

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  
le 25 Mars 2024

Par : Kyllian LECOUBLET

Titre : Risque RGA : projections climatiques et impact des changements des paramètres du régime  
CatNat

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 :*

*Entreprise :*

Nom : PricewaterhouseCoopers (PwC)

Signature :

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

*Directeur de Mémoire en entreprise :*

Nom : Thomas Durand

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 :*

*Signature du responsable entreprise*

*Bibliothèque :*

*Signature du candidat*



## Résumé

---

Alors que les effets du réchauffement climatique s'accroissent de manière toujours plus forte dans le monde et notamment en France, la sécheresse devient peu à peu le péril le plus coûteux à couvrir. A ce titre, un regard tout particulier peut être porté sur le risque Retrait-Gonflement des Argiles en raison, d'une part, du coût considérable qu'il représente et, d'autre part, de l'impact du changement climatique sur ce risque.

L'étude ci-après propose donc d'abord une présentation du risque RGA et du régime CatNat auquel son indemnisation est reliée. En plus de la forte exposition de la France, il y fait état d'une indemnisation parfois partielle de ce risque. Un point particulier est fait sur les difficultés de la CCR et du milieu assurantiel à couvrir toute la sinistralité laissant place à un calendrier de réformes important.

La deuxième partie présente la construction d'un indice sécheresse. Les résultats obtenus sont ensuite projetés afin de d'observer la très forte augmentation des sécheresses à différents horizons de temps. Pour chacun de ces tests, deux scénarios du GIEC sont retenus : le RCP 8.5 et le RCP 4.5 ainsi qu'une approche multi-modèle venant s'ajouter à l'approche basée sur le modèle ALADIN de Météo-France.

Enfin, la dernière partie a pour but d'estimer l'accroissement considérable du coût de la sécheresse à ces différents horizons de temps. Pour ce faire, un modèle de coûts est implémenté à l'échelle régionale. Sont par la suite implémentées au sein du modèle certaines mesures législatives dont les impacts colossaux sont observés à la fois sur le coût total de la sécheresse mais aussi à l'échelle de portefeuilles assurantiels fictifs.

Quelques limites ont été listées dans ce mémoire parmi lesquelles figurent la prise en compte de l'inflation et de la franchise, l'effet des mesures de prévention ou encore les changements socio-économiques.

---

*Mots-clés : sécheresse, changement climatique, régime CatNat, risque RGA, open data, réformes.*

## Abstract

---

At a time when the effects of global warming are becoming ever more pronounced throughout the world, and particularly in France, drought is gradually becoming the most costly peril to cover. In this respect, the risk of subsidence, or more specifically clay-shrinkage-induced subsidence (RGA), should be given special attention, firstly because of its considerable cost, and secondly because of the impact of climate change on this risk.

The following study therefore begins with a presentation of the RGA risk and the "CatNat" regime to which its compensation is linked. In addition to France's high exposure to this risk, it also notes that compensation is sometimes only partial. Particular attention is paid to the difficulties encountered by the CCR (*Caisse Centrale de Réassurance*) and the insurance industry in covering all claims, which has given rise to a major reform schedule.

The second part presents the construction of a drought index. The results obtained are then projected in order to observe the very sharp increase in droughts over different time horizons. For each of these tests, two IPCC scenarios are used: RCP 8.5 and RCP 4.5, as well as a multi-model approach in addition to the approach based on Météo-France's ALADIN model. Finally, the aim of the last section is to estimate the considerable increase in the cost of drought over these different time horizons. To do this, a cost model is implemented on a regional scale. A number of legislative measures are then implemented within the model, with colossal impacts observed both on the total cost of drought and on the scale of fictitious insurance portfolios.

A number of limitations are listed in this report, including the need to take account of inflation and deductibles, the effect of preventive measures and socio-economic changes.

---

*Keywords : drought, climate change, "CatNat regime", RGA risk, open data, reforms.*

# Note de Synthèse

## Contexte et démarche

Le réchauffement climatique ne cesse de s'intensifier à l'image de ces dernières années durant lesquelles tous les records de température et de sécheresses ont été battus. Les répercussions de cette intensification sont énormes, à commencer par les coûts engendrés. Ce mémoire a pour but d'étudier le risque RGA qui représente le premier risque lié à la sécheresse. Il s'agit du nom donné au phénomène qui consiste en des mouvements différentiels de terrain liés à une alternance de pluies et d'épisodes de sécheresses dans des zones argileuses. Ces épisodes sont déterminants dans le déclenchement du processus. Par la suite, ces mouvements de terrain fragilisent grandement les fondations des maisons provoquant le plus souvent des fissures dont le coût d'indemnisation peut être très élevé : de l'ordre de 20 000€ en moyenne.

Afin d'indemniser au mieux ce risque, il est intégré depuis 1989 au régime des catastrophes naturelles dit « régime CatNat ». Ce régime a été fondé en 1982 pour assurer une indemnisation de tous les particuliers, entreprises et collectivités en cas de dommages provoqués par des événements naturels d'une gravité exceptionnelle. Il s'agit d'un régime financé à l'aide d'une surprime sur les contrats de dommages aux biens et pouvant bénéficier d'une aide de l'Etat. L'intervention de la CCR dans le cadre d'une catastrophe naturelle doit faire suite à un arrêté de catastrophes naturelles. Dans le cadre du RGA, cette déclaration est un procédé particulier. A chaque commune est associée une ou plusieurs mailles de 8 km de côté. La commune doit alors respecter 2 critères :

- un critère géotechnique correspondant à la présence dans la commune d'un seuil minimum d'argiles gonflantes
- un critère météorologique : il faut, au travers de relevés et d'un indice climatiques, que le mois considéré soit parmi les 2 mois les plus secs de ces 50 dernières années.

Si la commune remplit ces 2 critères, la commission interministérielle peut alors déclarer la situation de catastrophe naturelle pour cette commune pourvu que le maire et le préfet en aient dans les 18 mois suivants la catastrophe fait la demande. Ce processus, bien que long et complexe, ne permet pas pour autant de couvrir l'intégralité de la sinistralité et laisse un nombre élevé de communes sinistrées sans solution. Qui plus est, il est difficile d'évoquer ces problèmes sans parler des coûts du RGA. En effet, le régime CatNat est un régime qui a, jusqu'ici, réussi à préserver son bilan et même à construire des réserves pouvant absorber des sinistres centenaires ou bicentenaires. Toutefois, le RGA pose un réel problème car suite aux sécheresses de ces 10 dernières années le régime CatNat est largement déficitaire et voit ses réserves fondre comme neige au soleil. Les assureurs observent le même problème et sont déficitaires depuis 2015 sur la couverture du risque RGA. Le risque RGA pose donc un problème crucial d'assurabilité.

Afin de l'illustrer, il est possible d'observer l'évolution des dépenses liées à la sécheresse sur les dernières années en figure 1 :

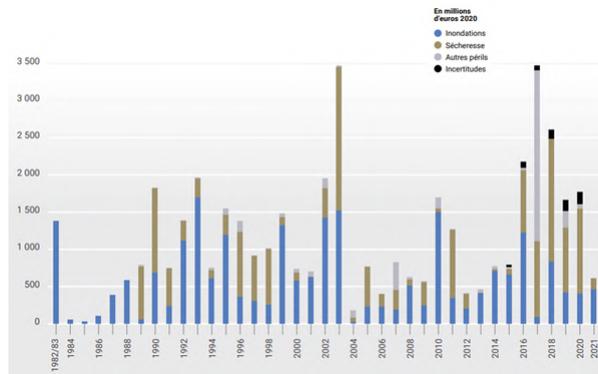


FIGURE 1 : Sinistralité CatNat hors auto de 1982 à 2021 en M€.

On y voit l'augmentation croissante de la part de la sécheresse dans le régime CatNat. Elle représente 37% de la sinistralité CatNat hors auto depuis 1989 et a coûté plus de 8,5 milliards d'euros depuis 2016 ce qui montre également la progression très forte ce risque liée au changement climatique. Face à ces problèmes, les réponses sont multiples. La première est celle de la prévention. Différentes mesures existent mais elles sont très coûteuses pour la plupart et demanderaient un vrai plan de mise en place qui jusqu'ici n'a pas été effectué. C'est donc pour toutes ces raisons que l'assemblée nationale, le sénat et le gouvernement se sont emparés de ce sujet et ont fait voter et proposé un grand nombre de lois et de réformes. L'un des principaux objectifs sera donc d'étudier les répercussions notamment financières et les impacts si de telles réformes venaient à être acceptées.

## Mise en place du modèle sécheresse

La première étape consiste donc en la construction d'un indice sécheresse capable de répliquer au mieux les variations de l'indice historique de Météo-France : le SWI. Les variables qu'il utilisait étant indisponibles et complexes à modéliser, un proxy était nécessaire. Pour cela, dans le cas de l'étude du risque RGA, deux indices ont fait l'objet de notre choix : le SPI et le SPEI. Utilisant la même méthode de calcul, ils se distinguent par les variables d'entrée.

Si le SPI utilise seulement les précipitations, le SPEI, lui, utilise l'évapotranspiration potentielle en plus des précipitations. Il s'agit d'une variable ayant pour but de modéliser l'évaporation de l'eau due aux niveaux de température. Deux jeux de données ont aussi été utilisés. Un jeu de données *réanalysées* et un jeu de données *simulées*. Le but du premier est double ; en effet, utilisant des données issues d'un modèle mais dont les valeurs sont modifiées pour coller au mieux à la réalité, il sert d'abord à vérifier l'adéquation de nos deux indices au SWI et dans un second temps à calibrer notre modèle de coûts sur la période historique. Le second joue un rôle décisif puisqu'il contient des données simulées sur différents scénarios du GIEC et sur une période s'étendant de 1940 à 2100. Ce jeu de données a pour but de présenter des données climatiques et non météorologiques : il représente un climat et ce, sur de longues périodes (d'une vingtaine d'années). Les résultats obtenus sont bons et nous laissent observer une corrélation supérieure à 70% pour le SPEI et proche de 80% pour le SPI. Pour calculer cette corrélation, un ajustement a été fait afin d'observer les sécheresses et donc les moments où l'indice est plus faible qu'à l'accoutumée seulement.

Ensuite, des tests ont été effectués afin de s'assurer que le modèle ne souffrait d'aucun biais particulier sur les résultats. Ainsi, cette corrélation a été recalculée selon l'exposition au risque RGA, le critère géotechnique et la sinistralité historique. Le modèle a ensuite été validé, d'abord en étudiant sa capacité à capter un événement historique de l'ampleur de la sécheresse de 2003 sur une ville très touchée : Toulouse. Les résultats ont été concluants et ont permis d'observer que le modèle captait très bien cette sécheresse. La deuxième vérification était la comparaison des résultats obtenus par le modèle par rapport aux modèles proposés par des organismes comme la FFA ou la CCR. Une nouvelle fois, le modèle a produit des résultats concluants en estimant par exemple la même augmentation de la sécheresse en 2050 que Covéa.

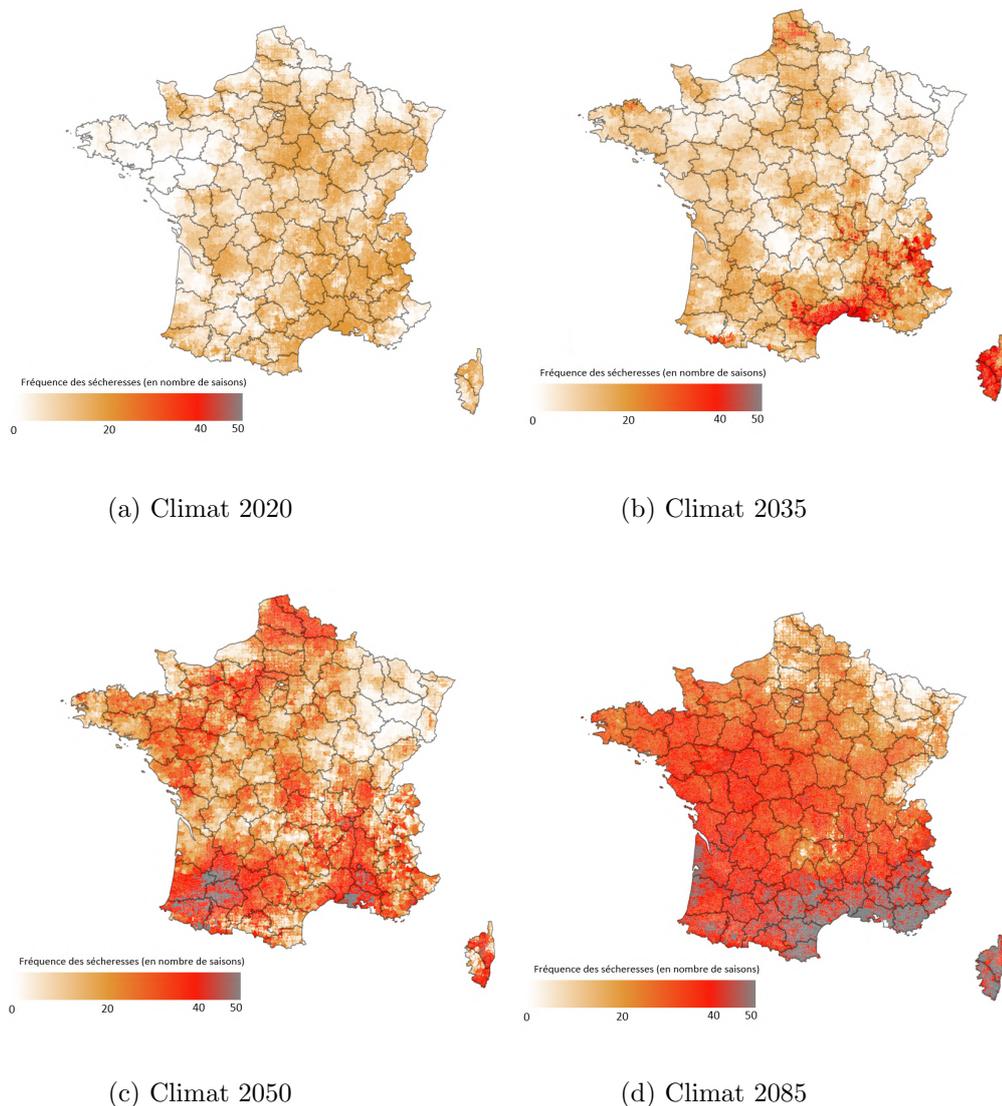


FIGURE 2 : Cartes de la sécheresse pour le scénario 8.5

Ainsi, il a été possible d'étudier les résultats du modèle. Tout d'abord, il a été possible de vérifier que, sur la période historique, un grand nombre de sécheresses apparaît en dehors de la période estivale mais aussi que le plus grand nombre de sécheresses avait eu lieu en 2011 devançant ainsi légèrement l'année 2003 connue pour son impressionnante sinistralité.

Quant aux résultats des modèles de projection, deux approches ont été mises en place : l'une utilisant le RCP 4.5 et l'autre avec le RCP 8.5. Les résultats du RCP 8.5 sont présentés en figure 2.

Les conclusions sont très différentes que ce soit en terme de coûts ou de régions touchées. Les deux scénarios subissent des changements très importants à compter de la décennie 2050. Le RCP 4.5 accentue la sécheresse en 2035 puis stabilise son évolution à partir de 2050 et ce, jusqu'à la fin du siècle alors que pour le RCP 8.5, l'évolution est progressive et exponentielle atteignant des records de sécheresse d'ici la fin du siècle. Quant aux zones concernées, le RCP 4.5 semble prédire une sécheresse sur le sud et la côte Ouest de la France alors que les résultats du RCP 8.5 sont sans appel et les sécheresses très violentes de la fin du siècle sont essentiellement concentrées dans le sud de la France. Les modifications du nombre de sécheresses comportent d'autant plus de différences suivant les deux scénarios.

L'augmentation du nombre de sécheresses éligibles est colossale pour le RCP 8.5 prévoyant à partir de 2050 une augmentation de 65% des sécheresses éligibles par rapport au climat 2020 qui est déjà 1,3 fois plus sec que le climat historique. Enfin, à la fin du siècle, on observe ni plus ni moins, un doublement de ces sécheresses éligibles. En scénario 4.5, cette augmentation reste importante, notamment par rapport à la période historique, mais ne dépasse pas les 35%.

Ainsi, plusieurs conclusions peuvent être tirées de ce modèle. La première est que, quel que soit le modèle, dans les cas les plus optimistes, une augmentation d'au moins 25% des sécheresses est à prédire d'ici 2035.

Les deux nouveautés sont le fait que des régions auparavant préservées de la sécheresse pourraient maintenant être touchées et fortement touchées à l'instar du nord de la France ou de la Bretagne dont certaines parties sont argileuses. L'autre élément primordial est cette augmentation substantielle des sécheresses à partir de 2050 et notamment un doublement du nombre de sécheresses d'ici la fin du siècle ce qui viendrait, sans nul doute, mettre gravement en péril l'assurance de ce risque.

## Modèle de coûts du risque RGA

Le but de cette partie est maintenant d'évaluer le coût que représenteraient ces épisodes de sécheresse par le prisme du milieu assurantiel. Ensuite, seront implémentées des mesures imaginées par des députées de l'Assemblée Nationale et qui pourraient bien constituer une alternative aux problèmes d'indemnisation du risque RGA. Pour cela, nous disposons de données historiques de coûts du risque sécheresse. Cela permet d'estimer pour les communes pour lesquelles nous disposons de ces données (environ 1/3, un peu plus de 9000 communes) un coût moyen de la sécheresse par commune.

Pour les autres, un GLM de coûts doit être mis en place. Ce GLM est effectué à l'échelle régionale et utilise les données précédemment décrites. Des regroupements situationnels entre la Bretagne, la Normandie et les Pays-De-La-Loire ont par exemple dû être effectués en raison d'un manque de données. Les données utilisées concernent le nombre de logements en zones sans risque, à risques faible, moyen et fort et les périodes de constructions de ces habitations. Les résultats sont obtenus sur la base de l'AIC.

Un coefficient d'ajustement a été mis en place afin de prendre en compte la différence qu'il existe entre sécheresse et déclaration CatNat. En effet, beaucoup plus de sécheresses ont été détectées avec le SWI qu'il n'y a en réalité d'arrêtés CatNat.

Cela s'explique par des demandes non déposées ou encore le fait qu'une sécheresse ayant été vécue une année, le maire n'ait pas eu l'utilité de redemander une autre déclaration dans les années suivantes.

Cet indice peut ainsi être vu comme le nombre de sécheresses effectives nécessaires avant qu'une commune nécessite une déclaration CatNat pour dommages. Dans les faits, cet indice prend en compte le fait, qu'en raison des premiers balbutiements du régime à ses débuts, la plupart des déclarations CatNat pour les communes permettaient d'assurer, non pas une sécheresse, mais les sécheresses de plusieurs années d'absence d'arrêtés CatNat. Cet indice peut ainsi également être vu comme un indice de retraitement des données.

Le modèle a été backtesté comparativement à des données de Covéa et de la FFA. L'augmentation de 52% la sinistralité pour le climat 2050 est en accord avec la fourchette fournie de Covéa de 46 à 60%. De plus, les coûts sur la période 2020-2050 sont estimées à 31,6 milliards d'euros par le modèle ce qui correspond aux estimations de la FFA comprises entre 31 et 33,4 milliards d'euros. Le modèle semble donc être intéressant pour évaluer le coût de la sécheresse.

On obtient alors une carte des coûts de la sécheresse par commune que l'on peut comparer à la carte des coûts historiques. On observe des similarités très prononcées par rapport à la sinistralité historique et les différences s'expliquent facilement à l'aide des déclarations sécheresses non obtenues pour les communes. On peut également comparer la sinistralité historique de la FFA avec celle du modèle. Notre modèle suit remarquablement bien les évolutions des données de la FFA ce qui est très encourageant.

Les projections climatiques estiment des coûts bien plus élevés que sur la période historique. Un des premiers éléments notables est que certaines sécheresses pourraient dépasser les 4 milliards d'euros de sinistralité à partir de 2050 ce qui semble vraisemblable au vu des données de l'année 2022.

Les coûts sont très importants notamment pour le climat 2085. On observe la même augmentation conséquente à partir de 2050 que pour les sécheresses. On y voit que les coûts sont presque multipliés par deux entre les deux scénarios ce qui amène à prendre les résultats présentés avec quelque peu de recul tant les différences sont importantes entre les deux scénarios.

## Impact des différentes réformes

Quatre réformes ont été testées :

- Modification de la période de retour
- Accumulation des sécheresses
- Modification du taux de sans suite
- Communes limitrophes

La modification de la période de retour, si elle est adoptée, pourrait entraîner une augmentation vertigineuse du coût de la sécheresse pour les assureurs. La mesure a d'autant plus d'impact que les sécheresses sont rares à l'instar du début du siècle. On peut toutefois raisonnablement déduire une surestimation certaine du prix en raison du nombre trop élevé de sécheresses estimés par le modèle. Des mesures de prévention devraient en pratique permettre une meilleure résilience face au risque dans le cadre où un tel de nombre de sécheresses seraient déclarées et, de ce fait, une diminution certaine du coût.

La modification du taux de sans-suite consiste est a été implémentée à l'aide de l'ajout d'un coefficient dans le modèle censé représenter l'impact qu'aurait une succession de réformes visant à mieux assurer les sinistrés et ainsi à réduire le taux de sans-suite jusqu'ici très élevé (de l'ordre de 50%).

L'implémentation de la succession anormale de sécheresse est difficile à mettre en place tant il existe de méthodes possibles. Une méthode de 24 mois a été retenue pour l'étude car elle semble être un bon compromis. Les conclusions pour la méthode 24 mois sont claires et semblent tendre, à l'opposé de la modification de la période de retour, vers une augmentation progressive des coûts observés à mesure que le climat se réchauffe avec des différences marquées entre les 2 scénarios. C'est surtout vers la fin du siècle, où les températures ont tendance à grandement se réchauffer et le SPEI à prendre des valeurs inférieures à -1, que les coûts engendrés deviennent astronomiques.

La réforme portant sur l'intégration des communes limitrophes est intéressante à implémenter et vise à éviter des situations pouvant paraître injustes pour certains sinistrés. Elle a tendance à privilégier les communes les plus petites mais surtout à réparer les injustices. Elle n'engendre aucune modification en profondeur du système.

Période/Méthode	Coût	Coût UP	10 ans	Ac3	Ac6	Ac24	CL	Tt6	Tt24
Histo (sur 30 ans)	0,46	0,46	1,24	2,03	1,01	0,53	0,58	1,93	1,55
2020	0,95	0,94	2,17	2,01	1,17	1,00	1,12	3,30	3,16
2030	0,99	0,92	2,18	2,30	1,34	1,07	1,16	3,45	3,20
2050	1,87	1,43	2,97	3,82	2,51	2,09	2,12	4,80	4,45
2085	2,25	0,93	3,11	7,26	4,69	4,36	2,68	7,22	7,17

FIGURE 3 : Coûts annuels de la sécheresse en différents climats et pour différentes mesures législatives en RCP 8.5

En conclusion, les résultats, présentés en figure 3, donnent satisfaction quant à la méthode employée. Les chiffres sont alarmants et prédisent d'ici la fin du siècle une multiplication de la sinistralité par 15 environ avec un coût moyen annuel de 7 milliards d'euros en cas d'application de l'ensemble des mesures étudiées. Ces chiffres sont toutefois à relativiser tant les projections peuvent différer les unes des autres et être incertaines pour une période aussi éloignée dans le temps. Les chiffres plus récents ne sont toutefois pas beaucoup plus rassurants avec, dans le cas de l'adoption de l'ensemble des mesures, un quintuplement de la sinistralité à très court terme et une augmentation considérable de cette dernière à horizon 2050 qui semble représenter d'après les différents modèles une année charnière. Ces mesures engendreraient donc, à n'en pas douter, un coût énorme pour l'assurance de ce risque qui, même s'il représente une grande partie de la sinistralité CatNat aujourd'hui, reste sous-indemnisé.

## Etudes sur des portefeuilles d'assurance

Une étude a été réalisée sur des portefeuilles d'assurance fictifs afin de déterminer les assureurs les plus à risque et d'étudier de manière plus générale l'assurabilité de ce risque. Les régions et types d'assurance exposés sont, de façon assez prévisible, l'Occitanie, la région PACA ou encore l'assurance de petites communes.

Cette partie d'application sur les portefeuilles d'assurance a permis d'observer à quel point ce risque allait bouleverser le système assurantiel privé. En effet, il faut considérer pour la plupart des assureurs un doublement au moins de la sinistralité d'ici 2050 ce qui pourrait venir mettre en péril leur équilibre sans considérablement augmenter le niveau des primes MRH. Un fait notable, à l'image de la conclusion tirée pour la sécheresse, est l'aggravation de la situation pour des assureurs auparavant épargnés aussi bien que pour ceux qui étaient exposés. Toutefois, une augmentation plus notable a lieu pour les assureurs qui étaient exposés probablement due à la concentration du risque RGA.

Ainsi, ce risque pourrait devenir inassurable pour certains assureurs sans une augmentation conséquente des primes de l'ordre de plus de 500% d'ici la fin du siècle. De même, pour des assureurs dans des régions en apparence moins exposées comme le Grand-Est ou les Hauts-De-France, une augmentation certaines des primes, de l'ordre du doublement, serait nécessaire pour préserver leur équilibre.

La question de l'assurabilité de ce risque peut naturellement se poser alors, tant les assureurs seraient exposés dans certains cas d'autant plus que l'augmentation de sinistralité s'accompagne d'une augmentation des coûts et de leur intensité. Beaucoup d'assureurs dans des régions très exposées pourraient envisager de ne plus assurer ce risque et de laisser à l'Etat, seul, l'indemnisation de ce dernier. Il existe donc une réelle et impérieuse nécessité de repenser l'assurance du risque RGA tant pour les assureurs que pour le régime CatNat.

## Conclusion

En conclusion, ce mémoire a permis de mettre au point un outil capable de capter les sécheresses historiques et d'évaluer l'impact du réchauffement climatique sur ce risque dans le futur. En outre, un modèle de coût de la sécheresse a été conçu et a permis d'étudier, après s'être intéressé aux coûts historiques du RGA, l'impact du dérèglement climatique et de différentes pistes de réforme étudiées par l'Assemblée Nationale. Ces différents modèles ont été favorablement testés et comparés aux sources à notre disposition. Ces évaluations ont été chiffrées, et leurs conséquences étudiées, sur des portefeuilles d'assurance fictifs pour des assureurs évoluant dans différentes régions et dans différents périmètres. L'ensemble de ces travaux a permis de démontrer à quel point le risque RGA allait être prégnant dans les prochaines décennies et pouvait fragiliser, non seulement le régime CatNat, mais aussi l'intégralité du système assurantiel CatNat. La portée des coûts qu'il pourrait engendrer à des horizons de temps peu lointains posent alors la question de son assurabilité.

Au-delà des quelques limites listées dans ce mémoire comprenant entre autres la prise en compte de l'inflation et des projections socio-économiques, des ajouts potentiels pourraient être la considération d'autres indices sécheresse, d'autres possibilités de réformes, d'autres scénarios du GIEC notamment le 2.6 ou encore d'autres modèles climatiques. De plus, la sécheresse est un phénomène palpable en constante évolution, il sera donc intéressant d'évaluer les prédictions du modèle sur les résultats que nous pourrions constater à l'avenir. Il sera ainsi pertinent de voir la façon retenue par les politiques publiques pour faire face aux difficultés d'assurabilité du risque tant par le secteur privé que par le secteur public. D'autres problèmes pourraient apparaître lors de cette implémentation, comme la localisation très forte du risque autour de certaines zones argileuses qui pourraient se trouver très rapidement délaissées par les assureurs si des incitations à l'assurance de ces dernières ne sont pas mises en place. Il semble, au demeurant, difficile à imaginer que la CCR puisse prendre en charge l'ensemble de ces régions très exposées dans leur totalité, tant les coûts d'indemnisation peuvent s'avérer faramineux, laissant pour le moment la question de l'assurance future de ce risque sans réponse.



# Synthesis note

## Context and Approach

Climate change continues to intensify, as evidenced by recent years during which all temperature and drought records have been broken. The repercussions of this intensification are enormous, starting with the costs incurred. This dissertation aims to study the RGA risk, which represents the primary risk associated with drought. RGA is the term given to the phenomenon involving differential ground movements linked to alternating periods of rain and drought in clayey areas. These episodes are crucial in triggering the process. Subsequently, these ground movements greatly weaken the foundations of houses, often causing cracks with compensation costs that can be very high: around €20,000 on average.

To best compensate for this risk, it has been integrated into the natural disaster regime known as the "CatNat regime" since 1989. This regime was established in 1982 to ensure compensation for individuals, businesses, and communities in the event of damage caused by exceptionally severe natural events. It is a regime funded by an additional premium on property damage contracts and can receive state aid. CCR's intervention in the context of a natural disaster must follow a natural disaster decree. In the case of RGA, this declaration is a particular process. Each municipality is associated with one or more 8 km by 8 km cells. The municipality must then meet 2 criteria:

- A geotechnical criterion corresponding to the presence in the municipality of a minimum threshold of swelling clays.
- A meteorological criterion: it is necessary, through readings and climatic indices, for the considered month to be among the 2 driest months of the last 50 years.

If the municipality meets these 2 criteria, the interministerial commission can then declare the situation a natural disaster for that municipality provided that the mayor and the prefect have requested it within 18 months of the disaster. This process, although long and complex, does not cover the entirety of the losses and leaves a high number of affected municipalities without a solution. Furthermore, it is difficult to discuss these issues without mentioning the costs of RGA. Indeed, the CatNat regime is a regime that has, so far, managed to maintain its balance and even to build reserves capable of absorbing hundred- or two-hundred-year losses. However, RGA poses a real problem because following the droughts of the past 10 years, the CatNat regime is largely in deficit and sees its reserves melting away. Insurers face the same problem and have been in deficit since 2015 in covering the RGA risk. The RGA risk thus poses a crucial problem of insurability.

To illustrate this, it is possible to observe the evolution of expenses related to drought over the past years in figure 4:

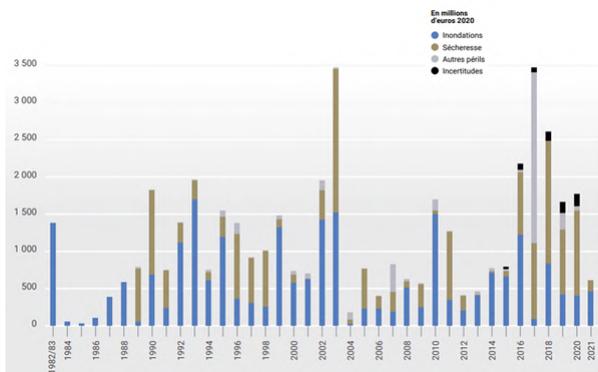


Figure 4: CatNat losses excluding auto from 1982 to 2021 in M€.

We can see the increasing share of drought in the CatNat regime. It represents 37% of CatNat losses excluding auto since 1989 and has cost more than €8.5 billion since 2016, which also shows the very strong progression of this risk linked to climate change. In response to these problems, there are multiple answers. The first is prevention. Various measures exist, but most of them are very costly and would require a real implementation plan that has not been carried out so far. It is for all these reasons that the National Assembly, the Senate, and the government have taken up this issue and have proposed and passed a large number of laws and reforms. One of the main objectives will therefore be to study the repercussions, particularly financial, and the impacts if such reforms were to be accepted.

## Implementation of the Drought Model

The first step therefore consists of constructing a drought index capable of best replicating the variations of Météo-France’s historical index: the SWI. Since the variables it used are unavailable and complex to model, a proxy was necessary. For this purpose, in the case of studying the RGA risk, two indices were chosen: the SPI and the SPEI. Using the same calculation method, they differ in their input variables.

If the SPI uses only precipitation, the SPEI, on the other hand, incorporates potential evapotranspiration in addition to precipitation. This variable aims to model water evaporation due to temperature levels.

Two datasets have also been used: a ”reanalyzed” dataset and a ”simulated” dataset. The purpose of the former is twofold; indeed, using data from a model but with values modified to best fit reality, it serves first to verify the adequacy of our two indices to the SWI and secondly to calibrate our cost model over the historical period. The latter plays a decisive role since it contains simulated data on different scenarios from the IPCC and over a period extending from 1940 to 2100. This dataset aims to present climatic rather than meteorological data: it represents a climate over long periods (about twenty years).

The results obtained are good and allow us to observe a correlation greater than 70% for the SPEI and close to 80% for the SPI. To calculate this correlation, an adjustment was made to observe droughts and therefore moments when the index is lower than usual only.

Next, tests were conducted to ensure that the model did not suffer from any particular biases in the results. Thus, this correlation was recalculated according to exposure to the RGA risk, the geotechnical criterion, and historical losses.

The model was then validated, first by studying its ability to capture a historical event as significant as the 2003 drought in a highly affected city: Toulouse. The results were conclusive and showed that the model captured this drought very well.

The second verification was the comparison of the results obtained by the model with models proposed by organizations such as FFA or CCR. Once again, the model produced conclusive results by estimating, for example, the same increase in drought in 2050 as Covéa.

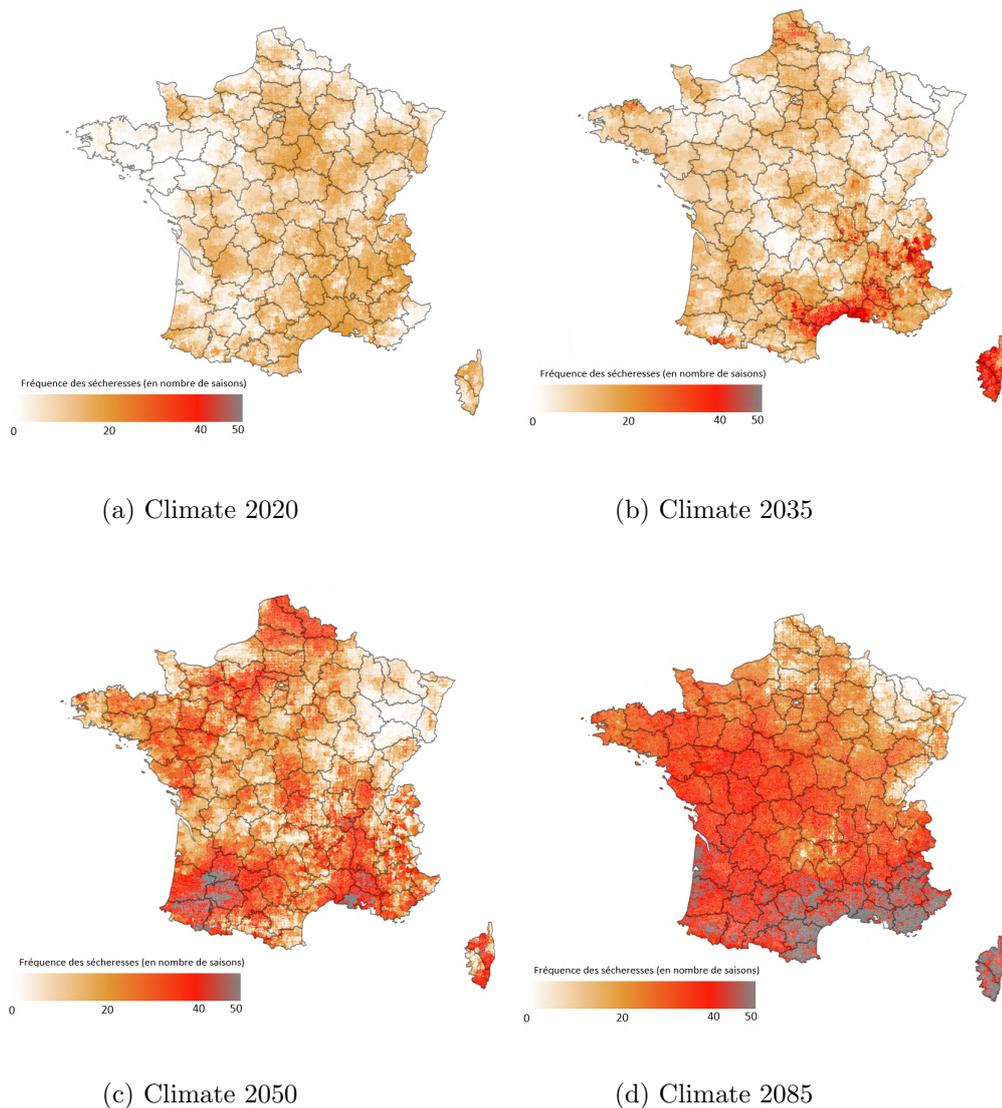


Figure 5: Drought maps for scenario 8.5

Subsequently, it was possible to study the results of the model. Firstly, it was possible to verify that, over the historical period, a large number of droughts occurred outside the summer period, but also that the largest number of droughts occurred in 2011, slightly ahead of the year 2003, known for its impressive losses.

As for the results of the projection models, two approaches were implemented: one using RCP 4.5 and the other with RCP 8.5. The results of RCP 8.5 are presented in Figure 5.

The conclusions are very different in terms of costs or affected regions. Both scenarios undergo very significant changes starting from the 2050s. RCP 4.5 exacerbates drought in 2035 and then stabilizes its evolution from 2050 onwards until the end of the century, while for RCP 8.5, the evolution is progressive and exponential, reaching record droughts by the end of the century. As for the affected areas, RCP 4.5 seems to predict drought in the south and west coast of France, while the results of RCP 8.5 are unequivocal, and the very severe droughts by the end of the century are mainly concentrated in the south of France. The changes in the number of droughts vary even more depending on the two scenarios.

The increase in the number of eligible droughts is colossal for RCP 8.5, predicting a 65% increase in eligible droughts from 2050 compared to the 2020 climate, which is already 1.3 times drier than historical climate. Finally, by the end of the century, we observe nothing less than a doubling of these eligible droughts. In scenario 4.5, this increase remains significant, especially compared to the historical period, but does not exceed 35%.

Thus, several conclusions can be drawn from this model. The first is that, regardless of the model, in the most optimistic cases, an increase of at least 25% in droughts is predicted by 2035.

The two novelties are that regions previously spared from drought could now be affected and heavily affected, such as northern France or Brittany, some parts of which are clayey. The other crucial element is this substantial increase in droughts from 2050 onwards, and notably a doubling of the number of droughts by the end of the century, which would undoubtedly seriously endanger the insurance of this risk.

## **RGA Risk Cost Model**

The goal of this section is now to evaluate the cost that these drought episodes would represent from the perspective of the insurance industry. Then, measures proposed by members of the National Assembly will be implemented, which could well constitute an alternative to the problems of RGA risk compensation. For this, we have historical data on drought risk costs. This allows estimating, for the municipalities for which we have this data (about one-third, just over 9000 municipalities), an average cost of drought per municipality.

For the rest, a cost GLM must be set up. This GLM is carried out at the regional level and uses the previously described data. Situational groupings between Brittany, Normandy, and Pays-De-La-Loire, for example, had to be made due to a lack of data. The data used concerns the number of dwellings in risk-free zones, low, medium, and high-risk areas, and the periods of construction of these dwellings. The results are obtained based on the AIC.

An adjustment coefficient has been implemented to account for the difference between drought and CatNat declaration. Indeed, many more droughts have been detected with the SWI than there are actually CatNat decrees. This can be explained by undeclared requests or by the fact that a drought experienced in one year may not prompt the mayor to request another declaration in the following years.

This index can thus be seen as the number of actual droughts required before a municipality requires a CatNat declaration for damages. In practice, this index takes into account the fact that, due to the early stages of the regime at its inception, most CatNat declarations for municipalities covered not just one drought, but droughts from several years without CatNat decrees. This index can also be seen as a data reprocessing index.

The model was backtested compared to data from Covéa and FFA. The 52% increase in severity for the 2050 climate is consistent with Covéa's provided range of 46 to 60%. Furthermore, costs over the 2020-2050 period are estimated at €31.6 billion by the model, which corresponds to FFA estimates ranging from €31 to €33.4 billion. The model therefore seems to be useful for assessing drought costs.

We then obtain a map of drought costs per municipality that can be compared to the map of historical costs. We observe very pronounced similarities with historical severity, and the differences can be easily explained by undeclared droughts for municipalities. We can also compare FFA's historical severity with that of the model. Our model remarkably follows the data trends of the FFA, which is very encouraging.

Climate projections estimate much higher costs than historical periods. One of the first notable elements is that some droughts could exceed €4 billion in severity from 2050 onwards, which seems plausible based on 2022 data. The costs are very high, especially for the 2085 climate. We observe the same significant increase from 2050 onwards as for droughts. We see that costs are almost doubled between the two scenarios, which leads to a somewhat cautious interpretation of the results given the significant differences between the two scenarios.

## Impact of Different Reforms

Four reforms have been tested:

- Modification of the return period
- Accumulation of droughts
- Modification of the dismissal rate
- Bordering municipalities

Modifying the return period, if adopted, could lead to a vertiginous increase in drought costs for insurers. The measure has even more impact since droughts are rare, similar to those at the beginning of the century. However, we can reasonably deduce an overestimation of the price due to the excessively high number of droughts estimated by the model. Prevention measures should in practice allow for better resilience to the risk in the event that such a number of droughts are declared, leading to a certain reduction in cost.

The modification of the dismissal rate was implemented by adding a coefficient to the model intended to represent the impact of successive reforms aimed at better insuring the victims and thus reducing the dismissal rate, which has been very high (around 50%).

Implementing abnormal drought succession is difficult due to the various possible methods. A 24-month method was chosen for the study as it seems to be a good compromise. The conclusions for the 24-month method are clear and tend, unlike the modification of the return period, towards a progressive increase in costs observed as the climate warms, with marked differences between the 2 scenarios. It is especially towards the end of the century, where temperatures tend to greatly warm up and the SPEI takes values below -1, that the costs incurred become astronomical.

The reform regarding the integration of bordering municipalities is interesting to implement and aims to avoid situations that may seem unfair to some victims. It tends to favor smaller municipalities but above all to correct injustices. It does not entail any fundamental changes to the system.

Période/Méthode	Coût	Coût UP	10 ans	Ac3	Ac6	Ac24	CL	Tt6	Tt24
Histo (sur 30 ans)	0,46	0,46	1,24	2,03	1,01	0,53	0,58	1,93	1,55
2020	0,95	0,94	2,17	2,01	1,17	1,00	1,12	3,30	3,16
2030	0,99	0,92	2,18	2,30	1,34	1,07	1,16	3,45	3,20
2050	1,87	1,43	2,97	3,82	2,51	2,09	2,12	4,80	4,45
2085	2,25	0,93	3,11	7,26	4,69	4,36	2,68	7,22	7,17

Figure 6: Annual drought costs under different climates and for different legislative measures in RCP 8.5

In conclusion, the results, presented in Figure 6, are satisfactory regarding the method used. The figures are alarming and predict by the end of the century a multiplication of severity by around 15 with an average annual cost of €7 billion if all the measures studied are applied. However, these figures should be relativized as projections can differ from each other and be uncertain for such a distant period. The more recent figures are not much more reassuring, with, in the case of the adoption of all measures, a quintupling of severity in the very short term and a considerable increase in the latter by 2050, which seems to represent a pivotal year according to the various models. These measures would undoubtedly entail a huge cost for the insurance of this risk, which, even though it represents a large part of CatNat severity today, remains under-compensated.

## Studies on Insurance Portfolios

A study was conducted on fictitious insurance portfolios to determine the insurers most at risk and to study more generally the insurability of this risk. The exposed regions and types of insurance are, quite predictably, Occitania, the PACA region, or insurance for small municipalities.

This application part on insurance portfolios allowed us to observe how much this risk would disrupt the private insurance system. Indeed, for most insurers, a doubling of severity by 2050 must be considered, which could endanger their balance without significantly increasing the level of MRH premiums. A notable fact, similar to the conclusion drawn for drought, is the worsening situation for insurers previously spared as well as for those who were exposed. However, a more significant increase occurs for insurers who were exposed, probably due to the concentration of the RGA risk.

Thus, this risk could become uninsurable for some insurers without a consequent increase in premiums of over 500% by the end of the century. Likewise, for insurers in apparently less exposed regions such as Grand-Est or Hauts-De-France, a certain increase in premiums, doubling, would be necessary to preserve their balance.

The question of the insurability of this risk can naturally arise, given how exposed insurers would be in certain cases, especially since the increase in severity is accompanied by an increase in costs and their intensity. Many insurers in highly exposed regions may consider no longer insuring this risk and leaving its indemnification solely to the State. There is therefore a real and urgent need to rethink the insurance of the RGA risk both for insurers and for the CatNat regime.

## Conclusion

In conclusion, this thesis has developed a tool capable of capturing historical droughts and assessing the impact of climate change on this risk in the future. Furthermore, a drought cost model has been designed and has allowed the study, after examining the historical costs of RGA, of the impact of climate change and various reform options studied by the National Assembly. These different models have been favorably tested and compared to the sources available to us. These evaluations have been quantified, and their consequences studied, on fictitious insurance portfolios for insurers operating in different regions and scopes. All of this work has demonstrated how pregnant the RGA risk will be in the coming decades and could weaken not only the CatNat regime but also the entire CatNat insurance system. The scope of the costs it could generate in the near future raises the question of its insurability.

Beyond the few limitations listed in this thesis, including among others the consideration of inflation and socio-economic projections, potential additions could include considering other drought indices, other reform possibilities, other IPCC scenarios including 2.6, or other climate models. Furthermore, drought is a palpable phenomenon in constant evolution, so it will be interesting to evaluate the model's predictions on the results we will see in the future. It will thus be relevant to see the approach taken by public policies to address the insurability difficulties of the risk, both by the private sector and the public sector. Other issues could arise during this implementation, such as the very strong concentration of risk around certain clayey areas that could quickly be abandoned by insurers if incentives for insuring them are not put in place. It seems difficult to imagine that the CCR could take on all of these highly exposed regions in their entirety, as the indemnification costs can be staggering, leaving the question of the future insurance of this risk unanswered.



# Remerciements

Je tiens à remercier d'abord mon tuteur de stage Thomas Durand qui a joué un rôle essentiel dans la réalisation de ce mémoire. Ses précieux conseils, son accompagnement et sa disponibilité sans faille ont été d'une aide inestimable.

Je souhaite également remercier mon tuteur académique et responsable du master actuariat Quentin Guibert, à la fois pour la qualité de la formation que j'ai reçue, et sa disponibilité et ses conseils pour mon mémoire.

Je tiens également à remercier David Cadoux pour m'avoir donné l'opportunité de rejoindre l'équipe PwC. A cet égard, je veux remercier l'ensemble de mes collègues pour leur accueil chaleureux et leur soutien. A ce titre, je tiens également à adresser un merci plus particulier à Marie Delmouly pour nos échanges et à Sophie Chevallier et Hugo Chaumont pour leur accompagnement tout au long du stage.

Je veux encore exprimer ma profonde gratitude envers ma famille et mes amis pour leur soutien indéfectible et leur motivation constante. Un merci tout particulier va à ma mère et à ma tante pour leur encouragement précieux.

Finalement, je tiens à remercier toutes les personnes ayant contribué à l'accomplissement de ce mémoire.



# Table des matières

<b>Résumé</b>	<b>3</b>
<b>Abstract</b>	<b>4</b>
<b>Note de Synthèse</b>	<b>5</b>
<b>Synthesis note</b>	<b>13</b>
<b>Remerciements</b>	<b>21</b>
<b>Table des matières</b>	<b>23</b>
<b>Liste des sigles utilisés</b>	<b>25</b>
<b>Introduction</b>	<b>27</b>
<b>1 Le risque RGA</b>	<b>29</b>
1.1 La sécheresse et le risque RGA . . . . .	29
1.2 Une intégration difficile au régime CatNat . . . . .	44
<b>2 Mise en place de modèles sécheresse et RGA</b>	<b>55</b>
2.1 Bases sur les modèles climatiques et l'utilisation de leurs données . . . . .	55
2.2 Modèle risque sécheresse . . . . .	68
2.3 Validation du modèle et résultats . . . . .	69
<b>3 Perspectives d'évolution financières</b>	<b>93</b>
3.1 Mise en place du modèle de coûts . . . . .	93
3.2 Impact des différentes réformes et lois récentes . . . . .	107
3.3 Application sur un portefeuille d'assurance . . . . .	120

3.4	Perspectives : Applications et utilité . . . . .	125
3.5	Validation et Backtesting . . . . .	126
3.6	Inflation . . . . .	126
3.7	Limites du modèle . . . . .	127
<b>Conclusion</b>		<b>129</b>
<b>Bibliographie</b>		<b>132</b>
<b>A Annexes</b>		<b>137</b>
A.1	Annexes Mathématiques . . . . .	137
A.2	Cartes de la sécheresse . . . . .	140
A.3	Etudes accumulation des sécheresses sur 3 et 6 mois . . . . .	143
A.4	Etude : toutes les réformes, accumulation sécheresse 6 mois . . . . .	145
A.5	Variables utilisées pour le GLM . . . . .	147

# Liste des sigles utilisés

AN : *Assemblée Nationale*

BRGM : *Bureau de Recherches Géologiques et Minières*

CCR : *Caisse Centrale de Réassurance*

CatNat : *Catastrophes Naturelles*

ELAN : *Evolution du logement, de l'aménagement et du numérique*

ETP : *Evapotranspiration potentielle*

FFA : *Fédération France Assureurs*

indice FFB : *indice Fédération Française du Bâtiment*

GCM : *Global Climate Model*

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

GLM : *Generalized Linear Model*

MACH : *MAison Confortée par Humidification*

MTE : *Ministère de la Transition Ecologique*

MRN : *Mission Risques Naturels*

ONRN : *Observatoire National des Risques Naturels*

PACA : *Provence-Alpes-Côte d'Azur*

PPRS : *Plan de Prévention pour le Risque Sécheresse*

RCM : *Regional Climate Model*

RCP : *Representative Concentration Pathway*

RGA : *Retrait-Gonflement des Argiles*

SPEI : *Standardized Precipitation-Evapotranspiration Index*

SPI : *Standardized Precipitation Index*

SWI : *Soil Water Index*

# Introduction

Les effets du réchauffement climatique se font sentir sur la planète de manière de plus en plus intense à l'image des catastrophes ravageuses ayant eu lieu dans tout le pourtour méditerranéen et notamment en Grèce au cours de l'été 2023. Cet été était, selon l'observatoire européen Copernicus, le plus chaud jamais observé dans le monde (LE MONDE, 2023). Et, alors que le monde commence à subir les manifestations du dérèglement climatique, la France, elle, fait face à des risques assez spécifiques. Parmi ceux-là, le deuxième plus important aujourd'hui et la plus grande menace est le risque de Retrait-Gonflement des Argiles consécutif à une sécheresse. Ce dernier, favorisé par différents facteurs dont le principal est l'alternance de fortes précipitations et d'événements importants de sécheresse, est un risque particulièrement préoccupant dans certaines régions de la France. Pour cause, ce risque est principalement associé aux sols argileux, qui ont la propriété de se contracter lorsqu'ils perdent de l'humidité (retrait) et de se dilater lorsqu'ils absorbent de l'humidité (gonflement). Certaines prédispositions topographiques ou humaines peuvent venir aggraver ce risque.

