}}$ obtenus pour le mois de janvier (resp. n'importe quel mois) sont indépendants les uns des autres et de même loi.

L'hypothèse où les évènements C_1 , C_2 , C_3 seraient disjoints, c'est-à-dire qu'au cours d'une même saison le critère ne peut être rempli pour plus d'un mois, est aussi logiquement réfutée. Sous cette assertion, le calcul [3.14](#) est valide.

$$\begin{aligned}
 \mathbb{P}(S) &= \mathbb{P}(C_1 \cup C_2 \cup C_3) \\
 &= \mathbb{P}(C_1) + \mathbb{P}(C_2) + \mathbb{P}(C_3) \\
 &= 3 \times \mathbb{P}(C_1) \\
 &= 0,12.
 \end{aligned}
 \tag{3.14}$$

Dans un cadre où l'identique distribution est respectée, mais pas forcément l'indépendance, on a donc $\mathbb{P}(S) \in]0,4; 0,12[$.

Cependant, l'identique distribution n'est pas évidente. Avec une vision simplifiée d'un climat fixe, elle pourrait être vérifiée puisque le critère météorologique est défini similairement d'un mois à un autre, et en prenant en compte la période considérée (il n'y aurait trivialement pas identique distribution si la comparaison reposait sur des SWI bruts compte tenu de la saisonnalité de l'indice). Le climat évolue, qui plus est de façon non homogène au cours de l'année. Il faut alors considérer que pour une saison donnée, les évènements C_1 , C_2 , C_3 ne sont pas nécessairement équiprobables. Par ailleurs, les probabilités de ces évènements changent en fonction de l'année considérée.

S'il est donc compliqué de connaître la valeur attendue de $\mathbb{P}(S)$, il est toujours possible de voir comment celle-ci évolue selon le scénario RCP considéré. La figure [3.17](#) illustre ainsi la fréquence moyenne de vérification du critère météorologique sur l'ensemble des points et de la période d'étude par saison. En effet, l'évolution du climat n'est pas nécessairement identique sur chacune d'entre elles.

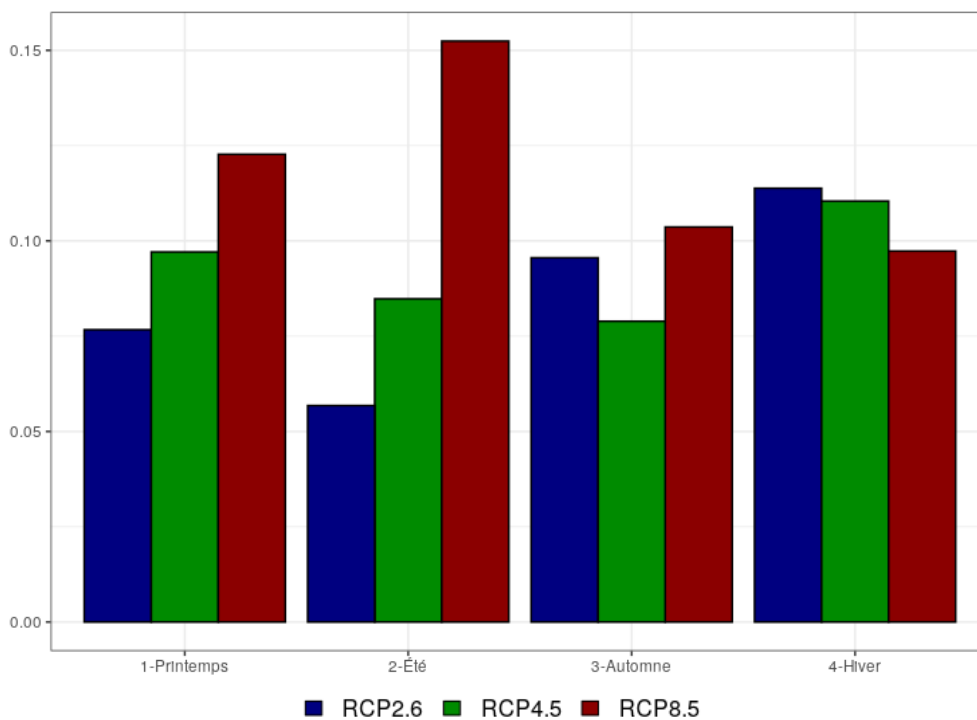


FIGURE 3.17 : Fréquences moyennes de déclenchement du critère météorologique par saison sur l'ensemble de la période modélisée (automne 2000-printemps 2100).

La fréquence ne dépend pas clairement du scénario choisi à l'automne (autour de 9%) et en hiver (proche de 11%). Il semble en revanche y avoir une corrélation positive nette entre forçage radiatif et fréquence des sécheresses « Cat Nat » au printemps, et encore plus forte en été. Au printemps, la fréquence évolue ainsi de 7,6% pour le scénario RCP2.6 à 12,3% dans le RCP8.5. En été, la fréquence de déclenchement varie de 5,7 à 15,2% pour ces mêmes trajectoires. Le scénario RCP4.5 se place alors en intermédiaire, avec une fréquence de 9,7% au printemps et 8,5% en été. Pour cette saison, la fréquence dans le scénario pessimiste est environ 2,7 fois plus élevée que celle obtenue dans le scénario optimiste.

La fréquence de déclenchement du critère météorologique par année est rarement nulle, ce qui signifie que dans la quasi-totalité de la période le critère est vérifié à au moins un endroit sur les 508 points considérés. Cette fréquence est très volatile : pour les années exceptionnellement sèches la fréquence de dépassement du seuil critère peut atteindre 40% (moyenne sur les quatre saisons).

Les sécheresses « Cat Nat » ont une fréquence moyenne (sur l'ensemble de la période, pas de temps mensuel) $\mathbb{P}(C)$ de 5,1% pour le RCP2.6, 5,7% pour le RCP4.5 et 7,2% dans le scénario *business as usual*. Le critère météorologique est donc vérifié en moyenne, sur un mois donné, une fois tous les 20 ans dans le scénario optimiste, une fois tous les 18 ans dans l'intermédiaire et une fois tous les 14 ans dans le pessimiste.

Au pas de temps saisonnier, la fréquence moyenne de la « sécheresse Cat Nat » $\mathbb{P}(S)$, estimée sur l'ensemble de la période de calcul, serait au mieux de 8,6% dans le scénario optimiste, contre 9,3% dans l'intermédiaire RCP4.5. Dans un schéma *business as usual*, la fréquence s'élèverait à 11,9%. La période de retour, pour une saison donnée, serait alors de 8 ans dans le RCP8.5, contre respectivement 11 et 12 ans pour les trajectoires RCP4.5 et RCP2.6. Ces valeurs représentent le temps moyen entre deux déclenchements du régime Cat Nat pour les sécheresses au XXI^e siècle.