Peu étudié à l'international de par sa spécificité et très présent en France, il constitue un véritable enjeu pour le milieu assurantiel. Intégré au régime de Catastrophes Naturelles depuis 1989, il le fragilise de par l'ampleur du phénomène et des coûts qu'il génère. Les sécheresses de ces 10 dernières années ont été particulièrement violentes, faisant émerger la question de l'assurabilité de ce risque.

A titre indicatif, le risque RGA représente plus de 13 milliards d'euros d'indemnisation entre son intégration au régime des catastrophes naturelles et 2019 et pourrait coûter plus de 3,5 milliards d'euros au titre de l'année 2022 seule. La sinistralité associée ne cesse d'augmenter et est déjà, en moyenne, 2 fois plus importante depuis 2016 qu'auparavant.

Ce risque étant inadapté à de nombreuses formes d'assurance, la classe politique s'est penché sur le sujet afin de le rendre assurable et de limiter les inégalités. De par les problèmes qu'il pose, le risque RGA fait l'objet d'un calendrier législatif important et de nombreuses lois sont mises en place pour tenter d'endiguer ses effets.

Différents modèles ont été développés par des acteurs du milieu afin de modéliser au mieux le risque de sécheresse. Parmi les études présentant une estimation du climat à horizon 2050 et/ou une estimation du coût, on peut citer des études de la FFA (2022a), de la CCR (2018), et de COVÉA (2022). De nombreuses études sont possibles dans la mesure où un grand nombre d'indices existent pour modéliser le risque sécheresse ; de plus, il existe différentes manières d'approcher l'étude de coût et ce, pour les différents scénarios du GIEC.

En parallèle, la loi est en constante évolution et la difficulté d'appréhender ce risque unique se fait ressentir. De son financement à la façon de l'assurer, les transformations du risque RGA semblent difficiles à prédire bien qu'indispensables à prendre en considération.

On peut alors s'interroger sur les perspectives d'évolution d'assurabilité de ce risque liées au changement climatique et aux changements législatifs.

Les travaux présentés ci-après ont pour but de quantifier les effets que pourrait avoir le RGA selon différents scénarios et le risque qu'il pourrait représenter à court, moyen et long terme pour le système assurantiel français. Ils peuvent permettre de mieux appréhender l'indemnisation de ce risque et ses possibilités d'évolution.

Ce mémoire présente d'abord le risque RGA, ses particularités et son ampleur en parallèle de son intégration difficile au régime CatNat (1). Puis, une étude de l'évolution de la sécheresse, à travers le prisme du changement climatique, est effectuée (2). Les régions menacées par ce risque, aussi bien que son importance sont analysés dans une multitude de scénarios. Enfin, un modèle de coût est mis en place afin de mieux appréhender et comprendre ce que pourrait représenter ce péril en France dans les prochaines années. (3)

Dans ce mémoire, on ne considère que la France métropolitaine.

# Chapitre 1

## Le risque RGA : un incontournable du régime assurantiel

### 1.1 La sécheresse et le risque RGA

La sécheresse est définie par le ministère de l'écologie (MINISTÈRE DE LA TRANSITION ECOLOGIQUE, 2023) comme un épisode de manque d'eau plus ou moins long, mais suffisant pour que les sols et la flore soient affectés.

Il s'agit d'un phénomène complexe qui se divise en différents types et dont les conséquences sur les habitations, les feux de forêt, les cultures, la production électrique ou encore la biodiversité varient par leur ampleur et selon les zones géographiques concernées. Ce mémoire s'attache à l'étude de la sécheresse géotechnique et son impact sur les bâtiments, via le phénomène de retrait-gonflement des argiles (RGA).

Ainsi, dans le reste du mémoire il sera important de distinguer ce phénomène des sécheresses agricoles, qui font l'objet de procédures de reconnaissance et d'indemnisations différentes (MINISTÈRE DE L'AGRICULTURE ET DE L'ALIMENTATION, 2023).

L'assurance RGA représente toutefois la majeure partie de l'assurance sécheresse devant la sécheresse agricole et engendre des coûts environ 6 fois plus importants (KAPSAMBELIS, 2023).

#### 1.1.1 Description physique : un risque particulier

Les argiles constituent des matériaux ayant la propriété très spécifique de posséder une structure en feuillets entre lesquels de l'eau peut s'infiltrer et ainsi dilater et rétracter l'argile (GÉORISQUES, 2023h).

Les sols argileux possèdent donc la propriété de voir leur consistance se modifier en fonction de leur teneur en eau. Ainsi, en contexte humide, un sol argileux se présente comme souple et malléable, tandis que ce même sol desséché sera dur et cassant.

Les variations de volume plus ou moins conséquentes en fonction de la structure du sol et des minéraux en présence, accompagnant ces modifications de consistance donnent son nom au phénomène de retrait-gonflement des argiles comme il est possible de le constater sur la figure 1.1.

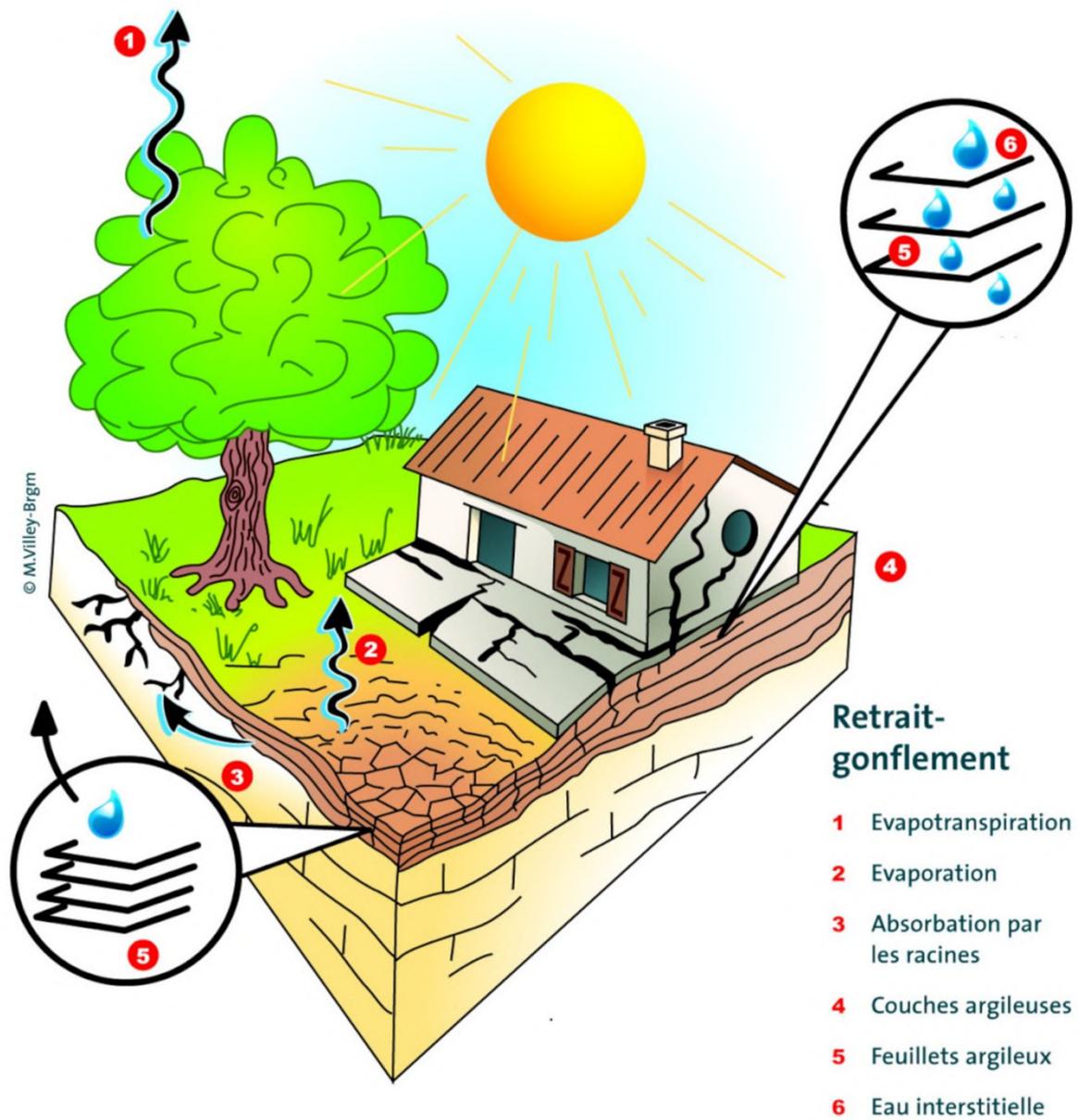


FIGURE 1.1 : Mécanisme de fonctionnement du phénomène de retrait-gonflement des sols argileux.  
Source : GÉORISQUES (2023h)

Si ces phénomènes sont sans danger immédiat pour les populations, ces variations de volume peuvent avoir un effet dévastateur sur le bâti (fissure, dislocation ou encore rupture de canalisation). Le phénomène touche essentiellement les maisons individuelles, dont les fondations sont moins profondes et la structure plus légère que celles des immeubles collectifs.

Les principaux facteurs à l'origine de ce phénomène sont les facteurs météorologiques et plus spécialement l'alternance de périodes pluvieuses favorisant le gonflement des argiles et de périodes de forte sécheresse ayant pour effet le phénomène de retrait à l'origine des dégâts sur les habitations. Il s'agit donc de phénomènes récurrents et de plus en plus visibles par les effets du dérèglement climatique. Des facteurs anthropiques comme le drainage autour de l'habitation ou la présence d'un réseau enterré peuvent aussi en être la cause.

Les facteurs (MINISTÈRE DE L'ÉCOLOGIE, DU DÉVELOPPEMENT ET DE L'AMÉNAGEMENT DURABLES, 2023) de prédisposition suivants peuvent être propices à l'apparition de ce phénomène :

- le contexte hydrogéologique : présence d'une nappe phréatique
- la géomorphologie : la présence de pentes ou reliefs facilitant l'écoulement de l'eau
- la végétation : la présence de racines qui se nourrissent d'eau et en appauvrissent le sol
- les défauts de construction : une profondeur insuffisante des fondations par exemple.

On trouve parmi les facteurs aggravateurs :

- les caractéristiques géotechniques du sol et notamment la forte présence d'argiles qui est une particularité française et qui est présentée plus tard (figure 1.4)
- le nombre important de maisons individuelles en France avec des fondations moins profondes et donc plus fragiles dont, qui plus est, une grande partie est en zone fortement exposée au risque argile (figure 1.5)
- la végétation qui reste très importante en France.

De plus, les systèmes de pompage ou les fuites d'eau peuvent constituer des risques aggravateurs d'origine humaine du problème de RGA.<sup>1</sup>

---

<sup>1</sup>En période de basses eaux, le prélèvement d'eau dans les rivières peut être néfaste pour l'écosystème aquatique (MINISTÈRE DE L'ÉCOLOGIE, DU DÉVELOPPEMENT ET DE L'AMÉNAGEMENT DURABLES, 2023). Parfois, même un seul pompage peut avoir des conséquences graves sur la santé des [cours d'eau](#).

Les conséquences sur les bâtiments peuvent être considérables. Le RGA fragilise les fondations des maisons auxquelles il laisse des fissures caractéristiques du mouvement de terrain différentiel consécutif à la sécheresse et à la réhydratation des sols. Ces fissures peuvent mettre gravement en péril la stabilité et l'intégrité de la maison. Les fissures peuvent s'agrandir au fil du temps, ce qui aggrave les problèmes de stabilité et peut nécessiter des travaux de réparation importants.



(a) Fissurations en escalier sur un angle de maison caractéristiques d'un tassement différentiel d'un ouvrage du fait du mouvement du terrain. Source : FFA (2022b)



(b) Fissurations en escalier caractéristiques d'un tassement différentiel d'un ouvrage du fait du mouvement du terrain. Source : France2



(c) Cisaillement qui se produit à la jonction entre le plancher et la maçonnerie. Source : FFA (2022b)



(d) Fissure de plancher caractéristique. Rotation de l'appui du plancher. Source : FFA (2022b)

FIGURE 1.2 : Exemple de fissures observables pour des demandes de reconnaissance CatNat sécheresse

Sur la figure 1.2, seules les fissures des deux premières figures sont caractéristiques du phénomène RGA car elles présentent une forme d'escalier. Dans les cas où de telles fissures ne sont pas constatées, l'expert déclare que la maison n'est pas éligible à la reconnaissance CatNat en raison de l'absence de lien entre le RGA et les dégâts à la structure. Le document 1.3 suivant présente les différents facteurs mis en avant par les experts pour expliquer ces dégâts et à ne pas confondre avec le risque RGA.



FIGURE 1.3 : Les facteurs identifiés comme expliquant des dommages mais n'étant pas des facteurs liés au RGA. Source : FFA (2022b)

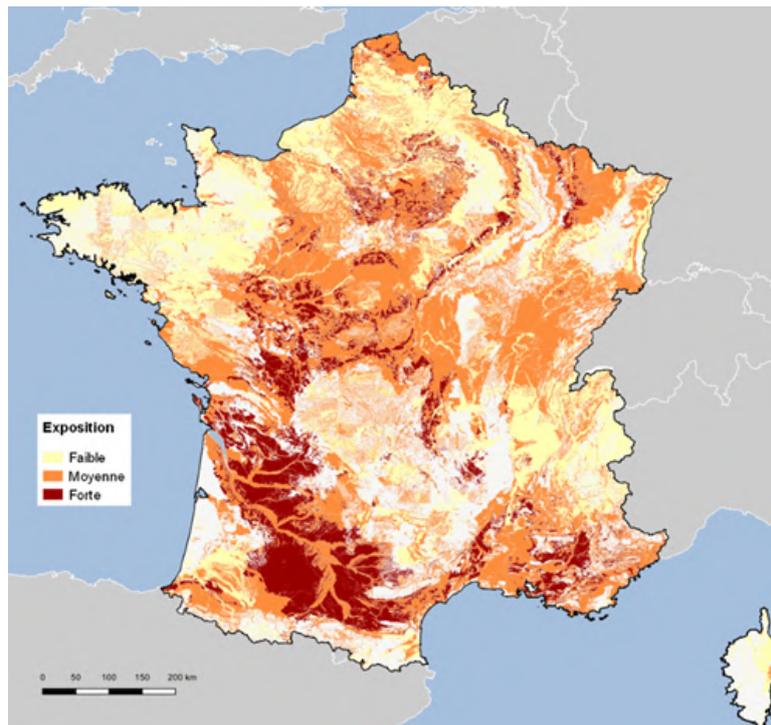


FIGURE 1.4 : Carte d'exposition au risque RGA. Source : GÉORISQUES (2023f)

Une grande partie du territoire français est exposée au risque RGA comme en témoigne la carte 1.4. Les régions touchées semblent principalement être l'ouest de la France sauf la Bretagne, le bassin parisien et la Provence. Ce risque est donc très important et pose donc un véritable problème quant à la façon de l'assurer.

Ainsi, d'après une étude du BRGM présentée en figure 1.5 près de la moitié du territoire français serait exposé au risque de sécheresse fort ou moyen dont 11,1 millions de maisons individuelles (sur 20,3 millions) parmi lesquelles on compte 3,3 millions de maisons individuelles avec une exposition forte, ce qui représente plus de 16% des maisons individuelles de France (FFA, 2022b).

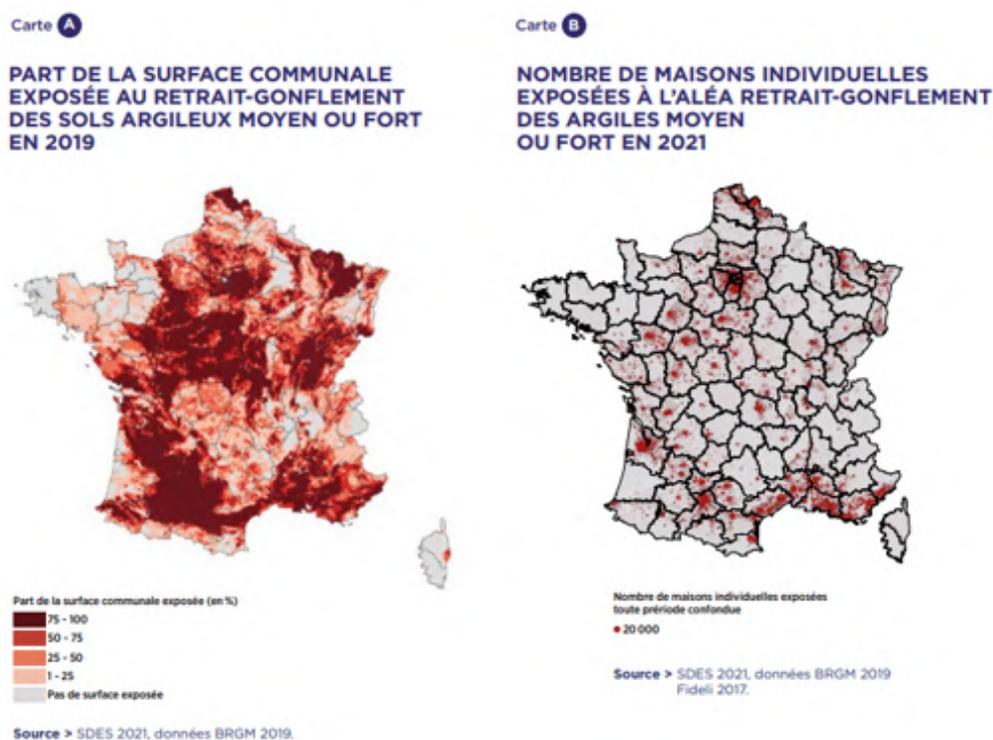


FIGURE 1.5 : Part de la surface communale et de maisons individuelles ayant une exposition au risque RGA moyen ou fort. Source : FFA (2022b)

Certains départements sont beaucoup plus à risque d'autres. Six d'entre eux ont plus de 50% de maisons individuelles en zone à risque fort. Cela monte même à 90% pour le Gers. Il existe donc en France des inégalités territoriales très prononcées face au risque RGA.

### 1.1.2 Enjeux assurantiels : une demande en constante augmentation...

Une présentation plus complète du régime catastrophes naturelles (CatNat) est faite à la section 1.2

La sécheresse est un phénomène d'ampleur, incontournable pour les assureurs. Il représente en effet, le deuxième risque le plus coûteux en CatNat derrière les inondations (CCR, 2022a). En effet, les coûts liés à la sécheresse représentent 37% des coûts de la sinistralité non-auto cumulée depuis 1982 avec un coût moyen de sinistralité depuis 1989 avoisinant les 500 millions d'euros par an.

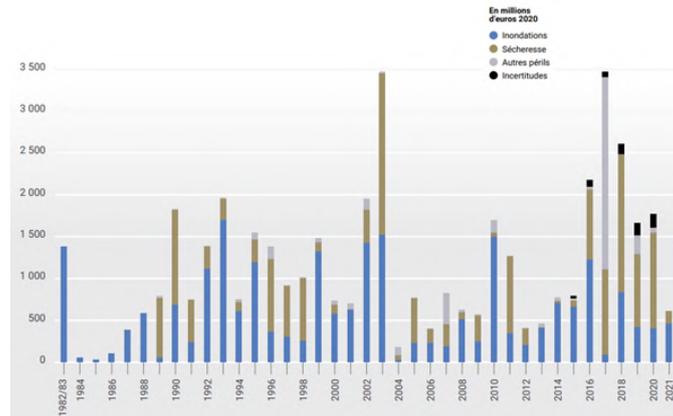


FIGURE 1.6 : Sinistralité CatNat hors auto de 1982 à 2021 en M€. Source : CCR (2022a)

La sécheresse a commencé à être assurée au sein du régime CatNat en 1989. On peut donc voir dans le graphique 1.6 ci-dessus, qui présente la sinistralité historique CatNat, les premières dépenses conséquentes apparaître en 1989. Une part importante des coûts de sinistralité lui sont alloués jusqu'en 1999 dans un premier temps, où le critère météorologique a été introduit, et jusqu'à 2003 où une forte canicule est venue tempérer les dépenses liées à la sécheresse. S'ensuit, dans un second temps, une inexorable augmentation année par année due entre autres au changement climatique avec des variations les années de forte canicule comme en 2018.

Cet effet se remarque particulièrement bien lorsque l'on s'intéresse au nombre de communes par exercice au titre de la sécheresse présenté sur le graphique 1.7 ci-après :

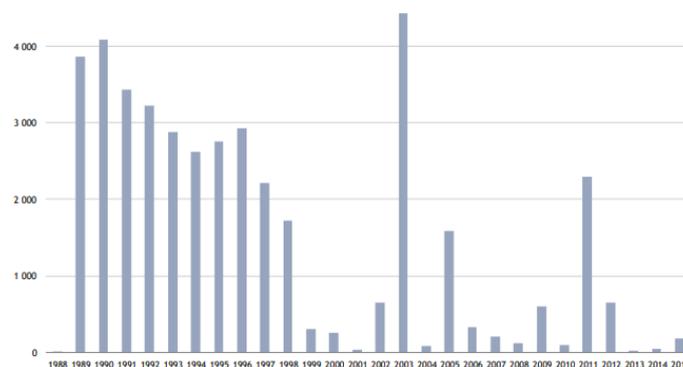


FIGURE 1.7 : Nombre de communes reconnues CatNat par exercice au titre de la sécheresse. Source : CCR (2017)

On y voit dans un premier temps, en 1999, l'implémentation du critère météorologique et, dans un second temps, les sécheresses historiques de 2003 et 2011.

L'historique des sécheresses les plus importantes en France est présenté sur la figure 1.11 et un historique des records de température et de précipitations est aussi effectué en 2.1.2.

Qui plus est, le coût moyen d'un sinistre RGA est d'environ 18 000€ (ASSEMBLÉE NATIONALE, 2023) par sinistre d'après une dernière actualisation de 2023 ce qui le classe parmi les sinistres les plus chers à indemniser (LA FINANCE POUR TOUS, 2021). Ce coût s'explique par les techniques de reconstruction utilisées pour ce genre de sinistres. Le choix est binaire pour l'assureur :

- Injecter des résines expansives : il s'agit d'une technique peu coûteuse car elle permet des reprises partielles mais elle ne permet pas de répondre au risque de manière durable.
- Poser des micropieux : il s'agit d'une technique bien plus coûteuse car elle nécessite une reprise totale mais elle est bien plus efficace pour faire face au risque.

Cette réalité est particulièrement visible sur l'histogramme 1.8 (ASSEMBLÉE NATIONALE, 2023) suivant issu de données de la CCR présentant, par tranche, le coût moyen d'un sinistre RGA :

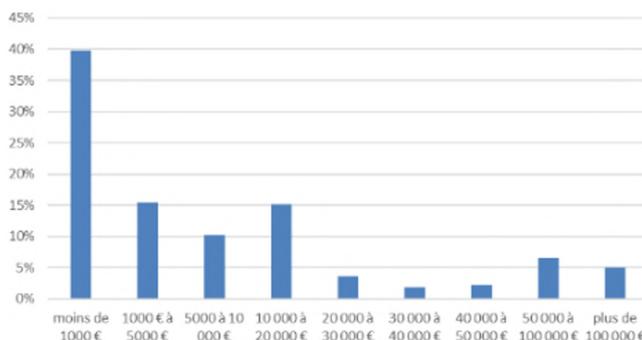


FIGURE 1.8 : Répartition des sinistres RGA par tranche de coûts. Source : CCR (2022a)

En ne prenant pas en compte les frais de 1 000€ ou moins couvrant vraisemblablement des sinistres sans suite, on observe que seuls 13 % des sinistres coûtent entre 20 et 50 000€ et donc ainsi la dualité entre des réparations fiables mais dispendieuses (plus de 50 000€) représentant 19 % du total et des réparations moins efficaces mais aussi moins coûteuses.

La sécheresse a ainsi représenté depuis son implémentation une importante part de la sinistralité climatique (environ 15%) et de la sinistralité CatNat (37%) mais tend à nettement augmenter ces dernières années s'approchant du seuil des 25% comme on peut le constater sur le graphique 1.9. La progression de l'exposition au RGA est observable ces dernières années. La charge annuelle liée au risque RGA a atteint plus de 1 milliard d'euros (SÉNAT, 2023a) en moyenne entre 2017 et 2020 contre 445 millions d'euros depuis 1982. Elle représente donc une part croissante de la sinistralité climatique.

Si ces sécheresses augmentent en nombre, elles augmentent aussi en intensité : la sécheresse de l'année 2022 selon les estimations de la CCR pourrait coûter 3,5 milliards<sup>1</sup> et représenterait 1,5 fois la sécheresse de 2003 soit 7 fois plus que le coût de sécheresse annuel moyen depuis 2000. La sécheresse est devenue le péril le plus coûteux du régime CatNat depuis 2016 hors sinistre auto.

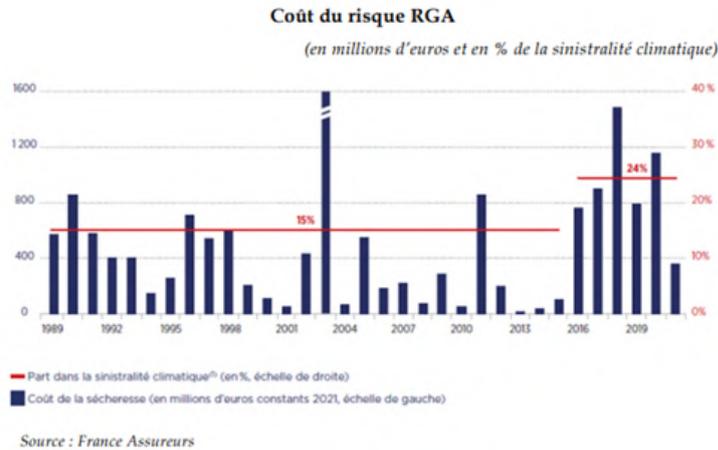


FIGURE 1.9 : Le coût de la sécheresse et la part qu'il représente dans la sinistralité climatique. Source : FFA (2022b)

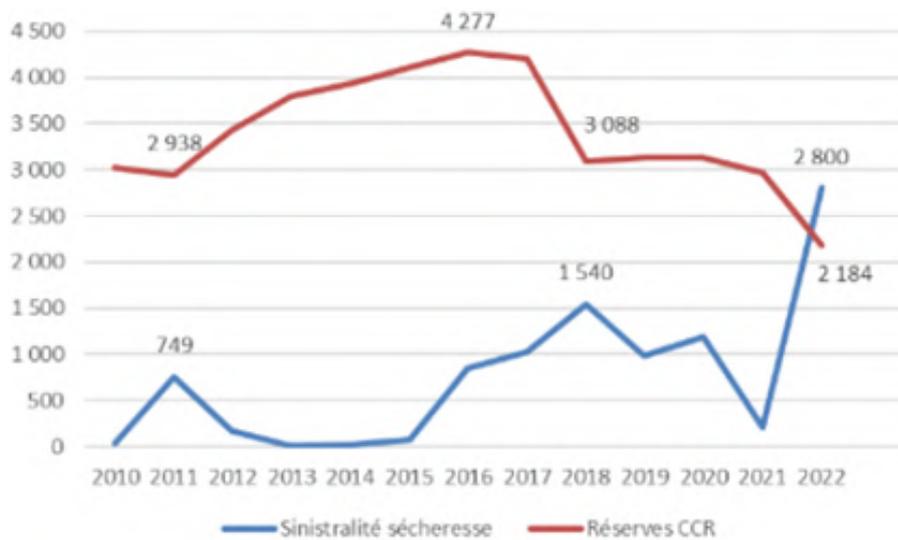


FIGURE 1.10 : Evaluation comparée de la sinistralité sécheresse et des réserves de la CCR. Source : Comité d'évaluation et de contrôle des politiques publiques dans ASSEMBLÉE NATIONALE (2023)

<sup>1</sup>Estimations de la CCR (2023b) en octobre 2023

C'est donc sans surprise que le graphique 1.10 faisant état sur la même période 2010-2022 des évolutions de sinistralité sécheresse et des réserves de la CCR montre que ces deux montants semblent fortement anti-corrélés : le risque sécheresse tend donc à fragiliser le régime CatNat.

La CCR avait jusqu'à 2022 réussi à maintenir ses réserves au-dessus des 3 milliards d'euros, préservant chaque année son équilibre technique même face à de fortes perturbations comme en 2018 où la sécheresse avait été très intense (figure 1.6). On observe une mise en péril de ce dernier, par les récentes sécheresses dont le coût est presque égal aux réserves accumulées par la CCR depuis 30 ans.

L'importance de ce phénomène se remarque en observant les 20 plus grands événements climatiques en France en 2019 sur la figure 1.11 parmi lesquels ne figurent pas moins de huit événements liés à la sécheresse.

Ce phénomène tend à fortement s'accroître puisque six des neuf années les plus sinistrées au titre de la sécheresse sont post 2015. Il s'agit donc d'un enjeu majeur actuel mais aussi et surtout des années à venir.

#### LES 20 PRINCIPAUX ÉVÉNEMENTS DE GRANDE AMPLIEUR EN FRANCE DEPUIS 1989

Année de survenance	Désignation de l'événement	Coût en M€ constants 2021
1999	Tempêtes Lothar et Martin/décembre	12728
1990	Tempêtes/février	3141
2009	Tempête Klaus/janvier	2165
<b>2003</b>	<b>Sécheresse - retrait gonflement des argiles</b>	<b>2113</b>
2017	Cyclone Irma St Martin et St Barthélemy/6 septembre	2016
2016	Inondations bassins Seine et Loire/mai-juin	1605
<b>2018</b>	<b>Sécheresse - retrait gonflement des argiles</b>	<b>1478</b>
2002	Inondations du Gard/septembre	1180
<b>2020</b>	<b>Sécheresse - retrait gonflement des argiles</b>	<b>1149</b>
2003	Inondations du Rhône/décembre	1089
2013	Orages de grêle France/été	965
2014	Orages de grêle France/8-10 juin	955
2010	Inondations Xynthia/février	925
2010	Tempête Xynthia/février	913
<b>2017</b>	<b>Sécheresse - retrait gonflement des argiles</b>	<b>891</b>
<b>2011</b>	<b>Sécheresse - retrait gonflement des argiles</b>	<b>849</b>
<b>1990</b>	<b>Sécheresse - retrait gonflement des argiles</b>	<b>848</b>
<b>2019</b>	<b>Sécheresse - retrait gonflement des argiles</b>	<b>786</b>
2010	Inondations du Var/juin	764
<b>2016</b>	<b>Sécheresse - retrait gonflement des argiles</b>	<b>752</b>

#### LES CHIFFRES CLÉS DE LA SÉCHERESSE EN FRANCE

Classement	Année de sécheresse	Coût en M€ 2021
1 <sup>er</sup>	2003	2113
2 <sup>e</sup>	<b>2022</b>	<b>2000<sup>1</sup></b>
3 <sup>e</sup>	<b>2018</b>	<b>1478</b>
4 <sup>e</sup>	<b>2020</b>	<b>1149</b>
5 <sup>e</sup>	<b>2017</b>	<b>891</b>
6 <sup>e</sup>	2011	849
7 <sup>e</sup>	1990	848
8 <sup>e</sup>	<b>2019</b>	<b>786</b>
9 <sup>e</sup>	<b>2016</b>	<b>752</b>

1. Prévission 2022 correspondant au centre de la fourchette de l'estimation donnée par la MRN.

Sources > France Assureurs, MRN.

FIGURE 1.11 : Chiffres clés de la sécheresse et principaux événements climatiques d'ampleur. Source : FFA (2022b)

On peut noter sur le graphique 1.12 ci-dessous que ces sécheresses peuvent se révéler à tous les mois de l'année. En effet, plus de la moitié de ces sinistres surviennent en dehors de la période estivale ce qui les rend imprévisibles. Il y a presque autant de sécheresses au printemps et en automne qu'en été. La saison la plus touchée est bien sûr l'été mais il est à prendre en compte que plus d'une sécheresse sur 10 intervient au cours d'hivers doux. Le printemps est la saison la plus touchée après l'été.

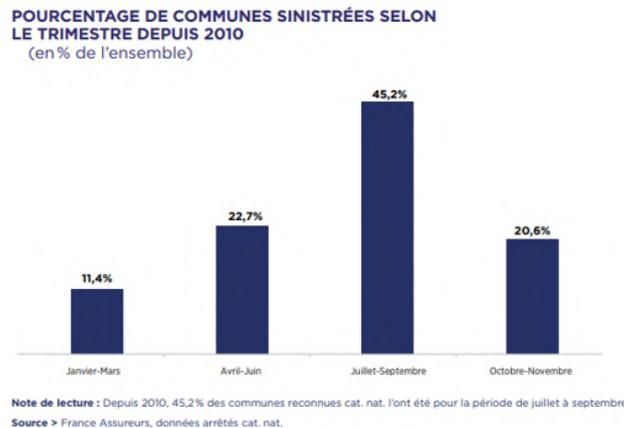
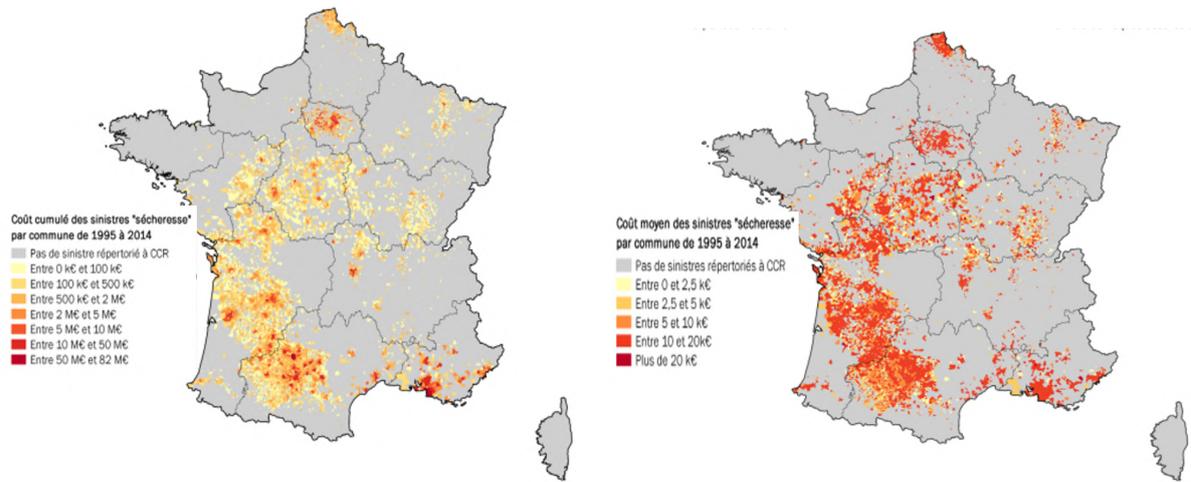


FIGURE 1.12 : Pourcentage de communes sinistrées selon le trimestre depuis 2010. Source : FFA (2022b)

Enfin, même si c'est dans le sud de la France en Occitanie, que la fréquence des sinistres est la plus importante, certaines régions comme l'Ile-de-France concentrent des coûts moyen et cumulé (figure 1.13a) de sécheresses très importants en raison de la concentration d'habitations et d'un coût de reconstruction plus important. L'Ile-De-France concentre par exemple le plus grand nombre de communes dont la sinistralité est supérieure à 5M€ de coûts cumulés (MRN, 2018). Ce seront des paramètres importants à prendre en compte dans le modèle.

Les montants les plus importants se situent dans les zones à risque et au sein d'aires urbanisées comme dans les métropoles de Toulouse, Marseille ou encore Paris.

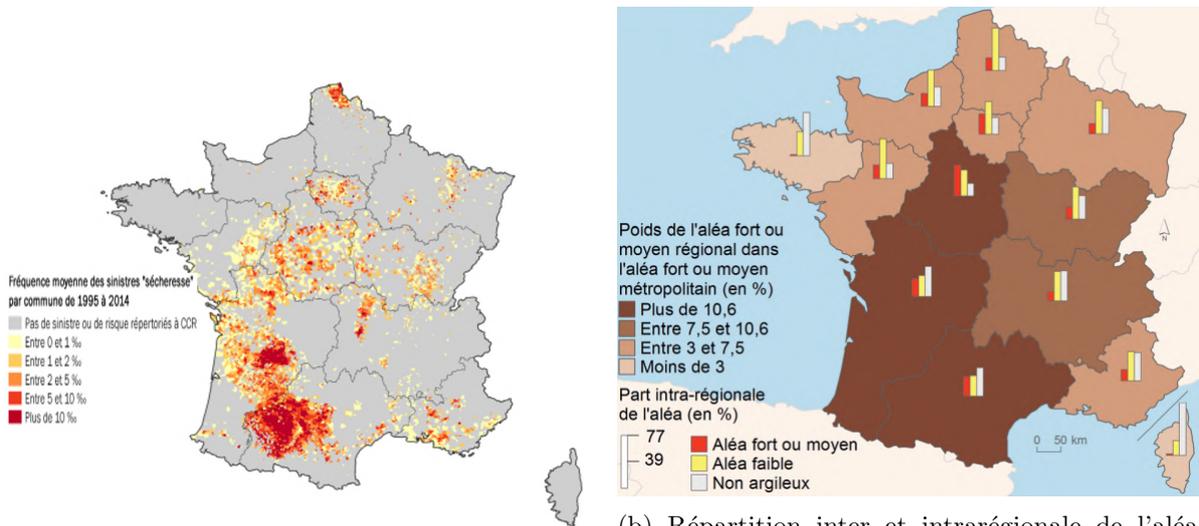
Les fréquences présentées en figure 1.14a peuvent dépasser les 10% de sinistres sécheresse pour certaines communes et le coût moyen cumulé peut lui dépasser les 50 millions d'euros sur la période 1995-2014 (figure 1.14b). Le risque RGA est donc un phénomène très étendu à l'échelle de la France mais qui a tendance à se concentrer sur certaines zones. De plus, ce dernier peut entraîner des coûts très élevés en raison de sa fréquence de survenance importante et des dégâts considérables qu'il cause. Qu'il s'agisse de la fréquence ou du coût moyen, il semble toucher les mêmes zones, argileuses et vic-times de la sécheresse, comme les bassins parisien et aquitain.



(a) Coût cumulé des sinistres sécheresse par commune de 1995 à 2014. Source : MRN (2018)

(b) Coût moyen des sinistres sécheresse par commune de 1995 à 2014. Source : MRN (2018)

FIGURE 1.13 : Coûts des sinistres sécheresse par commune de 1995 à 2014



(a) Fréquence moyenne des sinistres sécheresse par commune de 1995 à 2014. Source : MRN (2018)

(b) Répartition inter et intrarégionale de l'aléa RGA. Source : COMMISSARIAT GÉNÉRAL AU DÉVELOPPEMENT DURABLE (2017)

FIGURE 1.14 : Fréquence des sinistres sécheresse et répartition de l'aléa

1.1.3 Evolution du risque : il s'aggrave avec le changement climatique

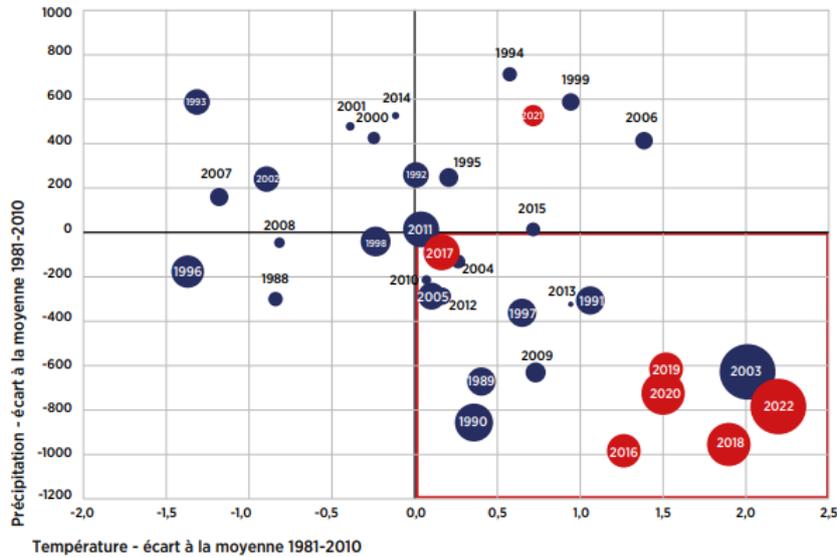


FIGURE 1.15 : Sinistralité sécheresse annuelle de juin à septembre selon les données de précipitation et de température(en écart à la normale). Source : FFA (2022b)

Le changement climatique se traduit entre autres par une augmentation importante des températures conjuguée à de faibles précipitations ce qui favorise grandement le risque RGA. Avec le document 1.15 précédent, on note que les dernières années figurent parmi les plus chaudes et sèches : parmi les six années les plus sèches et chaudes enregistrées depuis 1981 figurent cinq des sept dernières années (2016,2018,2019,2020,2022). Ainsi, hormis la sécheresse de 2003, les 4 sécheresses les plus coûteuses depuis 1989 ont eu lieu depuis 2017. Il est prévu que les records de sécheresse que l'on a aujourd'hui enregistrés correspondent à l'humidité moyenne des sols à horizon 2070 (figure 1.16).

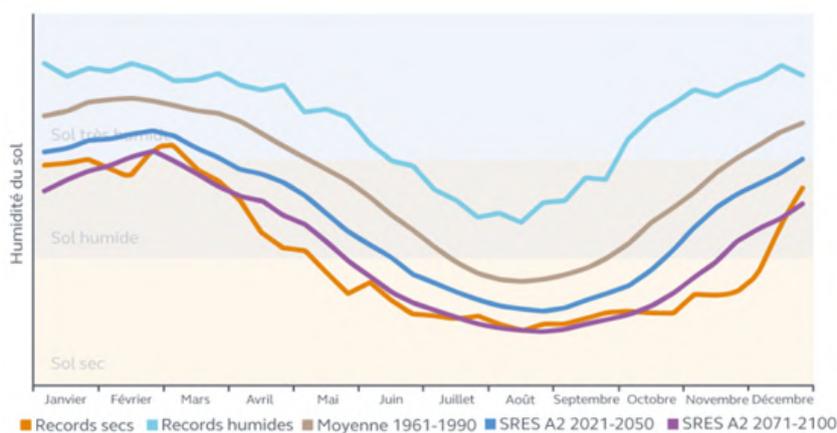


FIGURE 1.16 : cycle annuel d'humidité des sols, moyenne 1961-1990, record et simulations climatiques pour 2021-2050 et 2071-2100- Source : Météo-France

Les prévisions pour les prochaines années sont donc pessimistes et ce risque devrait donc jouer un rôle prépondérant dans les portefeuilles d'assurance non-vie. Le document 1.16 de Météo-France montre que ce risque devrait s'empirer et laisse présager le pire quant à l'humidité du sol et la sécheresse à horizon 2050, 2100.

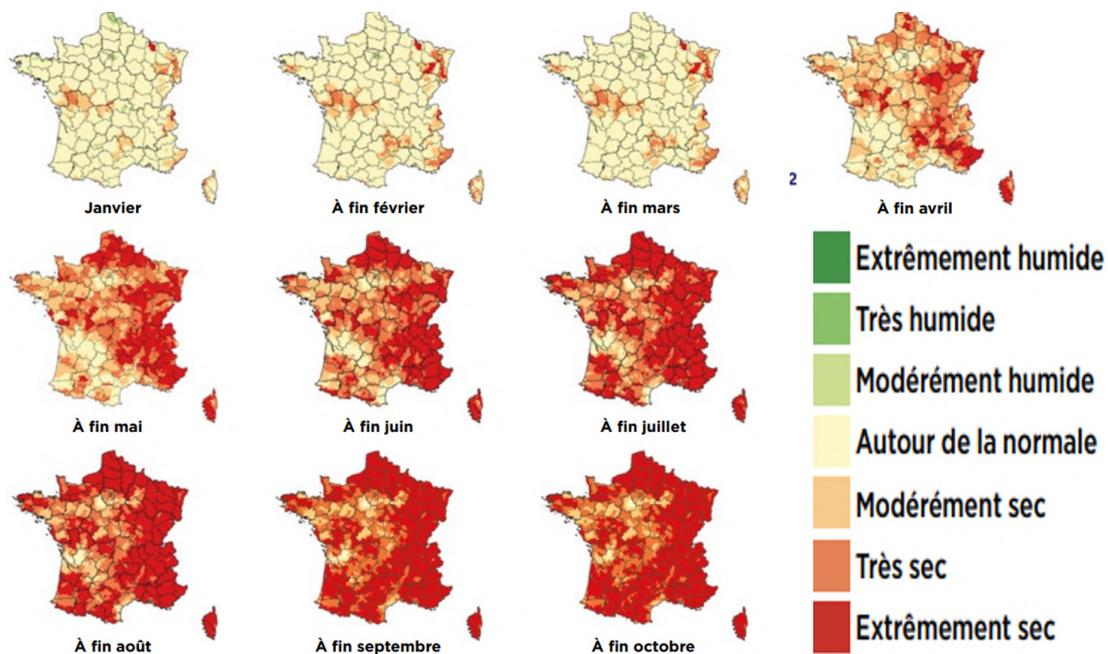


FIGURE 1.17 : Cumul des sécheresses extrêmes au fil des mois pour l'année 2022. Source : Météo-France dans FFA (2022b)

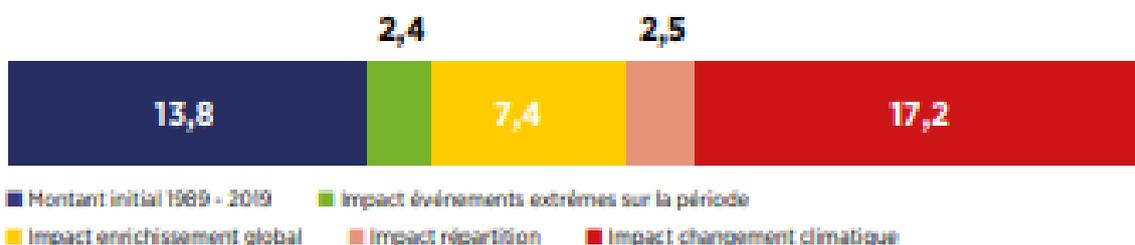
Sur ces images 1.17, on voit l'évolution des sécheresses extrêmes de l'année 2022. On voit que ces sécheresses ont tendance à durer et à ne pas avoir lieu qu'en été comme on a pu le constater précédemment. L'ensemble de la France semble touché. On voit ici aussi la particularité cinétique du RGA qui s'étend sur plusieurs mois. La sécheresse de 2022 est aussi causée par un hiver assez sec et ce sont les régions ayant connu les hivers les plus secs qui ont également, pour l'année 2022, connu les sécheresses les plus intenses.

D'après les projections les plus récentes (SÉNAT, 2023b), un événement de l'ampleur de l'été 2003 qui est à ce jour le plus coûteux depuis l'implémentation du régime CatNat pourrait survenir 1 année sur 2 entre 2050 et 2080 et 2 années sur 3 entre 2080 et 2100. La FFA présage dans son étude un triplement du coût de la sinistralité sécheresse d'ici 2050 avec un passage de 13,8 milliards de coût sur la période 1989-2019 à un coût de 43 milliards sur la période 2020-2050 (figure 1.18). L'hypothèse d'une absence d'inflation a été formulée pour cette étude (FFA, 2022a).

Le changement climatique explique plus de la moitié (17,2 milliards d'euros) de la hausse du coût de la sécheresse à horizon 2050 et représente le premier facteur inflationniste devant l'effet richesse.<sup>1</sup> Le risque RGA se distingue donc des autres catastrophes naturelles par son ampleur géographique et sa dimension progressive.

<sup>1</sup>On distingue dans ce facteur richesse le facteur « nombre d'établissements » (plus forte concentration de logements ou d'entreprises) et le facteur « agrandissement » (chaque unité vaut plus cher).

## COÛT DE LA SÉCHERESSE POUR LA PÉRIODE 2020-2050



Source > France Assureurs



FIGURE 1.18 : Coût estimé de la sécheresse pour la période 2020-2050. Source : FFA (2022b)

Depuis quelques années, la France doit faire face aux conséquences du changement climatique dont l'augmentation des températures fait partie. En témoignent les températures record enregistrées au cours de l'année 2022 où la France a successivement accusé un déficit de pluviométrie de 10% allant jusqu'à 80% dans certains départements au cours d'un hiver doux. Puis le printemps le plus sec jamais enregistré depuis 2011 avec un déficit hydrique de 25% et le deuxième été le plus chaud de l'histoire de la France avec 33 jours de vagues de chaleur avec le mois de juillet le plus sec depuis 1959 avec un déficit de pluviométrie de 85% sont venus donner à cette sécheresse une ampleur encore inédite.

Le changement climatique et ses conséquences risquent donc de fortement aggraver le risque RGA qui sera l'un des enjeux majeurs de l'assurance dans les prochaines années. Il faudra trouver un système assurantiel fiable sur lequel se reposer pour faire face aux coûts très élevés engendrés par ce dernier et sa sinistralité unique. Arthur Charpentier s'est par exemple penché sur le partage du coût du risque sécheresse (CHARPENTIER et al., 2022).

## 1.2 Une intégration difficile au régime CatNat

### 1.2.1 Le régime CatNat et son fonctionnement : un régime à part

Régime créé en 1982, il garantit à tous les particuliers, entreprises et collectivités une indemnisation des dommages causés par les aléas naturels d'intensité extrême. Les aléas naturels concernés sont notamment : les inondations (ruissellement, débordement de cours d'eau ou remontée de nappe), les phénomènes liés à l'action de la mer (submersion marine, fortes vagues...), les épisodes de sécheresse-RGA, les mouvements de terrain, les avalanches, les séismes, les éruptions volcaniques, les cyclones et les ouragans (à partir d'une valeur seuil de 145 km/h en moyenne sur 10 min, 215 km/h en rafales) (GÉORISQUES, 2023c).

A contrario, la CCR ne couvre pas les tempêtes, la neige ou encore la grêle qui sont des risques très courants pour les assureurs mais qui ne constituent pas une catastrophe naturelle.