La figure 3.16 invite néanmoins à prendre des précautions vis-à-vis de ces chiffres. Le climat simulé par le modèle CNRM-Aladin ne présente pas les mêmes caractéristiques pour les trois scénarios. En effet, des sécheresses majeures sont identifiées sur les scénarios RCP2.6 et RCP4.5 en milieu de siècle, alors que ce n'est pas le cas pour le scénario pessimiste. Dans le RCP8.5, les sécheresses sont en revanche quasi-systématiques en fin de siècle, et de plus en plus fortes.

D'une manière générale, l'analyse sur une seule simulation est délicate, d'autant plus que les données exploitées sont fortement corrélées dans le temps et dans l'espace. Pour essayer de réduire le potentiel biais lié à ce manque de données, d'autres modèles climatiques vont être exploités en parallèle.

Utilisation d'une approche multi-modèles pour consolider les résultats

Pour obtenir des résultats plus pertinents, les deux autres modèles climatiques à aérosols évolutifs disponibles sur le portail DRIAS (CNRM-Racmo et EC-Racmo) sont intégrés à l'étude. Les données sont exploitées pour chacun de ces deux modèles de la même façon que précédemment avec le modèle CNRM-Aladin. Il est alors possible de moyenniser les résultats sur les trois simulations climatiques.

Il est essentiel de moyenniser les résultats de l'analyse plutôt que de faire l'étude sur des données moyennées en entrée. Dans le cas contraire, les conclusions seraient complètement faussées puisque l'étude d'un climat moyen ne permet pas d'observer des phénomènes extrêmes comme les sécheresses « Cat Nat ».

D'un modèle à l'autre, les données sont indépendantes mais pas forcément identiquement distribuées. En se référant à l'illustration 2.5, le modèle CNRM-Racmo engendre un assèchement du

climat estival moins prononcé que le modèle EC-Racmo à horizon lointain avec le scénario RCP8.5.

L'illustration 3.18 donne pour chacun de ces deux modèles l'évolution du seuil moyen de vérification du critère météorologique de 2001 à 2099, de façon analogue à la figure 3.16. Par rapport à cette dernière, il y a ici une moins forte évolution dans le temps de ce seuil, et des trajectoires très proches entre les scénarios RCP4.5 et RCP8.5. Le modèle EC-Racmo simule de plus grandes sécheresses sur les données « historiques », qui conduisent le seuil à une position initiale plus basse que dans les deux autres modèles étudiés. Il remonte ensuite dans le scénario RCP4.5 jusqu'en milieu de siècle, ce qui signifie l'absence de sécheresse majeure jusqu'à ce moment.

Les trois modèles présentent le trait commun d'une baisse très prononcée du seuil en fin de siècle dans le scénario pessimiste. À terme (seulement), la hiérarchie attendue est respectée sur chacun des modèles : la courbe rouge est en dessous et la bleue au-dessus de la courbe verte.

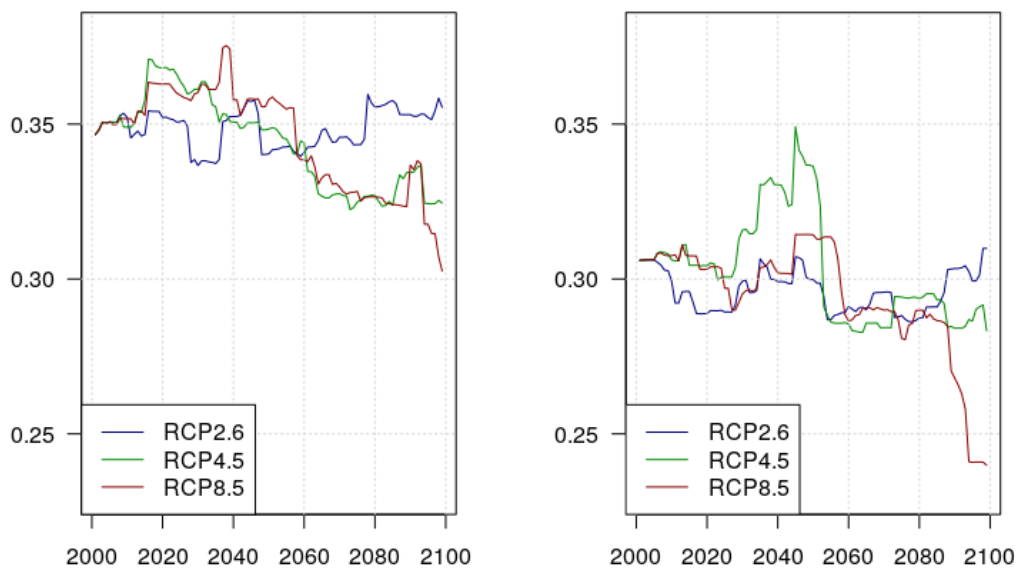


FIGURE 3.18 : Seuil moyen de déclenchement du critère météorologique par an selon différents scénarios RCP, de 2001 à 2099 - modèles climatiques CNRM-Racmo (gauche) et EC-Racmo (droite).

Comme observé avec les données issues du modèle CNRM-Aladin, cet ordre est préservé en mesurant le $\overline{\text{SWI}}^{\text{Cat}}$ moyen, mais pas avec le seuil moyen de déclenchement du critère météorologique. En effet, pour le modèle CNRM-Racmo ce dernier est plus haut dans le scénario pessimiste que le RCP4.5. Avec EC-Racmo, le seuil moyen dans le scénario RCP4.5 est au-dessus de celui simulé pour le RCP2.6.

En considérant les trois modèles, la fréquence moyenne de déclenchement du critère météorologique pour un mois donné, *ie.* $\mathbb{P}(C)$, est de 4,2% pour le scénario optimiste, 4,7% dans l'intermédiaire et 5,9% dans le pessimiste. Ces fréquences présentent des différences relativement élevées, et les périodes de retour associées sont alors entre 24 ans pour le RCP2.6 et 17 ans pour le RCP8.5.