Ces risques étant jusque-là inassurables, un partenariat public-privé a été trouvé pour ce régime afin de garantir son financement. L'Etat décide dans un premier temps du déclenchement de ce régime via la publication d'un arrêté de reconnaissance de l'état de CatNat puis apporte ensuite une garantie illimitée à la CCR, le réassureur public. En contrepartie de cette garantie, la CCR verse à l'Etat environ 100 millions d'euros par an. Le financement du régime est assuré par une surprime « catastrophe naturelle », prélevée sur l'ensemble des contrats de dommages aux biens à hauteur de 12% pour les contrats habitation et 6% sur les contrats auto.

Ce régime repose sur 3 principes :

- l'universalité qui couvre l'intégralité des français au moyen d'une obligation de souscription de garantie contre les CatNat dans les contrats d'assurance habitation.
- la solidarité qui permet à tous les français d'être couverts à un prix accessible (25€/an/ménage en moyenne)
- la responsabilité établie au moyen d'une franchise de montant variable.



FIGURE 1.19 : Mécanisme d'indemnisation du régime Catastrophes Naturelles. Source : CCR (2022b)

Dans les faits, ce régime d'indemnisation suit un mécanisme précis. A la suite d'un événement le maire de sa commune doit déposer un dossier de demande de reconnaissance CatNat au préfet qui le transmet à une commission interministérielle qui doit décider ou non de la reconnaissance de la commune en état de CatNat. Ensuite, un expert indépendant mandaté par un assureur doit venir évaluer les dégâts qu'indemnise par la suite l'assureur (figure 1.19). La CCR réassure les assureurs : elle s'engage à payer 50% du montant des sinistres et la partie du montant des sinistres qui excèdent 200% des primes perçues par les assureurs (traité Stop-Loss) (ASSEMBLÉE NATIONALE, 2023). Ce mécanisme existe pour toutes les catastrophes couvertes par le régime CatNat.

Une intervention de l'Etat peut même avoir lieu en dernier recours. Il est à noter que dans le cas du risque RGA et en raison de sa cinétique particulièrement lente, l'expert doit aussi reconnaître le lien de causalité entre l'événement climatique faisant l'objet d'une reconnaissance CatNat et les dégâts observés chez l'assuré. Nous l'évoquerons par la suite (cf 1.2.2). Le risque RGA est intégré au régime des catastrophes naturelles (CatNat) depuis 1989. Il repose sur deux critères pour déclarer une maille en situation de catastrophes naturelles pour la sécheresse :

- un critère géotechnique : la présence d'au moins 3% d'argiles gonflantes (cf 2.3.6)
- un critère météorologique : une sécheresse parmi les 2 les plus violentes des 50 dernières années pour le mois considéré (cf 2.2.1) (figure 1.20)

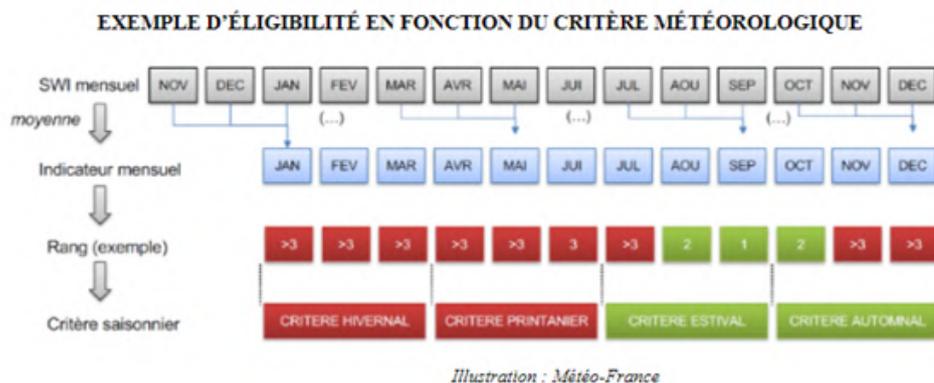


FIGURE 1.20 : Exemple d'éligibilité en fonction du critère météorologique. Source : Météo-France dans ASSEMBLÉE NATIONALE (2023)

**Processus d'éligibilité par maille et par saison** De plus, l'analyse météorologique nécessaire à la reconnaissance d'éligibilité au régime CatNat se fait à l'échelle de mailles dont une définition sera donnée plus tard (cf 2.1.4) et par saison. Ainsi, à condition que la commune satisfasse le critère géotechnique, il faut que son indice météorologique lié à la sécheresse pour un mois de l'année ait une période de retour de 25 ans c'est-à-dire qu'il soit sur les 50 dernières années le plus faible ou le deuxième plus faible.

L'indice est calculé sur le mois en question et les deux mois précédents. Il suffit de le satisfaire pour un mois pour être éligible pour la saison au régime CatNat. Cette reconnaissance est ensuite valable pour l'intégralité des territoires de la maille c'est-à-dire toutes les communes dont au moins une partie aussi petite soit-elle de leurs territoires est dans la maille calculée.

Cette méthode, pourtant assez maximaliste, crée des injustices, de par son importante période de retour et son intégration aux mailles qui donne lieu parfois à des fortunes diverses pour des communes pourtant adjacentes et exposées de façon quasi-identique au risque RGA.

Jusqu'à présent, le risque RGA n'a jamais conduit à remettre en cause l'équilibre financier du régime CatNat. Toutefois avec 48% du territoire français et 10 millions de maisons exposés, un milliard d'euros de dépense par an et 3,5 milliards au titre de la seule année 2022<sup>1</sup> le risque RGA menace la pérennité du régime CatNat.

### 1.2.2 Une remise en cause inévitable : une ampleur incompatible avec le régime CatNat

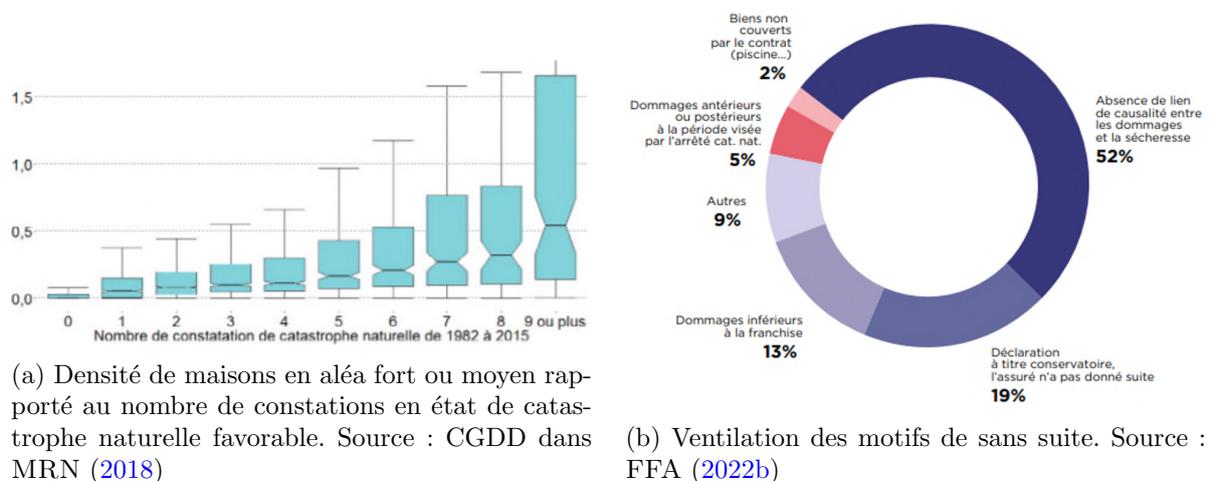


FIGURE 1.21 : Constatations CatNat favorables et motifs de sans suite

**La couverture par le régime CatNat : un processus administratif imparfait** Le graphique ci-dessus 1.21a montre que le nombre de constatations de catastrophes naturelles croît selon le nombre de maisons en aléa moyen-fort et que la densité est maximale quand le nombre de constatations dépasse 9 (le max). Le chiffre le plus impressionnant vient du graphique 1.21b qui nous apprend que plus de la moitié des sans suite le sont à cause d'une absence de concordance entre le sinistre constaté et la période de la reconnaissance CatNat à laquelle il se réfère.

Ainsi, si de prime abord le régime CatNat semble relativement bien couvrir les maisons présentes dans les zones à risque comme en témoigne la figure 1.21a la corrélation entre la densité de ces dernières et le nombre d'arrêtés CatNat, seules 50 % des communes demanderesse parviennent à obtenir une reconnaissance de l'état de catastrophe naturelle, et 50 % seulement des dossiers déposés dans ces communes bénéficient d'une indemnisation pour le risque sécheresse (figure 1.22).

En effet, compte tenu de la cinétique lente du risque RGA, le phénomène pouvant durer sur des mois ou sur des années, il est difficile de relier les dégâts observés à l'intensité anormale de la sécheresse. Ainsi, l'arrêté CatNat de l'année peut être lié à un événement climatique qui n'est pas celui auquel l'expert relie les dégâts constatés.

<sup>1</sup>(estimation CCR en octobre 2023)

De plus, dans plus de la moitié des cas les sinistres sont classés sans suite par l'absence de lien de causalité entre la sécheresse et les dommages observés. Le graphique 1.22a montre que le taux de sinistres défavorables tend à croître ces dernières années où les sécheresses ont été très intenses. Il tend à se stabiliser à 50% ce qui explique la volonté dans le calendrier législatif de vouloir réduire ce taux (cf 1.2.4).

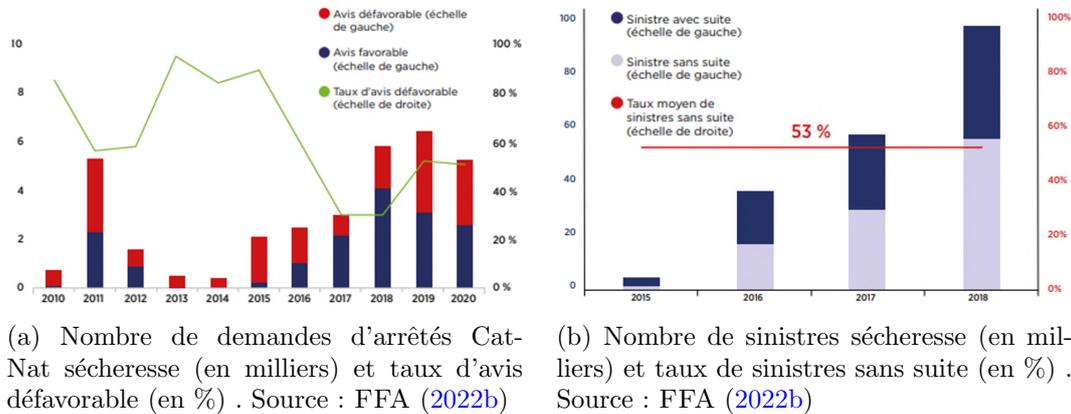


FIGURE 1.22 : Avis défavorables et sans suite

L'indemnisation des assurés au titre de la sécheresse peut donc paraître approximative et injuste. Dans le cadre de ce régime, différentes autres modalités peuvent être mises en place :

- Un fonds de prévention des risques naturels majeurs (FPRNM), plus communément appelé fonds Barnier (GÉORISQUES, 2023d), a été mis en place. Il permet de financer le rachat par les collectivités territoriales des habitations et bâtiments d'entreprise gravement menacés par un risque naturel majeur, ou déjà sinistrés à plus de la moitié de leur valeur. En matière de prévention, ce fonds subventionne la réalisation de travaux de réduction de la vulnérabilité des habitations ou des bâtiments des petites entreprises exposées à un risque naturel majeur (inondation, mouvement de terrain, etc.), afin de mettre les occupants en sécurité et de réduire les dégâts. Pour l'heure, ce fonds ne subventionne pas le risque RGA car il n'est pas considéré comme un risque majeur dans la mesure où il n'est pas cause de mortalité
- afin de protéger les futurs acquéreurs, l'Information Acquéreurs Locataires (IAL) (GÉORISQUES, 2023e) a aussi été créée. Elle est un diagnostic immobilier obligatoire que les propriétaires se doivent d'adresser aux futurs acquéreurs afin que ces derniers soient conscients de tous les risques (naturels et donc sécheresse) auquel le logement est exposé.

Le risque RGA se distingue toutefois des autres catastrophes naturelles par son ampleur et sa dimension progressive qui pose le problème de sa reconnaissance. En effet, il est difficile de considérer les dégâts causés par le RGA en prenant comme seule référence un événement exceptionnel ce qui le rend difficilement compatible avec le régime de catastrophe naturelle. Effectivement, comme l'attestent les cartes ci-dessous 1.23a et 1.23b, il existe un nombre très important de communes n'ayant pas reçu l'accréditation de catastrophe naturelle et possédant pourtant un nombre très élevé de maisons exposées à cet aléa. Ainsi, sur les quelques 3000 communes ayant demandé la reconnaissance CatNat et ne l'ayant pas obtenu on totalise 700 000 maisons à risque et pour 21% de ces communes, plus de 80% de leurs habitations sont exposées à cet aléa (MRN, 2018).

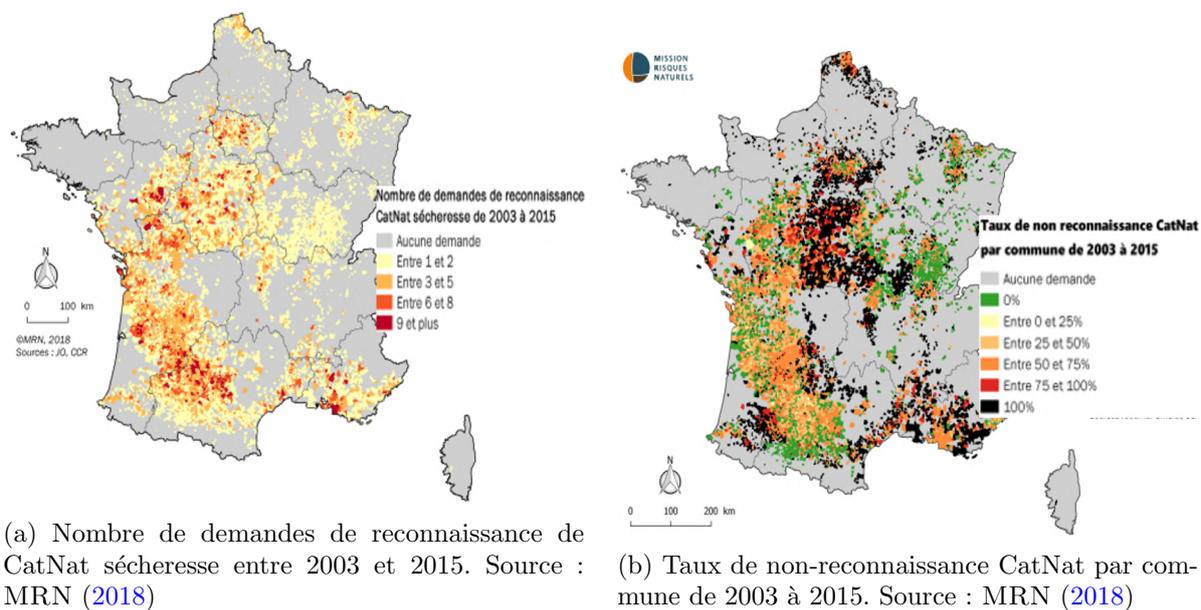


FIGURE 1.23 : Demande de reconnaissance CatNat et taux de non-reconnaissance

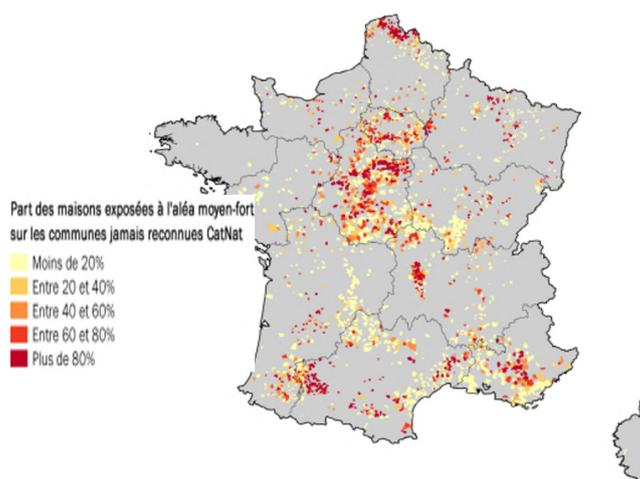


FIGURE 1.24 : Part des maisons exposées à l'aléa moyen-fort sur des communes jamais reconnues CatNat. Source : MRN (2018)

La carte précédente 1.24 présente la part des maisons exposées à l'aléa moyen-fort sur des communes jamais reconnues CatNat bien qu'elles en eussent fait la demande. Les régions les plus touchées sont des régions argileuses mais elles sont assez précises. Il s'agit du nord de la France, de l'ouest du bassin parisien et de quelques parties du sud-ouest et du sud-est de la France. Cette concentration des non-reconnaitances dans des zones pourtant exposées à ce risque participe au sentiment d'injustice chez certains assurés.

De plus, il est toujours difficile de considérer les dégâts sur le bâti causés au titre de la sécheresse et de la sécheresse uniquement, rendant une nouvelle fois compliquée son régime d'indemnisation. Qui plus est, les inégalités territoriales évoquées dans la partie précédente donnent lieu parfois à des situations pouvant paraître injustes. En effet, l'appréciation des épisodes de sécheresse se faisant au niveau de mailles il se peut que certaines communes, dont une très faible partie de territoire relève d'une maille remplissant les critères de reconnaissance CatNat, soient reconnues en état de catastrophe naturelle alors que d'autres communes limitrophes, possédant des caractéristiques de terrain et de pluviométrie très proches, ne le soient pas.

**Le financement du régime CatNat** De surcroît, le risque RGA pose un véritable problème de financement même pour le régime CatNat ; le coût de la sécheresse de 2022 est estimé à près de 3,5 milliards d'euros<sup>1</sup>, ce qui la placerait nettement au-dessus du coût de la sécheresse de 2003 (1,6 milliard d'euros), qui est la sécheresse la plus coûteuse sur la période 1989-2021. De fait, sur les sept dernières années, le régime CatNat est déficitaire.

En 2017, il a même connu son déficit le plus important depuis sa création : 439 millions d'euros. Sur la période 2015-2019, le déficit cumulé du régime atteignait ainsi près d'un milliard d'euros (SÉNAT, 2023b). En conséquence, les réserves de la CCR ont baissé de 30 % sur les cinq dernières années. Or, comme vu précédemment, les projections donnent une tendance à la hausse dans le montant de ces coûts mais aussi leur fréquence mettant gravement en péril le régime CatNat (FFA, 2022a) et (COVÉA, 2022).

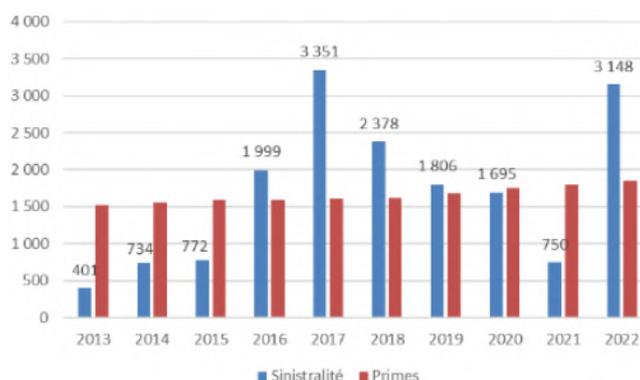


FIGURE 1.25 : Sinistralité (hors frais de gestion) et primes de la CCR sur la période 2013-2022. Source : MRN (2018)

<sup>1</sup>Estimations de la CCR (2023b) en octobre 2023

Le graphique ci-avant 1.25 montre l'augmentation notable des coûts de sinistralité pour la CCR par rapport au niveau des surprimes et l'oblige donc à puiser dans ses réserves. Cette situation n'étant pas pérenne, de nombreuses propositions de loi ont vu le jour.

### 1.2.3 Une réaction face au risque : Des mesures de prévention

L'un des aspects les plus importants du dispositif pour faire face à ce risque est la prévention. Un plan de prévention des risques (PPR) a été mis en place. Il a pour objectifs principaux de délimiter, à l'échelle communale, les zones exposées au phénomène de retrait-gonflement des argiles, et de rendre obligatoire des prescriptions permettant de diminuer le risque au moment de la construction, mais aussi celui en lien avec les activités dans les zones exposées (MINISTÈRE DE L'ÉCOLOGIE, DU DÉVELOPPEMENT ET DE L'AMÉNAGEMENT DURABLES, 2023). Toutefois, et malgré les incitations de l'Etat dans la mise en œuvre de ces PPR, notamment en minorant la franchise dans les communes dotées de PPR, l'implémentation de ces derniers reste relativement faible pour le risque RGA.

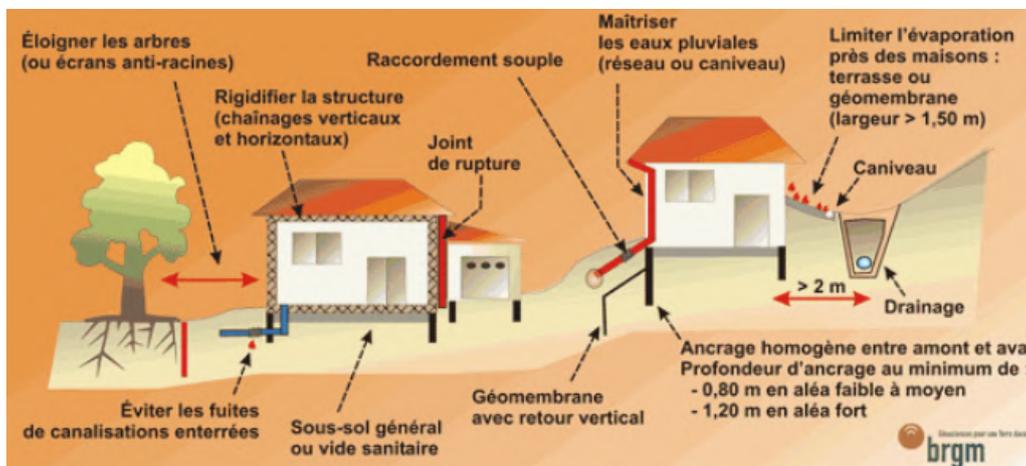


FIGURE 1.26 : Mesures de prévention des sinistres. Source : BRGM dans (GÉORISQUES, 2023g)

Des techniques simples comme des systèmes de drainage et le fait de construire loin de la végétation peuvent être utilisées comme il est observable sur la figure 1.26.

D'après la cour des Comptes (COUR DES COMPTES, 2022), sur la période 2009-2020 seules 1974 communes sur les 11791 concernées par le risque RGA possèdent un PPRS (Plan de Prévention pour le Risque Sécheresse) approuvé soit 6%. Seuls quatre départements affichent un taux de couverture supérieur à 90%. Ces chiffres apparaissent relativement décevants quand on les compare par exemple au PPR Inondations qui couvrent plus de 29% des communes concernées à cette même date.

De nouvelles techniques sont également imaginées ; il existe à ce titre deux types de mesures de prévention :

- les mesures verticales : coûteuses, elles permettent par l'installation de micropieux au niveau des fondations de limiter le risque RGA,
- les mesures horizontales : moins coûteuses, elles consistent à couper les arbres situés trop près des maisons ou placer des écrans anti-racinaires.

De nouvelles méthodes sont aussi expérimentées comme la méthode MACH qui consiste à stocker les eaux de pluie afin de réalimenter le sol en eau en période de sécheresse. Cette méthode est expliquée en détail dans le document 1.27 suivant :

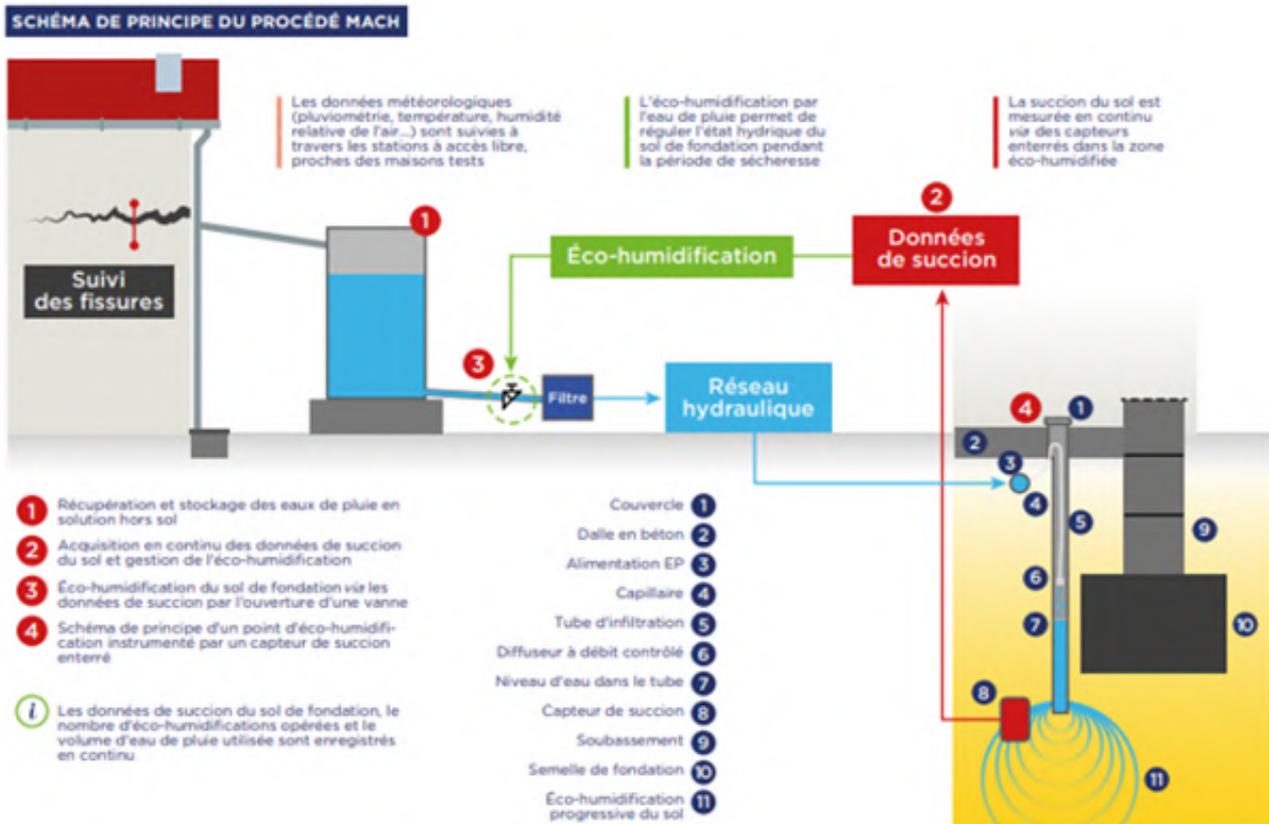


FIGURE 1.27 : Schéma du principe du procédé MACH. Source : FFA (2022b)

#### 1.2.4 Une adaptation inéluctable : un calendrier législatif important

Malheureusement, ces méthodes restent assez coûteuses (il faut compter 15 000€ pour le système MACH) et ne sont encore qu'au stade expérimental ; les résultats sont donc loin d'être garantis. En raison des difficultés précédemment évoquées rencontrées face à l'indemnisation du risque RGA, la loi le concernant est en permanente évolution et des propositions de loi sont régulièrement étudiées. C'est par exemple le cas de la loi ELAN (LÉGIFRANCE, 2018), dont le principal thème est la prévention, qui afin d'obvier au phénomène, impose la réalisation d'études de sol préalables à la construction dans les zones exposées au risque RGA.

Une refonte des critères de la reconnaissance CatNat a eu lieu en 2019. Cette dernière fixe le critère géotechnique à une présence d'argiles d'au moins 3% sur le territoire de la commune demanderesse et le critère de seuil de sécheresse anormale à une période de retour de 25 ans pour les 4 saisons de l'année. La sécheresse est concernée par la réforme du régime CatNat du 28 décembre 2021.

Tout d'abord, cette loi rend le processus de reconnaissance des CatNat plus transparent, entre autres par la création d'une commission nationale consultative des catastrophes naturelles.

Elle prévoit la nomination d'un référent CatNat affecté à la gestion des CatNat dans chaque préfecture chargé de présenter annuellement un bilan des demandes de reconnaissance, de l'utilisation du fonds Barnier et de l'évolution des zones exposées au risque RGA.

Le délai de prescription pour indemnisation pour le risque sécheresse passe de deux à cinq ans et les indemnisations devront permettre de financer des réparations mettant un terme aux « désordres existants ». Le texte prévoit également une meilleure information de l'assuré au moment de l'expertise. Ces mesures risquent donc d'aboutir à de plus grandes dépenses pour l'assureur obligé de couvrir plus de communes.

La dernière loi en date adoptée par l'AN est un projet de loi de la députée Sandrine Rousseau. Ce dernier apporte quelques changements (ASSEMBLÉE NATIONALE, 2023) :

- Le Fonds Barnier doit s'attacher à favoriser la prévention du risque
- Assouplissement des critères de reconnaissance de l'état de catastrophe naturelle par notamment la prise en compte des mesures d'humidité des sols et la prise en compte de plusieurs années pour la création de l'historique de sécheresse plus adaptée à ce risque long. Jusqu'ici seuls des critères géotechnique (présence d'argile) et hydrique (humidité des sols) étaient utilisés. Ainsi, des épisodes répétés de sécheresse d'intensité moyenne permettront également le placement de la commune en état de catastrophe naturelle
- procédure d'expertise plus impartiale
- élargissement des préjudices indemnisés pour le risque sécheresse
- présomption du risque RGA comme cause des dégâts

Ainsi, cette loi à l'image de la réforme que nous allons étudier favorise la protection de l'assuré et le remboursement des dommages au détriment de l'assureur.

La réforme du 8 février 2023 présentée sous forme d'ordonnance apporte des changements importants (ASSEMBLÉE NATIONALE, 2023). Tout d'abord, cette réforme n'entend pas changer l'appartenance du risque sécheresse au régime CatNat. Elle se trouve dans la lignée de la réforme du régime CatNat en proposant un assouplissement des critères de reconnaissance de CatNat au titre de la sécheresse en prenant en compte les communes ayant fait face à des périodes successives de sécheresse d'ampleur significative mais dont l'intensité année par année n'est pas assez importante pour les critères actuels. Il y aura également une prise en compte de la situation des communes adjacentes afin d'harmoniser la géographie des communes faisant l'objet d'une déclaration d'état de CatNat. Ces mesures vont donc une nouvelle fois dans le sens d'une plus grande reconnaissance de communes victimes du risque RGA et donc d'une augmentation considérable du budget alloué à ce risque pour un assureur. En outre, les indemnités pour ces sinistres seront ciblées afin de se concentrer sur les sinistres susceptibles d'affecter la solidité du bâtiment ou d'en entraver son utilisation normale. Un renforcement de l'encadrement de l'expertise afin qu'elle convienne aux exigences de qualité prévues à cet égard est également envisagé. Le texte exclut au demeurant du droit à la garantie CatNat les habitations construites sans permis de construire afin de promouvoir la prévention et l'expertise pour la construction du bâti. Enfin, la loi met en place un meilleur suivi des indemnités perçues par les assurés afin que ces dernières soient utilisées dans le cadre de travaux de réparation durable de leur habitation.

Les dernières propositions en date ont été faites par les députées Rousseau et Marsaud. Ces mesures feraient s'aligner le risque RGA sur le risque inondation tout en prenant en compte sa cinétique particulièrement lente.

Elles ont pour effet :

- De considérer la présomption de causalité entre les dommages survenus et la déclaration CatNat. L'expert aura alors à charge non plus de prouver le lien de causalité mais son absence. Ceci pourrait ainsi considérablement augmenter le nombre de sinistres.
- De considérer les épisodes de « successions anormales » de sécheresse. En effet, jusqu'à présent, seules sont prises en compte les sécheresses d'ampleur importante. Cette proposition prendrait en compte des sécheresses d'ampleur moins conséquente mais répétées.
- Une diminution de la durée de retour de 25 ans à 10 ans et une annualisation du critère météorologique (pour l'instant saisonnal) qui prendrait en compte les valeurs extrêmes. ce qui pourrait fortement augmenter les survenances de sinistres. Nous le verrons dans les projections(cf 3.2.1).
- Un resserrement de la maille à laquelle les mesures sont effectuées et les reconnaissances CatNat déclarées.
- D'étendre aux communes dont la superficie est inférieure à celle de la commune principale et aux maisons limitrophes de mailles sinistrées le bénéfice de la reconnaissance de l'état de catastrophe naturelle.
- De faire porter la reconnaissance de commune sur toute l'année afin de limiter le taux de sans suite.
- De prendre comme date d'apparition des fissures soit la date présumée d'apparition des premières microfissures soit la date présumée d'aggravation des fissures (la plus favorable).
- Un calcul du taux de surprime basé sur la sinistralité moyenne.
- Une extension de la période de la garantie dommages-ouvrage.
- Un agrément pour les experts agissant pour le risque RGA ainsi qu'une étude géotechnique spécifique au phénomène RGA qui serait demandé en cas d'intervention d'un expert non agréé.

Ainsi, ces mesures garantiraient une bien meilleure indemnisation de l'assuré et par conséquent des coups encore plus élevés pour les assureurs et la CCR.

Le dérèglement climatique impacte grandement l'aléa des catastrophes naturelles et fait donc, pour cette raison, de la sécheresse un enjeu majeur pour les années à venir. La connaissance de cet aléa doit être améliorée. Il faut également trouver un moyen de renforcer la prévention et trouver un système adéquat à ce risque très particulier afin de le rendre assurable. La pérennité de l'équilibre du régime faisant suite à cette réforme sera donc évaluée ainsi que son impact sur les portefeuilles assurantiels.

L'ensemble des évolutions législatives connues par le RGA est résumé dans la frise chronologique 1.28 ci-après :

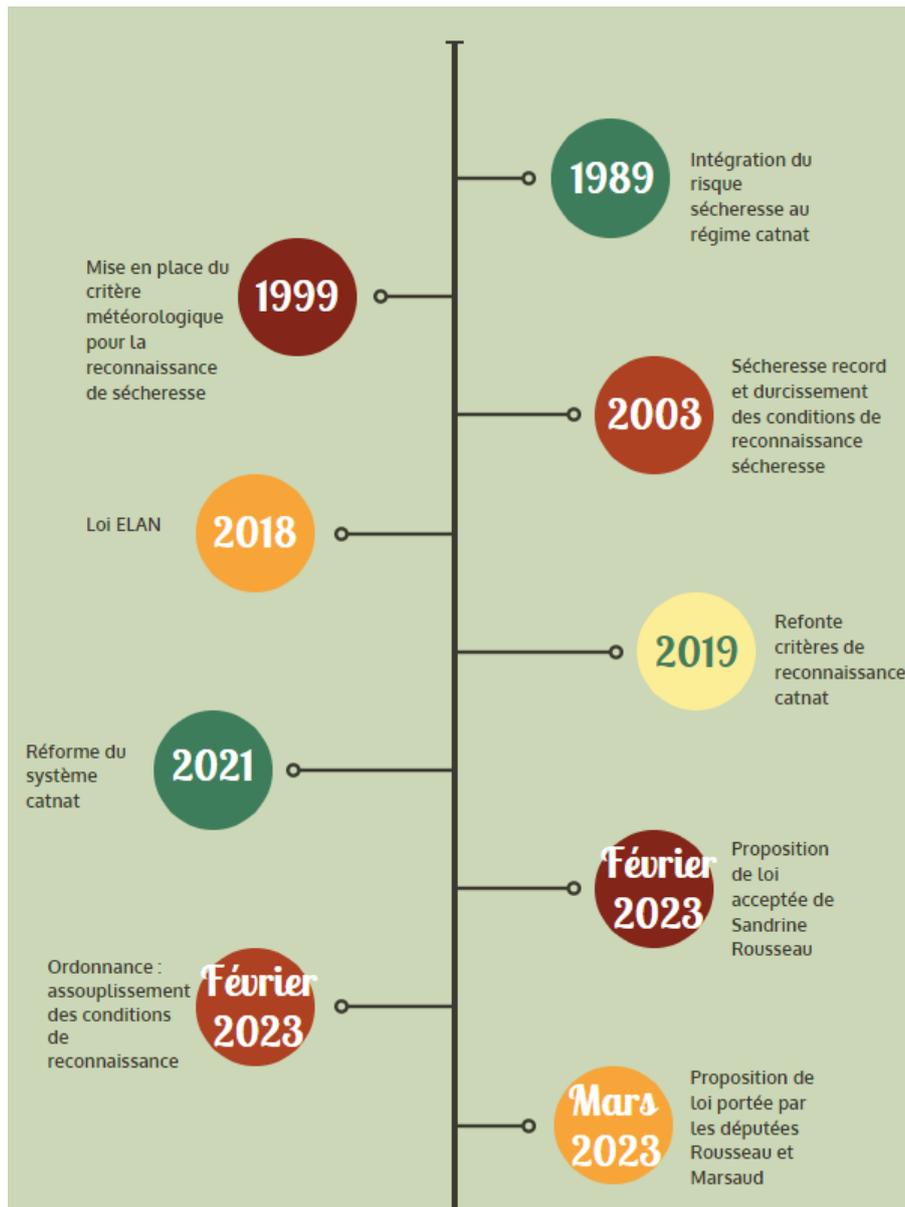


FIGURE 1.28 : Récapitulatif chronologique de la législation du RGA

Le risque RGA est donc un risque qui tend à s'accroître très fortement ces dernières années, et qui risque de s'intensifier d'autant plus avec le dérèglement climatique. Il est donc important d'en examiner la progression et les particularités afin de mieux l'appréhender. La partie 2 a donc pour objectif d'étudier l'évolution des sécheresses en France, tandis que la partie 3 propose un modèle de coût capable d'évaluer l'impact de ces sécheresses pour le risque RGA et de déterminer ce coût à différents horizons et sous différentes transformations législatives.

## Chapitre 2

# Mise en place de modèles sécheresse et RGA

Comme exposé en introduction, ce mémoire a pour but de déterminer le coût que représenterait le risque RGA selon différentes hypothèses tirées du calendrier législatif et selon les projections climatiques du GIEC, d'identifier les zones à risque. Dans un premier temps, l'objectif sera de créer un indice sécheresse le plus proche possible de celui de Météo-France : le SWI, utilisé pour déterminer le critère météorologique dans les reconnaissances CatNat. Une fois cet indice créé, le but sera d'utiliser les projections du GIEC et les différentes pistes de réforme afin d'évaluer le coût dans différents scénarios de ce risque auprès des assureurs et de la CCR.

## 2.1 Bases sur les modèles climatiques et l'utilisation de leurs données

### 2.1.1 Les indices sécheresse

Le SWI, pour *Soil Wetness Index*, est l'indice de référence utilisé par Météo-France pour la mesure de la sécheresse. Il se calcule de la façon suivante : (METEOFRACTICE, 2015)

$$\text{SWI (\%)} = \frac{W - W_{\text{wilt}}}{W_{\text{fc}} - W_{\text{wilt}}}$$

Où :

- $W$  est le contenu en eau du sol
- $W_{\text{wilt}}$  est le contenu en eau du sol au point de flétrissement (seuil à partir duquel la plante ne peut plus capter l'eau du sol, trop rare)
- $W_{\text{fc}}$  est le contenu en eau du sol à la capacité au champ (seuil au-dessus duquel il n'y a plus de drainage gravitationnel dans le sol, mais ruissellement).

Malheureusement, cet indice demande une précision de données, une profondeur historique et des variables qui ne sont pas disponibles en données ouvertes; d'où la nécessité de l'approximer avec un indice sécheresse dont la corrélation avec le SWI sera testée par la suite.

Il existe de très nombreux indices sécheresse (OMM ET GWP, 2023) mais seulement quelques-uns sont compatibles avec la sécheresse RGA. En effet, beaucoup concernent d'autres types de sécheresse comme évoquées en début de mémoire et notamment la sécheresse agricole (OMM ET GWP, 2023).

C'est pourquoi le choix de deux indices assez conventionnels a été fait, à savoir le SPI (*Standardized Precipitation Evapotranspiration*) et le SPEI (*Standardized Precipitation Evapotranspiration Index*). Ces deux indices ont une méthode de calcul similaire. L'un, le SPI, utilise les données de précipitations seules et le SPEI, lui, utilise les données de précipitation et d'évapotranspiration. Ces indices sont couramment utilisés pour évaluer des projections climatiques. Le SPI a été développé par l'OMM (Organisation Mondiale de Météorologie) tandis que le SPEI est une proposition de VICENTE-SERRANO et al. (2010). Le but ici sera de valider la correspondance entre ces indices reconstitués à partir des données UERRA (*Uncertainties in Ensembles of Regional Reanalysis*) et les valeurs historiques du SWI enregistrées par Météo-France (METEOFRACTANCE, 2023).

## SPI

Le SPI est le fruit des recherches conduites par McKee et ses collaborateurs en 1992 (MCKEE et al., 1993). C'est l'indice recommandé par l'OMM pour surveiller l'évolution des conditions de sécheresse météorologiques. Le SPI permet à de nombreux pays de se doter d'un certain niveau d'alerte rapide à la sécheresse. L'indice utilise les relevés historiques de précipitations à un emplacement donné. Pour le calcul, nous utilisons pour chaque point les précipitations mensuelles cumulées ( $\text{mm}\cdot\text{mois}^{-1}$ ). Le SPI se calcule mois par mois.

Pour chaque mois, il faut cumuler les précipitations de ce mois et des deux mois précédents et les comparer aux valeurs historiques issues d'une période de référence. La période de valeurs historiques est à prendre la plus grande possible avec idéalement une durée supérieure à 25 ans. Il faudra donc dans un premier temps ajuster une loi de probabilité sur la densité des valeurs historiques de chaque mois. Pour cela, trois lois de probabilités différentes sont utilisées afin d'obtenir le meilleur ajustement : une loi log-logistique (WIKIPEDIA, 2022a), une loi gamma (WÜTHRICH et MERZ, 2023) et une loi normale (WÜTHRICH et MERZ, 2023). L'utilisation d'une loi log-logistique s'explique par la volonté de modéliser ces indices par une queue lourde afin de gagner en précision sur les données extrêmes (annexe A.1.2) (WÜTHRICH et MERZ, 2023). L'utilisation de différentes lois permet d'obtenir des résultats plus précis et permet donc d'avoir des résultats plus proches de la réalité qu'avec le package R « SPEI » (BEGUERÍA et VICENTE-SERRANO, 2023). Ensuite, pour chacune des valeurs obtenues (sur les données ne provenant pas du jeu de données historiques) le quantile correspondant pour la loi ajustée sur les valeurs historiques sera calculé et projeté sur une loi normale centrée réduite. Le SPI est ainsi un indice normalisé.

**Généralités sur le maximum du vraisemblance** L'ajustement des lois aux courbes de densité se fait par maximisation de la fonction de vraisemblance.

Soit  $X$  une variable aléatoire réelle, de loi  $\mathcal{D}_\theta$ , de paramètre  $\theta$  inconnu. On définit une fonction  $f$  selon que la loi est discrète ou continue. Si  $X$  est une variable continue, alors on pose  $f(x; \theta) = f_\theta(x)$ , la densité de  $X$  au point  $x$ .

On appelle vraisemblance de  $\theta$  au vu des observations  $(x_1, \dots, x_n)$  d'un  $n$ -échantillon indépendamment et identiquement distribué selon la loi  $\mathcal{D}_\theta$ , le nombre :

$$L(x_1, \dots, x_n; \theta) = f(x_1; \theta) \times \dots \times f(x_n; \theta) = \prod_{i=1}^n f(x_i; \theta)$$

À  $(x_1, \dots, x_n)$  fixé, on cherche à trouver le maximum de cette vraisemblance pour que les probabilités des réalisations observées soient aussi maximum. Il s'agit d'un problème d'optimisation. Ainsi, un estimateur du maximum de vraisemblance est tout estimateur  $\hat{\theta}$  de  $\theta$  vérifiant :

$$\sup_{\theta} L(x_1, \dots, x_n; \theta) = L(x_1, \dots, x_n; \hat{\theta}).$$

Dans notre cas, 3 lois sont testées à chaque itération : une loi Gamma, une loi normale et une loi log-logistique. Ensuite, les 3 lois dotées de leurs paramètres optimaux au sens du maximum de vraisemblance sont comparées à l'aide du coefficient de détermination linéaire de Pearson, noté  $R^2$  qui est une mesure de la qualité de l'ajustement du modèle.

Il est défini par :

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}$$

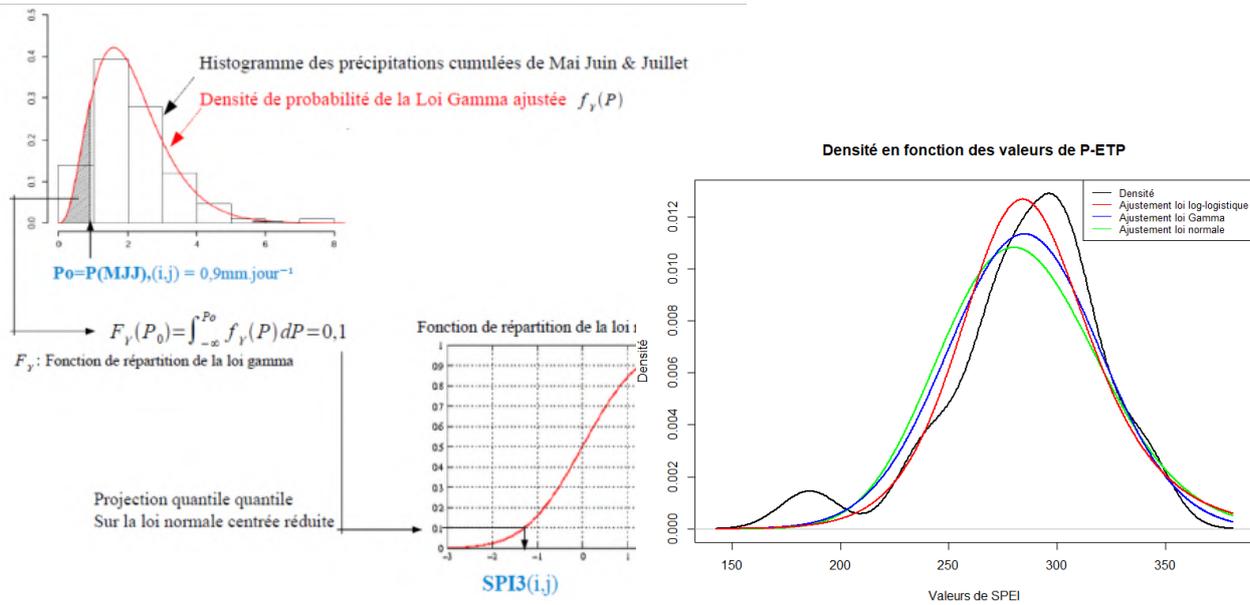
où  $n$  est le nombre de mesures,  $y_i$  la valeur de la mesure numéro  $i$ ,  $\hat{y}_i$  la valeur prédite correspondante, et  $\bar{y}$  la moyenne des mesures.

La loi retenue fait ensuite l'objet d'un test de Kolmogorov-Smirnov qui permet de tester l'ajustement de la loi à la fonction de densité et de s'assurer que l'échantillon peut bel et bien provenir de la loi choisie. Pour cela, on s'assure que la p-value associée à ce test ne tombe pas en dessous du seuil ici fixé à 5% (WIKIPEDIA, 2022c). Le SPI est ainsi un indice normalisé.

Par exemple, pour calculer le SPI-3 mois (SPI3) de juillet 2000 sur le point de la grille de coordonnées (latitude ,longitude) et sur la période 1951-2000 (figure 2.1a) :

- Les précipitations des mois de Mai, juin et juillet sont cumulées année par année.
- Une loi de probabilité (Gamma, Log-logistique ou Normale) à deux paramètres sur la série temporelle de ces données est ajustée.
- L'aire sous la courbe de la loi choisie est calculée et le quantile associé à la valeur pour l'année 2000 obtenu. Ce quantile est projeté sur la fonction de répartition d'une normale centrée réduite et on en déduit le SPI3 du mois de juillet 2000.

La figure 2.1a résume le procédé utilisé. Il est issu du mémoire de JOETZJER (2011). La figure 2.1b présente un exemple d'ajustement de courbes à une densité.



(a) Calcul du SPI pour le mois de juillet 2000

(b) Exemple d'ajustement de courbes

FIGURE 2.1 : Explication et mise en pratique de la méthode utilisée

McKee donne la définition 2.2 ci-après des sécheresses en fonction des valeurs de SPI :

Code	Drought classes	SPI values	Time in category (%)
1	Non-drought	$SPI \geq 0$	
2	Near normal	$-1 < SPI < 0$	34.1
3	Moderate	$-1.5 < SPI \leq -1$	9.2
4	Severe	$-2 < SPI \leq -1.5$	4.4
5	Extreme	$SPI \leq -2$	2.3

SPI drought class classification (McKee et al., 1993).

FIGURE 2.2 : Définition de la sécheresse selon les valeurs de SPI d'après McKee

On remarque alors que la valeur -1 représente une valeur seuil pour la définition des sécheresses ; les valeurs inférieures étant alors peu significatives. Il existe d'ailleurs d'autres méthodes considérant une sécheresse comme une période s'étendant du moment où le SPI vaut -1 jusqu'au moment où il repasse au-dessus de 0. Il n'existe pas de normes à ce sujet. L'indice ici, cherche à approximer le SWI et non détecter les sécheresses, on s'en tiendra donc à la méthode de calcul de Météo-France. La définition de McKee sera également néanmoins évoquée par la suite (OMM ET GWP, 2023).

## SPEI

L'autre indice retenu est le SPEI qui est calculé sur la même méthode que le SPI. Le SPEI réalise un bilan hydrique en considérant la différence entre les précipitations (P) et l'évapotranspiration potentielle (ETP). La différence entre les deux réside dans le fait que le SPEI utilise la variable  $P-ETP^1$  au lieu des précipitations seules.

Les SPI/SPEI retenus pour l'étude sont les SPI/SPEI1 mois, SPI/SPEI3 mois et SPI/SPEI6 mois (OMM ET GWP, 2023). La durée des mois correspond à la durée sur laquelle l'agrégation des valeurs est réalisée et la comparaison aux valeurs historiques établie. L'évapotranspiration potentielle (ETP) ou potentiel d'évaporation d'un sol est définie comme la quantité d'évaporation qui pourrait se produire en cas d'approvisionnement en eau suffisant. Cette donnée, comme on pourrait le supposer, dépend directement de la température et des réserves en eau. Plusieurs méthodes existent pour calculer cette ETP. On peut citer la méthode de Penman-Monteith, la méthode de Penman ou encore la méthode de Thornthwaite (WIKIPEDIA, 2021a).