Ces fréquences moyennes sur l'ensemble de la période étudiée, calculées à l'échelle de la saison, *ie.* $\mathbb{P}(S)$, passent à 7,1% dans le scénario optimiste, 7,9% pour le RCP4.5 et 9,8% pour le scénario pessimiste. Les périodes de retour correspondantes vont alors de 10 à 14 ans dans le cas le plus favorable.

Il est possible de décliner ces chiffres par saison pour voir si ces différences se font au printemps et surtout en été comme avec le modèle CNRM-Aladin. C'est bien le cas (voir figure 3.19), même si les fréquences sont légèrement diminuées.

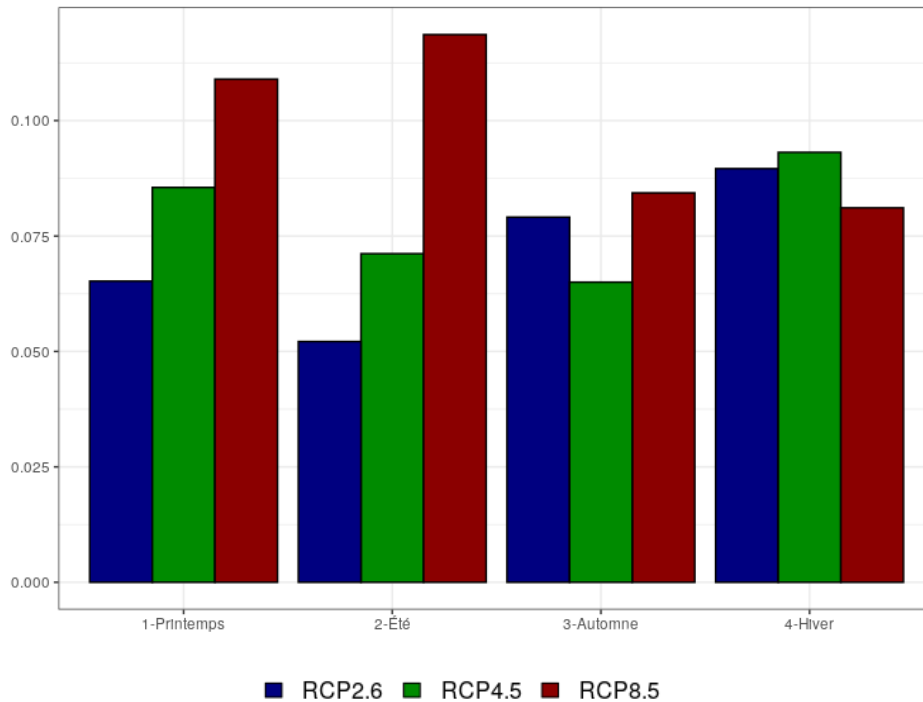


FIGURE 3.19 : Fréquences moyennes de déclenchement du critère météorologique au XXI^e siècle par saison avec une approche multi-modèles.

Après cette comparaison des fréquences entre trois scénarios RCP, il peut être également intéressant d'intégrer les données « historiques ». Ces dernières ont notamment servi à calculer le seuil météorologique avant que celui-ci soit entièrement dépendant du scénario choisi, puisque le seuil nécessite un historique de 49 ans. Pour les exploiter, le seuil météorologique ne peut être utilisé tel quel puisqu'il n'est pas défini avant octobre 2000. Pour chaque point, les premiers seuils sont retenus (d'octobre 2000 à septembre 2001), et définissent le seuil de déclenchement pour les données « historiques ». Lorsque ce seuil est dépassé pour un point et un mois donné, la situation sera ici qualifiée d'exceptionnellement sèche (elle l'est au sens du critère Cat Nat si elle survient entre octobre 2000 et septembre 2001).

Il est possible de calculer la fréquence « historique » de ces sécheresses exceptionnelles, puis sur les projections en conservant la même définition. Sur la période de référence, cette fréquence est logiquement proche de 4% (4,1%) compte-tenu de la définition du critère météorologique. Les sécheresses exceptionnelles deviennent en revanche nettement plus récurrentes à horizon lointain (2070-2099), et la fréquence dépend largement du scénario choisi. En effet, les sécheresses exceptionnelles sont alors simulées pour 5,2% des mois dans le RCP2.6, 8,7% dans le RCP4.5 et même 18,8% avec le scénario le plus pessimiste. Les périodes de retour sont alors (pour un mois donné) de respectivement 19, 12 et 5 ans.

Pour mesurer l'intensité des sécheresses « Cat Nat », il peut être intéressant de regarder la valeur de l'indice \overline{SWI}^{Cat} lorsqu'il remplit le critère météorologique.

À horizon proche (2001-2030), cette valeur ne dépend que peu du scénario choisi puisqu'elle va de 0,293 à 0,303. En revanche, elle se dégrade nettement à horizon lointain (2070-2099) selon la trajectoire

considérée. L'indice, conditionnellement à ce que sa valeur soit anormalement basse (au sens du régime Cat Nat), est alors plutôt stable dans le scénario RCP2.6 autour de 0,29. Cette indicateur baisse à 0,26 dans le scénario RCP4.5 et 0,25 dans le *business as usual*.

Enfin, la durée moyenne de vérification du critère est susceptible d'évoluer. Cet indicateur est calculé pour les horizons proche et lointain, en vision mensuelle ou saisonnière, toujours avec une approche multi-modèles. La durée moyenne des sécheresses Cat Nat est légèrement supérieure à deux mois et demi à horizon proche, mais s'établit à trois mois en fin de siècle dans les scénarios RCP2.6 et RCP8.5. Cette hausse n'est pas visible sur le RCP4.5, à cause de la forte baisse du seuil météorologique en milieu de siècle.

L'utilisation du critère à l'échelle de la saison va dans le même sens, avec une légère augmentation de la durée moyenne. Celle-ci passe de 1,7 à 1,8 saison, alors qu'une légère baisse apparaît sur le RCP4.5 pour la raison évoquée précédemment.

En revanche, la détérioration du seuil (figure 3.16 pour le modèle CNRM-Aladin) visible au cours du siècle peut introduire un biais dans l'interprétation des durées des sécheresses « Cat Nat ». En effet, lorsque le critère est rempli en fin de siècle, c'est bien souvent dans des conditions plus sèches qu'à horizon proche. Ainsi, les sécheresses qui présentent une période de retour supérieure à 25 ans deviennent légèrement plus longues à horizon lointain, mais le critère est alors plus exigeant. Ainsi, la durée des sécheresses « Cat Nat » telles que définies actuellement devrait augmenter plus sensiblement au cours du XXI^e siècle.

Il est possible d'étudier la durée de sécheresses rares avec une intensité minimale donnée, qui ne varie pas au cours du temps. Ici, pour chacun des mois de l'année et chaque point de simulation, le premier critère calculé sera la seuil retenu (*ie.* sur la période octobre 2000-septembre 2001). L'étude porte donc sur les sécheresses exceptionnelles définies précédemment.

Avec ce choix, la durée des sécheresses exceptionnelles (telles que définies par le régime Cat Nat en début de siècle) s'établit à 3,0 mois sur l'« historique ». En fin de siècle (2070-2099), cette durée moyenne est susceptible de diminuer ou d'augmenter selon la trajectoire socio-économique. Elle baisse légèrement avec le RCP2.6, à 2,8 mois. La durée moyenne des sécheresses exceptionnelles reste stable dans le scénario intermédiaire RCP4.5. En revanche, elle connaît une hausse de 25% pour s'établir à 3,8 mois dans le RCP8.5.

Les simulations climatiques appuient donc une progression des sécheresses anormales qui remplissent le critère météorologique du régime Cat Nat, en fréquence et en intensité. Les sécheresses gagnent également en durée. Ces évolutions dépendent clairement du scénario étudié.

En l'absence de données de sinistralité, il n'est pas possible d'estimer le coût du changement climatique sur le volet sécheresse du régime des catastrophes naturelles. Les mouvements de sols devraient logiquement appeler une enveloppe globale plus importante pour les indemnisations, accentuant les tensions sur le régime (*cf.* 1.1.2). Par ailleurs, le critère devenant plus restrictif, il pourrait y avoir de plus en plus de sinistrés non éligibles à une indemnisation par le régime Cat Nat. Dès lors, le système doit être revu rapidement. Dans le cas contraire, il pourrait y avoir un mécanisme d'assurance privée qui se développerait en parallèle, au risque de perdre la solidarité nationale inhérente au régime Cat Nat.

Conclusion

Ainsi, l'étude développée dans ce mémoire confirme les inquiétudes quant aux conditions climatiques futures dans les régions méditerranéennes françaises. Dans cette zone, et à l'inverse de la tendance mondiale, la nette hausse des températures en fin de siècle dans un scénario pessimiste ne s'accompagnerait pas de précipitations plus importantes. Ces dernières pourraient même diminuer par rapport à la période de référence (fin XX^e siècle).

Avec ces changements, l'évapotranspiration potentielle afficherait une croissance marquée, bien supérieure à celle de l'évapotranspiration réelle. Cet écart grandissant est synonyme d'assèchement des sols. Le drainage et le ruissellement évoluent vers des niveaux plus bas, ce qui présage également des sécheresses hydrologiques plus prononcées, tant au niveau des cours d'eau que des nappes souterraines. Ces observations sont confirmées avec l'utilisation d'indices de sécheresse directement calculés à partir des données climatiques.

La progression de la sécheresse n'est pas uniforme, mais possède plusieurs dimensions. D'un point de vue temporel, les différentes évolutions sont souvent inégalement réparties dans l'année. Les conditions devraient particulièrement se dégrader en été (pourtant de loin la saison la moins humide du climat actuel), avec un mois de juillet extrêmement sec en fin de siècle. D'un point de vue géographique, des régions homogènes en climat sont identifiables, avec des observations divergentes à bien des égards. Les régions montagnardes sont ainsi nettement plus exposées au réchauffement climatique. L'étude des variables climatiques et des indices de sécheresse conclut à une plus forte détérioration des conditions dans les massifs montagneux, mais il faut souligner qu'ils sont encore relativement épargnés par la sécheresse. Ce n'est pas le cas à faible altitude, et la situation est donc amenée à empirer pour le climat méditerranéen et en Corse.

Face à un risque en expansion, le coût de sa protection, qu'elle qu'en soit la forme, devrait lui aussi croître. En assurance paramétrique, cette hausse pourrait s'avérer assez réhabilitaire, et de nouveaux contrats deviendraient pertinents face à la dégradation du climat.

Pour le volet sécheresse du régime Cat Nat, le niveau de prestations est fixe en l'état, puisque défini dans un contrat d'assurance plus global. La surprime associée aux catastrophes naturelles a déjà subi des augmentations, mais une nouvelle hausse ne serait pas forcément supportable pour tous les assurés. Le régime Cat Nat est fondé sur la solidarité nationale, mais dans le cadre du retrait-gonflement des sols argileux, il est possible de connaître assez explicitement son niveau d'exposition. Les habitants des zones non argileuses pourraient donc à terme payer cher le prix des sécheresses géotechniques. Pourtant, des actions préventives peuvent être menées, à commencer par la bonne application de la loi ÉLAN.

La fréquence d'éligibilité aux indemnisations par la partie sécheresse du régime Cat Nat est fortement dépendante de la trajectoire socio-économique. Les conditions requises risquant de se durcir sévèrement, de plus en plus de sinistrés pourraient ne percevoir aucune prestation pour des sécheresses

éligibles selon les critères actuels. Les tensions qui existent déjà autour de ce système devraient vraisemblablement être exacerbées par le changement climatique. Elles rendraient d'autant plus difficiles sa conservation si un déséquilibre financier venait à se créer.

En ce qui concerne l'assurance agricole, un nouveau régime va voir le jour en 2023 pour mettre fin à la concurrence entre calamités agricoles et assurance récolte. Ce système universel aura notamment pour mission d'accroître la part des surfaces assurées en France. Une fois mis en place, il faudra surveiller de près les déséquilibres financiers qui pourraient se former. En effet, l'assurance récolte est aujourd'hui un produit déficitaire, et la sinistralité ne devrait pas diminuer, bien au contraire. L'objectif pour la nouvelle assurance agricole est de conquérir son marché, mais à quel prix ? Les assureurs devront proposer des tarifs attractifs pour séduire le plus grand nombre, ce qui pourrait mécaniquement impliquer des prestations assez limitées pour garantir la viabilité du système. Dès lors, les autres couches du régime que sont l'autoassurance et la solidarité nationale pourraient avoir un poids important.

Cependant, le scénario pessimiste RCP8.5 n'est pas le seul à prendre en compte, et la politique climatique aura son rôle à jouer. Sur une trajectoire optimiste en ligne avec l'accord de Paris comme le RCP2.6, les divers effets constatés précédemment sont largement atténués à horizon lointain. Ce scénario montre tout de même une dégradation du climat perceptible dans les applications assurantielles.