L'évapotranspiration potentielle (ETP) est à différencier de l'évapotranspiration (ET). L'évapotranspiration (ET) décrit le transport de l'eau depuis la surface vers l'atmosphère, soit la somme de l'évaporation directe de l'eau du sol et la transpiration par les plantes. L'ETP a donc l'avantage d'évaluer l'évapotranspiration quel que soit le niveau de précipitations en fonction de facteurs extérieurs comme la température ou le rayonnement, l'ET étant plus une mesure de terrain.

La méthode retenue est celle de Thornthwaite qui est, celle correspondant le mieux aux données à disposition (COPERNICUS, 2023a) et aussi celle privilégiée dans la mise en place d'indices sur la sécheresse (VICENTE-SERRANO et al., 2010). A noter qu'il a été montré (MAVROMATIS, 2006) que les résultats ne différaient que très peu suivant les méthodes utilisées pour calculer l'évapotranspiration (JOETZJER, 2011).

<sup>1</sup>précipitations - évapotranspirationpotentielle

**ETP selon Thornthwaite** La méthode de calcul utilise les données de température seulement. Le potentiel estimé d'évaporation (ETP) est calculé en utilisant la formule suivante :

$$\text{ETP} = 16 \left( \frac{L}{12} \right) \left( \frac{N}{30} \right) \left( \frac{10T_a}{I} \right)^\alpha$$

Où :

- ETP est le potentiel estimé d'évaporation (mm/mois) ;
- $T_a$  est la moyenne quotidienne de température du mois calculé (en degrés Celsius ; si cette valeur est négative, on prend 0) ;
- $N$  est le nombre calculé de jours dans le mois ;
- $L$  est la longueur moyenne en heures de la journée c'est-à-dire le nombre d'heures ensoleillées.

Le paramètre  $\alpha$  est défini comme suit :

$$\alpha = (6.75 \times 10^{-7})I^3 - (7.71 \times 10^{-5})I^2 + (1.792 \times 10^{-2})I + 0.49239$$

où  $I$  est défini comme :

$$I = \sum_{i=1}^{12} \left( \frac{T_{ai}}{5} \right)^{1.514}$$

$I$  est l'indice de chaleur qui dépend des 12 températures moyennes mensuelles  $T_{ai}$ .

La longueur moyenne en heures de la journée est déterminée à l'aide de latitude du point en utilisant la même formule que dans l'article de Serrano, Begueria et Moreno à savoir :

$$L = \frac{24}{\pi} \arccos(-\tan(\phi) \cdot \tan(\delta))$$

où :

- $\phi$  représente la latitude en radians.
- $\delta$  la déclinaison solaire en radians.

On obtient  $\delta$  avec :

$$\delta = 0.4093 \cdot \sin \left( \frac{2\pi \cdot (N_{\text{DOY}} - 81)}{365} \right)$$

où :

- $N_{\text{DOY}}$  est le jour de l'année.

Cette ETP que nous utiliserons et appellerons ETP est appelée ETP corrigée et notée  $\text{ETP}_c$  dans certains cas. Dans ce cas, l'ETP seule correspond à la forme :

$$\text{ETP} = 16 \left( \frac{10T_a}{I} \right)^\alpha$$

Il est à noter qu'un certain nombre d'études réalisées observent une meilleure corrélation entre le SWI et le SPI car ce dernier, ne prenant en compte que les précipitations, se rapproche des variables d'intérêt du SWI (GUTTMAN, 1999). Toutefois, le SPI présente un inconvénient important par rapport au SPEI. En effet, les projections climatiques issues du SPI ont tendance à être très optimistes et loin des prédictions des experts, alors que celles du SPEI y correspondent beaucoup mieux (BURKE et BROWN, 2010) comme nous le verrons dans une partie ultérieure (cf 2.3.6). Là encore, la période historique est à prendre la plus grande possible.

### 2.1.2 Toutes les données en données ouvertes et explication de la réanalyse

#### La réanalyse : des modèles à différentes échelles

**La réanalyse** L'analyse est la première étape d'un modèle climatique. Elle consiste, en partant des simulations tirées de ce modèle, de s'ajuster au plus près des données météorologiques relevées. Après cette étape, dite « assimilation de données », ces banques de données collectées sont mises en commun par les divers centres de prévision à travers le monde.

La réanalyse météorologique est ainsi une méthode qui a pour objectif de maintenir en permanence la mise à jour des analyses initiales afin de disposer d'une telle base de données. La tâche est rendue complexe par l'absence de données pour certaines variables ou périodes en raison de l'évolution des techniques et du fait que l'attractivité qu'elle génère n'est que très récente (WIKIPEDIA, 2022b).

**GCM, RCM, descentes d'échelle et méthodes de correction** L'obtention des données de projection de DRIAS (2.1.2) se fait en trois étapes. Les données sont d'abord obtenues à l'aide d'un modèle de climat global (GCM pour *Global Climate Model*). Ce modèle reproduit au travers d'équations physiques les interactions complexes pouvant avoir lieu entre les océans, les continents et l'atmosphère. Ce modèle, de par sa structure, est réalisé à des mailles de très grandes tailles -de l'ordre d'une centaine de km (JANCOVICI, 2007)- et n'a donc pas la possibilité de reproduire de façon précise et fidèle la réalité de la géomorphologie (reliefs, sols, topographie...).

Il faut donc adapter ces données à des spécificités de terrain, d'où la nécessité d'un modèle de climat régional (RCM pour *Regional Climate Model*). Ce modèle, plus précis, produit des données à des mailles allant de 10 à 50 km (COPPOLA, 2007). Ce dernier s'obtient grâce aux données du GCM et peut se réaliser de deux façons différentes :

- la descente d'échelle dynamique : elle consiste à utiliser un modèle atmosphérique ou un modèle à aire limitée (LAM) forcé par un modèle de grande échelle
- la descente d'échelle statistique : il s'agit de méthodes se basant sur l'établissement de relations quantitatives entre les variables à grande échelle et les variables locales de surface. Il convient cependant de souligner que cette approche présente l'inconvénient de ne pas bien rendre compte des phénomènes extrêmes, et l'hypothèse sous-jacente selon laquelle les relations statistiques établies entre les variables restent valables sous toutes les conditions de forçage (cf 2.1.3) et donc tous les climats futurs possibles, n'est pas vérifiable.

La dernière étape consiste à corriger le biais. Elle est cruciale et se caractérise par la rectification des données issues du précédent modèle régional. Les données régionales ont tendance à être biaisées par rapport aux observations et à présenter des résultats à une maille trop grossière pour pouvoir être utilisés de façon convenable. Il existe entre les données observées et les modèles des erreurs systématiques sur les moyennes et des différences importantes en particulier sur les événements extrêmes. Cet exemple 2.3), disponible sur le portail DRIAS (DRIAS, 2023a), est le diagramme quantile-quantile des températures minimales à Paris en hiver (°C), avec en abscisse les quantiles du modèle et en ordonnée les quantiles de l'observation. On remarque ainsi que le modèle a une tendance visible à surestimer les températures les plus faibles.

Pour procéder à ces ajustements, il existe de nombreuses méthodes (DRIAS, 2023a). Afin de mieux les comprendre, la méthode dite « quantile-quantile » a été étudiée. Il s'agit de la base de la méthode ADAMONT (DRIAS, 2023b) utilisée pour le modèle ALADIN (cf 2.1.3) et qui est présentée par DRIAS comme *la plus exhaustive*.

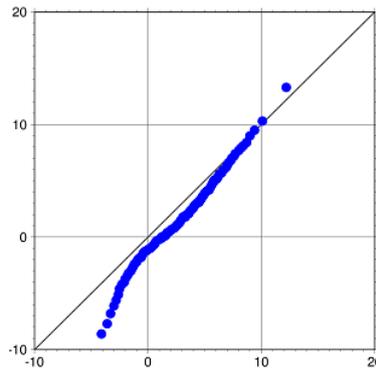


FIGURE 2.3 : Observation des différences du modèle à l'aide d'une méthode Q-Q. Source : DRIAS

La méthode s'articule autour de la création d'une fonction de correction pour rapprocher la distribution statistique des données simulées à celle des valeurs observées pour chaque variable et période. Cette méthode part donc du postulat que le modèle est capable de représenter la forme générale de la variable climatique mais pas d'en prévoir avec détail les valeurs.

Ainsi, la fonction de transfert est calculée en associant chaque centile du modèle au centile des données observées correspondant. Elle est ensuite appliquée sur les données futures en réalisant une interpolation linéaire entre les centiles. Pour les centiles extrêmes, une correction constante est appliquée. Une méthode détaillée est disponible sur le site DRIAS (DRIAS, 2023c).

Cette méthode permet d'améliorer les défauts les plus marqués des modèles, notamment l'intensité des phénomènes extrêmes. Toutefois, cette dernière comporte des limites et les résultats peuvent différer d'un modèle à l'autre. Il est donc important de garder à l'esprit que la correction de biais est aussi un facteur d'incertitude, au même titre que les modèles, les scénarios (cf 2.1.3) et les données observées.

**Le processus** Un récapitulatif du processus avec les différentes étapes est présenté ci-dessous :

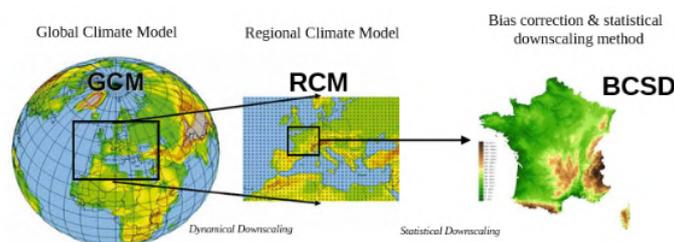


FIGURE 2.4 : Processus d'obtention des données climatiques projetées. Source : DRIAS

### Les données ouvertes

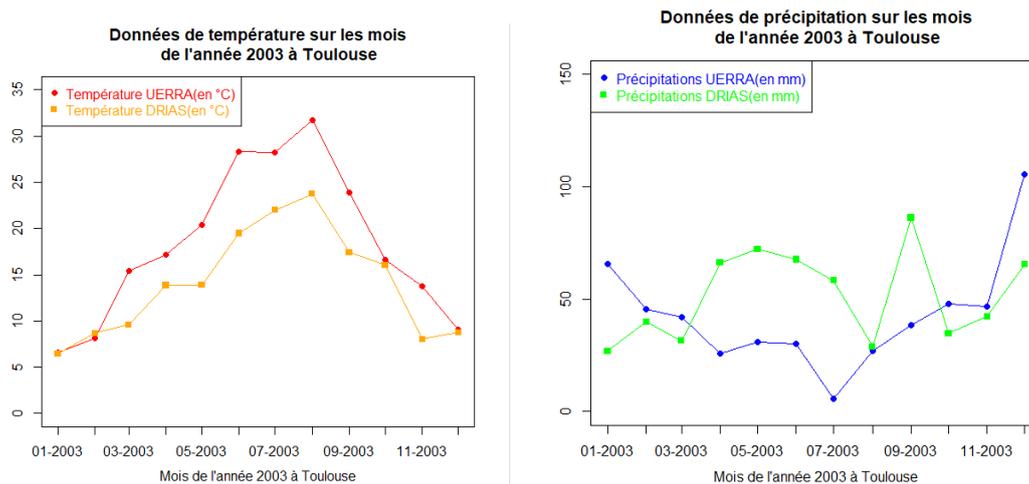
Les 3 sources principales de données climatiques en données ouvertes utilisées dans ce mémoire sont Copernicus, DRIAS et EuroCordex. Les données DRIAS et EuroCordex sont des données projetées mais non réanalysées issues de modèles de projection climatique dont la plupart est commun aux deux.

**DRIAS** DRIAS (Donner accès aux scénarios climatiques Régionalisés français pour l'Impact et l'Adaptation de nos Sociétés et environnement) (DRIAS, 2023c) est un projet mis en place par Météo-France. Il permet à tous les acteurs concernés par l'adaptation face aux changements climatiques de consulter et obtenir aisément les données et produits issus des modèles numériques de simulation climatique. Donnant accès à tous les scénarios du GIEC pour les principaux modèles internationaux, ce site a été retenu pour sa facilité d'accès (cf 2.1.3).

**UERRA** Les données UERRA (COPERNICUS, 2023b) sont issues du site Copernicus. Ces données sont réanalysées et ne comportent pas de projections. La réanalyse météorologique utilise les archives pour reconstituer digitalement les données du passé et affiner ainsi leur assimilation dans les modèles numériques de prévision, au profit de la météorologie et, surtout, de la climatologie. Copernicus (anciennement GMES acronyme de Global Monitoring for Environment and Security) est défini par Wikipédia (WIKIPEDIA, 2023a) comme un programme de l'Union Européenne qui collecte et restitue des données de qualité et actualisées de manière continue portant sur l'état de la Terre. Il propose, entre autres, une carte présentant le niveau de sécheresse en Europe en temps réel (COPERNICUS, 2023c).

Ces données sont donc proches des données historiques utilisées par Météo-France. Les utiliser permettra de valider l'indice utilisé pour répliquer le SWI utilisé par Météo-France. Les données issues de DRIAS seront, elles, utilisées pour les projections. Bien qu'elles ne présentent pas des données correspondant aux données réelles au jour le jour, elles permettent d'estimer un climat moyen et plus particulièrement une estimation du changement moyen de climat sur des périodes suffisamment longues (une dizaine d'années).

Pour visualiser ce phénomène, on peut s'intéresser à un événement historique marquant comme la sécheresse 2003 pour une ville qui fut l'une des plus touchées : Toulouse. Son record de température jamais atteint datait du mois d'août 2003 avant qu'il ne soit battu le 23 août 2023 (FRANCEBLEU, 2023).



(a) Données de température de Toulouse pour l'année 2003

(b) Données de précipitations de Toulouse pour l'année 2003

FIGURE 2.5 : Données climatiques de la ville de Toulouse pour l'année 2003

Sur le graphique 2.5, on voit les données de température et précipitation pour DRIAS et pour UERRA sur la ville de Toulouse. On observe, comme attendu, que les données de DRIAS appréhendent mal le pic de température particulièrement élevé pour ce mois d'août 2003.

De même, les données de précipitation ne correspondent pas aux données réanalysées de UERRA, comme on peut le constater sur la période estivale notamment, exceptionnellement sèche cette année.

Toutefois, les données DRIAS prévoient bien le climat moyen. Par exemple, pour les données de précipitations moyennes ci-dessous, en comparant les données UERRA et DRIAS sur les périodes 1961-2005 et 2000-2005 on obtient des résultats proches ce qui montre la capacité des données DRIAS à prédire des résultats moyens cohérents sur une durée suffisamment longue.

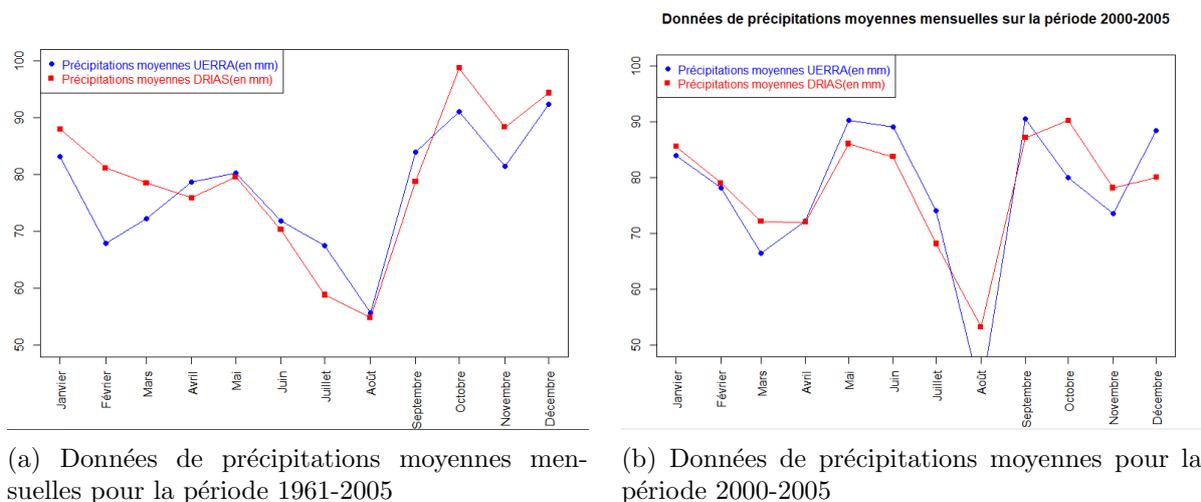


FIGURE 2.6 : Données de précipitations moyennes pour différentes périodes

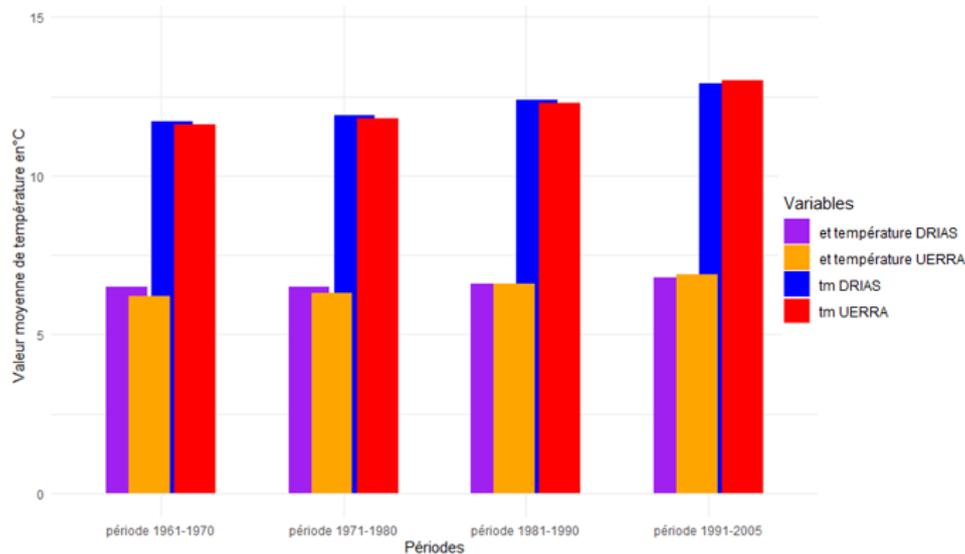
Une validation supplémentaire a été effectuée sur les données extrêmes des données historiques (UERRA). Les températures les plus chaudes enregistrées l'ont été, en août 2003, pour la ville de Le-Cannet-Des-Maures proche de Toulon ( $36.3^{\circ}\text{C}$ ) ce qui est cohérent<sup>1</sup>.

La température la plus faible ( $-20.6^{\circ}\text{C}$ ) a été enregistrée dans les Alpes en janvier 1963. Quant au record de précipitation, il a été enregistré à Vialas en octobre 1979 ce qui, là encore, est corroboré par l'Automne extrêmement pluvieux qui avait eu lieu à cette époque (METEOPFRANCE, 1979). Ces résultats ne présentent donc rien d'anormal.

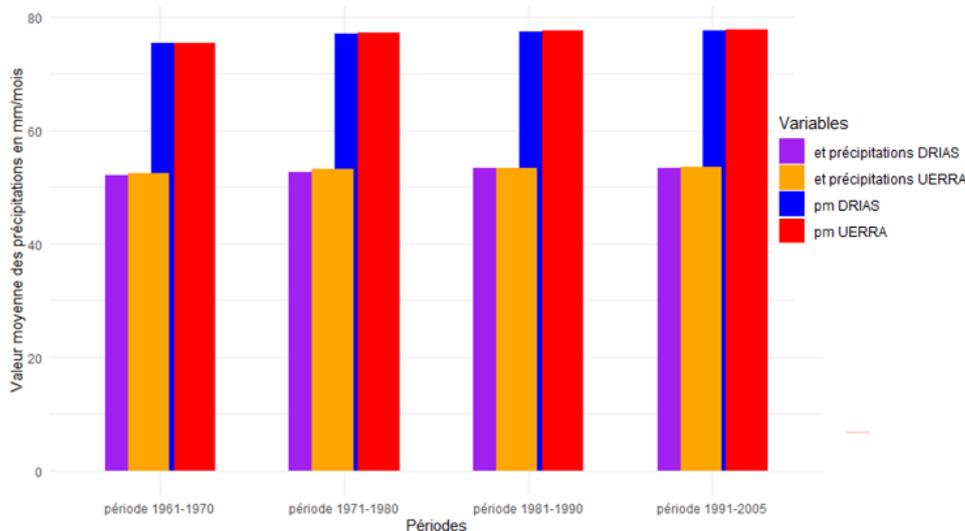
Une validation a donc été effectuée pour s'assurer que les modèles climatiques corrigés du biais correspondaient aux données de réanalyse au cours de la période historique pour les variables pertinentes pour la sécheresse (ex. précipitations). On s'attend à ce que les modèles climatiques saisissent avec précision les tendances décennales des changements globaux de température et de précipitations, mais ils ne sont pas programmés pour saisir tous les événements météorologiques. Par conséquent, nous comparons les statistiques qui décrivent les tendances des événements météorologiques avec les données des modèles climatiques. Ces statistiques se comparent favorablement.

<sup>1</sup>Le 6 août 2003,  $35,8^{\circ}\text{C}$  ont été enregistrés par la station Météo-France.

En effet, des histogrammes récapitulatifs des statistiques de température (en °C) et des précipitations (en mm) pour ces deux ensembles de données sont présentés ci-dessous : (*tm* désigne la température moyenne, *pm* les précipitations moyennes et *et* l'écart type de ces dernières)



(a) Moyennes et écart-type des températures selon DRIAS et UERRA sur différentes périodes



(b) Moyennes et écart-type des précipitations selon DRIAS et UERRA sur différentes périodes

FIGURE 2.7 : Comparaison des statistiques descriptives des données de précipitation et de température

On voit que les données DRIAS reproduisent de façon très satisfaisante les observations météorologiques sur des périodes décennales.

Les différences de températures moyennes sont très faibles au plus de 0.4°C, de même que l'écart-type associé. Pour les données de précipitations moyennes par mois, cette différence n'excède pas les 0.2 mm/mois et l'écart-type les 0.5mm. Les données peuvent donc être validées pour ce qui est des statistiques descriptives. Une dernière étape consistera dans la reconstitution d'un événement historique.

### 2.1.3 GIEC et modèles

Le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) est un organisme intergouvernemental chargé d'évaluer l'ampleur, les causes et les conséquences du changement climatique en cours. Ce groupe établit régulièrement des rapports et des scénarios prospectifs sur l'évolution du climat. Les modèles climatiques se basent sur les scénarios imaginés par le GIEC. Deux d'entre eux ont été retenus pour l'étude, les scénarios RCP (Representative Concentration Pathway) 8.5 et RCP 4.5; le scénario 2.6 dont les données sont aussi disponibles sur DRIAS, ayant été jugé trop optimiste et donc peu réaliste. Sur le graphique 2.8 disponible sur DRIAS, on peut observer l'évolution, selon les différents scénarios, du forçage radiatif (WIKIPEDIA, 2021b) et donc du réchauffement de la planète.

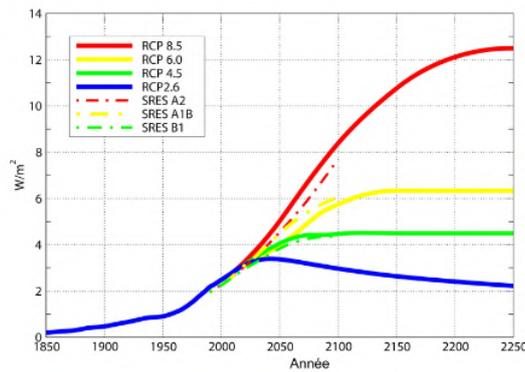


FIGURE 2.8 : Conséquences des différents scénarios RCP du GIEC. Source : DRIAS

On observe sur ce graphique des scénarios n'ayant que peu d'influence jusqu'à 2035 environ et une réelle différence se fait à partir de 2050 qui constitue une période charnière pour l'évolution du climat.

Classement des modèles par variable :

#### RCP8.5 : ECART DE TEMPÉRATURES

JJA [2071-2100] - [1976-2005]

Modèles	Delta
HadGEM2 / CCLM4-8-17	6,4 °C
HadGEM2 / RegCM4-6	5,3 °C
EC-EARTH / RCA4	5,0 °C
NorESM1 / HIRHAM5	4,9 °C
IPSL-CM5A / RCA4	4,7 °C
NorESM1 / REMO2015	4,6 °C
EC-EARTH / RACMO22E	4,3 °C
CNRM-CM5 / ALADIN63	4,1 °C
MPI-ESM / CCLM4-8-17	3,8 °C
MPI-ESM / REMO2009	3,7 °C
CNRM-CM5 / RACMO22E	3,0 °C
IPSL-CM5A / WRF381P	2,1 °C
5 <sup>e</sup> centile	2,6 °C
Médiane	4,4 °C
95 <sup>e</sup> centile	5,8 °C

Modèles qui réchauffent le plus

Modèles qui réchauffent le moins

#### RCP8.5 : ECART DE PRÉCIPITATIONS

JJA [2071-2100] - [1976-2005]

Modèles	Delta
IPSL-CM5A / RCA4	-48 %
HadGEM2 / CCLM4-8-17	-45 %
EC-EARTH / RCA4	-40 %
MPI-ESM / CCLM4-8-17	-36 %
MPI-ESM / REMO2009	-28 %
EC-EARTH / RACMO22E	-25 %
NorESM1 / HIRHAM5	-23 %
CNRM-CM5 / ALADIN63	-11 %
NorESM1 / REMO2015	-11 %
HadGEM2 / RegCM4-6	-7 %
CNRM-CM5 / RACMO22E	11 %
IPSL-CM5A / WRF381P	22 %
5 <sup>e</sup> centile	-46 %
Médiane	-24 %
95 <sup>e</sup> centile	16 %

Moins de précipitations

Plus de précipitations

FIGURE 2.9 : Comparaison des différents modèles sur le RCP 8.5. Source : DRIAS

Il existe également différents modèles développés par des instituts de climatologie. Ils présentent des versions plus ou moins optimistes des scénarios du GIEC. Par exemple, pour les scénarios relatifs au RCP 8.5, le site DRIAS propose une comparaison des différents modèles comme présentés en figure 2.9.

Le premier modèle retenu dans cette étude est le modèle ALADIN (Aire Limitée Adaptation dynamique Développement InterNational) du CNRM <sup>1</sup> qui est utilisé par Météo-France (DRIAS, 2023d) . Il est de plus un modèle plutôt médian pour les données de précipitations et de température. Il prévoit ainsi à horizon 2100, une augmentation de 4.1°C, soit plus de 33%, et une diminution des précipitations de 11%, soit 90mm par an<sup>2</sup> à horizon 2100.

**Approche multi-modèles** Une approche multi-modèles peut naturellement être envisagée et constituerait un axe d'amélioration. Elle pourrait être très pertinente et pourrait permettre d'ajouter à notre approche une incertitude suivant le modèle via des intervalles de confiance par exemple. Toutefois, dans ce mémoire, le choix a été fait de se limiter à l'approche du modèle ALADIN. En ayant fait le choix de la méthode de calcul du régime CatNat basée sur le SWI de Météo-France pour notre étude, il n'apparaît pas illogique de se limiter à ce modèle.

#### 2.1.4 Présentation des données

Les données sont disponibles au format netcdf qui est un format classique pour des données climatiques, souvent très denses. Elles permettent d'associer aux données climatiques une géolocalisation précise ainsi qu'une heure et un jour de relevé.

La géolocalisation est disponible pour les données DRIAS à la maille SAFRAN<sup>3</sup>, à une maille de 4.5km pour les données Copernicus et à la maille communale pour les données communales. Le module d'analyse objective SAFRAN est une application bien adaptée pour alimenter les modèles de surface à base physique nécessitant des données météorologiques complètes (CNRM, 2014). La grille SAFRAN contient des mailles de 8km de côté qui divisent la France en 8981 points distincts. Elle est entre autres utilisée par Météo-France.

La grille utilisée par le système MESCAN SURFEX (système de réanalyse de Copernicus) contient des mailles bien plus précises de 4.5 km de côté permettant une bien meilleure précision dans les données ; c'est la raison de son utilisation. Elle a été développée pour être plus précise sur un nombre restreint de variables.

Enfin, la grille communale est la grille développée par l'INSEE allouant à chaque commune un point représentant son barycentre.

Pour naviguer entre ces mailles, une technique d'interpolation linéaire est utilisée. Cette méthode consiste à rechercher, pour chaque point de la première grille, les 3 points les plus proches de l'autre grille. Ensuite, la moyenne des coordonnées de ces 3 points est calculée en affectant à chacun un poids inversement proportionnel à la distance qui le sépare du point de la première grille.

---

<sup>1</sup>Centre National de Recherches Météorologiques

<sup>2</sup>On aurait alors en moyenne 810mm de précipitations par an en France

<sup>3</sup>Système d'Analyse Fournissant des Renseignements Adaptés à la Nivologie

## 2.1. BASES SUR LES MODÈLES CLIMATIQUES ET L'UTILISATION DE LEURS DONNÉES<sup>67</sup>

Les données de Copernicus sont disponibles au pas de temps journalier du 1er janvier 1961 au 31 juillet 2019. Elles donnent la température à 12h et la quantité de pluie tombée en kg/m<sup>2</sup> depuis la dernière mesure (la veille).

Les données DRIAS donnent les mêmes variables, mais du 1er janvier 1951 au 31 décembre 2100. Les données sont projetées selon les scénarios du GIEC à partir du 1er janvier 2006. DRIAS distingue plusieurs périodes. D'abord la période historique pour laquelle, contrairement à ce que son nom indique, des données sont simulées avec le modèle choisi en utilisant les données de l'époque sur de vastes périodes. Ensuite viennent, un horizon de temps proche s'étendant de 2021 à 2050, un horizon de temps moyen de 2041 à 2070 et un horizon lointain de 2070-2100. Il faut comprendre que pour des horizons de temps éloignés et en particulier le dernier, ces données sont estimées plus difficilement et donc les résultats seront à prendre avec une plus grande précaution.

Les données du SWI depuis 1969 sont aussi mises à disposition par Météo-France au pas de temps mensuel. Elles permettront de valider la justesse des indices SPEI/SPI.

Afin de développer notre modèle sécheresse, nous utiliserons donc trois catégories de données différentes :

- Les données réanalysées (UERRA) combinant les données d'observation des stations météorologiques, des satellites, etc., avec les données des modèles météorologiques pour créer une vue uniforme du climat mondial. Ces données portent sur la période 1961-2019.
- Des données historiques du modèle climatique à échelle réduite et corrigées des biais (p. ex. précipitations, température, etc.) pour la période de 1951 à 2005
- Projections futures des données du modèle climatique à échelle réduite et corrigées du biais selon divers scénarios d'émissions de 2006 à 2100.

Dans le tableau 2.1 ci-dessous, un résumé des différentes informations sur les données disponibles est fait :

	<b>Copernicus (UERRA)</b>	<b>DRIAS</b>	<b>Euro-Cordex</b>
Profondeur historique	De 1961 à 2019	De 1951 à 2100	De 1951 à 2100
Couverture	Europe	France	Europe
Maille	Près de 17000 points en France	Près de 9000 points	Près de 9000 points en France
Variables	Réanalysés	Simulées	Simulées

TABLE 2.1 : Différents sets de données disponibles en données ouvertes

## 2.2 Modèle risque sécheresse

### 2.2.1 SWI selon Météo-France

Le critère météorologique tel que défini par Météo-France se calcule de manière très précise. Ce critère est défini mensuellement, mais les arrêtés de catastrophe naturelle pour sécheresse sont publiés par saison (cf 1.2.1). 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.

Pour tenir compte de la cinétique particulièrement lente du risque RGA, la solution retenue par l'Etat est d'agréger au niveau de SWI du mois  $m$ , le niveau des deux mois précédents et d'en faire la moyenne. Ainsi, au sens du critère météorologique du système CatNat :

$$SWI_m^{Cat} = \frac{SWI_m + SWI_{m-1} + SWI_{m-2}}{3}$$

avec  $SWI_m^{Cat}$  le SWI au sens du régime CatNat pour le mois  $m$ .

Avec le SWI ainsi calculé, un mois  $m$  est déclaré en état de catastrophe naturelle pour le risque sécheresse si son SWI est parmi les deux plus faibles des 50 dernières années pour ce mois, soit une période de retour de 25 ans. Avec une vision quantile, cela représente le quantile d'ordre au moins 4%.

### 2.2.2 Mise en place du modèle

Ainsi, au regard de ces éléments, la période historique retenue pour les valeurs projetées est de 25 ans. Ce choix est motivé par le but d'avoir pour 2025 une période de retour de 50 ans pour les données projetées de DRIAS. Pour les années 2010-2025, une méthode équivalente de quantile à 4% sera utilisée.

Pour les données historiques de UERRA, une période historique de 20 ans a été retenue afin de tester ce procédé en comparant le SPI/SPEI ainsi obtenu au SWI, qui plus est, sur une plus grande période. Une méthode de quantile à 4% est utilisée pour la période 1990-2019. La méthode de calcul du SPI/SPEI présente la particularité pour certaines valeurs très éloignées des valeurs historiques de fournir une valeur infinie sur  $\mathbb{R}$ . Pour pallier ce problème, des valeurs paliers de  $-5$ ;  $+5$  ont été introduites.

Leurs valeurs correspondent aux valeurs extrêmes du set de résultats. En dehors des valeurs infinies, les valeurs minimales et maximales sont respectivement  $-5.8$  et  $4.6$ . Des valeurs de même ordre de grandeur ont donc été retenues puisqu'elles suffisent à percevoir l'épisode de sécheresse dans le modèle. Une valeur plus grande n'a pas été retenue en raison de la méthode de calcul utilisée. En effet, en utilisant une période de retour, si ces valeurs avaient été trop élevées, elles n'auraient pas permis au modèle de relever les futures sécheresses; ces dernières n'étant pas dans les 2 plus grandes des 50 dernières années.

## 2.3 Validation du modèle et résultats

Les résultats sont présentés pour les indices avec leur corrélation moyenne avec le SWI. C'est cette corrélation qui va déterminer les meilleurs SPI et SPEI.

Cependant, il faudra s'assurer que le modèle évite plusieurs biais. Pour cela, il faut s'assurer que la corrélation reste identique suivant plusieurs paramètres : l'exposition des territoires au risque RGA (présence d'argiles), la population des territoires, le coût historique du risque RGA suivant les territoires (leur vulnérabilité).

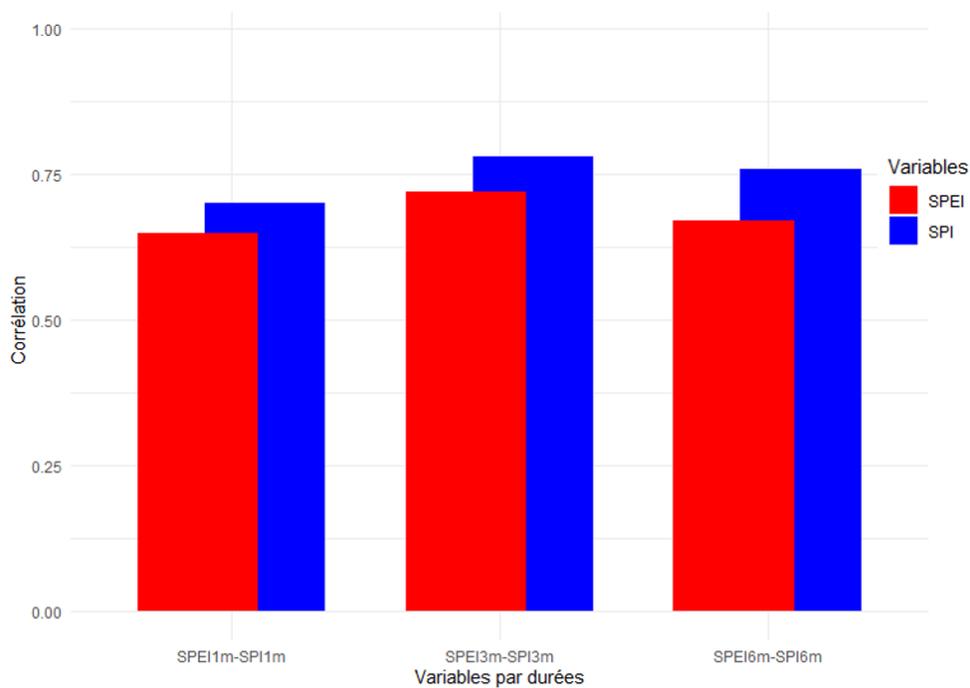
Un ajustement a aussi été fait sur l'indice. Une grande partie des différences notables avec le SWI pour certaines zones du bassin parisien provenaient de périodes où le SWI était particulièrement élevé et donc durant lesquels les sols sont gorgés d'eau. Ces valeurs n'étant pas pertinentes pour la sécheresse, le but étant de détecter les niveaux de SWI particulièrement bas et non élevés, une valeur seuil a été introduite pour le SWI et le SPI/SPEI. Les valeurs supérieures au quantile à 75% des valeurs du SPI/SPEI et du SWI ont été égalisées au quantile à 75% lui-même, permettant à la corrélation entre les indices d'être évaluée sur les épisodes de sécheresse uniquement.

Après calcul des projections, seuls 3 points respectivement situés dans l'océan Atlantique et dans les Pyrénées à des altitudes de plus de 2800 mètres ont présenté des p-value inférieures à 0.05 au test de Kolmogorov-Smirnov (cf 2.1.1). Ces points n'étant pas utilisés par la suite (à cause de leur position : ils n'étaient parmi les 3 points les plus proches d'une commune française), les résultats sont validés pour chacun des indices. En outre, la médiane des p-values est de 0.92 ce qui est très satisfaisant, la moyenne est à 0.9.

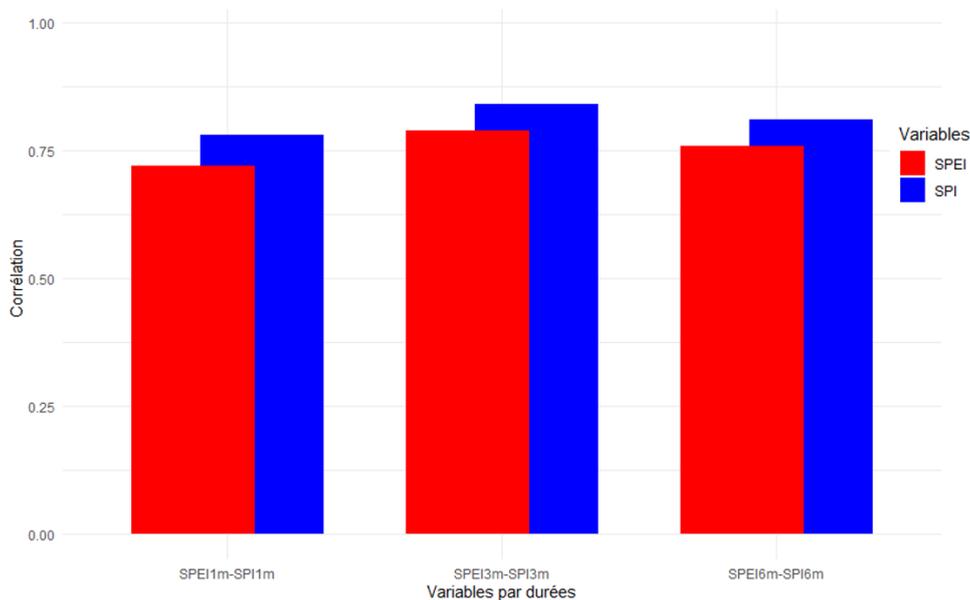
Si l'on s'intéresse aux lois les plus retenues par notre modèle (entre la log-logistique, la normale et la gamma), c'est la loi log-logistique qui est la plus utilisée. Elle est particulièrement utilisée pour le SPEI pendant les mois les plus chauds et secs. Elle est utilisée plus de 2 fois sur 3 pour les mois de Mai à septembre et 1 fois sur 2 le reste du temps. Elle semble être la plus pertinente pour modéliser la sécheresse (choix retenu par le package SPEI BEGUERÍA et VICENTE-SERRANO (2023)). La loi gamma a été utilisée environ 1,2 fois plus que la loi normale et principalement pour le calcul des SPI.

Les premiers résultats sont présentés en 2.10.

On remarque une amélioration notable en ne prenant pas en compte les épisodes humides les plus importants. Les graphiques sont clairs et tendent dans le sens d'une meilleure corrélation pour les indices SPI3 et SPEI3 (cf 2.1.1). De ce résultat, on peut conclure qu'il aurait peut-être été plus judicieux et pertinent de tenter d'ajuster la loi pour le calcul de nos indices sur la queue de distribution à gauche afin de mieux capter les risques de sécheresses plutôt que de chercher à approximer la loi pour toute la distribution.



(a) Corrélations des indices de SPI et SPEI avec le SWI



(b) Corrélations des indices en harmonisant les valeurs élevées (épisodes humides)

FIGURE 2.10 : Corrélations des différentes indices avec le SWI sur la période 1975-2019

Ces résultats préliminaires nous permettent de retenir les indices SPI3m et SPEI3m comme indices de référence les plus adaptés pour approximer le SWI. Cela peut s'expliquer par le fait que le SWI utilise principalement des données issues des sols qui font eux-mêmes leur bilan hydrique ce qui représente un procédé long d'évaporation et d'infiltration. Le SPI/SPEI 1 mois ne prend donc pas en compte la teneur en eau préalable des sols alors que le SPI/SPEI 6 mois, lui, considère des échanges trop lointains dans le temps. La valeur de corrélation moyenne est donc à l'échelle de la France pour les SPI3 et SPEI3 respectivement de 0.78 et 0.72 ce qui est tout à fait acceptable.

Enfin, la carte de la corrélation moyenne 2.11 des indices nous donne le résultat suivant :

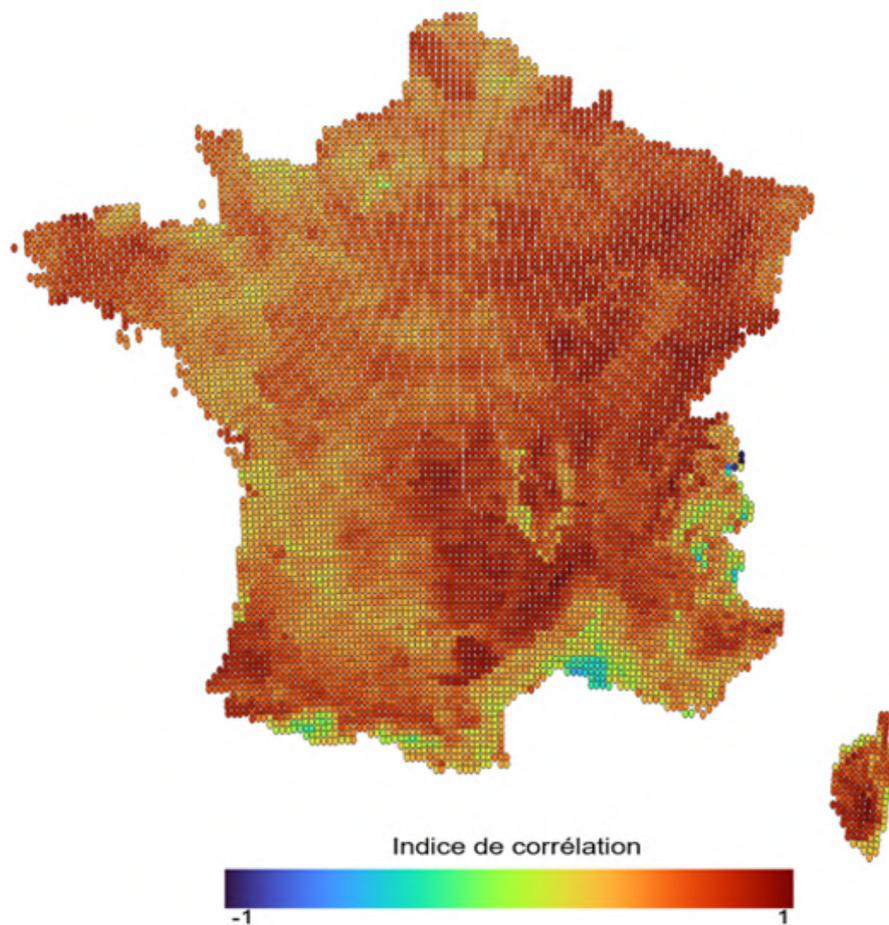
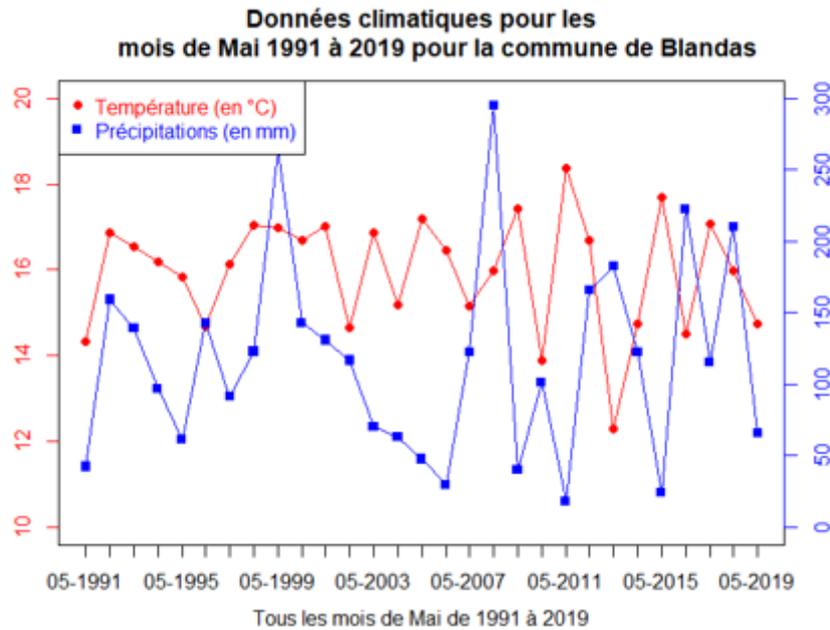


FIGURE 2.11 : Corrélation moyenne du SWI avec le SPEI3 sur la période historique 1986-2019

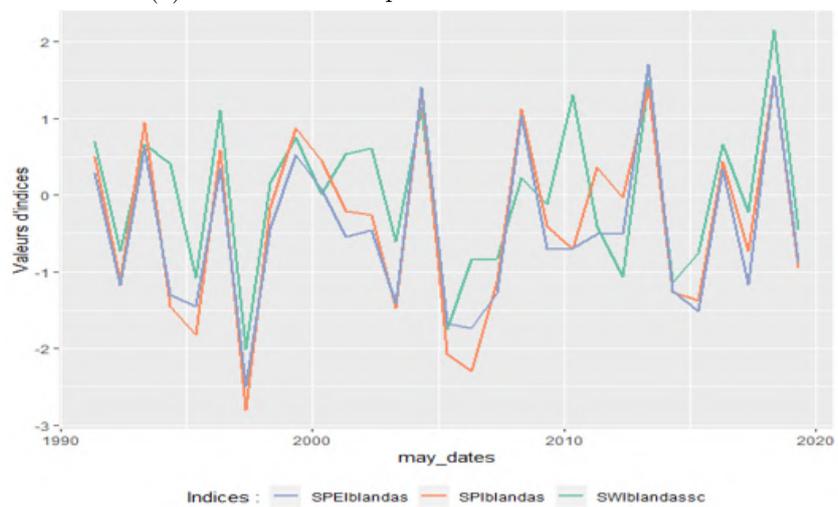
Il s'agit de la carte de la corrélation entre le SWI et le SPEI en moyenne sur la période 1986-2019. La corrélation moyenne est de 0.72. On remarque que la corrélation est très faible voire négative dans des zones au climat très particulier comme la Camargue ou les chaînes de montagne (Alpes, Pyrénées). Il s'agit de zones qui, de plus, ne sont pas très habitées du fait de leurs caractéristiques particulières. Il s'agit donc d'une imperfection du modèle acceptable et qui pourrait faire l'objet de travaux complémentaires. En revanche la corrélation est plutôt bonne sur l'ensemble de la France et notamment sur le bassin parisien et le croissant argileux qui sont des zones d'importance primordiale. On peut donc être satisfait de ce résultat.

### 2.3.1 Exemple de variation des indices

Plus concrètement, les données pour les mois de Mai d'une ville du sud de la France sont présentées ci-après en 2.12. Elles présentent une corrélation moyenne de 0.75 ce qui est la valeur médiane des corrélations moyennes. Sur ces graphiques, on voit les données climatiques de la commune de Blandas d'une part et les données du SWI et les données calculées des indices SPI3 et SPEI3 d'autre part :



(a) Données climatiques Blandas - mois de Mai



(b) Variation du SPEI pour la période correspondante selon les données DRIAS et Copernicus et du SWI

FIGURE 2.12 : Exemple de comportement des indices pour une commune du sud de la France

On observe que le SPI et le SPEI captent plutôt très bien les variations du SWI et c'est pour un épisode pluvieux en 2011 que ces indices captent moins les variations d'où l'importance de la mise en place d'une valeur seuil.

### 2.3.2 Vérification des erreurs

Il faut, par la suite, vérifier que ces indices ne font l'objet d'aucun biais particulier.

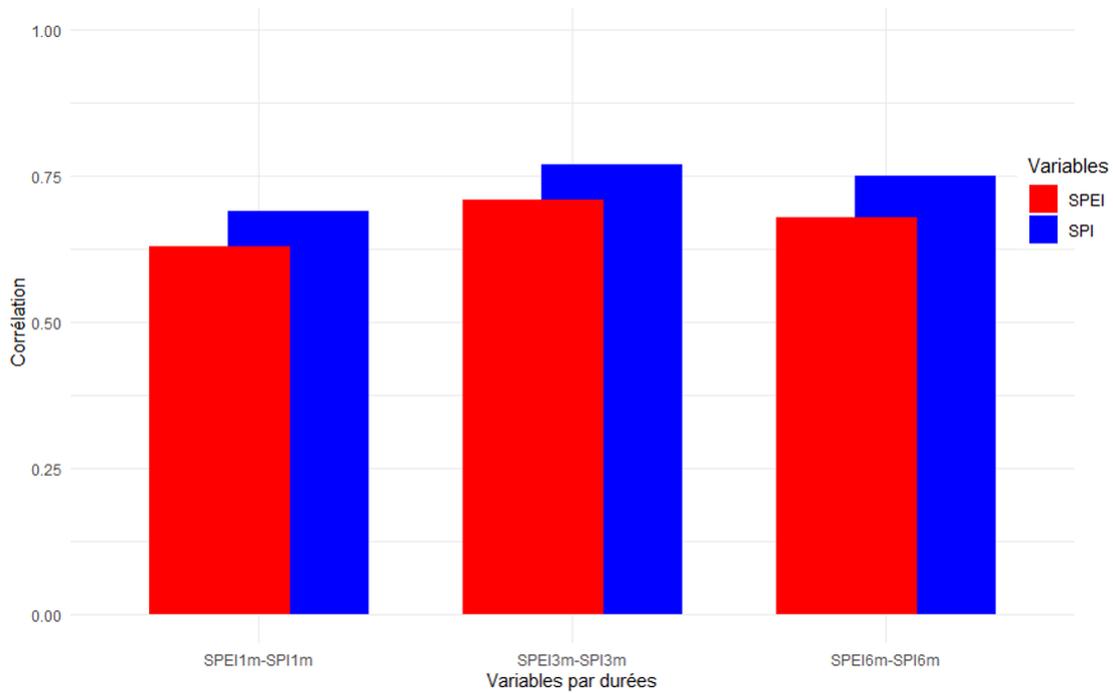


FIGURE 2.13 : Histogramme des corrélations moyennes des différents indices avec le SWI (critère géotechnique)

Ce graphique 2.13 présente à l'aide des données de l'ONRN (cf 3.1.1) la corrélation avec le SWI en ne considérant uniquement les communes respectant le critère des 3% d'argiles gonflantes. Cette vérification est importante car même si, dans cette partie, le but est de construire un indice sécheresse, cet indice sera utilisé pour modéliser le risque RGA et son coût et donc les zones qui y sont exposées seulement. Les résultats sont satisfaisants et la corrélation reste stable en ajoutant ce critère, la corrélation moyenne des deux indices choisis passant respectivement de 0,78 à 0,77 et de 0,72 à 0,71.

En considérant l'exposition au risque RGA de manière plus générale (figure 2.14), on trouve des résultats légèrement plus faibles pour les zones plus exposées même si cela reste très minime; la corrélation devenant légèrement meilleure pour les zones à risque inexistant (resp. 0,795;0,741) et les zones à risque faible (resp. 0,786;0,728), quasiment la même pour les risques moyens (resp. 0,776;0,737), et légèrement plus faible pour les risques forts (resp. 0,752;0,7). Ces mesures varient très légèrement et restant convenables, on en déduit l'absence de biais selon l'exposition au risque RGA.

Ces résultats ont ainsi été obtenus en considérant pour chaque commune, la part de cette dernière exposée à chaque gravité d'aléa au risque RGA en faisant la moyenne des corrélations des communes et en la pondérant par la surface communale présentant ce risque.

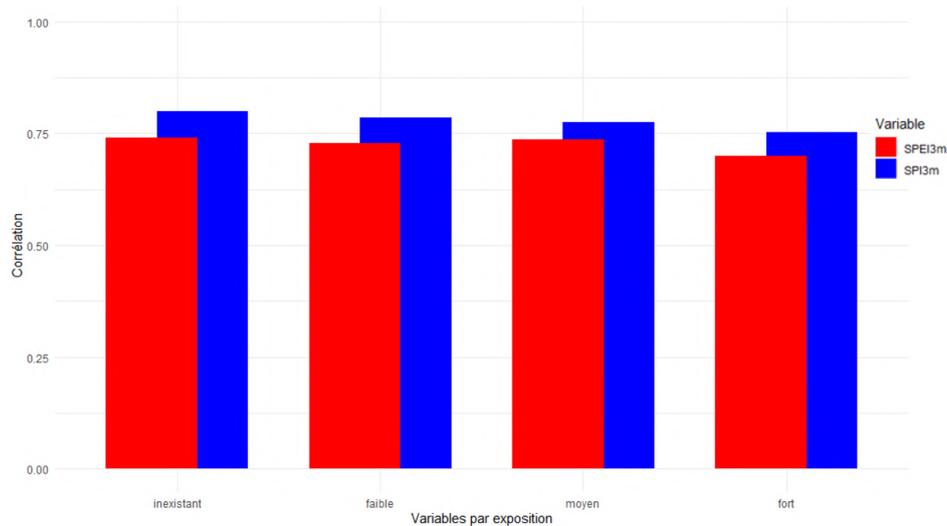


FIGURE 2.14 : Corrélations moyennes des différents indices avec le SWI (exposition au risque RGA)

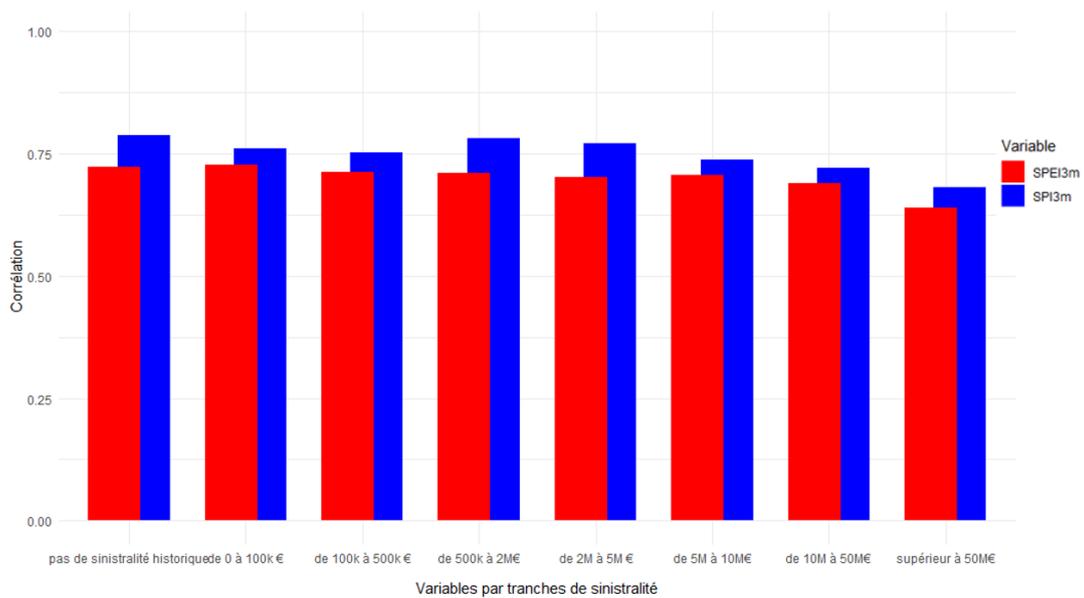


FIGURE 2.15 : Corrélations moyennes des différents indices avec le SWI (sinistralité historique)

En considérant cette fois la sinistralité historique, le graphique 2.15 ci-dessus montre l'évolution de la corrélation avec le SWI suivant les différents niveaux de sinistralité historique cumulée depuis 1995. Ces résultats doivent être analysés à la lumière du nombre de communes dans chacune des catégories (tableau 2.2) :

TABLE 2.2 : Répartition des communes en fonction du coût cumulé par fourchettes

Fourchette de coût	Nombre de communes	Pourcentage
0 € - 100 k€	3508	10%
100 k€ - 500 k€	3503	10%
500 k€ - 2 M€	2438	7%
2 M€ - 5 M€	748	2%
5 M€ - 10 M€	272	1%
10 M€ - 50 M€	170	0.5%
Supérieur à 50 M€	8	0.002%
Pas de sinistre répertorié à la CCR	24192	69%

Ainsi, le nombre de communes ne présentant pas de sinistralité historique est très important (environ les 2/3), alors qu'il y a moins de 1000 communes présentant un historique de sinistres de plus de 10 millions d'euros. La corrélation étant assez bonne sur les communes présentant une sinistralité de moins de 50 millions d'euros c'est-à-dire une grande majorité, l'indice est acceptable. Il est même d'ailleurs probable que les valeurs plus faibles de l'indice sur les communes les plus sinistrées s'expliquent par le faible échantillon qu'elles représentent, la variance du coût d'un sinistre RGA étant très importante. On ne relève donc pas de biais en fonction de la sinistralité historique.

La même analyse sur les autres indices montrent qu'ils ne sont pas plus performants que les indices retenus en prenant en compte ces biais. Les indices SPI3 et SPEI3 sont donc retenus et auront pour but d'approximer le SWI dans la suite de ce mémoire.

### 2.3.3 Méthode de calcul retenue

Le SPI 3 mois semble donc être le plus adapté pour approximer le SWI. Cela peut s'expliquer par le fait que le SWI utilise principalement des données issues des sols qui font eux-mêmes leur bilan hydrique ce qui représente un procédé long d'évaporation et d'infiltration. Toutefois, il est connu que le SPI (JOETZJER, 2011) est un indice prenant mal en compte le dérèglement climatique. En effet, comme expliqué : le SPI n'ayant que les précipitations comme variable d'entrée et, le changement climatique se manifestant principalement par une augmentation des températures, le SPEI est bien meilleur pour approximer les sécheresses futures ; c'est d'ailleurs la raison pour laquelle il a été créé (VICENTE-SERRANO et al., 2010).

Le mode de calcul des sécheresses retenu est donc (cf 2.2.1) le même que celui utilisé par Météo-France en remplaçant le SWI par le SPEI3 et le SPI3. Les résultats projetés seront présentés à trois horizons de temps différents.

Un horizon proche 2035, qui correspondra à la période 2025-2045, et qui est un climat encore proche de celui que l'on connaît actuellement. Un horizon moyen-long terme 2050, qui correspond à la période 2040-2060, et qui est un climat qui est dépendant du scénario RCP et du modèle ; c'est une période charnière pour les scénarios RCP du GIEC (cf 2.1.3).

Enfin un horizon 2085 très long terme correspondra à la période 2070-2100. C'est probablement la période la plus incertaine ; les résultats seront donc à prendre avec une grande prudence ; c'est aussi la raison du choix d'une période plus grande 2070-2100. Tous les résultats de cette période seront multipliés par 2/3 afin qu'ils soient comparables aux deux autres périodes (passage de 30 à 20 ans). Les résultats concernés sont le nombre de sécheresses et les coûts finaux.

### 2.3.4 Résultats historiques de l'éligibilité CatNat

En utilisant les données historiques du SWI, on peut essayer de retrouver l'éligibilité au sens du critère météorologique de chacune des communes depuis 1994 jusqu'à 2019. Les communes ne respectant pas le critère géotechnique n'ont donc pas été considérées dans cette partie. Une méthode d'approximation sera cependant effectuée en raison d'un manque de profondeur historique. En effet, les données du SWI ne sont disponibles qu'à partir de 1969. La période de retour de 50 ans pour le calcul ne peut donc pas être respectée.

Chaque année à partir de 1995, l'ensemble des données antérieures disponibles pour la commune du SWI sont utilisées afin de construire la densité de l'indice SWI la plus précise. Cette méthode nous donne les résultats 2.16 suivants en considérant la sinistralité par mois par année :

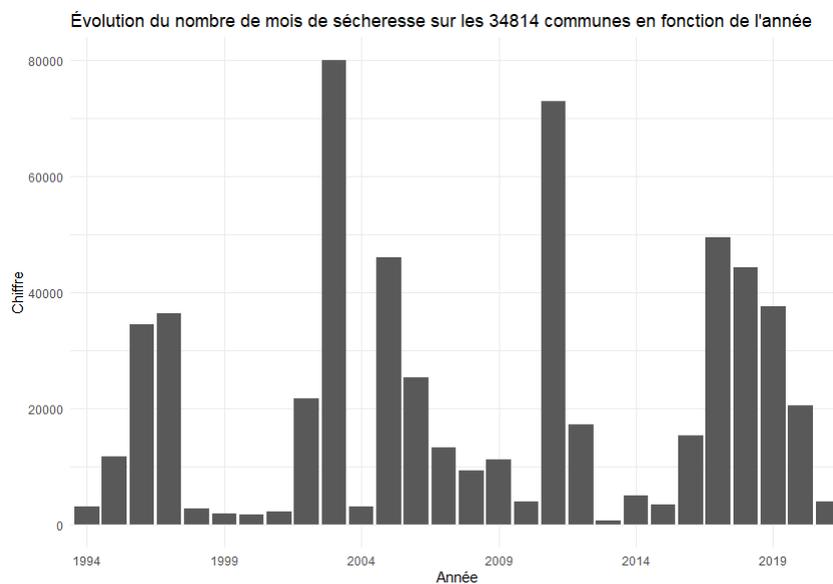


FIGURE 2.16 : Évolution du nombre de mois de sécheresse sur les communes en fonction de l'année

Par la suite, la méthode utilisée sera celle d'un quantile à 4% correspondant à la période de retour de 25 ans.

On observe des résultats cohérents avec les coûts historiques des sinistres pour les années que l'on sait particulièrement marquée comme 2003, 2011 ou les années 2016, 2017, 2018. Les résultats avant 1999 ne sont pas pertinents dans la mesure où durant ces années, le critère météorologique n'était pas encore introduit. Toutefois, la catastrophe naturelle « sécheresse » est déclarée par saison et il suffit d'un mois satisfaisant le critère météorologique pour que la saison le satisfasse (cf 2.1.2). Ainsi, une vision plus approprié serait celle des communes éligibles par saison et on observe les résultats suivants (toujours par année) pour les données historiques réanalysées :

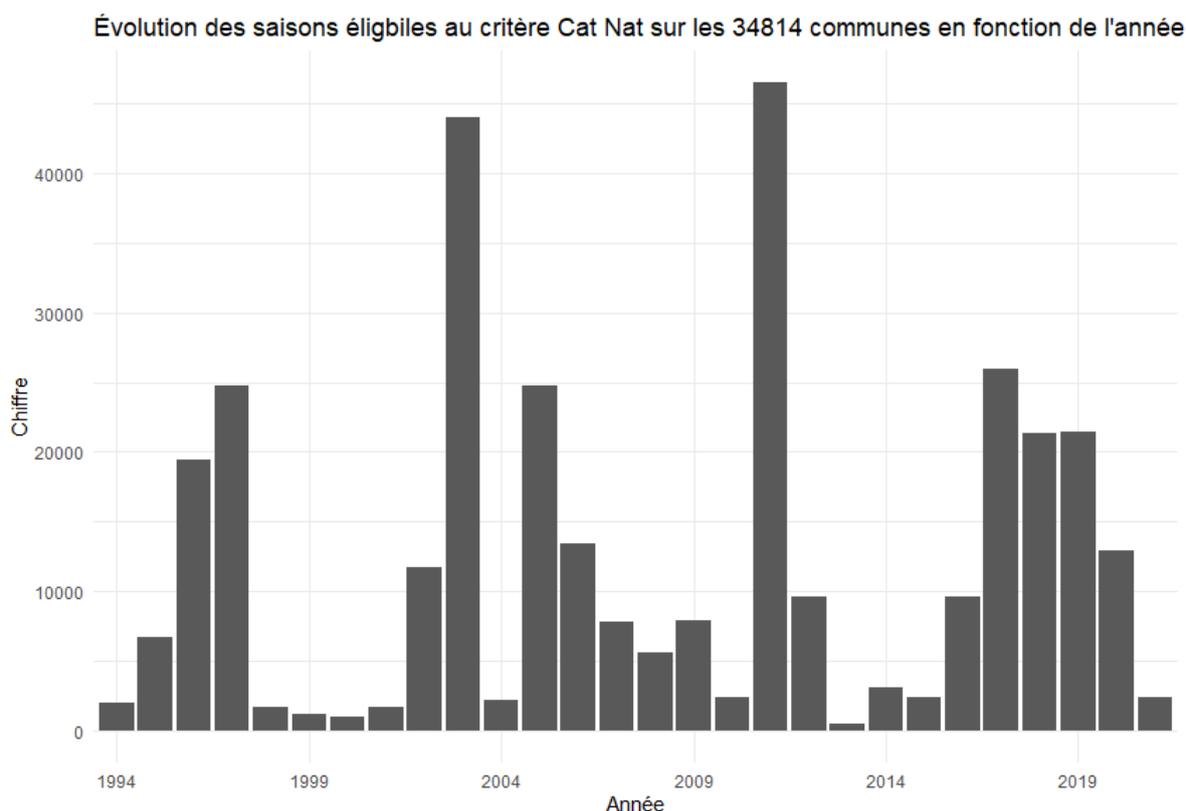


FIGURE 2.17 : Évolution des saisons éligibles au critère CatNat sur les communes en fonction de l'année

On observe une différence entre 2.17 et 2.16 notamment entre les années 2003 et 2011 par rapport au précédent graphique. Le mois 2003, ayant connu un été particulièrement chaud les mois de juin, juillet, août sont éligibles au critère pour de nombreuses communes mais par forcément les autres mois de l'année, expliquant ainsi le nombre moindre d'éligibilité en prenant la « vision » saison. En outre, le fait que l'année de 2011 contienne plus de saisons éligibles CatNat que 2003 malgré un coût moindre peut s'expliquer de plusieurs manières : tout d'abord le fait qu'après les coûts de la sécheresse 2003 un durcissement des conditions a été observé, mais aussi le fait qu'en 2003 la sécheresse estivale a été extrêmement intense et a donc pu provoquer plus de dégâts que celles de 2011.

Qui plus est, il faut distinguer éligibilité CatNat et sécheresse car pour de nombreuses communes peu exposées, ces demandes ne sont pas faites ou il n'y a pas de sinistralité, donnant lieu à une demande.

Ce calcul par saison est celui utilisé dans la suite de ce mémoire, étant celui privilégié par Météo-France et l'Etat. Toutefois, il est à noter que l'annualisation de ce critère est une des propositions effectuées par les députées Rousseau et Marsaud dans la dernière proposition de loi (ASSEMBLÉE NATIONALE, 2023). Elle n'est pas considérée dans ce mémoire. Une autre étude permet de retrouver le constat 2.18 de la FFA à savoir que plus de la moitié des sinistres interviennent en dehors de la période estivale :

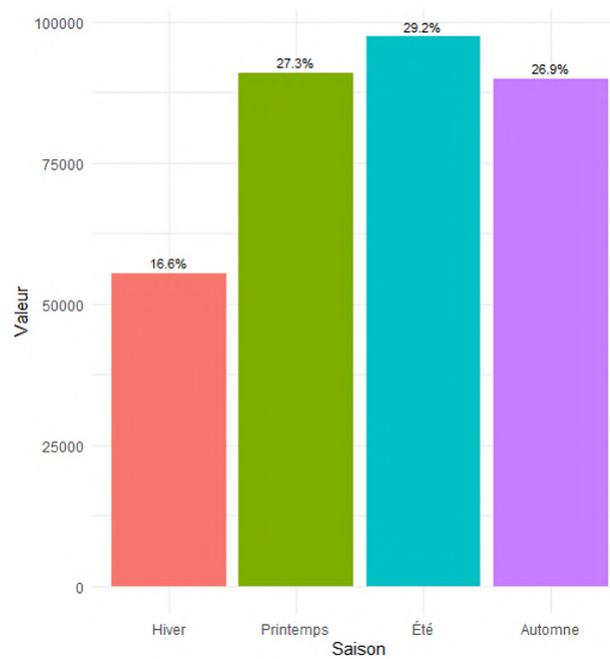


FIGURE 2.18 : Éligibilité CatNat pour chaque saison sur la période 1994-2019

On voit ici que seul 30% de l'éligibilité CatNat a lieu en été, ce qui peut être surprenant, mais s'explique par la méthode de calcul de l'indice qui s'effectue en comparaison des autres années pour les mêmes mois. Cela montre aussi un biais de cette méthode. En effet, les sinistres c'est-à-dire les fissures se déclenchent après des épisodes de fortes chaleurs et donc le plus souvent pendant la période estivale.

Et même si ces dernières peuvent résulter, d'un hiver doux suivi d'un été chaud, si ce dernier n'est pas éligible à la déclaration CatNat, l'assuré ne sera pas couvert alors qu'il l'aurait été pour l'hiver ; mais les fissures n'étaient pas encore apparues ce qui explique les différences de pourcentage avec ceux de la FFA qui, elle, recense les déclarations CatNat effectives. Il est aussi à noter qu'il ne s'agit pas des mêmes périodes et que le climat tend vers des étés particulièrement plus chauds comme nous le verrons plus tard.

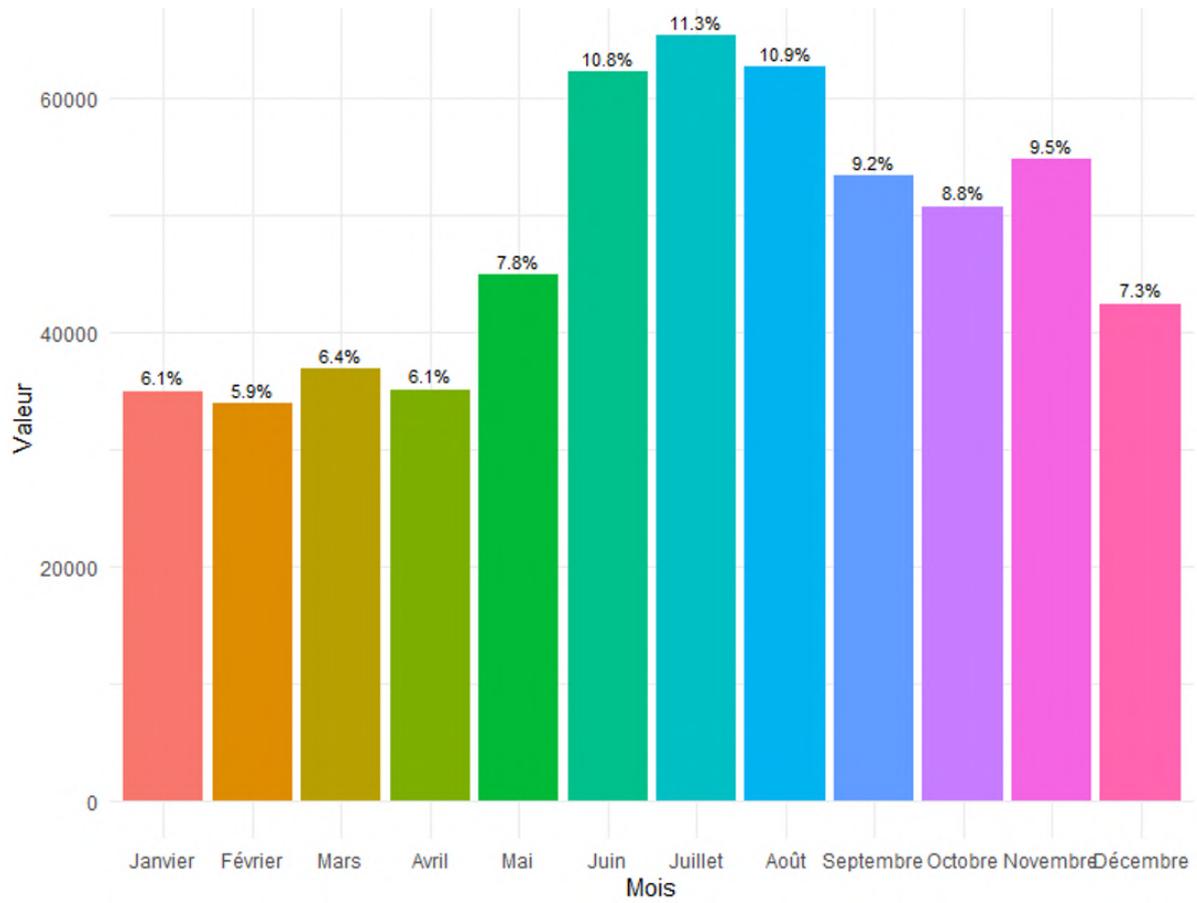


FIGURE 2.19 : Eligibilité par mois sur la période 1994-2019

En regardant mois par mois (figure 2.19), on observe que les mois les plus touchés sont les mois d'été juin, juillet et août et qu'ils représentent plus de 33% des mois de sécheresse alors que la saison (cf 2.18), elle, ne représentait qu'un peu plus de 29%, ce qui montre que, souvent, quand 1 des mois d'été l'est, les autres le sont. On retrouve ici un phénomène assez naturel à savoir que l'été est la saison la plus intense pour les sécheresses. C'est là qu'elles sont les plus sévères.

Ce à quoi nous nous intéresserons par la suite sera donc d'une part le nombre de sécheresses c'est-à-dire le nombre de mois vérifiant le critère CatNat et d'autre part le nombre de sécheresses éligibles aux déclarations CatNat au sens du critère saisonnier. Le premier rendra compte du climat et le deuxième du coût que cela pourrait représenter.

### 2.3.5 Reconstitution d'un événement historique

Afin de voir les qualités du modèle à reproduire un événement d'ampleur, les résultats en 2.20 sur la sécheresse de 2003 ont été analysés sur la ville de Toulouse extrêmement marquée par cette sécheresse (cf 2.1.2) :

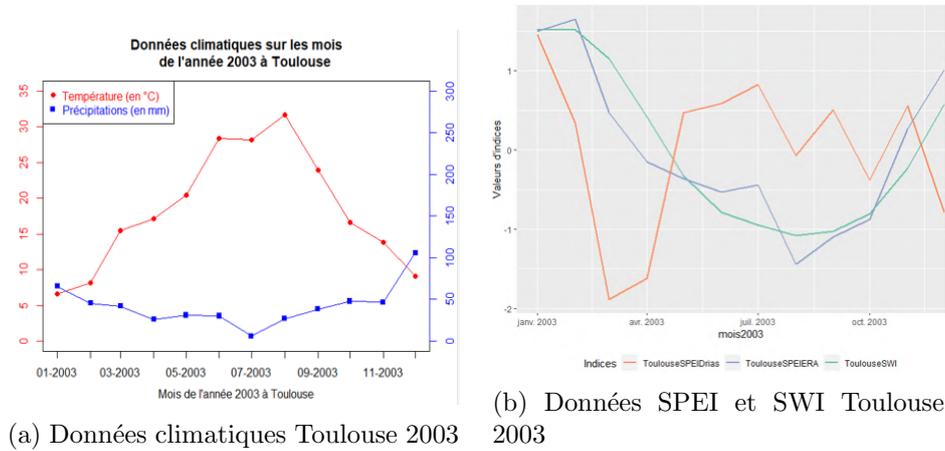


FIGURE 2.20 : Reconstitution d'un événement historique

Tout d'abord, les données issues de UERRA captent très bien la sécheresse subie par la ville de Toulouse cette année. Les échelles utilisées sont les mêmes que pour l'exemple de Blandas (cf 2.3.1) ce qui montre le montant faible des précipitations allié aux records de chaleur s'étant produits cette-année là.

Le SPEI issu des données UERRA réagit très bien aux variations du SWI et est donc parfaitement adéquat pour traiter des épisodes de fortes sécheresses. L'événement historique a été reconstitué avec succès. On constate par la même occasion, l'impossibilité de cette reconstitution par les données DRIAS pour les raisons évoquées précédemment (cf 2.1.2).

### 2.3.6 Présentation des cartes

#### Elimination du SPI3

Le premier résultat intéressant est, comme attendu, les résultats très optimistes du SPI. Pour le RCP 8.5, cet indice prévoit une augmentation des sécheresses de 10% des sécheresses éligibles à horizon 2050 et 2085 ce qui s'explique par la faible diminution des précipitations selon le modèle ALADIN (cf 2.1.3). En fait, le réchauffement climatique accélère le cycle de l'eau ce qui ne diminue pas les précipitations. De plus, à mesure que l'air se réchauffe, la quantité de vapeur d'eau qu'il contient augmente ce qui favorise des épisodes de pluie intenses (LES AGENCES DE L'EAU, 2019) (MADAKUMBURA et al., 2021).

Pour l'horizon 2050, par exemple, le SPEI prévoit une augmentation de ces sécheresses éligibles de 70% ce qui correspond à la même augmentation que celle obtenue par Covéa dans leur livre blanc (COVÉA, 2022). Les résultats du SPEI sont donc bien plus cohérents avec les résultats d'experts. L'indice SPI, comme attendu et conclu dans le mémoire de JOETZJER (2011), n'est pas adéquat pour les climats projetés, on utilise donc par la suite les climats issus du SPEI.

#### Présentation du RCP 8.5

Les cartes de sécheresse seront présentées avec comme variable la fréquence. La fréquence des sécheresses considérée pour le reste de ce mémoire est le nombre de saisons éligibles (au sens du critère météorologique) par commune.

Les cartes sont présentées à la maille commune avec le contour des départements visible afin de garder la précision du modèle tout en observant des phénomènes qui tendent à se répéter. La carte 2.21 le montre.

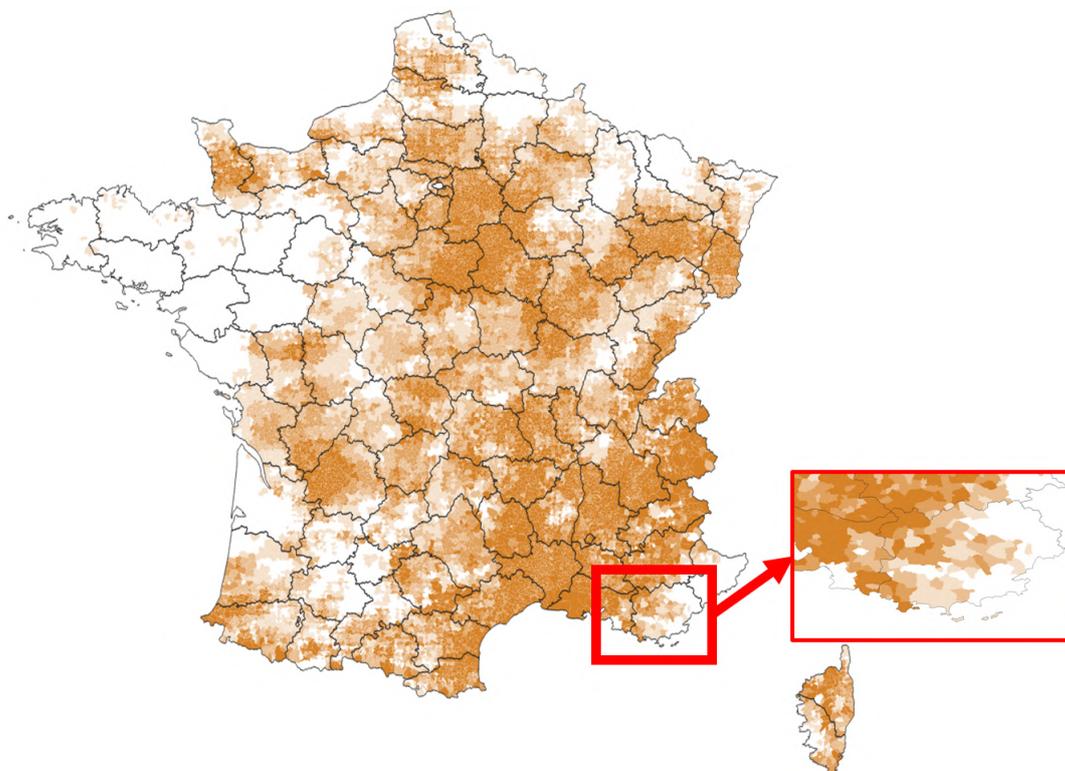


FIGURE 2.21 : Maille commune avec contour départements

Les résultats ici obtenus, l'ont donc été avec l'indice SPEI et les données projetées de DRIAS. Ces cartes doivent être lues à la lumière de l'exposition des différents points au sinistre RGA. La carte 2.22 présente en noir les communes ne satisfaisant pas le critère géotechnique. Ces points sont calculés en prenant en compte la présence sur la commune d'au moins 3% de surface en risque moyen-fort (CHARPENTIER et al., 2022).

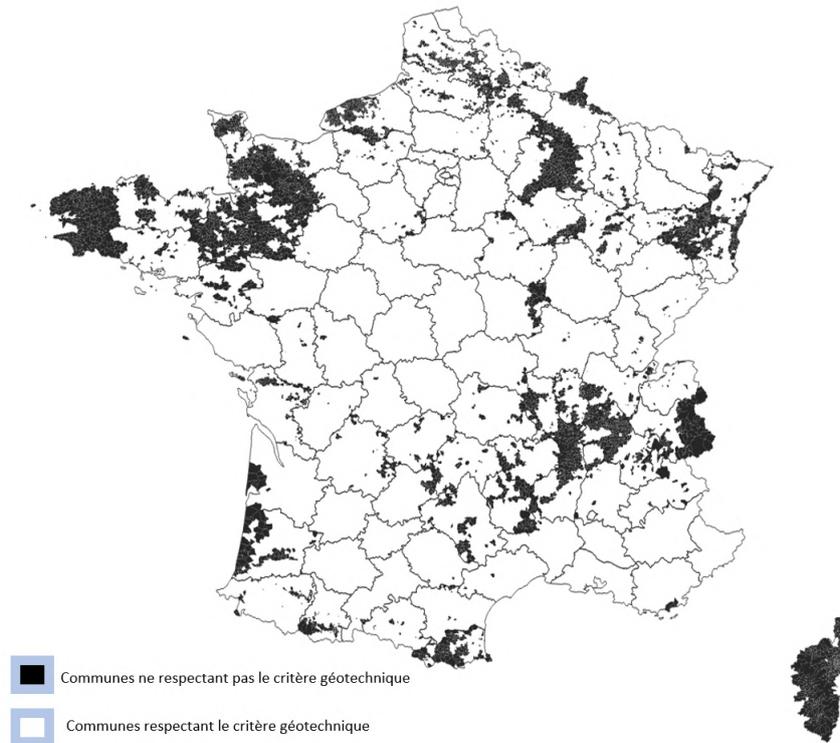


FIGURE 2.22 : Critère géotechnique pour les communes

**Présentation du climat actuel (Climat 2020)** Ce climat correspond à la période 2010-2030 dans laquelle nous nous trouvons. Nous nous attendons donc à retrouver un climat proche de celui qu'on connaît. La carte suivante présente les communes de France avec le niveau de sécheresse auxquelles elles font face sur la période. La fréquence de la sécheresse est le nombre de saisons pour lequel la commune est éligible CatNat pour la sécheresse.

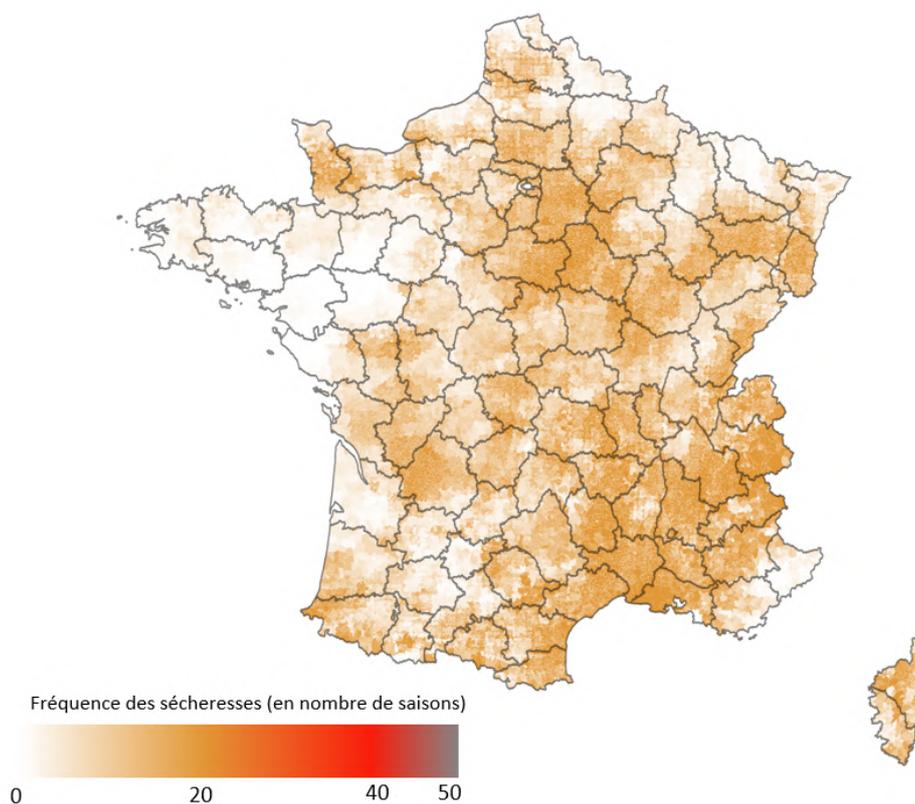


FIGURE 2.23 : Sécheresse en France sur la période 2010-2030

(NB : Le gradient de couleur ici utilisé sera utilisé pour l'intégralité des cartes de sécheresse afin de pouvoir mieux les visualiser.)

Sur cette carte (cf 2.23), on observe des zones particulièrement touchées comme le sud du bassin parisien, le sud-est de la France, le bassin méditerranéen, l'est de la France et la nord du bassin aquitain. A contrario, certaines zones comme le nord-ouest de la France et notamment la Bretagne et les pays de la Loire semblent relativement épargnées. Ceci paraît très cohérent avec les sécheresses de ces dernières années ; l'atteste la carte 2.24b du ministère de la transition écologique sur le risque sécheresse.

Il existe également une ressemblance très importante avec la carte des sécheresses historiques calculées à l'aide du SWI. Les sécheresses sont concentrées dans les mêmes zones : le nord-est, le sud-est et le croissant argileux. Le bassin parisien semble toutefois plus touché en climat 2020 et le bassin aquitain légèrement plus épargné. De plus, pour cette période, une augmentation de 30% des sécheresses a été observée en comparaison à la période historique.

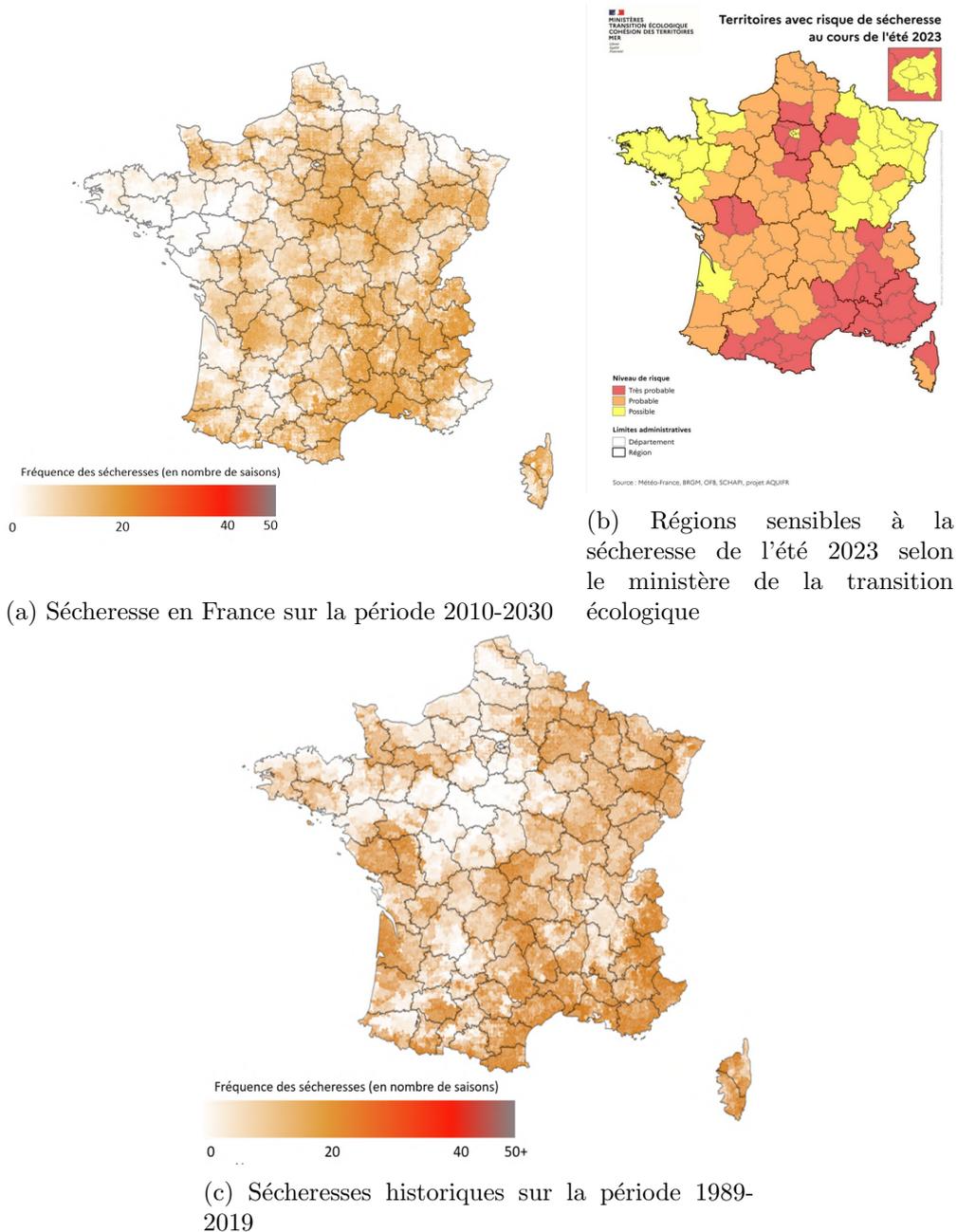


FIGURE 2.24 : Comparaison des résultats avec un carte du MTE et la carte des sécheresses historiques

Pour rappel, le choix ici a été de présenter l'indice sécheresse sur toute la France afin de mieux voir et comprendre l'ampleur de l'augmentation du phénomène et les régions les plus touchées. Pour la suite du mémoire, seul le risque RGA est étudié et donc cette carte peut être vue comme la carte suivante, les communes en noires n'étant pas considérées :

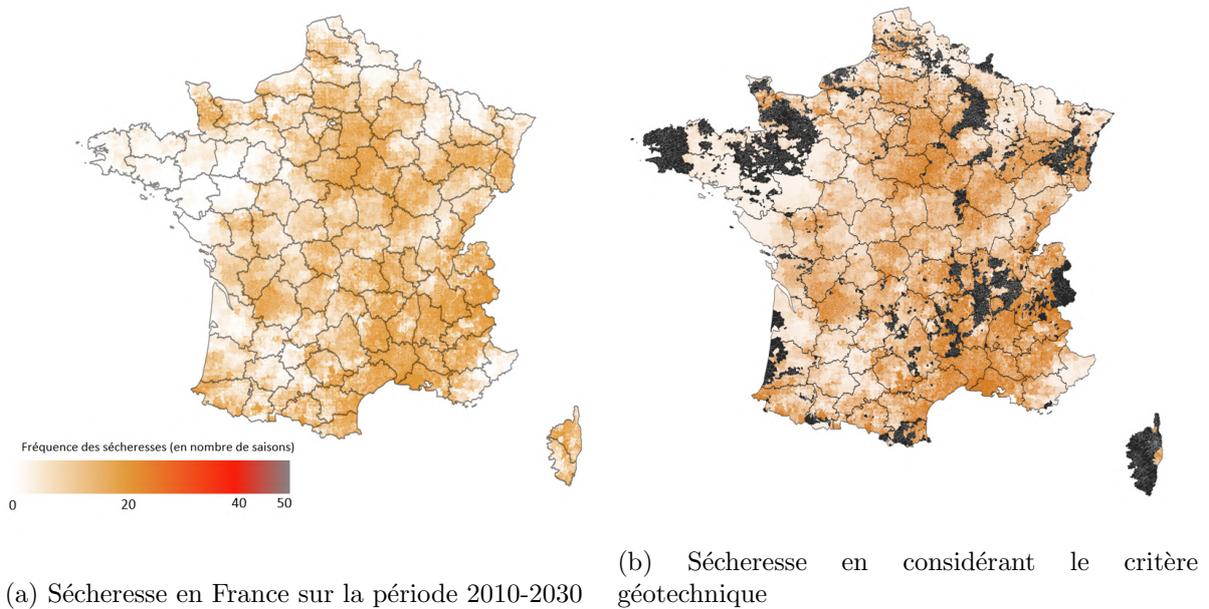


FIGURE 2.25 : Comparaison avec les communes ne respectant pas le critère géotechnique

On voit que cela a un impact considérable sur certaines régions comme la Corse.

**Climat 2035** A horizon 2035 : on observe une augmentation de 15% des sécheresses c'est-à-dire du nombre de mois en risque sécheresse. On peut voir cette donnée comme une augmentation des sécheresses et donc de leur puissance sur l'ensemble d'une saison. En effet s'il y a deux fois plus de mois en sécheresse par saison, on peut naturellement s'attendre à une saison plus sèche. On observe également une augmentation de 10% des sécheresses éligibles par saison aux déclarations CatNat.

En ce qui concerne l'intensité, il est essentiel de noter que dans ce mémoire, seule la fréquence des sécheresses a été prise en compte, tandis que leur intensité a été exclue de l'analyse. Cette décision découle de la pertinence de la fréquence en tant qu'indicateur prédominant pour les sécheresses, dont les conséquences varient peu en fonction de leur intensité, contrairement à d'autres phénomènes tels que les inondations. Par conséquent, par la suite, est faite l'hypothèse raisonnable que les fissures que l'on peut observer ne varient ni en gravité ni en coût de réparation avec l'intensité des sécheresses.

D'ailleurs, pour la représentation de l'augmentation des sécheresses, il s'agit également du choix effectué par COVÉA (2022) et FFA (2022a).

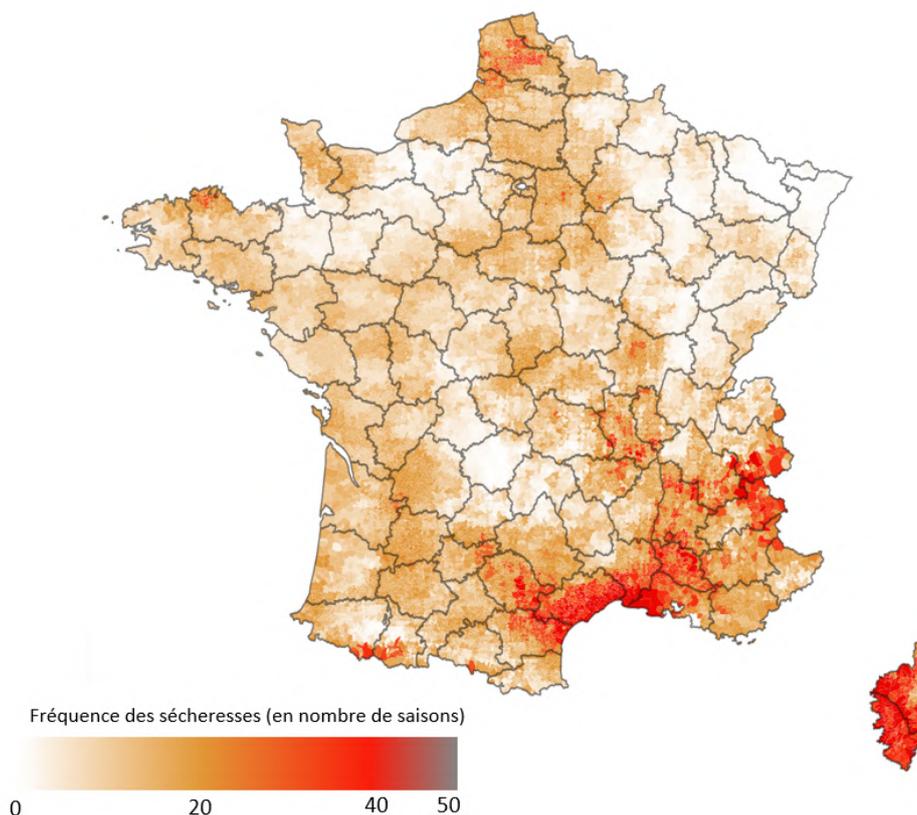


FIGURE 2.26 : Climat 2035

Sur cette période, on observe des zones touchées proches du climat 2020. Le sud de la France et notamment le bassin méditerranéen semblent très touchés. La Corse semble très exposée. Le bassin parisien est légèrement plus épargné alors que le nord de la France semble, lui, bien plus touché.

**Climat 2050** A horizon 2050 : on observe une augmentation de 105% des sécheresses et une augmentation de 69.5% des sécheresses éligibles par saison aux déclarations CatNat. Un autre phénomène notable est l'apparition d'un nombre très important de sécheresses automnales venant jusqu'à représenter 35% des sécheresses annuelles contre 36 % pour les sécheresses estivales. On parle ici de saisons éligibles. A horizon 2050, une sécheresse comme celle de 2022 arriverait une année sur deux en moyenne (même nombre de sécheresses mensuelles).

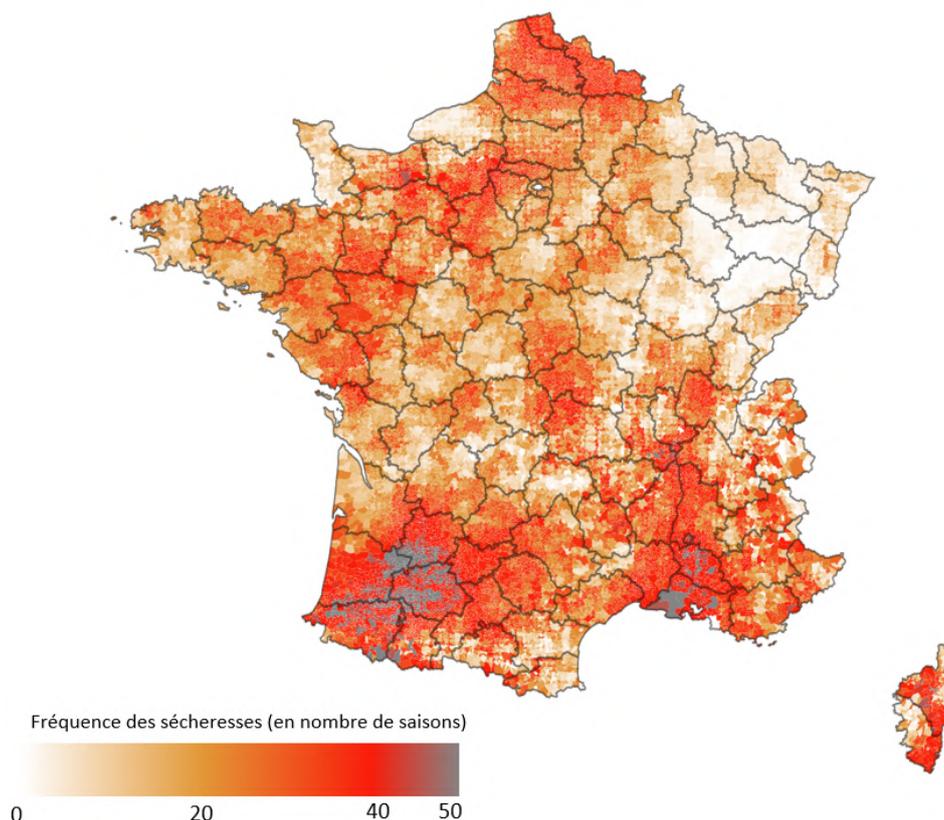


FIGURE 2.27 : Climat 2050

La carte présente des différences avec les précédentes. Tout d'abord, on note ici une augmentation notable du nombre de sécheresses. On observe une France globalement beaucoup plus touchée, avec des régions jusque-là relativement épargnées comme la Normandie ou les Pays de la Loire plus touchées. Le Nord semble, lui aussi, beaucoup plus frappé. La différence se fait surtout sur le sud-ouest de la France qui semble être l'une des régions les plus à risque, d'autant plus qu'elle concentre une forte partie de l'argile présent sur le territoire français.