Cette étude est toutefois clairement limitée par un manque de données. Pour rendre toutes ces conclusions plus certaines, il faudrait multiplier les modèles climatiques, et les simulations de chaque modèle en faisant varier les conditions initiales.

Par ailleurs, il serait intéressant de voir si toutes ces tendances s'étendent au reste de la France, puisque seule une petite partie du territoire est couverte dans ce mémoire. Pour compléter l'étude, l'utilisation de données d'un portefeuille d'assurance pourraient aider à quantifier l'impact à long terme du réchauffement climatique sur la sinistralité. Dans cette optique, l'étude de la démographie est également importante puisqu'une plus forte concentration des populations dans les zones à risques est attendue.

Bibliographie

- ACPR (2021). Une première évaluation des risques financiers dus au changement climatique - les principaux résultats de l'exercice pilote climatique 2020. Analyses et synthèses.
- ARNAUD, E. (2016). Modélisation du risque sécheresse en France. Mémoire d'actuariat. Université Paris Dauphine PSL.
- ASSEMBLÉE NATIONALE et SÉNAT (2022). Loi n° 2022-298 du 2 mars 2022 d'orientation relative à une meilleure diffusion de l'assurance récolte en agriculture et portant réforme des outils de gestion des risques climatiques en agriculture. JO Annexe loi n°2022-298.
- BEGUERÍA, S. et VICENTE-SERRANO, S. M. (2017). SPEI: Calculation of the Standardised Precipitation-Evapotranspiration Index. R package version 1.7. URL : <https://CRAN.R-project.org/package=SPEI>.
- BIANCHI, F. (2021). Triplement des pertes de récoltes liées aux sécheresses en Europe en 50 ans. *BFM*.
- BYUN, H.-R. et WILHITE, D. A. (1996). Daily quantification of drought severity and duration. *Journal of Climate* 5, p. 1181-1201.
- CADOUX, M. (2022). Canicule : jusqu'à 50% de pertes agricoles selon la FNSEA. *LSA*.
- CARPON, A. (2022). Groupama mise beaucoup sur la pédagogie auprès des jeunes agriculteurs. *Web-agri*.
- CAZAUX, MEUR-FÉREC et PEINTURIER (2018). Le régime d'assurance des catastrophes naturelles à l'épreuve des risques côtiers. Rapport.
- CCR (2015). Modélisation de l'impact du changement climatique sur les dommages assurés dans le cadre du régime Catastrophes Naturelles. Rapport. CCR.
- CCR (2020). Note de synthèse sur le suivi de l'aide à l'assurance multirisque climatique pour l'exercice 2019 par CCR pour le ministère de l'agriculture et de l'alimentation. *Rapport pour le MAA*.
- CNULCD (2022). La sécheresse en chiffres, 2022 - restaurer afin d'être prêts et résilients. Rapport.
- COUR DES COMPTES (2022). Sols argileux et catastrophes naturelles. Rapport. Cour des Comptes.
- COVÉA (2022). Changement climatique et assurance : quelles conséquences sur la sinistralité à horizon 2050. Livre blanc. Covéa et Risk Weather Tech.
- FFA (2015). Changement climatique et assurance. Rapport d'étude horizon 2040. FFA.
- GIEC (2014). Changements climatiques 2014: rapport de synthèse. *Contribution des Groupes de Travail I, II et III au Cinquième Rapport D'évaluation du Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat*, p. 60-79.
- GOLLEDGE, N. R., KOWALEWSKI, D. E., NAISH, T. R., LEVY, R. H., FOGWILL, C. J. et GASSON, E. G. (2015). The multi-millennial Antarctic commitment to future sea-level rise. *Nature* 526.7573, p. 421-425.
- GUTTMAN, N. B. (1994). On the sensitivity of sample L moments to sample size. *Journal of climate*, p. 1026-1029.
- JANIS, M. J., JOHNSON, M. B. et FORTHUN, G. (2002). Near-real time mapping of Keetch-Byram drought index in the south-eastern United States. *International Journal of Wildland Fire* 11.4, p. 281-289.

- JOETZJER, E. (2011). Variabilité inter-annuelle des sécheresses et leur réponse au changement climatique : quels indicateurs ? Mémoire d'agronomie. École nationale supérieure en agronomie et industries alimentaires.
- KIRSCH, A. (2020). Sécheresse. *Agriculture Stratégies* 3.
- LEROUX, C. (2022). L'assurance climatique agricole en pleine réforme. Article. Aspexit. URL : https://www.aspexit.com/lassurance-climatique-agricole-en-pleine-reforme/#Le_contrat_Multi_Risque_Climatique_MRC.
- MINISTÈRE DE L'AGRICULTURE (2022). La gestion des risques en agriculture. Rapport. URL : <https://agriculture.gouv.fr/la-gestion-des-risques-en-agriculture#:~:text=En%202020%2C%20pr%C3%A8s%20de%2031,contrat%20d'assurance%20multirisque%20climatique.>
- MONCOULON, D, DESARTHE, J, NAULIN, J., ONFROY, T, TINARD, P, WANG, Z., HAJJI, C, VEYSSEIRE, M, DEQUÉ, M et RÉGIMBEAU, F (2018). Conséquences du changement climatique sur le coût des catastrophes naturelles en France à l'horizon 2050. *Caisse Centrale de Réassurance & Météo France, Paris*.
- NABAT, P., SOMOT, S., MALLET, M., SANCHEZ-LORENZO, A. et WILD, M. (2014). Contribution of anthropogenic sulfate aerosols to the changing Euro-Mediterranean climate since 1980. *Geophysical Research Letters* 41.15, p. 5605-5611.
- NOAA-NCEI (2020). The high cost of drought. Rapport. Agence américaine de l'environnement. URL : <https://www.drought.gov/news/high-cost-drought>.
- R CORE TEAM (2021). R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing. Vienna, Austria. URL : <https://www.R-project.org/>.
- SCHUMACHER, D. L., KEUNE, J., DIRMEYER, P. et MIRALLES, D. G. (2022). Drought self-propagation in drylands due to land-atmosphere feedbacks. *Nature Geoscience* 15.4, p. 262-268.
- TF1 (2022). Sécheresse : plus de 100 communes privées d'eau potable. *TF1 Info*.
- UNDRR (2021). Special report on drought 2021. Rapport.
- ZHONG, R., CHEN, X., WANG, Z., LAI, C., GODDARD, S., WELLS, N. et HAYES, M. (2018). scPDSI: Calculation of the conventional and self-calibrating Palmer Drought Severity Index. R package version 2.10. URL : <https://CRAN.R-project.org/package=scPDSI>.
- ZHONGMING, Z., LINONG, L., XIAONA, Y., WANGQIANG, Z., WEI, L. et al. (2021). Drought report calls for new management approach. *World Meteorological Organization*.

Annexe A

Informations supplémentaires sur le SWI

Le point de flétrissement représente la teneur en eau à partir de laquelle les plantes n'ont plus assez de force pour aspirer l'eau du sol. Au-delà de ce seuil et sans arrosage, les plantes meurent. En effet, celles-ci ne peuvent plus puiser l'eau qui est retenue dans le sol par une puissante force de capillarité. La capacité du champ, également appelée point de ressuyage, désigne quant-à-elle la teneur en eau après écoulement total de l'eau par gravité. Au-delà de ce seuil, le sol est saturé. Visuellement, cela se traduit par la présence d'eau stagnante à la surface, ou par le dégagement d'eau à la moindre pression, par exemple si une personne se tient debout.

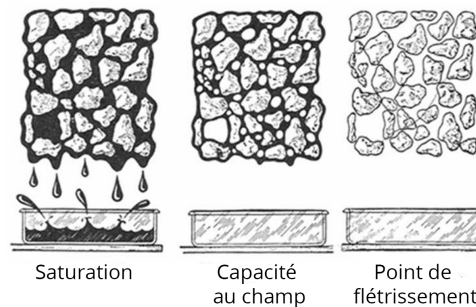


FIGURE A.1 : Illustration des différents niveaux de teneur en eau des sols. Source : [TerraCottem](#).

Ces notions nous permettent de définir le SWI comme suit en notant W la teneur en eau massique du sol, W_f celle au point de flétrissement et W_c celle au seuil de capacité du champ :

$$SWI = \frac{W - W_f}{W_c - W_f}.$$

$W_c - W_f > 0$ par définition, ce qui mène aux interprétations suivantes :

- pour $W_f < W < W_c$ le SWI est dans $]0, 1[$. Cela correspond au cas général ;
- si le point de flétrissement est passé, *ie.* $W < W_f$, le SWI est négatif. Cette situations traduit une sécheresse extrême où les plantes ne peuvent plus puiser d'eau dans le sol, ce qui précipite leur mort ;
- lorsque le sol est saturé et que l'eau ne s'est pas encore écoulee par gravité, c'est-à-dire le cas $W > W_c$, le SWI est supérieur à 1.

Le SWI donne donc la proportion disponible de la réserve d'eau utile aux plantes dans le sol (RU). Le type de sol a un impact sur le SWI. En effet, le sol argileux caractéristique des phénomènes RGA possède un point de ressuyage et un point de flétrissement plus hauts que pour d'autres types de sols (sableux ou limoneux), comme l'illustre le graphique [A.2](#)

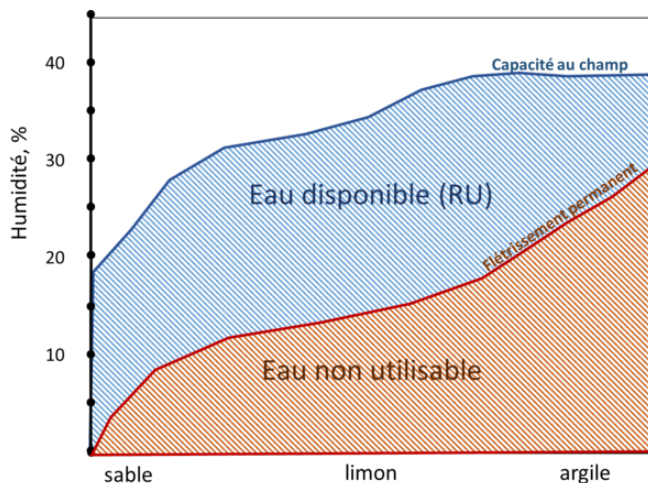


FIGURE A.2 : Points de flétrissement et de ressuyage en fonction du type de sol. Source : [INRAE](#).

Toutefois, l'utilisation du SWI au sein du régime Cat Nat se fait en comparant un indice mensuel pour une zone géographique donnée à son historique sur 50 ans (voir [3.3.1](#)). Le sol n'ayant *a priori* pas connu de changement géologique marqué en 50 ans, les valeurs utilisées sont bien comparables et il n'y a pas lieu de se poser la question de l'impact de la nature du sol dans le calcul du SWI pour ces fins.

Annexe B

Évolution du climat sur une courte période : cas des données « historiques »

Pour mettre en exergue le changement rapide du climat dans le bassin méditerranéen, une étude spécifique est faite sur la partie historique des données simulées par le modèle CNRM-Aladin. L'historique s'étalant de 1951 à 2005 est ainsi coupé en deux parties qui vont être comparées : 1951-1975 et 1976-2005. La dernière est celle retenue dans ce mémoire pour illustrer le climat initial à mettre en face des projections (partie [2.3](#)).

Le réchauffement est déjà observable entre ces deux périodes : la température moyenne sur le bassin méditerranéen passe de 11,09°C à 11,30 °C. Cette progression est visible sur les trois régions étudiées : +0,15°C en Corse, +0,20°C en PACA et +0,24°C dans le Languedoc-Roussillon. Elle reflète bien l'évolution observée sur tout le globe (figure [2.13](#)).

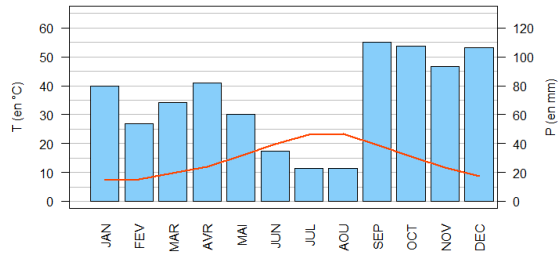
Des disparités régionales plus nettes apparaissent sur les précipitations. En effet, une légère baisse est visible sur la pluviométrie annuelle du bassin méditerranéen, passant de 948 mm entre 1951 et 1975 à 911 mm sur la période 1976-2005, mais les trois zones ne connaissent pas le même sort ici. La baisse est plutôt modérée en Corse (de 992 à 955 mm) mais nettement plus marquée en Languedoc-Roussillon (de 1023 à 931 mm). Il n'y a pas de changement majeur en PACA, le régime annuel moyen passant de 870 à 880 mm.