Cette caractéristique majeure des projections à horizon 2050 se retrouve également dans les études de COVÉA (2022) et FFA (2022a) pour lesquelles le sud-ouest est aussi très touché. Ce point commun montre également que le modèle ici créé semble tout à fait cohérent avec les résultats qui ont déjà pu être observés. Une nouvelle fois, le bassin méditerranéen subira les conséquences majeures du réchauffement climatique, les épisodes de sécheresse se concentrant sur la Corse et le sud de la France.

**Climat 2085** A horizon 2085 : on observe une augmentation de 123% des sécheresses et une augmentation de 94% des sécheresses éligibles par saison aux déclarations CatNat. Le phénomène impressionnant de cette projection est la concentration du risque autour du bassin méditerranéen. A horizon 2085, l'équivalent de la sécheresse de 2003 aurait lieu tous les ans en moyenne (même nombre de sécheresses mensuelles).

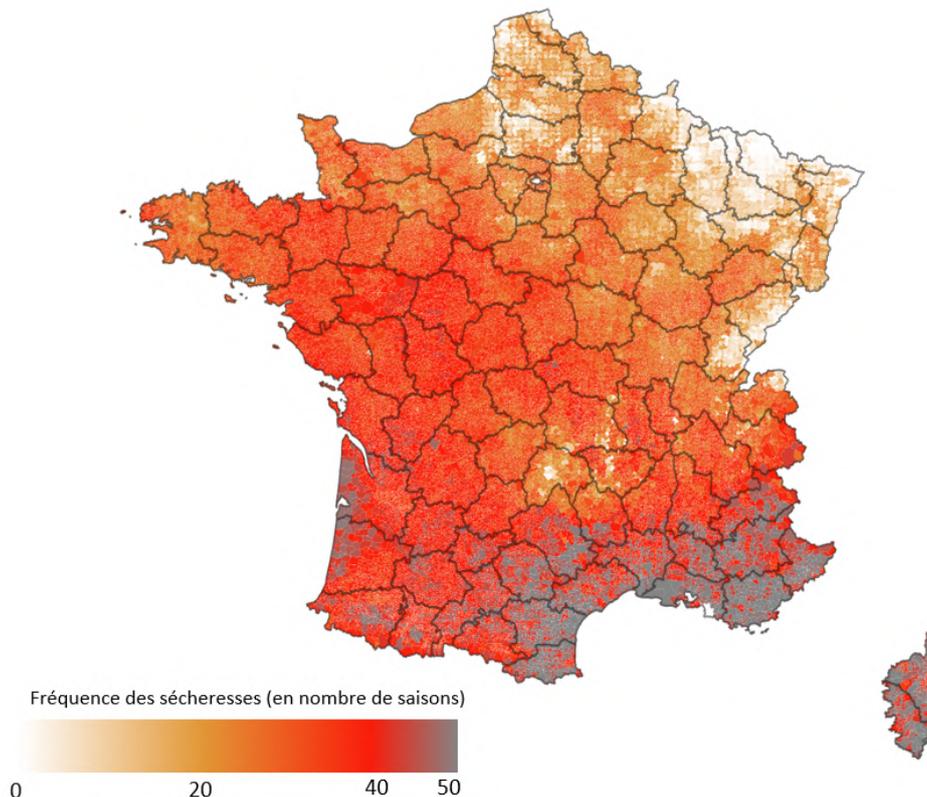


FIGURE 2.28 : Climat 2085

Effectivement, le nombre de sécheresses éligibles connaît une augmentation significative, atteignant jusqu'à 50 sécheresses sur une période de 20 ans par endroit et notamment sur le bassin méditerranéen qui concentre la part la plus importante de la sécheresse. Toutefois, cette projection est à prendre avec beaucoup de prudence car il est difficile d'estimer précisément l'évolution du climat à une date aussi lointaine.

En conclusion, trois phénomènes majeurs ont pu être observés :

- une généralisation du risque avec l'apparition d'événements importants de sécheresse sur des régions jusqu'ici relativement épargnées comme le nord-ouest de la France (Bretagne, Normandie, Pays de la Loire) ou les Hauts-de-France
- une augmentation générale du risque sur toute la France avec un accroissement des sécheresses de 70% à horizon 2050
- une concentration du risque autour du bassin méditerranéen et notamment de zones très argileuses comme le bassin aquitain ou la région PACA.

### Présentation du RCP 4.5

Le but de cette section est de comparer les différences d'intensité et de zones touchées par rapport au scénario RCP 8.5.

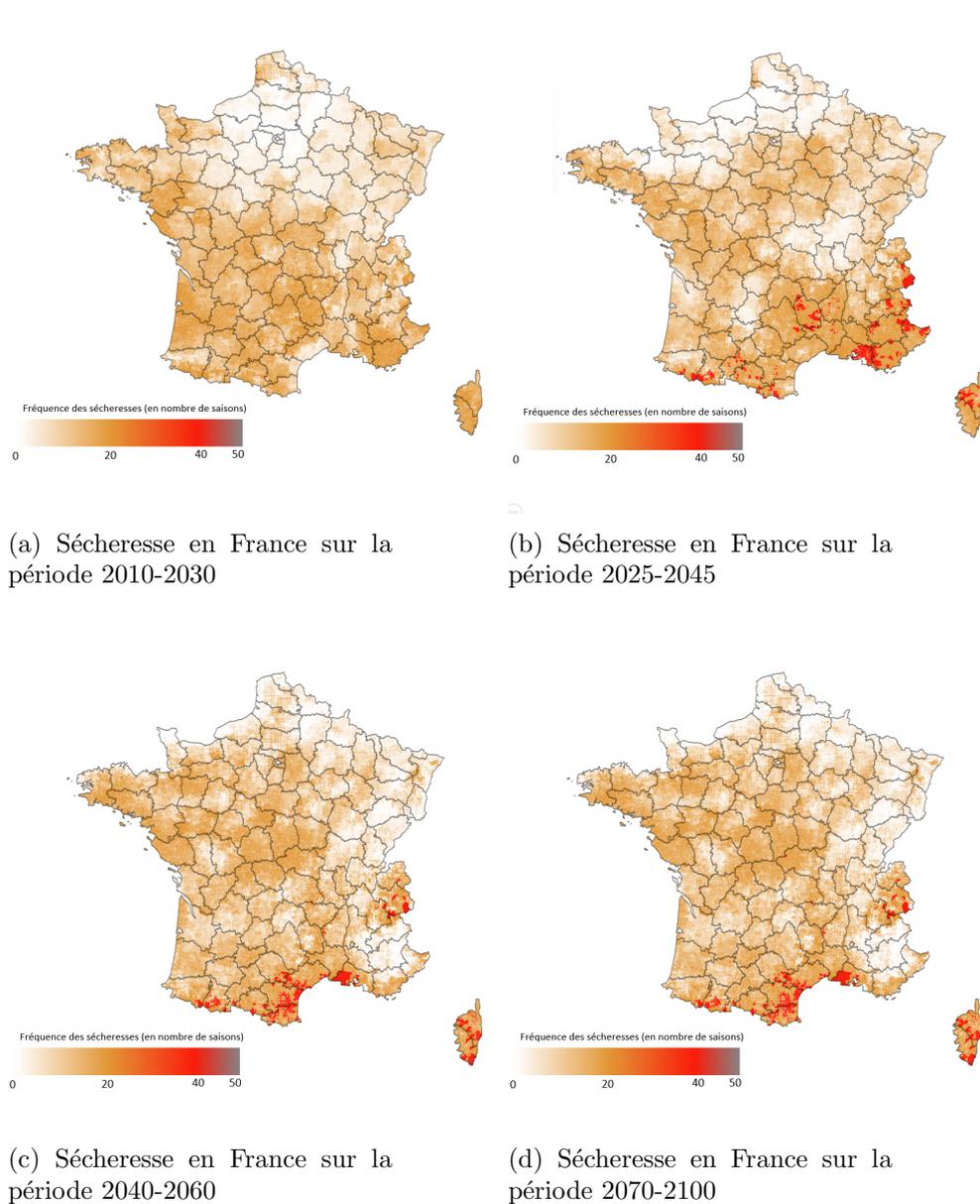


FIGURE 2.29 : Cartes de la sécheresse pour le scénario 4.5

**Climat 2020** La carte du climat 2020 (figure 2.29a) pour le RCP 4.5 apparaît comme très différente de celle du RCP 8.5 et donc aussi de la carte historique. Sur cette dernière, c'est plutôt l'ouest et le sud de la France qui sont impactés avec notamment un Grand-Est très préservé. Cette période présente une augmentation de 5% des sécheresses par rapport à la période historique.

**Climat 2035** Pour la période 2035 (figure 2.29b), la carte est relativement proche de celle pour la période 2020 pour ce qui est des zones frappées par la sécheresse, à l'instar du RCP 8.5. La différence majeure est l'ampleur considérable que prend le phénomène pour la période. Une augmentation de 45% des sécheresses et de 32% des sécheresses éligibles est observé, là où le scénario 8.5 faisait état d'une augmentation de 15% seulement. Ainsi, pour cette période, le scénario 4.5 est plus pessimiste que le scénario 8.5. Cela peut s'expliquer par le fait que la période choisie pour l'analyse des résultats n'est pas suffisamment grande et, par conséquent, l'aléa des données simulées rend cette période plus à risque pour le scénario 4.5. Toutefois, ceci constitue un épiphénomène dans la mesure où le scénario apparaît comme bien plus optimiste en particulier à partir de 2050 où un vrai changement est observé, encore une fois à l'instar du RCP 8.5.

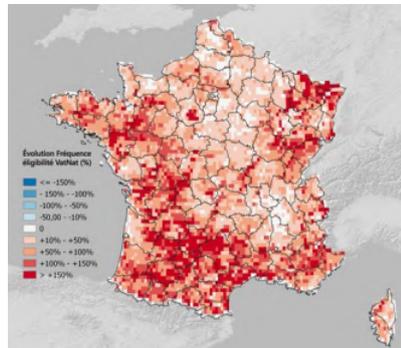
**Climat 2050** De même que pour le scénario 8.5 (figure 2.29c), il est clair qu'un changement s'opère à horizon 2050. Le scénario 4.5 ici retenu étant beaucoup plus optimiste, le nombre de sécheresse est nettement moins important qu'en scénario 8.5 et diminue même par rapport à 2035. C'est à partir de 2050 que devraient donc voir s'opérer les effets de la politique climatique internationale actuelle et des prochaines années. Les sécheresses augmentent de 38% par rapport à 2020 et le nombre de sécheresse éligibles de 25%. Les zones touchées sont aussi très différentes. En effet, le bassin méditerranéen qui était la zone la plus touchée et la plus victime du changement soudain de l'ampleur de la sécheresse en 2050 pour le 8.5 semble ici moins impactée. Il semblerait donc que c'est dans cette zone que le dérèglement climatique aura le plus gros impact. A contrario, c'est plutôt le nord-est de la France qui serait touché dans ce scénario alors qu'il était assez épargné en 8.5.

**Climat 2085** Enfin, pour le climat 2085 (figure 2.29d), les régions impactées diffèrent peu de celles du RCP 8.5 si ce n'est le bassin méditerranéen qui semble une nouvelle fois moins touché par la sécheresse. L'ouest de la France semble beaucoup plus impacté que l'est. Les sécheresses augmenteraient sur cette période de 48% et les sécheresses éligibles de 34% par rapport à 2020 ce qui est légèrement plus qu'en 2035. Cette hausse est très faible et aucunement comparable à celle observée pour le scénario 8.5.

En conclusion, ce scénario se montre beaucoup plus optimiste que le scénario 8.5 à l'échelle de la France et semble relativiser les effets du réchauffement climatique sur le nord-ouest de la France et le bassin méditerranéen qui étaient les premières victimes des augmentations de sécheresse. Dans ce scénario, c'est le bassin parisien qui subirait le plus de changements par rapport au climat 2020. L'élément primordial à remarquer est la différence de nombres de sécheresses entre les deux scénarios. Là où, pour un nombre important de communes le nombre de sécheresses dépassait 50 en scénario 8.5 d'ici la fin du siècle, ce chiffre peine à atteindre les 35 en 4.5 témoignant là encore de la différence d'ampleur de la sécheresses entre ces deux scénarios.

### 2.3.7 Validation

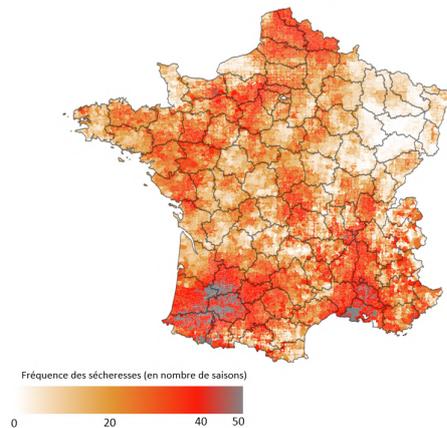
#### Comparaison à d'autres sources



(a) Estimation de la sécheresse par Covéa à horizon 2050. Source : COVÉA (2022)



(b) Estimation de la sécheresse par la FFA à horizon 2050. Source : FFA (2022a)



(c) Estimation de la sécheresse par notre modèle à horizon 2050

FIGURE 2.30 : Cartes de la sécheresse à horizon 2050

Les résultats du modèle ont été comparés aux résultats issus du livre blanc de Covéa (figure 2.30a), rare documentation traitant avec précision de projection climatique sur le risque sécheresse. La méthode utilisée par Covéa est très différente de celle employée pour ce mémoire faisant notamment appel à une approche multi-modèles. Les résultats sont probants, l'augmentation de la fréquence de la sinistralité sécheresse éligible en 2050 est de l'ordre de 70% pour Covéa et de 69.5% pour notre modèle. Les régions touchées relevées par Covéa sont le sud de la France, le bassin méditerranéen et le bassin aquitain. Il a aussi été notifié que les régions épargnées comme la Bretagne ou le nord seront touchées. Les conclusions sont donc identiques. Notre modèle semble donc en phase avec celui utilisé par Covéa.

Une autre étude semblable est celle de la (FFA, 2022a) qui utilise deux indicateurs météorologiques très différents des nôtres à savoir les précipitations inférieures à la médiane et les températures supérieures au 3<sup>ème</sup> quartile avec deux modèles IPSL<sup>1</sup> et MPI<sup>2</sup>.

<sup>1</sup>Institut Pierre-Simon Laplace

<sup>2</sup>Max Planck Institute of Meteorology

Leurs conclusions (figure 2.30b) restent proches des nôtres pour l’aspect sécheresse avec des augmentations marquées des sécheresses dans les départements de la Haute-Garonne, de la Gironde, des Bouches-du-Rhône, du Tarn-et-Garonne et du Tarn.

Comme nous l’avons vu auparavant, (cf 2.3.6) le point commun le plus remarquable entre ces deux études et nos résultats est l’impact majeur du réchauffement climatique sur le Sud-Ouest de la France à horizon 2050. On observe également une disparité certaine entre les cartes de la FFA (2022a) suivant les indices choisis. Ceci montre à quel point le choix de ces derniers peut être déterminant.

De manière générale, les résultats de ces études semblent proches. Le Sud de la France semble particulièrement marqué. Une légère différence peut également être notée sur l’Est de la France pour lequel notre carte et celles de la FFA (2022a) ne semblent pas présenter de situations de sécheresses singulières alors que c’est le cas pour COVÉA (2022). Ces différences restent toutefois marginales et peuvent être rattachées au choix de l’indice ou à des aléas sur la période choisie si elle est trop petite.

### 2.3.8 Conclusion

En conclusion, le premier élément qui mérite d’être noté est la grande différence de régions touchées entre les scénarios 4.5 et 8.5 et en particulier le bassin méditerranéen. Alors qu’il est la région majoritairement exposée au risque en 8.5, il est nettement moins exposé en 4.5. On voit aussi l’apparition de régions plus exposées comme le nord-est ou le nord-ouest à des horizons de temps différents de ceux du 8.5 et certaines régions presque complètement épargnées comme les Hauts-De-France.

Le second élément, et le plus important, est la différence sensible de sécheresse observée entre les deux scénarios. Des écarts majeurs ont ainsi pu être notés à partir de 2050 notamment où le scénario 8.5 prévoit presque deux fois plus de sécheresse qu’en 4.5.

### 2.3.9 Limites du modèle

Ainsi, les données du modèle et leur cohérence ont été favorablement testées ainsi que les résultats (backtesting, comparaison...). Cependant, le modèle comporte quelques limites qui pourraient être examinées :

- La continuité géographique et temporelle des résultats
- la sensibilité aux paramètres :
  - les indices de sécheresse : ici, seuls deux d’entre eux ont été testés
  - le choix de l’échelle de temps pour la calibration de l’indice ou encore le calcul de la période de retour.
  - le calcul de l’ETP : la formule de Penman Monteith par exemple (WIKIPEDIA, 2021a), pour laquelle il existe différents paramétrages (PM et FAO) (DRIAS, 2023e) pourrait constituer une alternative.
  - le critère de calcul de la sécheresse. Ici, le but étant de mesurer l’impact des changements législatifs, seule la méthode utilisée par le régime CatNat a été considérée.

On pourrait aussi apprécier une plus grande profondeur historique pour les données.

## Chapitre 3

# Perspectives d'évolution financières

Cette partie a pour but, sur la base des résultats du modèle sécheresse qui vient d'être présenté, de calculer une estimation des coûts de la sécheresse sur les horizons de temps étudiés et selon des réformes et lois touchant la sécheresse dans le régime CatNat.

### 3.1 Mise en place du modèle de coûts

#### 3.1.1 Données et mise en place du modèle

Disposant d'un modèle de sécheresse, le but est maintenant d'établir un coût moyen par sécheresse pour toutes les communes afin d'élaborer un modèle de coût à l'échelle de la France. Pour établir ce coût, nous possédons plusieurs jeux de données mis à disposition par l'observatoire national des risques naturels (ONRN) et basés sur des données fournies par la CCR (GÉORISQUES, 2023b). Créé en 2012, suite aux conséquences catastrophiques de la tempête Xynthia de 2010, l'Observatoire National des Risques Naturels (ONRN) est un organisme du ministère de la transition écologique ayant pour objectifs d'améliorer la connaissance des risques, de favoriser leur prévention et d'alimenter un dispositif d'évaluation et de prospective. L'ensemble des montants utilisés dans cette partie sont nets de franchise. Une modification de la franchise n'a pas été retenue, cette dernière ayant reçu un avis défavorable dans le dernier rapport d'information (ASSEMBLÉE NATIONALE, 2023).

Des données d'assurance auraient permis de rencontrer moins de difficultés dans la mise en place d'un modèle de coût et auraient permis d'avoir plus de variables capables d'expliquer ce coût comme le type de bâti ou la nature du terrain couvert. En se basant sur ces réflexions, il est d'autant plus pertinent de prendre de grandes périodes afin de minimiser ces largesses du modèle.

Ainsi, sont mis en ligne sur le site Georisques (GÉORISQUES, 2023a) :

- les coûts moyen et cumulé par commune des sinistres au titre des mouvements de terrain différentiels consécutifs à la sécheresse et à la réhydratation des sols sur la période 1995-2019 (Mise à jour mars 2023)
- la fréquence par commune des sinistres au titre des mouvements de terrain différentiels consécutifs à la sécheresse et à la réhydratation des sols sur la période 1995-2019 (Mise à jour mars 2023)
- le S/P par commune au titre des mouvements de terrain différentiels consécutifs à la sécheresse et à la réhydratation des sols sur la période 1995-2019 (Mise à jour mars 2023) : les S/P sont les ratios moyens sinistres à primes. Ils sont calculés à partir des coûts des sinistres mouvements de terrain différentiels consécutifs à la sécheresse et à la réhydratation des sols et des primes CatNat acquises extrapolés à l'ensemble du marché de l'assurance pour la période 1995-2019.

Nous utilisons le coût cumulé qui se présente par fourchette avec les fourchettes suivantes :

TABLE 3.1 : Répartition des communes en fonction du coût cumulé par fourchettes

Fourchette de coût	Nombre de communes	Pourcentage
0 € - 100 k€	3508	10%
100 k€ - 500 k€	3503	10%
500 k€ - 2 M€	2438	7%
2 M€ - 5 M€	748	2%
5 M€ - 10 M€	272	1%
10 M€ - 50 M€	170	0.5%
Supérieur à 50 M€	8	0.002%
Pas de sinistre répertorié à la CCR	24192	69%

En supposant que les sinistres sont répartis de façon uniforme entre ces fourchettes, nous allons chercher le quantile permettant de représenter au mieux le coût de la sécheresse sur la période 1995-2019. Ce coût est d'environ 11,1 milliards d'euros d'après le graphique 1.9 de la FFA à coûts constants 2021. On cherche alors le quantile permettant, en l'appliquant à chaque fourchette, de retrouver ce coût. On trouve alors le quantile à 33% pour représenter au mieux ce coût. Ainsi, pour le premier intervalle on retient un coût cumulé de 33 k€, 233 k€ pour le deuxième, etc..

Le nombre de déclarations sécheresses est lui récupéré sur le site de la CCR (2023a).

Etant donné qu'il y a plus de 2/3 des communes françaises sans historique de coûts pour la période 1995-2019, le coût moyen d'une sécheresse par commune sera calculé à l'échelle de région ou au besoin de groupes de régions. Cette topographie du coût a pour but de prendre en compte le coût de reconstruction ou des matériaux qui peut varier d'un département à l'autre.

De plus, l'argilosité de la commune joue un rôle important dans le calcul du coût puisqu'une sécheresse dans un département très argileux engendrera probablement un coût beaucoup plus important en cas de sécheresse. Ainsi, ce coût moyen se calcule en plusieurs étapes. D'abord, il faut diviser le coût cumulé par commune par le nombre de reconnaissances CatNat sécheresse pour la commune afin d'obtenir par commune le coût moyen d'une reconnaissance CatNat.

Pour les communes disposant de coûts historiques cette donnée est conservée. Elles auront donc un coût moyen par reconnaissance CatNat.

Pour les communes ne disposant pas de données historiques, un GLM (WÜTHRICH et MERZ, 2023) par région est réalisé. Ce GLM prend en compte l'ensemble des données mises à disposition par l'ONRN et présentées en annexe A.5. Il s'agit des variables que nous utilisons pour le GLM.

Les communes n'ayant pas de logements sont enlevées de la base. Les logements représentent ici les maisons individuelles. Le nombre de données historiques est assez inégale suivant les régions : certaines d'entre elles ne disposent pas de suffisamment de données pour établir un GLM. Ainsi, pour certaines d'entre elles il est nécessaire de les regrouper. C'est le cas de la Bretagne et de la Normandie regroupées avec les Pays-de-la-Loire et de la Corse avec la région Provence Alpes Côte d'Azur (PACA).

Ensuite, pour chaque GLM, la fonction de coût est tracée. C'est alors que la famille du GLM est choisie. Pour chacun des modèles, des lois Gamma, normale et log-normale sont testées. Les lois Gamma et normale appartiennent à la famille exponentielle (annexe A.1) et les fonctions de lien suivantes ont donc été testées :

Distribution	Fonction de lien canonique	Autres fonctions de lien testées
Gamma	Identité	Inverse, Log
Normale	Inverse	Identité, Log

TABLE 3.2 : Tableau des distributions et des fonctions de lien

Les résultats n'étant pas satisfaisants, et au vu des données de coûts dont on dispose, une loi log-normale a été testée. Cette loi n'appartenant pas à la famille exponentielle, une méthode différente est adoptée, tirée de l'ouvrage WÜTHRICH et MERZ (2023). La loi log-normale constitue en cela une amélioration de la qualité d'une loi gamma mais présente comme limite d'avoir une transformation inverse compliquée et donnant peu de visibilité. De plus, aucune information sur le biais ne peut-être recueillie (WÜTHRICH et MERZ, 2023). La loi log-normale a été la loi retenue pour l'intégralité des GLM sur la base des valeurs des AIC (méthode présentée ci-après). Cette dernière n'appartenant pas à la famille exponentielle, il convient de faire un GLM de loi normale sur le log des coûts puis de corriger le biais. Dans le cas ci-présent le biais se corrige en multipliant par  $e^{\frac{\sigma^2}{2}}$  (WÜTHRICH et MERZ, 2023). De plus, comme il s'agit d'une loi normale, la dispersion est égale à  $\sigma^2$  (cf A.1.2). Il est donc facile de corriger le biais.

Le but de cette partie est donc d'expliquer au mieux une variable  $Y$ , représentant la sinistralité RGA d'une commune pour une reconnaissance CatNat de sécheresse en fonction de variables explicatives  $X_i$  reprenant l'argilosité des communes et l'ancienneté de construction des bâtiments. La méthode d'un GLM a donc été choisie.

**Généralités sur les modèles linéaires généralisés** Les modèles linéaires généralisés (GLM) ont été introduits en statistique par John Nelder et Robert Wedderburn au début des années 1970. Ils sont composés d'un prédicteur linéaire  $\nu_i = \beta_0 + \beta_1 x_{i,1} + \dots + \beta_p x_{i,p}$  et de deux fonctions :  
— une fonction de lien  $g$  qui décrit comment la moyenne,  $E(Y_i) = \mu_i$ , se comporte par rapport au prédicteur linéaire  $g(\mu_i) = \nu_i$  ;  
— une fonction de variance  $V(Y_i) = \phi V(\mu_i)$ . On appelle  $\phi$  le paramètre de dispersion et nous le considérons constant.

Contrairement à la régression linéaire classique, les GLM ne supposent pas de distribution normale sur la variable réponse. Les GLM permettent de traiter de manière unifiée toutes les distributions de la famille exponentielle, qui peuvent être exprimées sous la forme ci-dessous :

$$f(y|\theta, \phi) = a(y, \phi) \exp \left\{ \frac{y\theta - k(\theta)}{\phi} \right\} \quad (3.16)$$

Avec :

- $\theta$  un paramètre dans  $\mathbb{R}$ , appelé paramètre naturel ou paramètre canonique ;
- $\phi \in \mathbb{R}_+$  le paramètre de dispersion contrôlant la variance. Lorsqu'une pondération est nécessaire, on note  $\omega$  les poids choisis, et on substitue  $\phi$  par  $\phi_\omega$  ;
- $a(\cdot)$  et  $k(\cdot)$  des fonctions données, le choix de  $k(\theta)$  déterminant la distribution de la variable réponse. Pour estimer les paramètres d'un GLM, on passe généralement par la méthode du maximum de vraisemblance (2.1.1). A l'issue de l'élaboration des GLM, quelques tests sont performés afin de vérifier les hypothèses suivantes du GLM :
  - les résidus sont centrés et ne sont pas corrélés
  - homoscedasticité des résidus
  - gaussianité des résidus.

Afin de mieux montrer comment ces GLM ont été obtenus, l'exemple de la région Ile-de-France est pris. La première étape consiste à séparer le jeu de données en 2 : un jeu de données *entraînement* qui sert à calculer les coefficients du GLM et un jeu de données *test* qui sert à comparer les prédictions du GLM avec d'autres valeurs connues.

En raison d'un manque important de données, cette méthode assez simple a été retenue. Toutefois, une méthode comme la validation croisée (WÜTHRICH et MERZ, 2023) pourrait lui être préférée. L'Ile-de-France étant une région assez argileuse, on s'attend à voir apparaître comme variables explicatives des variables reliées au nombre ou au pourcentage de logements exposés à un aléa moyen-fort. Les variables sont éliminées, et les lois choisies, en utilisant le critère d'information d'Akaike (AIC). Cette méthode est facilement implémentable à l'aide de la fonction `Step` sur R (2023). L'AIC se calcule de la façon suivante :

$$\text{AIC} = 2k - 2 \ln(L)$$

avec :

- $k$  le nombre de paramètres à estimer du modèle
- $L$  le maximum de la fonction de vraisemblance du modèle.

Il s'agit d'un estimateur de la qualité d'ajustement du modèle aux données. Plus l'AIC est faible, meilleure est la qualité d'ajustement du modèle.

Afin de savoir quelles variables explicatives conserver, la fonction `Step` sur R propose trois méthodes de choix de variables :

- la méthode « forward » qui consiste à partir d'un modèle vide et à ajouter à chaque étape la variable qui améliore le plus le critère de sélection (AIC ici). Le processus s'arrête lorsqu'aucune variable supplémentaire n'améliore l'AIC,
- la méthode « backward » qui consiste à partir d'un modèle incluant toutes les variables explicatives et à supprimer la variable qui améliore le plus l'AIC. Le processus s'arrête lorsque qu'aucune élimination de variable n'améliore la qualité du modèle,
- la méthode « both » qui combine les deux approches et commence avec un modèle vide et ajoute ou retire des variables afin d'améliorer l'AIC.

L'ensemble de ces méthodes a été testé dans l'élaboration des GLM.

Après que le GLM a été retenu, deux tests sont performés :

- Un test de Durbin-Watson dont la p-value est supérieure à 5% ce qui permet de s'assurer que l'on ne peut écarter l'hypothèse de non-corrélation des résidus
- Un test de Shapiro-Wilk dont la p-value est supérieure à 5% ce qui permet de s'assurer que l'on ne peut écarter l'hypothèse de gaussianité des résidus.

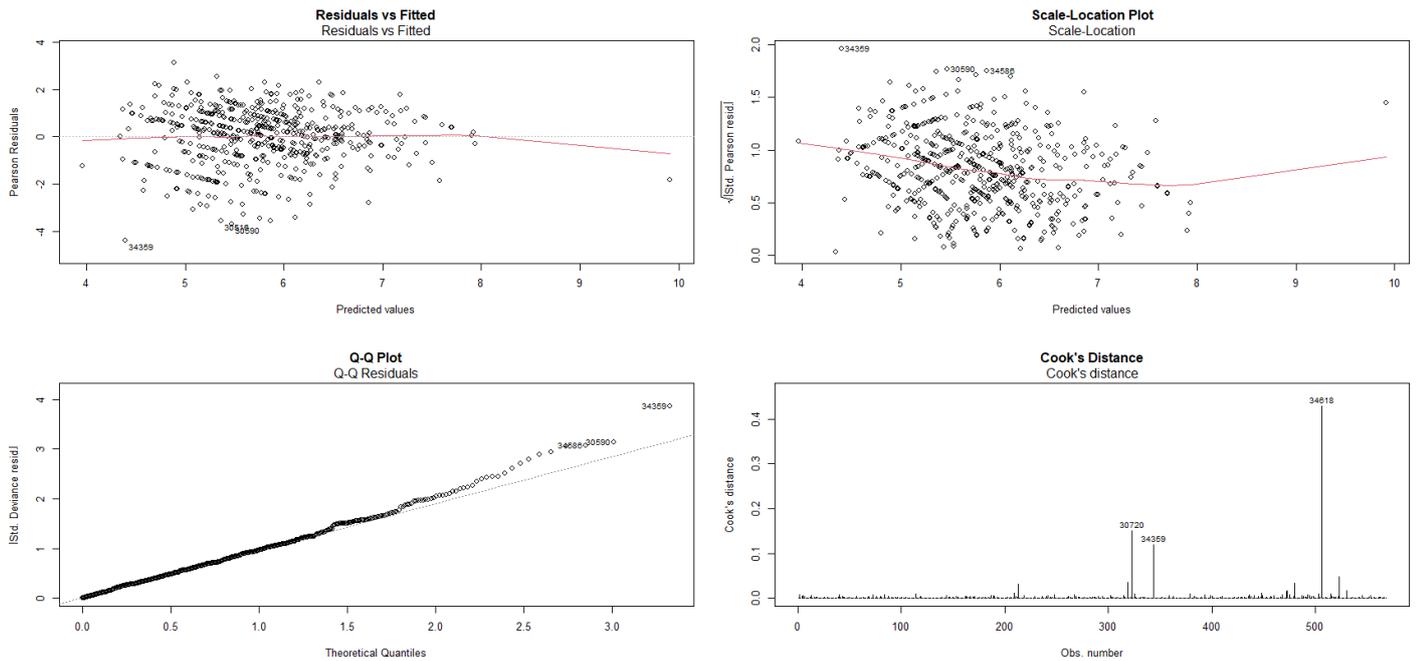


FIGURE 3.1 : Résultats du modèle GLM Ile-De-France

Sur les résultats 3.1 issus du GLM étudié, on observe pour les « *residuals vs fitted* » que les résidus sont bien centrés autour de 0. Sur le « *Scale-Location Plot* », on observe que les résidus sont situés de part et d'autre de la droite. L'hypothèse d'homoscédasticité des résidus est donc vérifiée. Enfin, les deux derniers graphiques présentent les difficultés du modèle à estimer les grandes valeurs et révèlent la présence de valeurs aberrantes qui sont traitées dans la suite du mémoire.

On trouve la p-value la plus faible pour l'intercept ce qui était attendu en raison du faible nombre de données et de leur grande disparité. Toutefois, il ne s'agit pas d'une mauvaise chose : le but de cette méthode était d'établir un modèle plus précis qu'un coût moyen régional, ce qui est le cas. Le modèle prend en compte le fait que l'argilosité du sol peut énormément varier au sein même d'une région. Il existe par exemple 13 départements contenant à la fois une commune dont l'intégralité du territoire est exposé au risque moyen-fort (le plus fort) et une dont le territoire n'est pas du tout exposé au risque (même faible).

On retient finalement les variables suivantes :

TABLE 3.3 : Variables retenues sur la base de leur p-value

<b>Variabiles conservées pour le GLM Ile-De-France</b>
<i>Nombre de logements en exposition moyenne ou forte construits avant 1921</i>
<i>Nombre de logements en exposition moyenne ou forte construits entre 1946 et 1975</i>
<i>Part de la commune en exposition moyenne ou forte (%)</i>
<i>Part de logements en exposition moyenne ou forte construits avant 1921</i>
<i>Part de logements en exposition faible construits entre 1946 et 1975</i>
<i>Nombre de logements en exposition moyenne ou forte construits entre 1921 et 1945</i>
<i>Nombre de logements en exposition moyenne ou forte construits après 1976</i>

Ces résultats sont, par ailleurs, cohérents avec nos prédictions puisqu'il s'agit principalement de variables liées à une exposition moyenne-forte au risque RGA. Pour rappel, l'exposition moyenne-forte des territoires représente 93% de la sinistralité (MINISTÈRE DE LA TRANSITION ÉCOLOGIQUE, 2021).

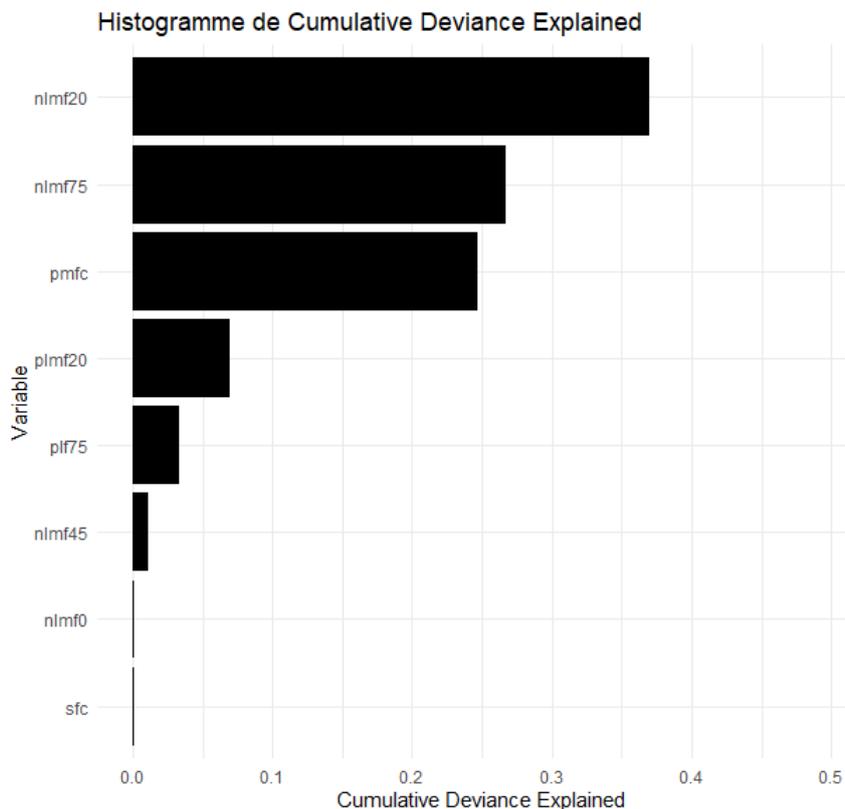


FIGURE 3.2 : Importance des variables pour le modèle de la région Ile-de-France / légende : voir annexe A.5

Le graphique 3.2 explique l'importance de chacune des variables. On retrouve alors les maisons construites avant 1920 et en zone à risque comme variable qui explique le mieux les coûts. On peut imaginer que leur date de construction implique un moins grand soin dans l'élaboration des fondations et donc une plus grande vulnérabilité. Une même explication peut être donnée pour les maisons construites depuis 1975 qui seraient supposément mieux adaptées au risque RGA.

Le nombre de logements en exposition moyenne ou forte construits entre 1921 et 1945 est une des variables les moins pertinentes probablement car elle ne représente que 6% des constructions en France. Viennent ensuite, les parts de logements en aléa moyen-fort et de maisons en aléa moyen-fort construites avant 1920. Cette part pourrait jouer le rôle d'intensité du coût par exemple. On peut imaginer que les coûts engendrés par les sécheresses sont d'autant plus importants que l'est cette part.

Il est à noter que l'ensemble des variables ont été utilisées dans au moins un GLM à l'exception *du nombre de logements en zone à priori non argileuse dans la commune*. Cela s'explique par le fait que dans les zones moins argileuses il y a des coûts liés au RGA, même s'ils sont plus faibles, et ces derniers sont donc majoritairement liés à l'argilosité du sol (même faible).

Il faut également remarquer qu'il aurait pu être pertinent de sélectionner d'autres critères d'observation comme le BIC ou le  $R^2$ .

### 3.1.2 Validation du GLM

Afin de valider le modèle, un dernier examen doit être effectué sur les prédictions et l'ensemble test.

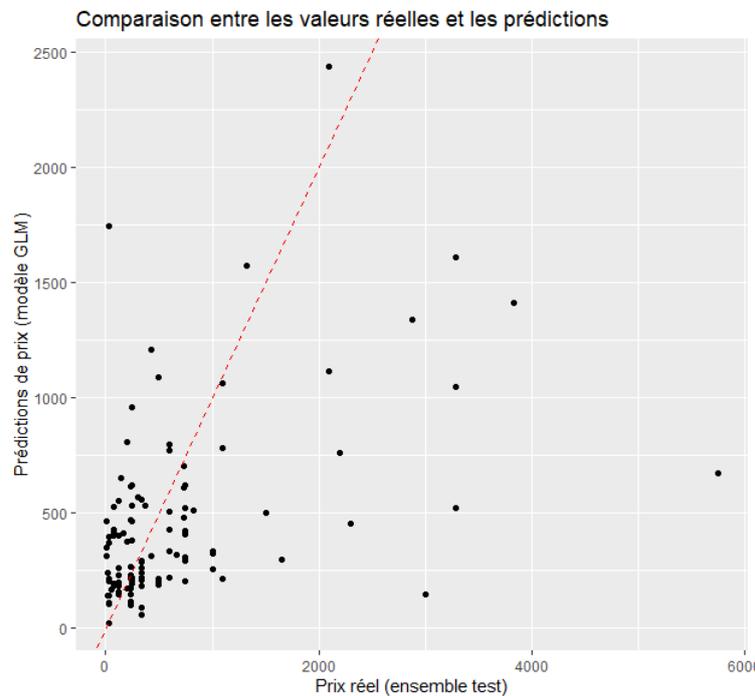


FIGURE 3.3 : Comparaison entre les valeurs réelles et les prédictions

Sur le graphique 3.3, nous observons la difficulté de capter les différents coûts associés aux communes. Ces coûts varient largement suivant les maisons endommagées et l'argilosité des zones qui peut être très différente au sein d'une même région. On observe ainsi les difficultés de notre modèle à capter les spécificités de l'évolution des coûts. On remarque aussi des différences importantes entre prédictions et valeurs réelles lorsque les coûts augmentent ce qui avait été noté lors de la construction du GLM. Ces différences ne semblent toutefois pas rédhibitoires pour la suite de l'étude.

Comme dit précédemment, afin d'obtenir un modèle de coût précis pour un tel risque, il serait appréciable de disposer de données d'assureurs. Elles seraient plus précises et permettraient de retenir un coût à l'échelle de logements ou de quartiers. Toutefois, la modélisation, bien que très imparfaite, est acceptable et permet d'obtenir un modèle de coût plus précis qu'un coût moyen. Au vu des horizons de temps auxquels nous raisonnons, les imperfections du modèle sont jugées acceptables.

La présence de valeurs aberrantes a été relevée dans quelques modèles régionaux. Il s'agit de communes pour lesquelles une sécheresse coûterait plus de 500 millions d'euros pour chaque occurrence alors qu'elles ne sont pas très peuplées. Les communes concernées sont au nombre d'une dizaine et présentent une exposition au risque-argile particulièrement élevée. Elles représentent moins de 1000 logements soit 0,001 % des logements considérés dans l'étude.

Ainsi, pour éviter de surévaluer les résultats, tous les coûts ont été capés à 100 000€ en moyenne par maison en aléa moyen-fort et 50 000€ par maison en aléa faible, par commune ce qui reste dans la fourchette très haute des coûts liés au RGA (1.8). Le coût le plus élevé est alors de l'ordre de 25 millions d'euros par sécheresse.

Ce GLM donne donc, par région, le coût moyen que représente une sécheresse en fonction de différentes variables. Les résultats sont présentés sur la carte des coûts 3.4a ci-dessous :

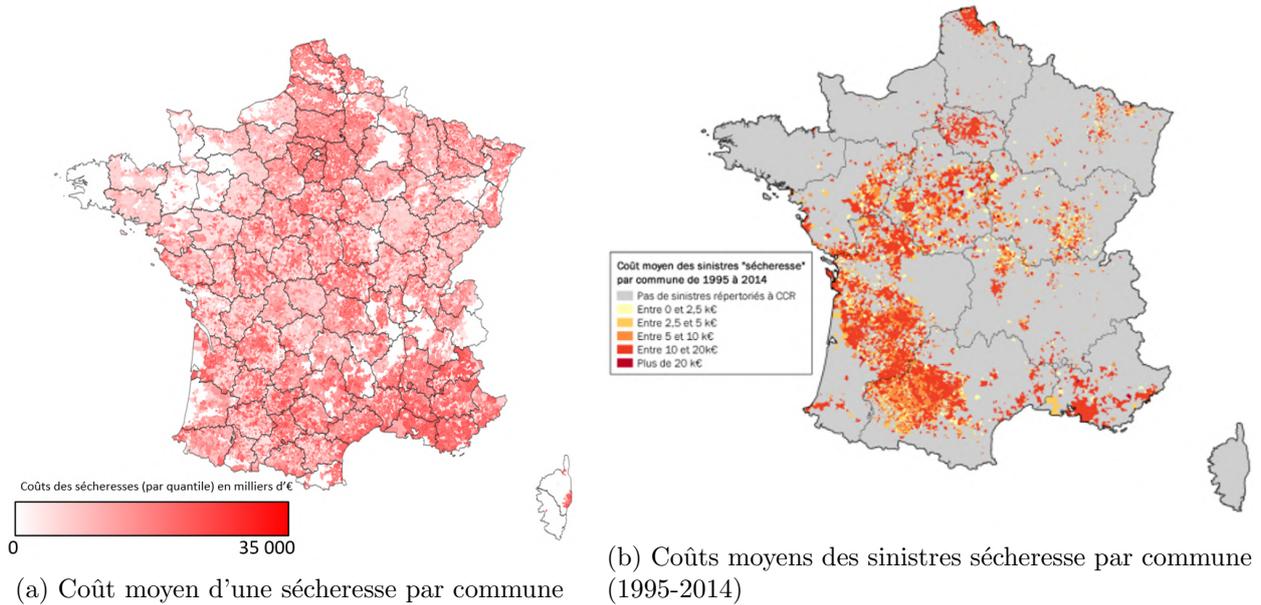


FIGURE 3.4 : Comparaison du modèle de coûts avec les données historiques. Source : MRN (2018)

On y voit le coût moyen d'une sécheresse par commune en vision quantile (cf 3.1.2).

En comparant cette carte à la carte moyenne des coûts de 1994-2015, on remarque logiquement des similarités importantes notamment pour la zone Sud-Est, le croissant argileux, s'étendant du sud-ouest au bassin parisien, le Nord et le Grand Est. Toutefois, certaines régions semblent apparaître sur notre carte de coûts sans avoir fait l'objet d'une sinistralité historique importante : on pense à la Picardie ou encore aux Alpes de Haute-Provence. Cette différence peut s'expliquer, d'une part par le fait que certaines communes aient pu ne pas recevoir de reconnaissances CatNat et donc n'aient pas fait l'objet d'une indemnisation et, d'autre part, par le fait que ces zones n'aient pas encore trop souffert de la sécheresse et donc ne présentent pas de sinistralité historique.

Ainsi, la formule permettant de connaître le coût historique pourrait donc s'écrire :

$$C_s \times \epsilon_{\text{argilosité}} \times I_s \times C_{\text{corr}} \quad (3.1)$$

avec :

- $I_s$  : l'indice de sécheresse saisonnière qui vaut 0 ou 1
- $C_{\text{corr}}$  : un coefficient de corrélation entre la sécheresse et la reconnaissance catnat
- $C_s$  : le coût moyen d'une sécheresse en fonction soit de la sinistralité historique soit du coût moyen régional issu du GLM
- $\epsilon_{\text{argilosité}}$  : le respect du critère géotechnique (valeur de 0 ou 1)

Deux approximations sont faites pour la suite du mémoire : les logements sont considérés comme porteurs de l'ensemble du risque et on suppose que le nombre de logements reste constant dans le temps.

La prise en compte du mouvement des populations pourrait constituer une étude à elle seule.

Le coefficient de corrélation présenté dans la formule 3.1 prend en compte la différence qu'il existe entre sécheresse et déclaration CatNat. En effet, beaucoup plus de sécheresses ont été détectées avec le SWI qu'il n'y a en réalité d'arrêtés CatNat. Cela s'explique par des demandes non déposées ou encore le fait qu'une sécheresse ayant été vécue une année, le maire n'ait pas eu l'utilité de redemander une autre déclaration dans les années suivantes. Cet indice peut ainsi être vu comme le nombre de sécheresses effectives nécessaires avant qu'une commune nécessite une déclaration CatNat pour dommages. Dans les faits, cet indice prend en compte le fait, qu'en raison des premiers balbutiements du régime à ses débuts, la plupart des déclarations CatNat pour les communes permettaient d'assurer, non pas une sécheresse, mais les sécheresses de plusieurs années d'absence d'arrêtés CatNat. Cet indice peut ainsi également être vu comme un indice de retraitement des données.

Ce coefficient est calibré sur la donnée de la FFA de 13,8 milliards d'euros de dégâts sur la période 1989-2019. On trouve alors un coefficient de 0,51 (environ 1/2). On peut donc l'interpréter de la manière suivante : jusqu'à 2019, il y avait une reconnaissance CatNat toutes les 2 sécheresses en moyenne environ. En appliquant cette méthode sur les données dont nous disposons pour l'année 2003, on trouve un montant de 1,7 milliards au lieu des 2,1 milliards effectifs qu'a coûté la sécheresse de 2003 (FFA, [2022b](#)). Cette différence est tolérable mais nous amène à étudier les coûts sur les autres années.

De manière plus générale, on peut étudier les coûts historiques de la sécheresse sur la période 1999-2019 à ceux prédits par le modèle en figure 3.5. 1999 correspond ici à l'année d'implémentation du critère météorologique.

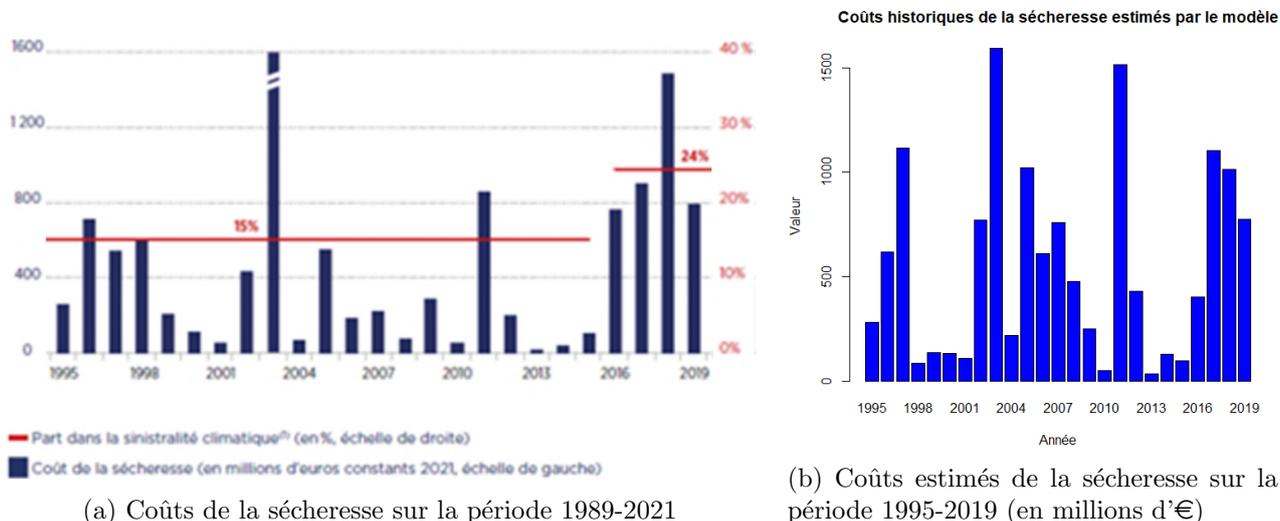


FIGURE 3.5 : Comparaison entre les coûts historiques de la sécheresse et ceux estimés par le modèle de coûts

Notre modèle réplique bien les tendances de la courbe et notamment la sécheresse historique de 2003. De plus, le nombre de reconnaissances CatNat accordé ayant été revu à la baisse après la sécheresse de 2003, voir que le modèle a tendance à surévaluer les coûts survenant à la fin des années 2000 n'est pas étonnant. Quelques différences peuvent être observées pour les années 2010, notamment le fait que 2017 est plus coûteux que 2018 d'après le modèle. Cela peut également s'expliquer par la présence d'un coût de rattrapage pour des sinistres de l'année 2017 traités une année plus tard.