Aucune tendance ou disparité n'est observée au niveau de l'évapotranspiration potentielle. À l'échelle du bassin méditerranéen, elle passe de 856 mm par an en moyenne entre 1951 et 1975 à 857 mm pour les 30 années suivantes.

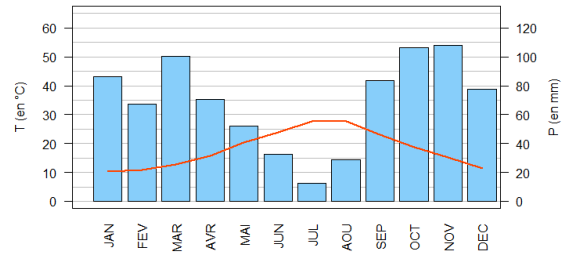
Annexe C

Diagrammes ombrothermiques par zone climatique

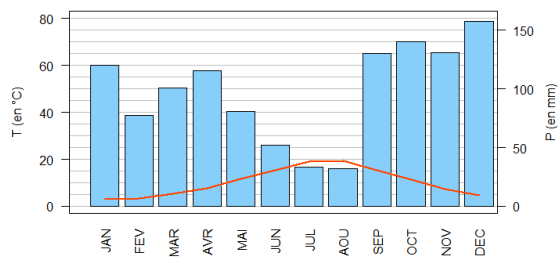
Les diagrammes de la figure [C.1](#) ci-après comparent, pour différents groupes de points homogènes en climat, les conditions « historiques » aux projections à horizon lointain selon le scénario RCP8.5. Le modèle climatique utilisé est CNRM-Aladin. Ils sont interprétés dans la partie [2.4.9](#).



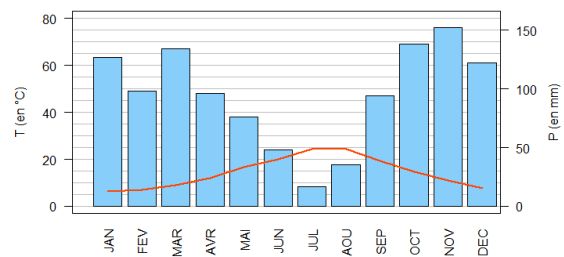
(a) Climat corse de plaine, 1975-2005



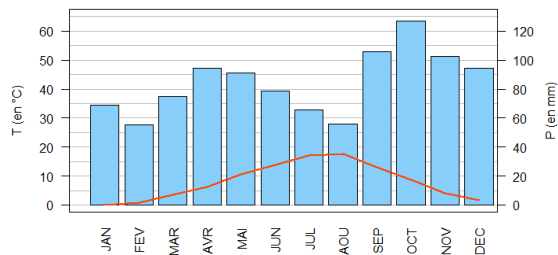
(b) Climat corse de plaine, 2070-2100



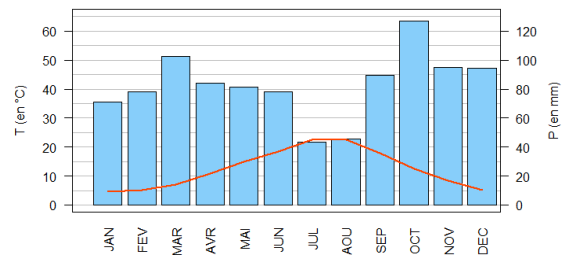
(c) Climat corse de montagne, 1975-2005



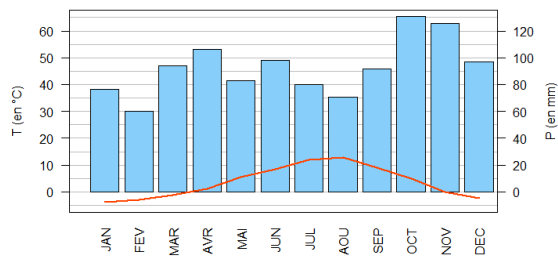
(d) Climat corse de montagne, 2070-2100



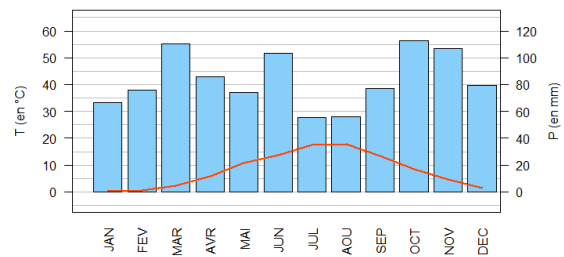
(e) Climat dégradé, 1975-2005



(f) Climat dégradé, 2070-2100



(g) Climat montagnard, 1975-2005



(h) Climat montagnard, 2070-2100

FIGURE C.1 : Diagrammes ombrothermiques « historiques » et projetés selon le scénario RCP8.5.

Annexe D

Conversion de coordonnées WGS 84 en Lambert 93

Cette partie donne la formule utilisée pour passer de coordonnées (lat, long) dans le système WGS 84 aux coordonnées (X,Y) du même point dans le système Lambert 93. Quelques constantes sont nécessaires, elles sont résumées dans le tableau [D.1](#).

Constante	Valeur	Signification
a	6 378 137	demi-grand axe de l'ellipsoïde (en m)
E	0,08181919106	première excentricité de l'ellipsoïde
X_0	700 000	origine axe X en Lambert 93 (en m)
Y_0	6 600 000	origine axe Y en Lambert 93 (en m)
ϕ_1	rad(44)	premier parallèle automécoïque
ϕ_2	rad(49)	second parallèle automécoïque

TABLE D.1 : Valeurs nécessaires au changement de coordonnées WGS 84 vers Lambert 93.