Le modèle semble donc dans l'ensemble être en adéquation avec les données historiques bien qu'ayant une légère tendance à surestimer les événements lors d'années de faibles sécheresses et à le sous-estimer pour les plus fortes.

Le choix a été fait pour présenter les cartes de coûts de les présenter par quantile car certaines communes totalisent des coûts de sécheresse bien plus importants en raison de leur densité de population. Par exemple, à coûts égaux, une commune de 10 000 habitants sera 100 fois plus touchée qu'une commune de 100 habitants et donc 100 fois plus visible. Ainsi, 100 communes de 100 habitants très touchées sont à peine visibles alors que la commune de 10 000 habitants le sera.

Il s'agit de la raison pour laquelle il est très difficile de représenter correctement les coûts sur une carte. La vision quantile tente de limiter cet effet puisque 84,6% des communes comptent moins de 2000 habitants : les densités de population jouent donc un rôle moins important. Il est toutefois nécessaire de garder à l'esprit que si une commune est considérablement plus peuplée que la moyenne, elle a plus de chance d'apparaître très touchée.

Dans une première étape, on compare la carte des coûts historiques avec celle que l'on obtient à l'aide du modèle et des données historiques 3.6 :

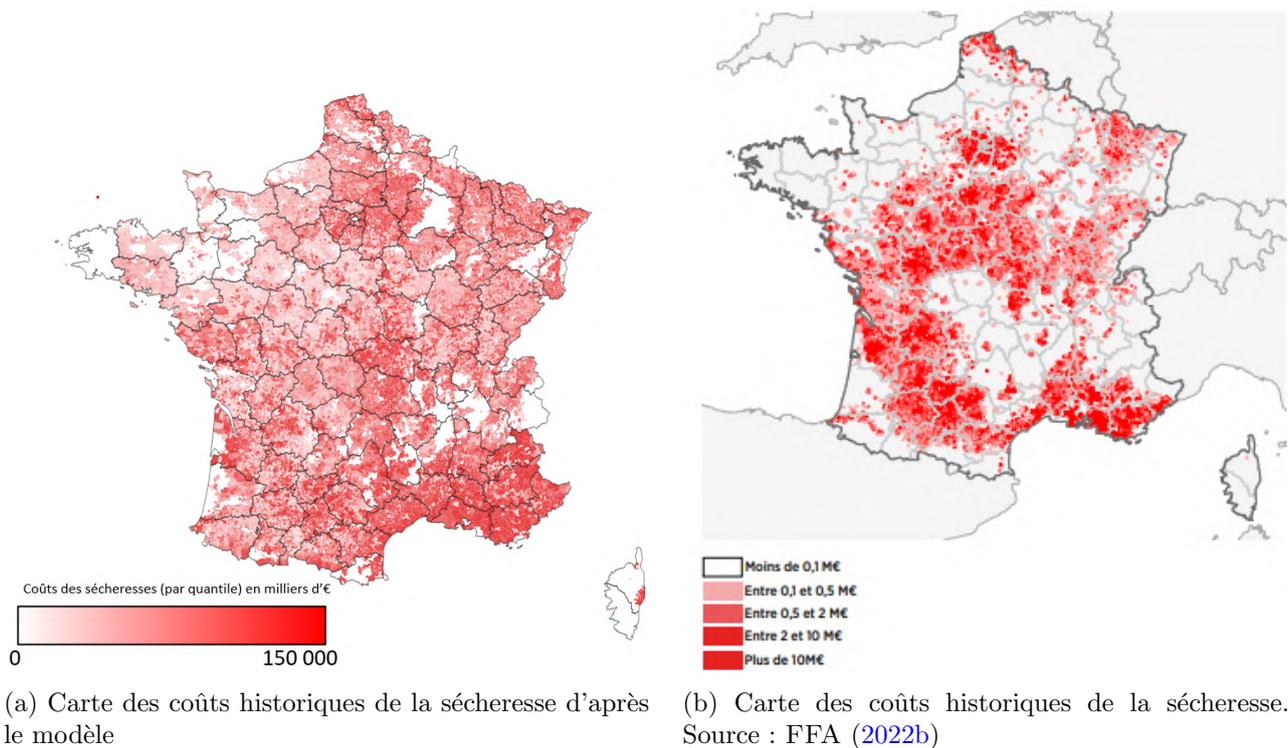


FIGURE 3.6 : Comparaison entre les cartes des coûts réelle et modélisée

La carte historique est impossible à reproduire à l'identique dans la mesure où seul un tiers des communes ont été couvertes jusque-là pour le risque RGA et que des particularités administratives et l'implémentation tardive du critère météorologique ont pu biaiser les chiffres effectifs. L'important est donc de retrouver une similarité dans les foyers de sécheresse et de coût dans les zones les plus à risque. Le résultat est assez satisfaisant. Le sud-est de la France apparaît clairement sur les deux cartes comme la zone la plus coûteuse. De plus, l'intégralité des foyers de sinistralité historique sont aussi présents sur la carte issue du modèle. On y retrouve le nord de la France, le bassin parisien, le croissant argileux et des communes dans le Puy-De-Dôme.

La première carte étant en vision quantile, cela explique aussi le fait que des régions apparaissent en rouge même si, le coût qu'elles entraînent pour les sécheresses est faible. Enfin, le modèle étant un coût moyen, il est normal que certaines communes accusent aujourd'hui des coûts pour le modèle alors qu'elles n'ont pas encore fait l'objet de sinistralité sécheresse. Le but étant d'avoir en moyenne une sinistralité proche de la sinistralité constatée ce qui est vraisemblablement le cas au vu des coûts observés pour la sécheresse sur les graphiques précédents (cf 3.1.2).

Dans le reste de l'étude la période historique désigne la période 1989-2019. Les données de SWI de Meteo-France ont été utilisées pour cette période. Avec ces hypothèses, on trouve les résultats suivants.

### 3.1.3 Estimations du coût de la sécheresse

**Les cartes de coûts** A la vue de l'ensemble de ces cartes, il est clair que le facteur prédominant du coût du risque RGA n'est pas la récurrence des sécheresses mais bien l'exposition à l'argilosité du sol pour certaines régions comme cela a été décrit dans la première partie de ce mémoire. En effet, les cartes de coûts varient très peu de l'une à l'autre en termes de zones touchées. Seuls les coûts évoluent de manière considérable. Ainsi, pour la suite de l'étude, les cartes de coûts ne sont pas présentées et les coûts sont, eux, présentés à l'aide de tableaux.

Dans la suite, l'ensemble des résultats est la somme moyenne annuelle sur 20 ans (30 ans pour la période historique et le climat 2085) pour toute la France des dégâts estimés du modèle. Les coûts sont présentés en milliards d'euros.

#### RCP 8.5

**Climat 2020** La localisation du risque se révèle être assez proche de la carte des coûts historiques ce qui est logique puisqu'elles sont concomitantes. Les zones touchées restent les mêmes : le nord, les bassins parisien et aquitain et surtout le sud-est. Le coût estimé pour cette période par le modèle est de 18,85 milliards d'euros, bien supérieur aux 13,8 milliards de la période historique. Le coût moyen annuel estimé est donc proche du milliard d'euros alors qu'il était inférieur à 380 millions d'euros sur la période historique 2003-2015 (COVÉA, 2023).

**Climat 2035** Cette période ne présente pas d'évolution importante par rapport au climat 2020 ce qui est cohérent avec l'évolution des sécheresses. Le coût pour cette période atteint 19,7 milliards d'euros ce qui est légèrement plus élevé que pour la période 2020.

**Climat 2050** Cette période est celle pour laquelle les changements des épisodes de sécheresse et de leur intensité sont les plus importants. Ceci ne se voit pas au niveau des zones touchées qui restent principalement les mêmes en raison notamment du coût élevé des sinistres pour ces régions dû à leur forte exposition au risque. Cette intensité se fait donc fortement ressentir en termes de coûts. En effet, la sinistralité estimée pour cette période atteint les 37,6 milliards d'euros et donc presque 2 milliards d'euros par an ce qui est proche du coût estimé pour la sécheresse de 2003. Une évolution du coût maximum de la sécheresse pour une commune est aussi à noter il est alors de presque 230 millions d'euros.

**Climat 2085** Cette période ne présente pas de différences particulières avec la carte de 2050 pour ce qui est des zones touchées. Le coût de la sécheresse pour cette période est de 45 milliards dépassant alors les 2 milliards par an. en termes de coûts pour les assureurs, il s'agit donc de l'équivalent de la sécheresse de 2003 tous les ans. Une autre différence majeure à remarquer est le coût maximum de la sécheresse pour une commune atteignant les 400 millions sur 20 ans et dépassant donc les 20 millions par an en moyenne. Les zones impactées semblent donc être les mêmes que pour le risque sécheresse à savoir le sud de la France, et spécialement le bassin méditerranéen. En raison d'une absence d'argilosité du sol, des régions comme la Bretagne ou la Corse sont très préservées alors que le nord, lui, semble assez touché.

On observe également que le modèle prévoit des résultats différents d'une année à l'autre. Le graphique 3.7 présente les coûts estimés par le modèle de la sécheresse année par année entre 2020 et 2050.

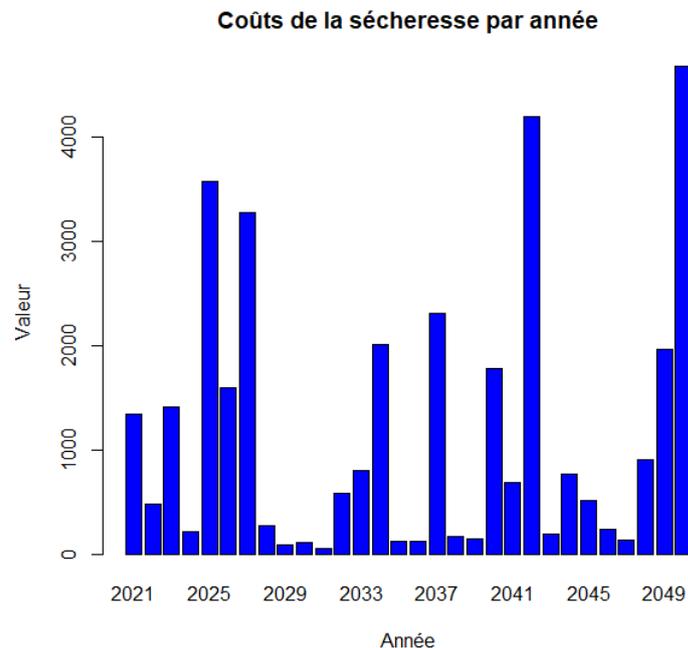


FIGURE 3.7 : Coûts annuels de la sécheresse de 2020 à 2050 (en millions d'€)

Certaines sécheresses pourraient donc dépasser les 3 milliards d'euros (sur un an) et atteindre les 4 milliards d'euros à horizon 2050. Pour rappel, les coûts de la sécheresse de 2022 sont estimés à plus de 3,5 milliards d'euros ce qui constitue le record absolu. Cela pourrait aussi avoir un impact sur le coût de la main d'oeuvre qui se ferait d'autant plus coûteuse que la demande augmente. L'impact climatique joue donc bien un rôle majeur. Pour rappel, ces résultats n'ont pas vocation à être des prédictions annuelles : elles servent bien à décrire un climat général sur plusieurs décennies. Il est donc tout à fait normal que les chiffres de l'année 2022 ne soient pas en accord avec ceux que nous connaissons.

### Résultats du modèle de coûts pour le RCP 4.5

Ces résultats présentent l'impact qu'aurait la sécheresse dans un scénario assez optimiste.

Pour ce scénario, les zones les plus touchées restent les mêmes tant l'argilosité du sol joue un rôle prépondérant dans l'établissement du coût de la sécheresse. Toutefois, des différences de coûts peuvent être notées tant sur le climat 2020 où le coût diminue de 30% pour atteindre les 400 millions d'euros par an en moyenne. Le tournant le plus important a lieu pour le climat 2050. Il s'agit de la période qui marque le changement le plus important et qui est la plus caractéristique du scénario choisi. On observe sur cette période une sinistralité de 19,9 milliards d'euros sur 20 ans ce qui est environ deux fois moins élevé que pour le scénario 8.5 (37,4 milliards d'euros). C'est aussi pour cette période, qu'une différence apparaît sur la localisation de la sinistralité. En effet, comparativement au scénario 8.5 le risque se localise autour du bassin parisien et le sud de la France semble bien plus épargné. La sinistralité reste stable autour du milliard d'euros par an jusqu'à la fin du siècle.

Ce climat se caractérise donc par des zones affectées en lien avec la sécheresse précédemment observée et donc notamment un bassin méditerranéen assez préservé. Les coûts sont relativement moins importants qu'en 8.5 et ce notamment, à partir de 2050. Ils sont d'ailleurs stables sur la période 2035-2100. Cela s'explique par le postulat de base de ce scénario qui est l'endiguement de l'émission des gaz à effet de serre à horizon 2050 afin de tempérer les effets du réchauffement climatique. Il est tout de même à noter que dans ce scénario optimiste le coût moyen annuel de la sécheresse est de 1 milliard d'euros ce qui reste plus de 2 fois supérieur au coût moyen historique de 460 millions d'euros.

Le tableau 3.4, récapitulatif des coûts est commenté ci-après :

Période \ Scénario GIEC	RCP 4.5	RCP 8.5
Histo	0,46	0,46
Climat 2020	0,65	0,95
Climat 2035	1,21	0,99
Climat 2050	1,00	1,87
Climat 2085	1,11	2,25

TABLE 3.4 : Coûts annuels de la sécheresse pour différentes périodes (en milliards d'€)

On y voit ainsi clairement que les coûts sont presque multipliés par deux entre les deux scénarios ce qui amène à prendre les résultats présentés avec quelque peu de recul tant les différences sont importantes entre les deux scénarios.

### Méthode 1%

Une hypothèse qui a été prise par la CCR pour prendre en compte les nouvelles mesures de prévention de la loi ELAN, était de réduire de 1% par an la sinistralité à partir de 2030 dans la modélisation afin de refléter au mieux les effets de cette réforme. On trouverait alors les résultats suivants :

**RCP 8.5** Le tableau 3.5 présente les coûts en prenant en compte cette méthode. Les effets les plus palpables sont observés en 2050 et 2085 ce qui s'explique très simplement par la méthode de calcul employée. On voit une modification significative des résultats. Toutefois, estimer une baisse jusqu'à 1 milliard d'euros par an pour le climat 2085 semble quelque peu optimiste. Pour rappel, cette hypothèse avait été faite pour des études n'allant que jusqu'à 2050, date pour laquelle cette réforme donne des résultats intéressants. Il pourrait donc être pertinent d'évaluer les résultats avec une mesure réduisant de 1% la sinistralité par an entre 2030 et 2050.

Période \ Méthodes de coût	Méthode coût	Méthode coût 1%/an
Climat 2020	0,95	0,94
Climat 2035	0,99	0,92
Climat 2050	1,87	1,43
Climat 2085	2,25	0,93

TABLE 3.5 : Coûts annuels de la sécheresse avec la méthode 1% (en milliards d'€)

**RCP 4.5** Le tableau 3.6 présente les mêmes coûts que précédemment mais en scénario 4.5. Pareillement au RCP 8.5, on observe une diminution pour les climats 2050 et 2085. Une nouvelle fois, le coût pour le climat 2080 semble excessivement optimiste. Il est dans ce cas même égal au coût historique.

Période \ Méthodes de coût	Méthode coût	Méthode coût 1%/an
Climat 2020	0,43	0,43
Climat 2035	1,21	1,12
Climat 2050	1,00	0,79
Climat 2085	1,11	0,45

TABLE 3.6 : Coûts annuels de la sécheresse avec la méthode 1% (en milliards d'€)

Pour la suite, nous ne prenons pas en compte cette hypothèse difficilement chiffrable et un peu optimiste, particulièrement pour la fin du siècle.

*Cette méthode est abrégée en coût UP dans les tableaux.*

## 3.2 Impact des différentes réformes et lois récentes

Les différentes réformes et loi retenues sont les suivantes :

- Modification de la période de retour
- Accumulation des sécheresses
- Modification du taux de sans suite
- Communes limitrophes

*Deux tableaux finaux récapitulatifs des coûts sont présentés en tableaux 3.10 et 3.11.*

### 3.2.1 Implémentations et premiers résultats

D'autres mesures pourraient être implémentées comme l'annualisation du critère de sécheresse. Cette mesure tendrait à diminuer le taux de sécheresses pour les années de faible sécheresse et à l'augmenter pour les années de forte sécheresse.

Afin de mieux observer l'impact de ces réformes d'un point de vue financier, 2 communes ont été choisies pour observer les effets de ces réformes sur une commune à différents horizons de temps. Le focus est fait sur 2 communes pour lesquelles on ne dispose pas de sinistralité historique ce qui permet d'évaluer également le modèle de coûts.

Les deux communes retenues sont Saint-Avé (WIKIPEDIA, 2023b) qui se situe dans le pays de Vannes et Salles (WIKIPEDIA, 2023c), une commune située dans l'aire d'attraction de Bordeaux. La commune de Salles comporte 2940 logements dont 1550 sont fortement exposés au risque et Saint-Avé en compte 3864 dont 698 sont fortement exposées et 926 faiblement.

Ainsi, le modèle estime ces coûts pour les deux communes :

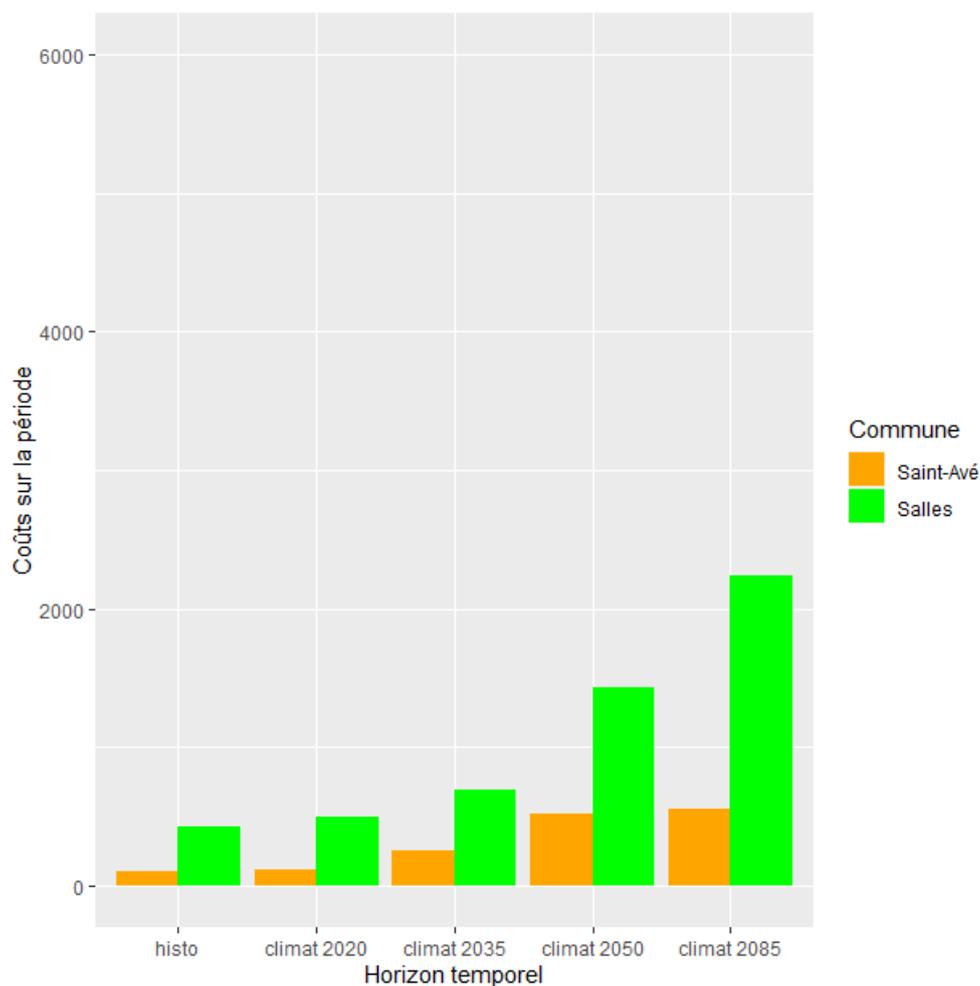


FIGURE 3.8 : Coûts de la sécheresse sur 2 communes à différents horizons de temps (en millions d'€)

La commune de Salles est plus exposée que celle de Saint-Avé ce qui est logique car elle comporte plus de logements très exposés au risque (environ 3 fois plus) et est plus exposé au risque sécheresse selon le scénario 8.5, se situant dans le bassin aquitain alors que Saint-Avé est en Bretagne.

La sinistralité croît de façon importante avec le temps. La sinistralité de la ville de Saint-Avé connaît un vrai choc en 2050 où elle voit sa sinistralité doubler et atteindre le double de la sinistralité de 2020 pour avoisiner les 500 000 euros sur la période.

La croissance de la sinistralité de Salles est encore plus importante, augmentant de façon importante en 2085 comme pouvait le laisser deviner les cartes de sécheresse de la partie 2, allant jusqu'à dépasser les 2 millions d'euros sur 20 ans en climat 2085.

Pour rappel, ces villes n'ont jamais fait l'objet d'une reconnaissance CatNat au titre du RGA et ne présentent donc pas de sinistralité historique.

### Modification de la période de retour

Cette modification fait partie des propositions de loi imaginées par les députées Rousseau et Marsaud (ASSEMBLÉE NATIONALE, 2023). Cette réforme est abrégée en *da* dans les tableaux.

**Présentation méthode de calcul utilisée** Il convient donc d'utiliser une période de retour de 10 ans. Le quantile associé est donc le quantile à 10%. Pour une commune, un mois est en sécheresse s'il est parmi les 2 plus secs des 20 dernières années (au lieu de 50).

**Impact sur les résultats historiques (A.2e)** En dépit de légers changements dans le centre de la France, cette mesure change peu, sur les résultats historiques, les zones touchées. Toutefois, elle a des impacts spectaculaires sur le nombre de sécheresse avec une multiplication de presque 3 du nombre de sécheresses éligibles et une multiplication du coût par 2,7 atteignant ainsi 37,2 milliards d'euros pour la période. Ceci s'explique facilement avec la méthode de calcul utilisée qui considère en sécheresse les quantiles à 10% au lieu de 4%. Il y a donc 2,5 fois plus de chance d'être en situation de sécheresse. Une limite du modèle utilisé ici, est l'estimation du coût pour cette réforme. En effet, on peut raisonnablement envisager une diminution du coût en considérant une telle hausse de sécheresse. Toutefois, cette diminution n'est pas prise en compte en raison de la difficulté rencontrée à l'estimer et la chiffrer. Météo-France avait par exemple chiffré un doublement de l'éligibilité en 2019 (année déjà fortement touchée) (ASSEMBLÉE NATIONALE, 2023).

**Projections climatiques (A.2)** Une nouvelle fois, la mesure ne semble pas affecter les zones touchées. Toutefois, son impact pour les sécheresses et les coûts est incommensurable. Les sécheresses sont multipliées par 2 jusqu'en 2050 puis par 1,6 à partir de 2050 par rapport à la situation où cette mesure n'est pas mise en vigueur. Les coûts sont eux, multipliés par plus de 2 en climat 2020 et 2035 et plus de 1,5 pour 2050 et 2080. Un effet remarquable de cette réforme est son impact naturellement plus important sur les années moins sèches. En effet, les sécheresses devenant de plus en plus courantes vers la fin du siècle, l'effet de cette mesure s'estompe. Ainsi, en prenant du recul, cette mesure permettrait, par sa grande souplesse, de déclarer un très grand nombre de sécheresses pour les prochaines années et donc s'assurer qu'un maximum de sinistrés soient dédommagés. Les effets s'estomperaient au fur à mesure que nous avancerions vers des épisodes de sécheresse de plus en plus récurrents.

**Evolution sur 2 communes-types** L'effet précédemment décrit est facilement observable en s'intéressant à l'évolution de la sinistralité pour les 2 communes-types sélectionnées. On observe un lissage des coûts avec une augmentation considérable de ces derniers dans les premières décennies et un effet qui s'estompe à l'approche de la fin du siècle.

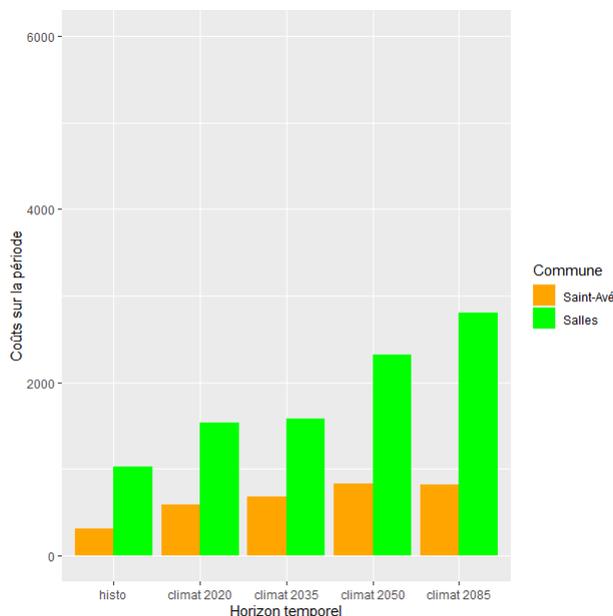


FIGURE 3.9 : Coûts de la sécheresse sur 2 communes à différents horizons de temps (en millions d'€) / modification de la période de retour

**Sensibilité au modèle climatique global** Cet effet est d'autant plus visible en étudiant le scénario RCP 4.5, beaucoup plus optimiste. En effet, cette mesure a un effet très important sur les coûts pour ce scénario. Alors que les sécheresses sont beaucoup moins importantes en fin de siècle pour le scénario RCP 4.5, l'implémentation de cette mesure augmente davantage le coût de la sécheresse pour le scénario 4.5 que pour le 8.5 tant il est important pour le 8.5.

Période \ Scénario GIEC	RCP 4.5	RCP 8.5
Histo	1,24	1,24
Climat 2020	1,99	2,17
Climat 2035	2,67	2,18
Climat 2050	2,28	2,97
Climat 2085	2,09	3,11

TABLE 3.7 : Tableau récapitulatif des coûts annuels (en milliards d'€)

**Conclusion** Cette mesure est difficile à estimer et constituera, à n'en pas douter, si elle est adoptée, une augmentation vertigineuse du coût de la sécheresse pour les assureurs. La mesure a d'autant plus d'impact que les sécheresses sont rares à l'instar du début du siècle. On peut toutefois raisonnablement déduire une surestimation certaine du prix en raison du nombre trop élevé de sécheresses estimés par le modèle. Des mesures de prévention devraient en pratique permettre une meilleure résilience face au risque dans le cadre où un tel de nombre de sécheresses seraient déclarées et, de ce fait, une diminution certaine du coût.

### Accumulation des sécheresses

**Présentation méthode de calcul utilisée** Cette modification fait partie des propositions de loi imaginées par les députées Rousseau et Marsaud (ASSEMBLÉE NATIONALE, 2023). Une période de 24 mois est envisagée mais les détours précis de la loi ne sont pas encore dessinés (ARGUS DE L'ASSURANCE, 2023). Ici, le choix a été fait de considérer les sécheresses au sens de McKee (cf 2.2)(MCKEE et al., 1993) pour prendre en compte la succession anormale d'épisodes de sécheresse. Plusieurs méthodes ont été retenues et ont été testées :

- Une durée de 3 mois ce qui correspond à une saison de sécheresse pour le critère de McKee. Ainsi, est considéré en sécheresse le mois dont l'indice SPEI et les 2 précédents sont inférieurs ou égaux à -1.
- Une durée de 6 mois ce qui correspond à deux saisons entières de sécheresse pour le critère de McKee. Ainsi, est considéré en sécheresse le mois dont l'indice SPEI et les 5 précédents sont inférieurs ou égaux à -1.
- Une durée de 18 mois parmi 24 ce qui correspond à six saisons de sécheresse parmi huit pour le critère de McKee. Ainsi, est considéré en sécheresse le mois dont l'indice SPEI et les 23 précédents comportent au moins 18 valeurs inférieures ou égales à -1.

Dans un souci de concision, seule la méthode des 24 mois est présentée ci-après, ayant été jugée la plus pertinente. Les résultats et analyses des deux autres méthodes sont disponibles en annexe A.3. Ces réformes sont abrégées respectivement en *ac3*, *ac6* et *ac24* dans les tableaux.

Ces réformes peuvent être considérées comme des mesures visant principalement des zones en proie à de forts épisodes de sécheresse et de chaleur comme le sud de la France et dont l'indemnité et la reconnaissance de déclaration CatNat peuvent se voir refuser en raison de sécheresses qui « bloquent » le critère météorologique. En effet, deux sécheresses très importantes sur deux années consécutives peuvent empêcher les sécheresses des 48 prochaines années de se retrouver parmi les 2 plus importantes même si elles ont eu un effet destructeur et ont causé de très lourds dommages. Il s'agit donc d'un ajustement permettant d'affiner le critère météorologique.

**Impact sur les résultats historiques (A.6e)** La méthode retenue revient à vérifier que 18 des 24 derniers mois étaient en état de sécheresse (au sens de McKee). Elle prend à la fois en compte la cinétique lente du RGA sans discriminer des communes ayant subies d'importantes sécheresses. La carte obtenue est assez proche de la carte historique, obtenue sans les réformes. Les régions touchées sont les mêmes et pour cause, on trouve une augmentation de 20% des sécheresses éligibles pour une augmentation de 15% du coût. Il s'agit là de chiffres très cohérents avec l'idée de la réforme.

**Projections climatiques (A.6)** Cette mesure présente des caractéristiques proches des projections effectuées en l'absence d'évolutions législatives. L'impact de la mesure est mineur jusqu'en 2035 et représente moins de 5% d'augmentation du coût et du nombre de sécheresses éligibles. Une première augmentation a lieu en 2050 où cette augmentation est de l'ordre de 15%. La dynamique change cependant grandement, à horizon 2085, car les épisodes de sécheresse y sont très fréquents et ce, quelle que soit la méthode de calcul utilisée. On observe alors une augmentation de près de 100% de la sinistralité.

**Evolution sur 2 communes-types** La dynamique observée ici est très intéressante; les coûts augmentent assez peu d'une période à l'autre et c'est après une légère hausse en 2050 qu'une flambée de la sinistralité a lieu à horizon 2085 surtout pour la commune de Salles située dans le sud de la France (région bordelaise). Une nouvelle fois, les chiffres sont à l'image de ce que nous avons pu observer pour la France.

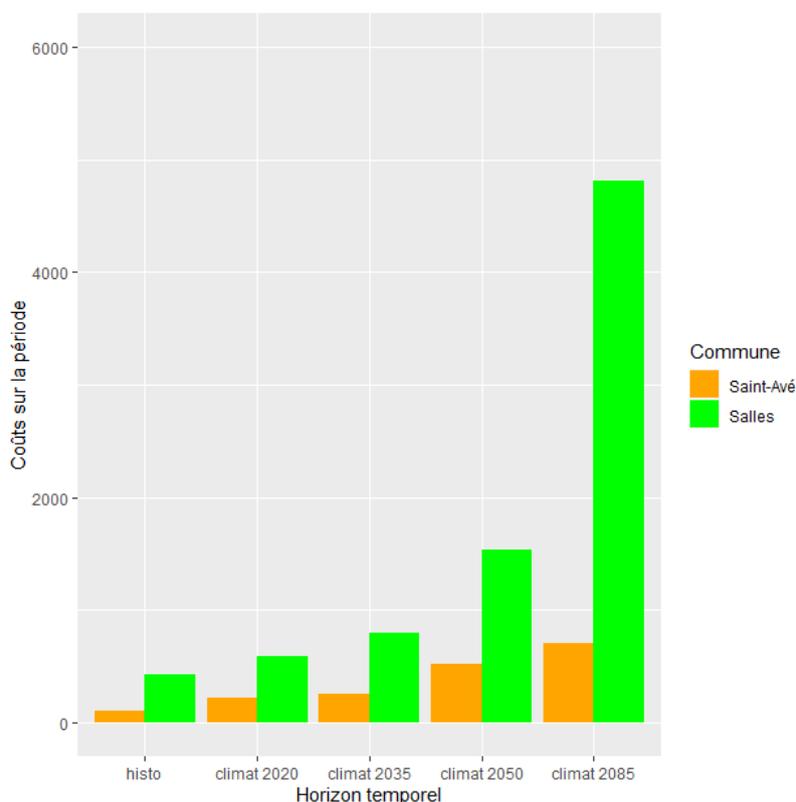


FIGURE 3.10 : Coûts de la sécheresse sur 2 communes à différents horizons de temps (en millions d'€) / accumulation de sécheresse

**Sensibilité au scénario RCP** On observe une différence très importante d'augmentation des coûts entre les deux scénarios. En effet, l'optimisme du scénario 4.5 rend beaucoup plus rare les épisodes de sécheresse et donc l'impact de ces réformes. On remarque alors, une augmentation nettement plus faible des coûts pour le scénario 4.5 et ce, particulièrement, à partir de 2050. A horizon 2085, une différence de près de 3 milliards d'euros par an est constatée entre les deux scénarios. Les chiffres d'accumulation sont, in fine, assez cohérents et montrent une augmentation croissante du coup avec le réchauffement climatique.

**Conclusion** L'implémentation de cette succession anormale de sécheresse est difficile à mettre en place tant il existe de méthodes possibles. Toutefois, la méthode 24 mois semble être un bon compromis. Les conclusions sont claires et semblent tendre, à l'opposé de la modification de la période de retour, vers une augmentation progressive des coûts observés à mesure que le climat se réchauffe avec des différences marquées entre les 2 scénarios. C'est surtout vers la fin du siècle, où les températures ont tendance à grandement croître et le SPEI à prendre des valeurs inférieures à -1, que les coûts engendrés deviennent astronomiques.

### Communes limitrophes

Cette modification fait partie des propositions de loi imaginées par les députées Rousseau et Marsaud (ASSEMBLÉE NATIONALE, 2023). Cette réforme est abrégée en *cl* dans les tableaux.

**Présentation méthode de calcul utilisée** Il s'agit, comme expliqué dans le texte de loi, d'étendre aux communes limitrophes dont la superficie est inférieure à celle de la commune principale le bénéfice de la reconnaissance de l'état de catastrophe naturelle. Cette mesure est implémentée ainsi pour tous les mois.

**Impact sur les résultats historiques (A.3e)** Les zones touchées par la mise en place de cette mesure sont évidemment les mêmes que les zones géographiques historiques. L'intégration des communes limitrophes n'a pas vocation à changer la localisation de la sinistralité. Les sécheresses et les coûts augmentent de 25% environ avec l'implémentation de cette réforme selon le modèle. Il s'agit d'une augmentation légèrement supérieure à celle engendrée par la mise en place de l'accumulation de sécheresses sur 24 mois mais qui reste toutefois négligeable par rapport à la modification de la période de retour.

**Projections climatiques (A.3)** Pour cette réforme, l'augmentation des coûts et des sécheresses est à peu près constante en pourcentage ce qui s'explique facilement par la méthode de calcul. On observe donc quel que soit l'horizon de temps une augmentation de 25% environ ce qui correspond à une sinistralité d'autant plus importante que la sinistralité de base est importante et donc que l'horizon de temps est lointain.

**Evolution sur 2 communes-types** Pour nos deux communes, il existe une commune plus grande qui leur est limitrophe : Vannes pour Saint-Avé et Belin-Béliet pour Salles. Le fait qu'il n'y a qu'une seule commune de plus grande taille que notre commune rend l'impact de cette mesure beaucoup plus faible si ce n'est négligeable. On observe donc une très légère augmentation de la sinistralité pour ces deux communes à horizon 2050 et 2080. Pour une commune de plus petite taille, il aurait pu exister un plus grand nombre de communes limitrophes permettant d'augmenter le nombre de déclarations CatNat sécheresse. Pour Saint-Avé, cette mesure n'a aucun effet : il n'existe pas de communes pour lesquelles Vannes est en sécheresse et Saint-Avé ne l'est pas. Pour Salles, cela augmente le nombre de sécheresses éligibles de 1 à horizon 2050 et de 2 à horizon 2085.

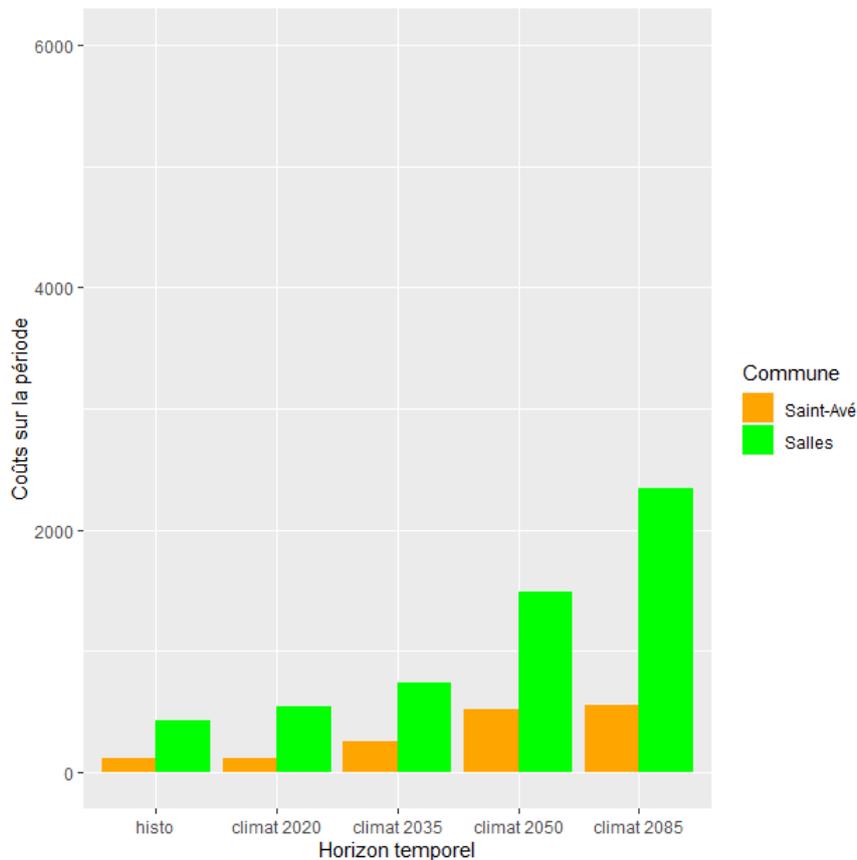


FIGURE 3.11 : Coûts de la sécheresse sur 2 communes à différents horizons de temps (en millions d'€) / communes limitrophes

**Sensibilité au scénario RCP** Il est, ici aussi, possible de remarquer que la valeur de l'augmentation engendrée par la réforme est largement dépendante de la valeur initiale et cette augmentation est toujours d'une valeur proche de 25%. Cette réforme a donc tendance à augmenter avec la sinistralité et donc elle est plus coûteuse pour le scénario 8.5.

Période \ Scénario GIEC	RCP 4.5	RCP 8.5
Histo	0,58	0,58
Climat 2020	0,74	1,12
Climat 2035	1,41	1,16
Climat 2050	1,21	2,12
Climat 2085	1,28	2,68

TABLE 3.8 : Tableau récapitulatif des coûts annuels (en milliards d'€)

**Conclusion** Cette réforme est intéressante à implémenter et vise à éviter des situations pouvant paraître injustes pour certains sinistrés. Elle a tendance à privilégier les communes les plus petites mais surtout à réparer les injustices. Elle n'engendre aucune modification en profondeur du système.

### Modification du taux de sans suite

Les propositions de loi suivantes allant dans le sens d'une modification du taux de sans suite et, plus précisément, des sans suite dus à l'absence de causalité entre les dommages et la sécheresse, la décision a été prise d'envisager une diminution du nombre de cas classés sans suite : (ASSEMBLÉE NATIONALE, 2023)

- Présomption simple de causalité entre l'événement reconnu au titre de la sécheresse et les sinistres survenus dans la commune. L'expert a maintenant à charge de démontrer l'absence (et non plus la présence) de lien entre le sinistre et l'arrêté sécheresse.
- « Faire porter la demande de la commune et la reconnaissance de l'état de catastrophe naturelle sur une année entière, dans un objectif de simplification et de diminution du taux de sans suite », par une association plus facile des dégâts avec l'arrêté sécheresse.
- Prendre comme date d'apparition des fissures le plus favorable des deux événements suivants, dans l'intérêt de l'assuré :
  - soit la date présumée d'apparition des premières microfissures ;
  - soit la date présumée d'aggravation des fissures.
- La création d'un agrément légal pour les experts sécheresse qui serait mis en place en deux temps : d'abord la délivrance de l'agrément et la constitution d'un corps d'experts réputés compétents ; puis, d'ici 2030, l'obligation d'être titulaire de l'agrément pour exercer.

**Présentation méthode de calcul utilisée** D'après une étude FFA (FFA, 2022b), 53% des déclarations de sinistres sécheresses sont classées sans suite. Sur ces sans suite, 52% le sont en raison d'une absence de lien de causalité entre les dommages et la sécheresse et 5% pour des dégâts ne correspondant pas à la date de l'arrêté CatNat. On peut imaginer qu'en raison des différentes mesures prises et de la possible inversion de causalité, certaines des sinistres non assurés en raison d'une absence de lien pourraient l'être à l'avenir. On suppose donc que la moitié des sinistres non indemnisés en raison d'une non-adéquation des périodes de survenance et de reconnaissance CatNat par le passé le seront dorénavant et que 5% des sinistres auparavant non indemnisés en raison d'une absence de causalité le seront aussi. Cela constituerait une diminution de 5% ( $1/2*5\% + 50%*5\%$ ) des cas de sans suite. On peut donc estimer que ce changement du taux de sans suite représente environ 5% des coûts des sécheresses. Par conséquent, l'application d'un coefficient de 1,05 sur les coûts a été établie.

**Tout en 1 (accu24)**

Dans cette partie, est considérée l'adoption de l'intégralité des mesures présentées précédemment. Cette réforme est abrégée en *tt24* dans les tableaux.

**Présentation méthode de calcul utilisée** On considère, dans un premier temps, l'ensemble des réformes et on retient les sécheresses obtenues correspondantes. On calcule le coût associé auquel on ajoute le montant découlant de la diminution possible du taux de sans suite (multiplication par 1,05). Deux méthodes de calcul différentes ont été retenues. L'une utilise l'accumulation de sécheresses 6 mois (cf 3.2.1) et l'autre celle de 24 mois (cf 3.2.1). Cette partie s'intéresse à la méthode de l'accumulation de sécheresses 24 mois. L'autre est proposée en annexe A.4.

**Impact sur les résultats historiques (A.8e)** Cette carte présente une exposition régionale très proche de l'historique. Ici l'accumulation des 24 mois a beaucoup moins d'impact. Toutefois, sur cette période, on remarque tout de même une augmentation extrêmement importante de la sinistralité. On peut ainsi prédire pour cette période des augmentations de la sécheresse et des coûts de plus de 230 et 200 %. Il s'agit ici de chiffres beaucoup plus raisonnables et cohérents que ceux trouvés avec l'autre méthode de calcul de la réforme.

**Projections climatiques (A.8)** Les zones touchées sont peu ou prou les mêmes que pour la période historique. La nouvelle accumulation donne des coûts du même ordre de grandeur que les autres réformes. Une fois encore, la différence majeure se trouve dans le nombre de sécheresses et les coûts engendrés. La dynamique suivie est donc pour les premières décennies celle de la modification de la période de retour et à la fin celle de l'accumulation des sécheresses. Les valeurs à horizon 2085 sont d'ailleurs assez proches de celles obtenues par l'autre méthode et atteignent les 143 milliards d'euros. On trouve ainsi, des valeurs souvent légèrement inférieures à celles obtenues précédemment mais qui restent plus de 3 fois supérieures aux valeurs de base. Il est ici indéniable que la modification de la période de retour joue un rôle essentiel dans la valeur de cette augmentation.

**Evolution sur 2 communes-types** Cet histogramme de nos deux communes semblent beaucoup mieux refléter la réalité observée pour les différents horizons de temps : à savoir, pour la commune de Salles, une augmentation conséquente de la sinistralité projetée par rapport à la sinistralité historique puis un premier accroissement à horizon 2050 et une hausse décisive à horizon 2085. La commune de Saint-Avé présente une évolution bien différente en raison de sa localisation, la Bretagne étant une région relativement épargnée par la sécheresse. On voit donc une stagnation de la sinistralité à partir de 2020 avec une légère hausse d'ici la fin du siècle. Ce graphique apparaît cohérence avec les effets des réformes précédemment étudiées.

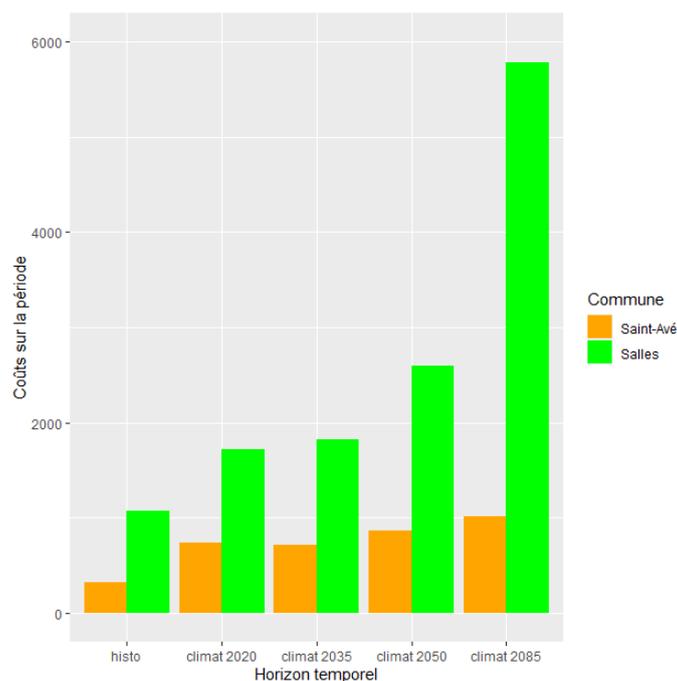


FIGURE 3.12 : Coûts de la sécheresse sur 2 communes à différents horizons de temps (en millions d'€) / toutes les réformes (accu24)

**Sensibilité au scénario RCP** Quant aux coûts, les dynamiques des RCP 4.5 et 8.5 sont respectées. Les coûts diminuent globalement par rapport à la méthode 6 mois (annexe A.4) excepté à horizon 2085 où ils restent proches car comme nous l'avons remarqué, l'accumulation de sécheresses à horizon 2085 est, nonobstant le mode de calcul choisi, très significative.

Période \ Scénario GIEC	RCP 8.5	Inflation 2,5%
Histo	0,46	0,46
Climat 2020	0,95	1,08
Climat 2035	0,99	1,15
Climat 2050	1,87	2,98
Climat 2085	2,25	6,11

TABLE 3.9 : Tableau récapitulatif des coûts annuels (en milliards d'€)

**Conclusion** En conclusion, les résultats donnent satisfaction quant à la méthode employée. Les chiffres sont alarmants et prédisent d'ici la fin du siècle une multiplication de la sinistralité par 15 environ avec un coût moyen annuel de 7 milliards d'euros. Ces chiffres sont toutefois à relativiser tant les projections peuvent différer les unes des autres et être incertaines pour une période aussi éloignée dans le temps. Les chiffres plus récents ne sont toutefois pas beaucoup plus rassurants avec, dans le cas de l'adoption de l'ensemble des mesures, un quintuplement de la sinistralité à très court terme et une augmentation considérable de cette dernière à horizon 2050 qui semble représenter d'après les différents modèles une année charnière. Ces mesures engendreraient donc, à n'en pas douter, un coût énorme pour l'assurance de ce risque qui, même s'il représente une grande partie de la sinistralité CatNat aujourd'hui, reste sous-indemnisé.

### Les réformes

On observe que la modification de la période de retour augmente le coût de façon décroissante avec le temps. On peut imaginer qu'en raison du nombre très élevé de sécheresses aux horizons 2050 et 2085, cette modification n'a plus grand effet. Il s'agit toutefois de la mesure la plus coûteuse jusqu'en 2085. Les autres modifications augmentent le coût de façon linéaire avec le temps. L'accumulation de la sécheresse augmente logiquement avec le temps et surtout vers 2050 et 2085, périodes pour lesquelles un SPEI de -1 est un phénomène fréquent. Elle représente plus de 40 milliards d'euros en 2085.

Le choix de l'accumulation sur 24 mois semble être le meilleur et donner les résultats les plus cohérents. On observe également une explosion de la sinistralité à partir de 2080 avec une évolution miroir à celle de la modification de la période de retour. L'extension de la reconnaissance CatNat aux communes limitrophes représente, elle, une augmentation du coût plus faible et est assez logiquement dépendante des autres mesures. Elle représente entre 3 et 8 milliards d'euros sur 20 ans et représente tout de même environ 25% de sécheresses supplémentaires. La modification du taux de sans suite représente entre 3 et 10 milliards d'euros sur 20 ans.

Les montants totaux, eux, paraissent faramineux par rapport aux montants actuels. Prendre en compte l'ensemble de ces mesures représenterait 40 milliards d'euros à climat 2020, soit plus du double que ce que nous connaissons actuellement. Le coût moyen annuel de la sécheresse serait de 2 milliards d'euros, ce qui constituait avant la sécheresse de 2022 le record de coût (sécheresse de 2003). Il est également notable que de nombreuses réformes présentent des augmentations de coûts et d'intensité plus importantes sur la période historique qu'en climat 2020. Cela peut s'expliquer par les nombreux changements dans le régime CatNat sur la reconnaissance des sécheresses et par les approximations dans l'établissement de ces dernières dues aux aléas humains et administratifs.

### Les 2 communes

L'évolution des graphiques des deux communes reste assez révélateur des conclusions tirées sur les multiples perspectives de loi étudiées. On y observe la forte intensité de la modification de la période de retour ainsi que des accumulations de sécheresse sur 3 et 6 mois.

Bien que les deux communes aient deux profils assez différents, aussi bien en terme d'exposition à l'argile et à la sécheresse, on observe souvent des dynamiques similaires suivant les réformes et les horizons de temps. On remarque une exposition particulièrement importante à horizon 2085 qui est assez typique du sud-ouest de la France qui est un plus préservé en 2050.