La fonction rad convertit les degrés ($^\circ$) en radians, elle s'exprime comme suit : $\text{rad}(x) = x \times \frac{\pi}{180}$. La première étape du calcul est la conversion des coordonnées d'origine exprimées en degrés dans le système WGS 84 en radians ([D.1](#)). Les grandes normales N_1 et N_2 sont obtenues par [D.2](#)

$$\begin{cases} \phi = \text{rad}(\text{lat}) , \\ \lambda = \text{rad}(\text{long}) . \end{cases} \quad (\text{D.1})$$

$$\begin{cases} N_1 = \frac{a}{\sqrt{1-E^2 \times \sin^2(\phi_1)}} , \\ N_2 = \frac{a}{\sqrt{1-E^2 \times \sin^2(\phi_2)}} . \end{cases} \quad (\text{D.2})$$

La latitude d'origine ϕ_0 , exprimée en radians, correspond à la moyenne des deux parallèles automécoïques. Ces deux parallèles réfèrent aux intersections entre le cône utilisé dans la projection de Lambert 93 et l'ellipsoïde de révolution qui représente la Terre (figure [3.14](#)). L'ellipsoïde est caractérisé par les paramètres a et E . Par linéarité de la fonction rad(), la latitude d'origine est obtenue simplement par [D.3](#).

$$\phi_0 = \frac{\phi_1 + \phi_2}{2} = \text{rad}(46, 5). \quad (\text{D.3})$$

Le calcul se poursuit avec les latitudes isométriques (D.4). L'exposant n et la constante c de projection sont obtenus à partir de (D.5), et permettent de trouver les coordonnées finales (D.6).

$$\left\{ \begin{array}{l} L_1 = \ln\left[\tan\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi_1}{2}\right) \times \left(\frac{1-E \times \sin(\phi_1)}{1+E \times \sin(\phi_1)}\right)^{\frac{E}{2}}\right], \\ L_2 = \ln\left[\tan\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi_2}{2}\right) \times \left(\frac{1-E \times \sin(\phi_2)}{1+E \times \sin(\phi_2)}\right)^{\frac{E}{2}}\right], \\ L_0 = \ln\left[\tan\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi_0}{2}\right) \times \left(\frac{1-E \times \sin(\phi_0)}{1+E \times \sin(\phi_0)}\right)^{\frac{E}{2}}\right], \\ L = \ln\left[\tan\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2}\right) \times \left(\frac{1-E \times \sin(\phi)}{1+E \times \sin(\phi)}\right)^{\frac{E}{2}}\right]. \end{array} \right. \quad (\text{D.4})$$

$$\left\{ \begin{array}{l} n = \frac{\ln(N_2 \times \cos(\phi_2)) - \ln(N_1 \times \cos(\phi_1))}{L_1 - L_2}, \\ c = \frac{N_1 \times \cos(\phi_1)}{n} e^{nL_1}. \end{array} \right. \quad (\text{D.5})$$

$$\left\{ \begin{array}{l} X = X_0 + ce^{-nL} \sin(n(\lambda - \text{rad}(3))), \\ Y = Y_0 + ce^{-nL_0} - ce^{-nL} \cos(n(\lambda - \text{rad}(3))). \end{array} \right. \quad (\text{D.6})$$

Annexe E

Obtention des parangons

À partir du *clustering* réalisé en [2.2.3](#), il est possible de déterminer l'individu le plus représentatif de chaque classe. Cet individu, appelé parangon, est défini comme le plus proche du barycentre du groupe.

Utiliser uniquement les parangons peut permettre de réduire fortement les temps de calcul. Dans notre contexte, cette approche est plus pertinente que de recourir directement aux centres de gravité, puisque le climat n'est pas convexe (*cf.* [figure 2.9](#)).

En notant $(C_i)_{i \in \llbracket 1,5 \rrbracket}$ les cinq *clusters* issus de la CAH, $(n_i)_{i \in \llbracket 1,5 \rrbracket}$ leurs nombres de points, et $(g_i)_{i \in \llbracket 1,5 \rrbracket}$ les isobarycentres de chaque classe (il n'y a pas de surpondération de certains points par rapport aux autres), le parangon d'une classe $i \in \llbracket 1,5 \rrbracket$ peut être calculé selon l'équation [E.1](#).

$$p_i = \operatorname{argmin}_{k \in \llbracket 1, n_i \rrbracket} \{ \|k - g_i\| \}. \quad (\text{E.1})$$

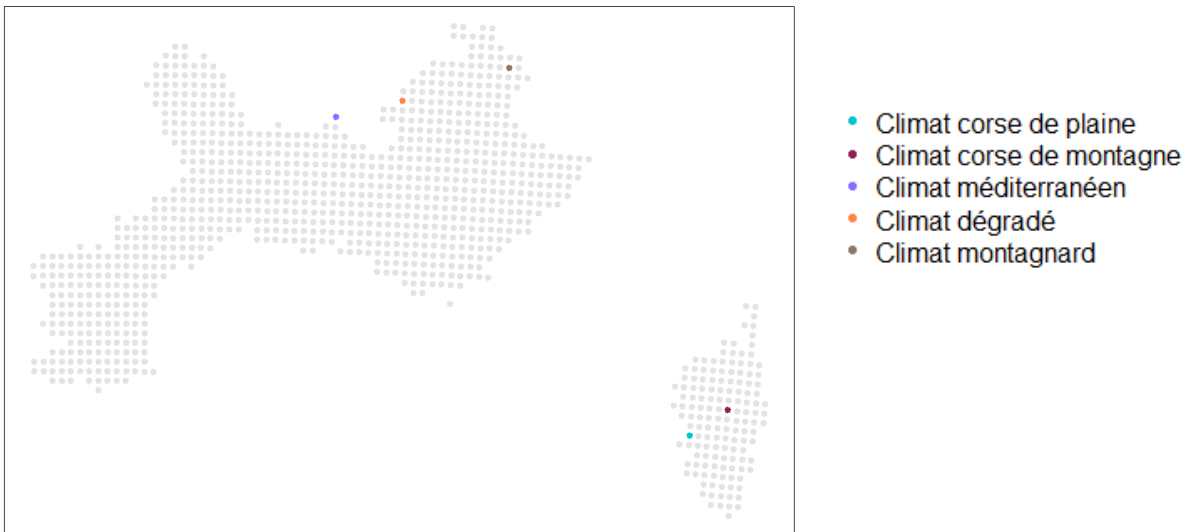


FIGURE E.1 : Parangon de chaque zone climatique après CAH.

Les parangons ainsi obtenus sont illustrés sur la carte [E.1](#). Le point le plus représentatif pour le climat corse de plaine est situé dans l'ouest de l'île, proche du littoral. Pour le climat corse de montagne, le parangon est situé en plein centre de la Corse. Il a une altitude proche de 1 000 m.

Pour les trois autres zones qui couvrent la partie continentale du périmètre de l'étude, les parangons sont tous situés dans la région PACA. L'individu le plus représentatif du climat méditerranéen est très proche de la région Languedoc-Roussillon, et situé dans la vallée du Rhône. Celui du climat dégradé est géographiquement proche de ce dernier, mais est nettement plus élevé avec 949 m d'altitude. Le parangon du climat montagnard, proche de la frontière italienne, avoisine quant-à-lui les 2 000 m d'altitude.