### Les coûts

Le tableau 3.10, récapitulatif de l'ensemble des coûts pour le scénario 8.5 est présenté ci-dessous :

Période/Méthode	Coût	Coût UP	10 ans	Ac3	Ac6	Ac24	CL	Tt6	Tt24
Histo (sur 30 ans)	0,46	0,46	1,24	2,03	1,01	0,53	0,58	1,93	1,55
2020	0,95	0,94	2,17	2,01	1,17	1,00	1,12	3,30	3,16
2030	0,99	0,92	2,18	2,30	1,34	1,07	1,16	3,45	3,20
2050	1,87	1,43	2,97	3,82	2,51	2,09	2,12	4,80	4,45
2085	2,25	0,93	3,11	7,26	4,69	4,36	2,68	7,22	7,17

TABLE 3.10 : Tableau récapitulatif de l'ensemble des coûts pour le scénario 8.5 (en milliards d'€)

Le tableau 3.11, récapitulatif de l'ensemble des coûts pour le scénario 4.5 est présenté ci-dessous :

Période/Méthode	Coût	Coût UP	10 ans	Ac3	Ac6	Ac24	CL	Tt6	Tt24
Histo (sur 30 ans)	0,46	0,46	1,24	2,03	1,01	0,53	0,58	1,93	1,55
2020	0,65	0,65	1,99	1,67	0,90	0,66	0,74	3,07	2,90
2030	1,21	1,12	2,67	3,02	1,73	1,28	1,41	4,22	3,88
2050	1,00	0,79	2,28	3,53	1,73	1,16	1,21	4,15	3,54
2085	1,11	0,45	2,09	3,95	1,97	1,54	1,28	3,90	3,55

TABLE 3.11 : Tableau récapitulatif de l'ensemble des coûts pour le scénario 4.5 (en milliards d'€)

Les coûts connaissent une première augmentation importante en climat 2020 ce qui pourrait correspondre aux années de sécheresse impressionnantes vécues depuis 2015. Le deuxième choc est très visible et a lieu en 2050 ce qui est assez caractéristique du RCP 8.5. Cette augmentation représente environ 100% du coût du climat 2035. Les coûts totaux si l'ensemble des mesures est implémenté sont très importants. Le coût total est doublé en climat 2020 et en climat 2035, multiplié par 2,5 en climat 2050 dépassant les 88 milliards d'euros pour la période 2040-2060 et est triplé en climat 2085.

Le RCP 4.5 représente une dynamique tout autre où les coûts continuent à augmenter jusqu'en 2035 parfois de manière encore plus importante qu'en 8.5 mais qui stagne à partir de 2050. Cette perspective d'endiguement du risque donne des résultats beaucoup moins élevés mais qui restent quand même largement supérieurs à la sinistralité que l'on connaît aujourd'hui. La disparité entre les deux scénarios est très importante. Les coûts pour le scénario 8.5 sont entre 1,5 et 2 fois plus importants que ceux du 4.5.

### 3.3 Application sur un portefeuille d'assurance

L'étude précédente portait sur l'ensemble de la France et présentait l'avantage de mettre en exergue les grandes dynamiques d'exposition géographique au RGA et à différents horizons de temps. Ces résultats pourraient convenir à un assureur/réassureur aussi global que la CCR. Toutefois, la réalité du milieu assurantiel est souvent tout autre et les portefeuilles d'exposition plus spécifiés. Le but de cette section est donc d'appliquer les résultats du modèle sur des « assureurs-types » afin d'évaluer les impacts du dérèglement climatique et du calendrier législatif. L'idée est d'évaluer l'évolution de sinistralité d'un assureur à primes constantes. On cherche donc à calculer l'évolution du S/P de l'assureur en fonction des résultats précédents.

Le choix a été fait d'examiner huit assureurs répondant aux critères suivants :

- Un assureur opérant au niveau national de manière homogène.
- Un assureur couvrant la région Occitanie.
- Un assureur couvrant la région Hauts-de-France.
- Un assureur couvrant le nord-ouest de la France, comprenant les régions Bretagne, Normandie et Pays-de-la-Loire.
- Un assureur couvrant la région Grand-Est.
- Un assureur couvrant la région Provence-Alpes-Côte d'Azur (PACA).
- Un assureur couvrant exclusivement les grandes communes, celles ayant plus de 5 000 habitants.
- Un assureur couvrant exclusivement les petites communes, celles ayant moins de 100 habitants.

On s'attend à des résultats plutôt bons pour les assureurs nord-ouest en raison de la faible exposition au risque ou grandes villes en raison du nombre important d'immeubles et de structures avec des fondations suffisamment profondes pour limiter l'exposition au RGA. A contrario, les portefeuilles exposés comme ceux de la région PACA ou de petites communes pourraient s'avérer très déficitaires.

Les études pour cette partie ne sont effectuées qu'en RCP 8.5. Il est à la fois le scénario le plus prudent, le plus probable et le plus étudié et donc le plus intéressant pour un portefeuille assurantiel. C'est aussi celui qui s'accompagne des changements les plus majeurs.

Afin d'obtenir un ordre d'idée du chiffre d'affaires de l'assureur, des primes ont été estimées. Le prix retenu est celui de 25€ par an par ménage qui est le coût actuel de la surprime pour le régime CatNat. La CCR engrange à ce titre un peu plus de 50% des primes de l'assureur. Il est donc acceptable de considérer une prime égale à la surprime CatNat de la CCR. Il s'agit d'un coût surévalué dans la mesure où cette prime a augmenté au fil des années et représente la prime liée à l'ensemble des catastrophes naturelles. Ainsi, avec un tel niveau de primes, il est supposé que les assureurs aient des réserves. Ce niveau de primes n'a pas pour but d'évaluer précisément les gains des assureurs mais simplement d'estimer la pérennité de cette assurance et une estimation de l'augmentation du coût.

Ces primes sont supposées constantes sur toute la période et on observe les gains et pertes des différents assureurs sur la période. Les coûts des assureurs sont les coûts pour la zone assurée divisés par deux. On considère une indemnisation de la CCR de 50%, qui est l'indemnisation réglementaire.

Toutefois, on élude la partie Stop-Loss du traité qui permet aux assureurs de se voir rembourser jusqu'à 73% des coûts pour des années de fortes sécheresses. Ce traité Stop-Loss est particulièrement critiqué dans la dernière proposition de loi et est renégocié chaque année ce qui le rend difficile à implémenter.

On considère d'ailleurs ici uniquement les sinistres RGA ayant fait l'objet d'une déclaration CatNat préalable. Le but de cette partie est bel et bien d'évaluer l'équilibre du régime et non les résultats historiques, c'est-à-dire les gains historiques ou provisions constituées. Il s'agit ici d'assureurs dont on ne connaît pas les gains car nous ne disposons pas de données.

Ci-dessous sont présentées les dynamiques de chacun des assureurs. La courbe en bleu présente la somme cumulée des primes, en rouge la somme cumulée des sinistres, en vert les gains/pertes de l'assureur.

La somme cumulée des primes varie avec le nombre de logements présents dans la région étudiée.

Au vu des résultats obtenus et dans un souci de clarté, les assureurs ont été regroupés en 3 groupes distincts :

-Groupe A comprenant les assureurs *Nord-Ouest, grandes communes* : des assureurs historiquement bénéficiaires mais dont la sinistralité rattrape le niveau de primes d'ici la fin du siècle.

-Groupe B comprenant les assureurs *Hauts-De-France, homogène, grand-Est* : des assureurs historiquement bénéficiaires et qui seront déficitaires d'ici la fin du siècle.

-Groupe C comprenant les assureurs *Occitanie, PACA, petites communes* : des assureurs historiquement déficitaires et qui devraient faire face des pertes sans précédent à cause du dérèglement climatique.

Le tableau 3.12 résume l'évolution de la sinistralité pour ces différents groupes :

Groupe	Assureurs concernés	Situation historique	Evolutions sur le siècle	Situation finale en RCP 8.5
Groupe A	Nord-Ouest, grandes communes	+	=	+
Groupe B	Hauts-De-France, Grand-Est, homogène	=	-	-
Groupe C	Occitanie, PACA, petites communes	-	-	--

TABLE 3.12 : Tableau récapitulatif des groupes A,B et C

### 3.3.1 Exposition des assureurs au réchauffement climatique

Les graphiques associés aux commentaires sont présentés juste après. (figure 3.13)

**Groupe A** Ce groupe est probablement le plus épargné par le risque ce qui est effectivement extrêmement visible sur les gains de l'assureur. Le portefeuille est relativement stable et peu exposé. L'assureur est historiquement bénéficiaire et continue à l'être vers la fin du siècle malgré une hausse - faible - de la sinistralité pour l'assureur *Nord-Ouest* et une stagnation des profits à horizon 2050 pour l'assureur *Grandes Communes*.

**Groupe B** Pour ce groupe, la dynamique est claire et a été présentée en introduction. L'augmentation du coût de la sécheresse met en péril la couverture de ce risque en France. Pour un portefeuille homogène, l'assurance de ce risque deviendrait déficitaire à horizon 2050. Elle est bénéficiaire au début, mais ces résultats sont à prendre avec précaution dans la mesure où la prime sélectionnée pour l'histoire est la prime actuelle, qui est aussi la plus élevée. Par exemple, d'après l' ASSEMBLÉE NATIONALE (2023) les assureurs sont déficitaires à partir de 2022. En effet, les résultats historiques seraient positifs jusqu'en 2021 : +132 millions d'euros. Avec ce chiffre, il est donc possible de vérifier que le montant des primes perçues par les assureurs a effectivement été légèrement surévalué puisqu'ils ne sont pas encore déficitaires à horizon 2020 dans notre modèle.

**Groupe C** Ce portefeuille est très à risque et les zones assurées très exposées. Déjà déficitaires historiquement, l'assurance du risque dans ces régions devient de plus en plus coûteuse. Le risque s'aggrave fortement vers 2050 avant d'exploser en 2085 atteignant par exemple pour la région PACA une sinistralité représentant 7 fois le montant des primes récoltées, 4 fois pour l'assureur *petites communes* et 2 fois pour l'assureur de la région Occitanie.

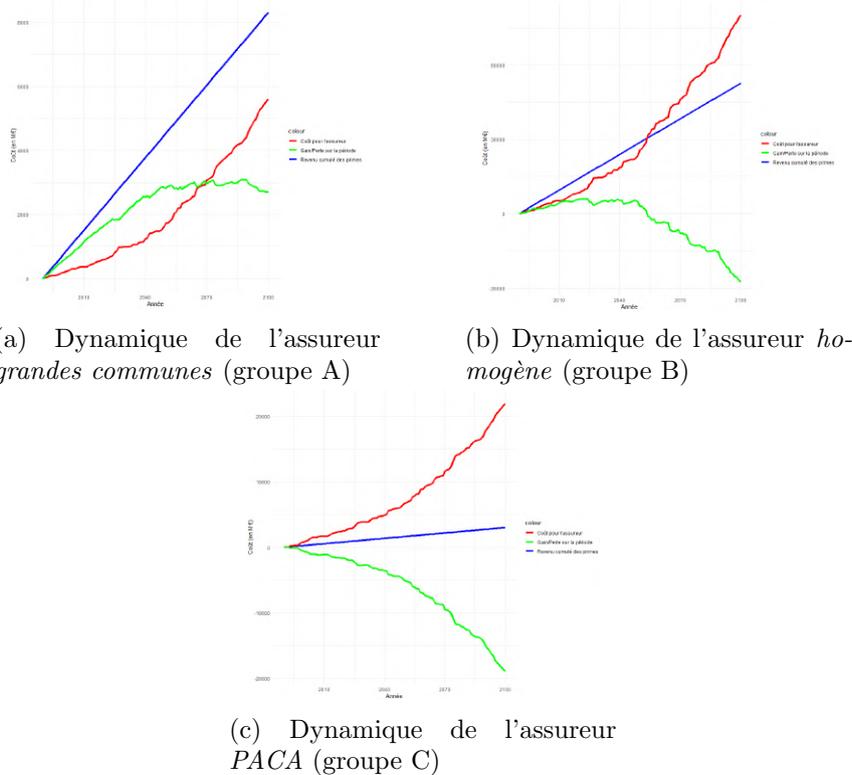


FIGURE 3.13 : Dynamiques des trois groupes d'assureurs

### 3.3.2 Etude de l'impact de la mise en place des réformes

On s'intéresse maintenant aux différents assureurs dans le cas de l'application des mesures législatives précédemment étudiées (les coûts sont exprimés en millions d'euros).

Les graphiques associés aux commentaires sont présentés juste après. (figure 3.14)

**Groupe A** Pour ce groupe, en présence de l'implémentation des mesures, les assureurs, en particulier l'assureur *grandes communes* tend à ne plus être bénéficiaire. Ces portefeuilles semblent exposés à l'accumulation des sécheresses. Pour ces assureurs, la sinistralité pourrait doubler d'ici la fin du siècle.

**Groupe B** La sinistralité de ces assureurs est très peu affectée par l'accumulation des sécheresses mais bien plus par la modification de la période de retour. Ainsi, sans l'implémentation de cette dernière le portefeuille de l'assureur serait encore à peu près à l'équilibre et il devient très déficitaire avec l'implémentation de cette mesure. Ainsi, pour ce groupe aussi, la sinistralité de la sécheresse pourrait être doublée d'ici la fin du siècle.

**Groupe C** Ces portefeuilles très exposés sont marqués par une très forte augmentation de la sinistralité en particulier de l'accumulation de sécheresses. Cette hausse est d'autant plus importante d'ici la fin du siècle et à horizon 2080 ce qui implique de prendre ces résultats avec précaution. La sinistralité pourrait être multipliée par 2 d'ici la fin du siècle en raison de l'implémentation de ces mesures et pourrait atteindre un montant égal à plus de 10 fois le montant des primes touchées.

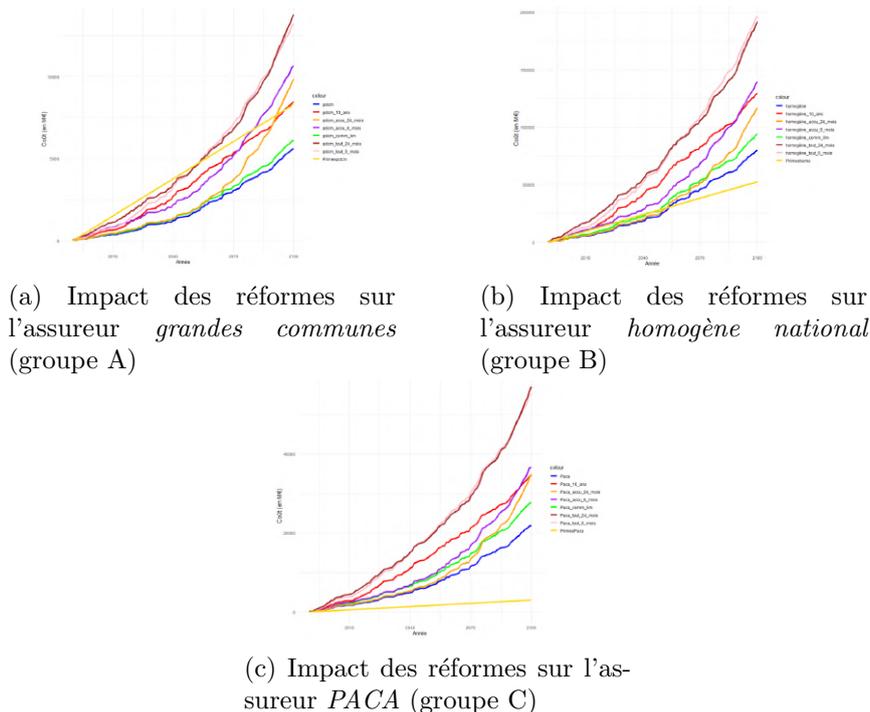


FIGURE 3.14 : Dynamiques des trois groupes d'assureurs

### Conclusion

En conclusion, cette partie d'application sur les portefeuilles d'assurance a permis d'observer à quel point ce risque allait bouleverser le système assurantiel privé. En effet, il faut considérer pour la plupart des assureurs un doublement au moins de la sinistralité d'ici 2050 ce qui pourrait venir mettre en péril leur équilibre sans considérablement augmenter le niveau des primes MRH. Un fait notable, à l'image de la conclusion tirée pour la sécheresse, est l'aggravation de la situation pour des assureurs auparavant épargnés aussi bien que pour ceux qui étaient exposés. Toutefois, une augmentation plus notable a lieu pour les assureurs qui étaient exposés probablement due à la concentration du risque RGA. Ainsi, ce risque pourrait devenir inassurable dans certaines régions comme l'Occitanie ou la PACA ou pour des assureurs *petites communes* sans une augmentation conséquente des primes de l'ordre de plus de 500% d'ici la fin du siècle. De même, pour des assureurs dans des régions en apparence moins exposées comme le Grand-Est ou les Hauts-De-France, une augmentation certaines des primes, de l'ordre du doublement, serait nécessaire pour préserver leur équilibre.

La question de l'assurabilité de ce risque peut naturellement se poser alors, tant les assureurs seraient exposés dans certains cas d'autant plus que l'augmentation de sinistralité s'accompagne d'une augmentation des coûts et de leur intensité. Beaucoup d'assureurs dans des régions très exposées pourraient envisager de ne plus assurer ce risque et de laisser à l'Etat, seul, l'indemnisation de ce dernier. Il existe donc une réelle et impérieuse nécessité de repenser l'assurance du risque RGA tant pour les assureurs que pour le régime CatNat. Pour rappel, les assureurs sont déficitaires pour l'assurance de ce risque depuis plusieurs années déjà.

### 3.4 Perspectives : Applications et utilité

Dans cette partie, sont listées quelques motivations et aspirations de ce mémoire afin de mieux le replacer dans la problématique assurantielle et visualiser les cadres dans lesquels il pourrait être utilisé.

**Présentation du risque, Sensibilisation et Prévention** L'un des enjeux majeurs du risque RGA est la sensibilisation et la prévention. Il s'agit d'un risque qui pourrait prendre dans les prochaines années des proportions démesurées. Toutefois, des méthodes, certes coûteuses, très efficaces contre ce risque peuvent être mises en place afin de le prévenir. Une meilleure connaissance de ce dernier et des ravages qu'il occasionne permettrait d'accélérer la démocratisation de ce risque.

Ce risque présente la particularité d'être très localisé. Ainsi, une prévention apportée à des zones très exposées pourrait permettre à des particuliers de mieux s'en prémunir. Qui plus est, l'incitation à la prévention, en plus de diminuer le risque, pourrait permettre à des assurés de diminuer leur franchise (ASSEMBLÉE NATIONALE, 2023).

**Ajustement primes et commissions** La localisation des zones à risques et notamment du coût qu'engendre ce risque peut permettre à des organismes assurantiels de différencier le montant des primes selon les régions et l'exposition à l'argile préservant ainsi les gains et les bénéfices de ces derniers. Une autre différenciation peut également se faire au niveau des commissions pour les vendeurs et encourager la vente de contrats MRH dans des zones peu/moins exposées et à l'inverse réduire, voire suspendre la commercialisation de contrats pour des régions trop à risque. Ce système permet d'éviter une antisélection très indésirable pour un tel risque. Il s'agit d'un des écueils majeurs à contourner.

**Suivi des coûts** Cette étude peut apporter une visibilité plus claire sur le montant et la justesse des primes à proposer. Une projection des coûts permet de mieux évaluer pour un phénomène aussi lent que le RGA (que ce soit la formation des fissures ou l'ensemble du processus administratif qu'il requiert) le niveau de primes à demander et la justesse de ces dernières. Ce niveau doit être intégré à la politique de souscription et peut être un élément clé de la fonction actuarielle.

Cette évaluation du coût revêt aussi, dans le même registre, une importance capitale dans la politique de provisionnement de l'entreprise. Une estimation du coût permet de déterminer le niveau de provisions à choisir ; un autre élément clé de la fonction actuarielle.

**Simulation ORSA** Cette étude, en plus de son utilité en souscription, peut être pertinente dans le cadre d'une simulation ORSA. En effet, l'application de notre étude à un portefeuille et l'intégration des impacts financiers dans le bilan d'une entreprise assurantielle permettrait d'estimer l'évolution de la solvabilité d'un assureur à moyen ou long terme à travers des scénarios de changements climatiques. De plus, suite aux recommandations de l'EIOPA, les risques liés au changement climatique doivent être inclus dans l'ORSA des assureurs afin d'évaluer le risque de durabilité sur un horizon de 15 ans ou plus. Ce mémoire rentre ainsi pleinement dans ce cadre de risques climatiques projetés. Ceci a motivé le choix d'évaluer les résultats de la sécheresse à horizon 2035.

**Approche répliquable sur d'autres périls** L'approche utilisée dans ce mémoire pour l'évaluation de l'impact du risque sécheresse est, de plus, assez facilement répliquable sur d'autres périls climatiques comme l'inondation. L'utilisation d'un indice climatique et d'une méthode de coût pour calibrer la sinistralité pourrait être imaginée pour une étude du risque inondation.

### 3.5 Validation et Backtesting

Il existe peu de projections de la sécheresse et surtout d'estimations du coût qu'elle représentera dans quelques années. L'une des études réalisée à ce sujet est celle de la FFA (FFA, 2022a). Cette dernière estime le coût de la sécheresse, en ne considérant que l'impact du changement climatique et des événements extrêmes (notre modèle ne s'étant pas intéressé à l'effet richesse et aux évolutions socio-économiques) entre 31 et 33,4 milliards d'euros sur la période 2020-2050. Sur la même période, avec les mêmes hypothèses (dont la réduction de 1% de la sinistralité à partir de 2030), notre modèle évalue ce coût à 31,6 milliards d'euros (34,6 milliards sans l'hypothèse de réduction de la sinistralité) ce qui est dans le même ordre de grandeur. Les fortes sécheresses de ces dernières années et l'impact d'une seule sécheresse peuvent facilement expliquer une différence. En effet, les plus fortes sécheresses sur la période pourraient occasionner jusqu'à 4 milliards d'euros de dégâts pour une seule année. Ce résultat est très encourageant.

Deux autres études ont été faites par la CCR et Covéa (ASSEMBLÉE NATIONALE, 2023). En considérant les mêmes hypothèses et notamment la baisse de sinistralité de 1% par an à partir de 2030, une augmentation de 46 à 60% de la sinistralité sécheresse a été constatée sur le climat 2050 par rapport à celle de ces dernières années par ces deux organismes. Or l'augmentation de la sinistralité sécheresse sur le climat 2050 par rapport au climat 2020 pour notre modèle est d'environ 52% selon les mêmes hypothèses. Cela montre, à la fois, la pluralité des observations et des prédictions et la justesse des résultats du modèle par rapport aux études préexistantes.

Quant aux réformes, l'assemblée nationale chiffre à 700 millions d'euros par an l'implémentation de toutes ces mesures sur les années 2017-2019. Notre modèle, lui, le chiffre beaucoup plus haut à hauteur de presque 2 milliards d'euros. Ceci s'explique par la méthode de calcul qui relie le prix directement au nombre de sécheresses et l'explosion des sécheresses due à la possible implémentation de la modification de la période de retour.

Il est donc probable que le coût estimé des réformes ait été quelque peu surévalué même si toutefois, le réchauffement climatique tend à largement augmenter le montant de ces dernières.

### 3.6 Inflation

Une intégration au modèle du phénomène d'inflation a tenté d'être mis en place. Il se base sur la valeur historique de l'indice FFB<sup>1</sup> avant la guerre en Ukraine. On en déduit alors une inflation de 2,5% des coûts pour le bâtiment. En implémentant cette valeur d'inflation on trouve les résultats suivants pour le scénario 8.5 (tableau 3.13) :

Période \ Scénario GIEC	RCP 8.5	Inflation 2,5%
Histo	0,46	0,46
Climat 2020	0,95	1,08
Climat 2035	0,99	1,15
Climat 2050	1,87	2,98
Climat 2085	2,25	6,11

TABLE 3.13 : Tableau récapitulatif des coûts annuels (en milliards d'€)

<sup>1</sup>indice de la Fédération Française du Bâtiment pour le coût de la construction

Les résultats sont peu concluants. Une légère augmentation est visible à horizon 2020, 2035 de 100 à 150 millions d'euros. Toutefois, les chiffres obtenus pour les horizons 2050 et 2085 ne reflètent probablement pas la réalité du moment avec une augmentation de plus de 1 milliard et de 3,5 milliards d'euros par an respectivement du coût du RGA. Le choix a donc été fait de ne pas incorporer le résultat de cette étude au résultat final. L'inflation est une source de grande incertitude pour la sécheresse et reste assez difficile à modéliser ; l'atteste cette étude de la CCR qui considère l'inflation comme le facteur le plus aggravant du risque sécheresse (CCR, 2018).

## 3.7 Limites du modèle

### 3.7.1 Limites du modèle de coûts

Ce modèle de coûts est assez approximatif et possède quelques limites. Les disparités régionales d'exposition au RGA et de niveau de coût de la vie en France ne permettraient pas de réaliser un coût moyen de la sécheresse à l'échelle de la France d'où la nécessité de mettre en place des GLM à l'échelle régionale.

Comme nous avons pu le voir ici, l'un des problèmes principaux de ce modèle est le calcul du coût quand les épisodes de sécheresse deviennent très fréquents. Les déclarations CatNat sécheresse ayant été jusque-là assez rares, leur coût a pu être quelque peu surévalué et, malgré la présence du coefficient de réajustement des données, ce coût croît assez rapidement avec la sécheresse. L'idéal serait probablement de mettre en place un modèle de coût dégressif à partir d'un certain nombre de sécheresse en essayant de s'adapter à l'évolution des mesures de prévention et de résilience mises en place pour des zones déjà sinistrées un certain nombre de fois.

Dans la mise en place des réformes, des ajustements peuvent aussi être faits, la modification du taux de sans suite ou la prise en compte de l'accumulation de sécheresses pourraient par exemple être réajustées. Un ajustement pourrait être fait sur le coût estimé des réformes car l'augmentation du nombre de sécheresses par ces réformes n'entraînerait probablement pas une augmentation linéaire du coût qui lui est associé.

En effet, les sécheresses et leur sinistralité associée resterait la même. Cela aurait un impact particulièrement sur les logements n'ayant pas reçu de déclarations CatNat ou s'étant vu refuser l'indemnisation (cas de sans suite). Il est alors assez réducteur de considérer que le coût de la sécheresse pour ces communes est le même que le coût historique. Cela reviendrait à considérer que le nombre de logements touchés est le même quel que soit la définition de la sécheresse.

Par exemple, une commune qui connaîtrait une déclaration CatNat sur 10 ans avec la période de retour de 25 ans et 2 déclarations avec la période de retour de 10 ans ne verrait pas automatiquement sa sinistralité multipliée par deux. Elle serait probablement augmentée car une sécheresse est « oubliée » dans le premier dispositif. Toutefois, il est réducteur de penser que les deux sécheresses seraient d'une intensité identique d'autant plus que le coût établi par notre modèle se base sur une période de retour de 25 ans. Le coût des sécheresses peut donc avoir tendance à être surévalué. La mise en place d'un coefficient permettant d'atténuer cet effet pourrait être envisagée.

### 3.7.2 Autres limites

En dépit des bons résultats obtenus par les méthodes de backtesting, peuvent être listées, de manière non exhaustive, les limites suivantes :

- la prise en compte de l'inflation dans notre modèle (cf 3.6)
- la prise en compte de l'augmentation des coûts de la main d'oeuvre et des changements d'emplois
- l'urbanisation croissante/ déménagement : étude d'une tendance à rejoindre/quitter les zones argileuses
- les projections socio-économiques/ effet richesse introduit par la FFA dans son étude (FFA, 2022a)
- la modélisation plus précise du bien assuré et une modélisation des alentours : par exemple la végétation, la topographie du terrain, le type de bâti... etc
- la prise en compte d'un coût de rattrapage dû à l'absence d'indemnisation dans certains cas les précédentes années chiffré par ASSEMBLÉE NATIONALE (2023) entre 2,6 et 5,4 milliards d'euros
- la prise en compte de la sévérité de la sécheresse
- une meilleure profondeur des données historiques
- Une meilleure qualité des données : exposition au risque argile, coût du bien assuré (données assureur)
- la prise en compte d'autres variables comme le débit fluvial, l'irrigation, les sources d'eau éloignées
- l'utilisation d'autres indices de sécheresse/utilisation d'indices économiques
- le calcul d'un indice de taux d'endommagement du bâti suivant sa structure et les sécheresses
- la prise en compte de la franchise
- la prise en compte des effets des mesures de prévention (cf 3.1.3)
- l'étude du coût prévention/efficacité : rapport bénéfice/risque
- la mise en place d'une approche multi-modèles

# Conclusion

La problématique de cette étude portait sur les perspectives d'évolution du risque RGA dues aux changements climatiques et législatifs. Les résultats sont sans appel : les assureurs devraient être en première ligne face à une augmentation très importante des coûts de la sécheresse. En effet, ce risque pourrait subir de plein fouet les effets du réchauffement climatique à l'image des sécheresses inédites des dernières années. Quel que soit le scénario, ces changements sont importants. Ce risque semble se localiser autour de différentes zones suivant les périodes. Le sud de la France semble faire les premiers frais de ce réchauffement climatique et semble particulièrement exposé à moyen-long terme. Qui plus est, si la sécheresse s'accroît dans toutes les régions, son impact est d'autant plus inquiétant que les zones concernées sont pour la plupart assez argileuse à l'image du sud-ouest ou du bassin parisien.

Ce mémoire s'est intéressé à la France métropolitaine et les coûts ont été pris à euros constants. La première étape a consisté en la construction d'un indice sécheresse capable d'appréhender au mieux les valeurs historiques du SWI et donc les reconnaissances CatNat liées à la sécheresse. Cet indice a été construit avec succès et validé à l'aide d'événements historiques et d'études faites sur le sujet. Les résultats sont sans équivoque et deux alternatives se présentent. Les deux études estiment une augmentation manifeste des sécheresses jusqu'en 2035 mais une différence nette apparaît à horizon 2050 suivant les scénarios. Si nous réussissons à diminuer les émissions de gaz à effet de serre d'ici la fin du siècle, alors il est possible d'envisager le scénario 4.5 qui stabiliserait le nombre de sécheresses annuelles mais qui resterait cependant jusqu'à 3 fois supérieur au nombre historique. Les coûts correspondants de la sécheresse seraient autour d'un milliard d'euros par an ce qui reste une somme très importante et plus de 3 fois supérieure à la sinistralité annuelle historique moyenne. Dans le pire des scénarios, c'est-à-dire si aucun effort n'est fait sur les émissions de gaz à effet de serre, le coût des sécheresses parle de lui-même et pourrait bien doubler dès 2050 avant d'augmenter à nouveau vers la fin du siècle. Les sécheresses coûteraient alors près de 2 milliards d'euros par an à partir de 2050 ce qui représente à aujourd'hui le coût de la deuxième sécheresse la plus importante de l'histoire et qui reste l'une des plus marquantes pour le milieu assurantiel à savoir celle de 2003. Par la suite, ces différents résultats ont été confrontés auprès de différentes sources de données.

Le risque, en plus de s'intensifier dans des régions déjà très exposées comme le bassin aquitain et la région PACA, se déplace et apparaît dans des zones jusque-là épargnées comme la Bretagne ou le nord de la France. Toutefois, c'est bel et bien le sud de la France qui semble souffrir le plus de cette évolution de la sécheresse. D'ici la fin du siècle, l'ensemble du bassin méditerranéen subira des épisodes de sécheresse jamais vus auparavant.

Le deuxième volet de la problématique et de l'étude présentée concernait l'implémentation des dernières mesures liées au risque RGA. Parmi celles-ci, 3 ont été retenues pour l'implémentation, plus précisément la modification de la période de retour, la prise en compte de l'accumulation anormale de sécheresse, et l'intégration des communes limitrophes dans les déclarations CatNat.

D'autres mesures ont été prises en compte dans l'estimation de la réduction du taux de sans suite.

Des estimations des coûts de ces mesures ont été faites sur les projections climatiques précédentes et ont été testées par rapport aux quelques sources mentionnant ces dépenses. Le modèle a estimé des coûts souvent très élevés probablement dus au fait que ce coût est directement lié au nombre de reconnaissance CatNat et que cette méthode de coût moyen par commune devient défailante quand le nombre de sécheresses devient trop important. Toutefois, les résultats semblent acceptables et permettent de se forger une idée des coûts que ces dernières pourraient représenter. Pour la plupart d'entre elles, le risque restait localisé autour des mêmes régions. Le sud était toutefois plus concerné par les sécheresses avec l'implémentation de l'accumulation des sécheresses puisqu'il est sensible à des événements de chaleur plus fréquents.

La modification de la période de retour à 10 ans semble être l'une des mesures les plus coûteuses. Elle multiplie par plus de 2,5 le nombre de sécheresses en moyenne sur la période historique et a tendance à avoir un impact plus grand dans des périodes où les sécheresses sont moins fréquentes comme pour le scénario 4.5 par exemple. Cet impact a un effet moins important en fin de siècle pour le scénario 8.5 car la sinistralité y est déjà grande et les sécheresses déjà très fréquentes.

La prise en compte de l'accumulation de sécheresses a été modélisée de 3 façons différentes; les sécheresses étant ainsi obtenues via le critère de McKee (valeurs inférieures à -1). La première modélisait, prenant en compte les sécheresses sur les 3 derniers mois, donnait lieu à des résultats beaucoup trop excessifs et a donc été écartée.

La deuxième modélisation, prenant en compte les sécheresses sur les 6 derniers mois, a donné lieu à des résultats acceptables bien qu'encore très élevés. Elle prévoit, par exemple, une multiplication du nombre de sécheresses et du coût de 1,5 en climat actuel à 2,5 à la fin du siècle. Toutefois, elle semble nécessaire pour éviter que certaines sécheresses très importantes ne fassent écran à d'autres qui arrivent ultérieurement d'une intensité moins forte mais tout de même importante.

Enfin, la dernière modélisation est probablement la plus concluante. Elle consiste à s'intéresser au nombre de mois en sécheresse sur les 24 derniers et de déclarer l'état de sécheresse si 18 d'entre eux le sont. Cette réforme apporte des résultats probants avec une augmentation exponentielle suivant les climats. Ainsi, on passe de 5% d'augmentation jusqu'en 2035 à 15% à partir de 2050 et 100% pour 2085.

La réforme suivante est l'intégration des communes limitrophes au système. Cette réforme a permis d'observer une augmentation certaine des déclarations CatNat de l'ordre de 25% quel que soit le climat ce qui n'est pas négligeable. La réduction du taux de sans suite est un impact de réformes et a été implémenté via un coefficient et représente un coût proche de celui des communes limitrophes.

Au-delà de ces limites, des ajouts potentiels pourraient être la considération d'autres indices sécheresse, d'autres possibilités de réformes, d'autres scénarios du GIEC notamment le 2.6 ou encore d'autres modèles climatiques. De plus, la sécheresse est un phénomène palpable en constante évolution, il sera donc intéressant d'évaluer les prédictions du modèle sur les résultats que nous pourrions constater à l'avenir. Il sera ainsi pertinent de voir la façon retenue par les politiques publiques pour faire face aux difficultés d'assurabilité du risque tant par le secteur privé que par le secteur public. D'autres problèmes pourraient apparaître lors de cette implémentation, comme la localisation très forte du risque autour de certaines zones argileuses qui pourraient se trouver très rapidement délaissées par les assureurs si des incitations à l'assurance de ces dernières ne sont pas mises en place.

Il semble, au demeurant, difficile à imaginer que la CCR puisse prendre en charge l'ensemble de ces régions très exposées dans leur totalité, tant les coûts d'indemnisation peuvent s'avérer faramineux.

L'intégration de phénomènes comme l'inflation ou les évolutions socio-économiques ou les conséquences des mesures de prévention pourrait être un élément déterminant dans la qualité du modèle tant ils peuvent influencer sur l'impact de la sinistralité. D'autres considérations, comme la végétation, le type de bâti et l'intensité des sécheresses et des dégâts occasionnées pourraient être des ajouts permettant d'affiner le modèle.

Une autre étude intéressante pourrait être de tenter de répliquer la démarche utilisée dans ce mémoire pour d'autres périls, à l'image du péril inondation. Ce péril est très différent de la sécheresse et pourrait nécessiter la prise en compte de l'intensité de l'effet qui a un grand impact sur la sinistralité. Il s'agit également d'un phénomène localisé dont les coûts peuvent être grands et impactés par le changement climatique.

Ainsi, l'implémentation de l'ensemble de ces mesures représenterait un séisme considérable dans le milieu assurantiel même si toutefois, il doit être signifié, que les coûts observés pour l'implémentation de toutes ces réformes de l'ordre de 2 à 5 milliards d'euros par an d'ici à la fin du siècle sont probablement surestimés. Parmi les limites qui ont été évoquées pour ce mémoire, on peut citer entre autres : l'absence de lissage géographique de l'indice sécheresse, l'inflation, les coûts de main d'oeuvre, les évolutions socio-économiques, la modélisation des habitations ou encore l'absence de données d'assureurs. Qui plus est, jusqu'ici le système de reconnaissances CatNat ayant beaucoup évolué et ayant connu quelques dysfonctions, les données dont nous disposons ne sont pas forcément d'une très bonne qualité. Le modèle pourrait ainsi s'améliorer dans le temps avec l'incorporation de nouvelles données.



# Bibliographie

- ARGUS DE L'ASSURANCE (2023). Sécheresse : la proposition de loi qui veut révolutionner l'indemnisation des victimes. URL : <https://www.argusdelassurance.com/green-assurance/secheresse-la-proposition-de-loi-qui-veut-revolutionner-l-indemnisation-des-victimes.213416>.
- ASSEMBLÉE NATIONALE (8 fév. 2023). Prise en charge des conséquences des désordres causés par le phénomène naturel de mouvements de terrain différentiels consécutifs à la sécheresse et à la réhydratation des sols. Ordonnance. URL : <https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000047106316>.
- ASSEMBLÉE NATIONALE (21 fév. 2023). Proposition de loi visant à mieux indemniser les dégâts sur les biens immobiliers causés par le retrait-gonflement de l'argile, Proposition de loi. URL : [https://www.assemblee-nationale.fr/dyn/16/textes/l16b1022\\_texte-adopte-commission](https://www.assemblee-nationale.fr/dyn/16/textes/l16b1022_texte-adopte-commission).
- ASSEMBLÉE NATIONALE (22 mars 2023). Rapport d'information sur l'évaluation de la prise en compte du retrait-gonflement des argiles. Rapport d'information et proposition de loi. URL : [https://www.assemblee-nationale.fr/dyn/16/rapports/cec/l16b1003\\_rapport-information](https://www.assemblee-nationale.fr/dyn/16/rapports/cec/l16b1003_rapport-information).
- BEGUERÍA, S. et VICENTE-SERRANO, S. M. (2023). SPEI: Calculation of the Standardized Precipitation-Evapotranspiration Index. R package version 1.8.1. URL : <https://CRAN.R-project.org/package=SPEI>.
- BURKE, E. J. et BROWN, S. J. (2010). Evaluating Uncertainties in the Projection of Future Drought. Volume 23, issue 7.
- CCR (2017). Les Catastrophes Naturelles en France : Bilan 1982 - 2016. Rapp. tech. URL : [https://www.ccr.fr/documents/35794/35836/Bilan\\_CatNat\\_1982-2016.pdf/326b8219-e0cb-419c-a83f-4ec2837c3ddb?t=1497004387000](https://www.ccr.fr/documents/35794/35836/Bilan_CatNat_1982-2016.pdf/326b8219-e0cb-419c-a83f-4ec2837c3ddb?t=1497004387000).
- CCR (2018). Conséquences du changement climatique sur le coût des catastrophes naturelles en France à horizon 2050. Rapp. tech. URL : <https://www.ccr.fr/documents/35794/35836/Etude+Climatique+2018+version+complete.pdf/6a7b6120-7050-ff2e-4aa9-89e80c1e30f2?t=1536662736000>.
- CCR (1<sup>er</sup> juin 2022a). Les catastrophes naturelles en France. URL : <https://www.ccr.fr/documents/35794/1105781/CCR+leaflet+2022+web+31052022.pdf/e5850258-ba88-3cf2-21ee-672e0b2be257?t=1668097571134>.
- CCR (2022b). L'indemnisation des Catastrophes Naturelles en France. URL : <https://www.ccr.fr/-/indemnisation-des-catastrophes-naturelles-en-france>.
- CCR (2023a). URL : <https://catastrophes-naturelles.ccr.fr/les-arretes>.
- CCR (17 oct. 2023b). CCR dévoile les résultats de son étude portant sur l'impact du changement climatique sur le coût des catastrophes naturelles à horizon 2050. URL : <https://www.ccr.fr/en/-/ccr-climate-report-2023>.
- CHARPENTIER, A., JAMES, M. et ALI, H. (2022). Predicting drought and subsidence risks in France. *NHESS* Volume 22, issue 7.
- CNRM (2014). URL : <https://www.umn-cnrm.fr/spip.php?article788>.
- COMMISSARIAT GÉNÉRAL AU DÉVELOPPEMENT DURABLE (2017). plus de 4 millions de maisons potentiellement très exposées. URL : <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/sites/default/files/2018-10/datalab-essentiel-122-retrait-gonflement-argiles-octobre2017.pdf>.

- COPERNICUS (2023a). URL : <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/reanalysis-uerra-europe-single-levels?tab=form>.
- COPERNICUS (2023b). URL : <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/reanalysis-uerra-europe-single-levels?tab=form>.
- COPERNICUS (2023c). URL : <https://edo.jrc.ec.europa.eu/edov2/php/index.php?id=1153>.
- COPPOLA, E. (2007). Regional Climate Modeling. URL : <https://indico.ictp.it/event/a14334/session/11/contribution/10/material/slides/0.pdf>.
- COUR DES COMPTES (1<sup>er</sup> fév. 2022). SOLS ARGILEUX ET CATASTROPHES NATURELLES : Des dommages en forte progression, un régime de prévention et d'indemnisation inadapté. URL : <https://www.ccomptes.fr/system/files/2022-02/20220215-sols-argileux-catastrophes-naturelles.pdf>.
- COVÉA (2022). Changement climatique Assurance : Quelles conséquences sur la sinistralité à horizon 2050 ? Livre Blanc. URL : [https://www.covea.com/sites/default/files/2022-02/202202\\_Livre\\_Blanc\\_Cov%C3%A9a\\_Risques\\_Climatiques.pdf](https://www.covea.com/sites/default/files/2022-02/202202_Livre_Blanc_Cov%C3%A9a_Risques_Climatiques.pdf).
- COVÉA (2023). Risque climatique : quelles préventions ? Livre Blanc. URL : [https://www.covea.com/sites/default/files/2023-05/livre\\_blanc\\_covea\\_risque\\_climatique\\_quelles\\_preventions\\_202305.pdf](https://www.covea.com/sites/default/files/2023-05/livre_blanc_covea_risque_climatique_quelles_preventions_202305.pdf).
- DRIAS (2023a). URL : <https://www.drias-climat.fr/accompagnement/sections/52>.
- DRIAS (2023b). URL : <https://www.drias-climat.fr/accompagnement/sections/218>.
- DRIAS (2023c). URL : <http://www.drias-climat.fr/>.
- DRIAS (2023d). URL : <http://www.drias-climat.fr/accompagnement/displayMenu/31?secondLevel=182>.
- DRIAS (2023e). URL : <https://www.drias-climat.fr/accompagnement/sections/310>.
- FFA (2022a). Impact du changement climatique à l'horizon 2050. Rapp. tech. URL : [https://www.franceassureurs.fr/wp-content/uploads/2022/09/vf\\_france-assureurs\\_impact-du-changement-climatique-2050.pdf](https://www.franceassureurs.fr/wp-content/uploads/2022/09/vf_france-assureurs_impact-du-changement-climatique-2050.pdf).
- FFA (1<sup>er</sup> sept. 2022b). le risque sécheresse et son impact sur les habitations. Rapp. tech. URL : <https://www.franceassureurs.fr/wp-content/uploads/le-risque-secheresse-et-son-impact-sur-les-habitations-15-novembre-2022-web.pdf>.
- FRANCEBLEU (2023). Canicule : les records absolus de Toulouse, Albi et Montauban battus.
- GUTTMAN, N. B. (1999). accepting the standardized precipitation index : a calculation algorithm. *JOURNAL OF THE AMERICAN WATER RESOURCES ASSOCIATION* VOL. 35, NO.2, p. 311-322.
- GÉORISQUES (2023a). Accéder aux indicateurs sur les dommages. URL : <https://www.georisques.gouv.fr/articles-risques/onrn/acceder-aux-indicateurs-sinistralite>.
- GÉORISQUES (2023b). Accéder aux indicateurs sur l'exposition. URL : <https://www.georisques.gouv.fr/articles-risques/onrn/acceder-aux-indicateurs-enjeux>.
- GÉORISQUES (2023c). Le dispositif d'indemnisation des catastrophes naturelles. URL : <https://www.georisques.gouv.fr/minformer-sur-la-prevention-des-risques/la-garantie-cat-nat>.
- GÉORISQUES (2023d). Le soutien financier du «fonds Barnier». URL : <https://www.georisques.gouv.fr/etre-accompagne/le-soutien-financier-du-fonds-barnier-0>.
- GÉORISQUES (2023e). L'information des acquéreurs et des locataires (IAL) – Remplir son état des risques. URL : <https://www.georisques.gouv.fr/information-des-acquereurs-et-locataires>.
- GÉORISQUES (2023f). m'informer sur le retrait-gonflement des argiles. URL : <https://www.georisques.gouv.fr/articles-risques/retrait-gonflement-des-argiles/exposition-du-territoire-au-phenomene>.
- GÉORISQUES (2023g). m'informer sur le retrait-gonflement des argiles. URL : <https://www.georisques.gouv.fr/articles-risques/etude-geotechnique/recommandations-et-reglementations>.
- GÉORISQUES (2023h). m'informer sur le risque RGA. URL : <https://www.georisques.gouv.fr/risques/retrait-gonflement-des-argiles>.
- JANCOVICI, J.-M. (2007). Qu'est-ce qu'un modèle climatique ? Quels sont leurs premières conclusions ? URL : <https://jancovici.com/changement-climatique/predire-lavenir/quest-ce-quun-modele-climatique-queles-sont-leurs-premieres-conclusions/>.

- JOETZJER, E. (2011). Variabilité inter-annuelle des sécheresses et leur réponse au changement climatique : Quels Indicateurs ?
- KAPSAMBELIS, D. (2023). Modélisation d'événements climatiques extrêmes sur les productions agricoles à horizon 2050 : Application à la gestion économique du risque. URL : <https://theses.hal.science/tel-03953483v1/document>.
- LA FINANCE POUR TOUS (2021). Climat : le montant des sinistres climatiques devrait doubler d'ici 2050.
- LE MONDE (2023). L'été 2023 a été le plus chaud jamais mesuré dans le monde, selon l'observatoire européen Copernicus.
- LES AGENCES DE L'EAU (2019). Le grand cycle de l'eau face au changement climatique. URL : <https://www.lesagencesdeleau.fr/ressources/le-grand-cycle-de-leau-face-au-changement-climatique>.
- LÉGIFRANCE (25 nov. 2018). Code de la construction et de l'habitation. Loi. URL : <https://www.legifrance.gouv.fr/codes/id/LEGISCTA000037645086/2018-11-25>.
- MADAKUMBURA, G. D., THACKERAY, C. W., NORRIS, J., GOLDENSON, N. et HALL, A. (2021). Anthropogenic influence on extreme precipitation over global land areas seen in multiple observational datasets.
- MAVROMATIS, T. (2006). Drought index evaluation for assessing future wheat production in Greece. Volume 27, issue 7.
- McKEE, T. B., DOESKEN, N. J. et KLEIST, J. (1993). the relationship of drought frequency and duration to time scales.
- METEOFRANCE (1979). Pluies extrêmes en France métropolitaine.
- METEOFRANCE (2015). Évolution du cycle annuel d'humidité du sol Climat passé. URL : [http://www.meteo.fr/meteonet/temps/clim/ClimatHD/ressources/fiches/PASSE\\_IMPAC\\_SWI\\_FPROD.pdf](http://www.meteo.fr/meteonet/temps/clim/ClimatHD/ressources/fiches/PASSE_IMPAC_SWI_FPROD.pdf).
- METEOFRANCE (2023). DONNÉES MENSUELLES D'INDICE D'HUMIDITÉ DES SOLS POUR LE DISPOSITIF CATNAT. URL : [https://donneespubliques.meteofrance.fr/?fond=produit&id\\_produit=301&id\\_rubrique=40](https://donneespubliques.meteofrance.fr/?fond=produit&id_produit=301&id_rubrique=40).
- MINISTÈRE DE LA TRANSITION ÉCOLOGIQUE (1<sup>er</sup> nov. 2021). Mesures de prévention. URL : [https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/construire\\_en\\_terrain\\_argileux\\_reglementation\\_et\\_bonnes\\_pratiques.pdf](https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/construire_en_terrain_argileux_reglementation_et_bonnes_pratiques.pdf).
- MINISTÈRE DE LA TRANSITION ÉCOLOGIQUE (2023). Sécheresse en France. URL : <https://www.ecologie.gouv.fr/secheresse-economiser-leau>.
- MINISTÈRE DE L'AGRICULTURE ET DE L'ALIMENTATION (2023). Demander une indemnisation pour les pertes en agriculture causées par un aléa climatique. URL : <https://www.mesdemarches.agriculture.gouv.fr/demarches/exploitation-agricole/demander-une-aide-pac/article/demander-une-indemnisation>.
- MINISTÈRE DE L'ÉCOLOGIE, DU DÉVELOPPEMENT ET DE L'AMÉNAGEMENT DURABLES (2023). Le retrait-gonflement des argiles : Comment prévenir les désordres dans l'habitat individuel ? URL : [https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/dppr\\_secheresse\\_v5tbd.pdf](https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/dppr_secheresse_v5tbd.pdf).
- MRN (21 jan. 2018). Rapport MRN sécheresse géotechnique. Rapp. tech. URL : [https://www.mrn.asso.fr/wp-content/uploads/2019/01/21-01-2018\\_rapport-mrn\\_secheresse-2018.pdf](https://www.mrn.asso.fr/wp-content/uploads/2019/01/21-01-2018_rapport-mrn_secheresse-2018.pdf).
- OMM ET GWP (2023). manuel des indicateurs sécheresse. Rapp. tech. L'Organisation météorologique mondiale (OMM) et Le Partenariat mondial pour l'eau (GWP). URL : <https://www.unclearn.org/wp-content/uploads/library/fr.pdf>.
- R (2023). R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing. Vienna, Austria. URL : <https://www.R-project.org/>.
- SÉNAT (15 fév. 2023a). LA SÉCHERESSE ÉBRANLE LES FONDATIONS DU RÉGIME CATNAT. rapport d'information. URL : <https://www.senat.fr/rap/r22-354/r22-354-syn.pdf>.
- SÉNAT (15 fév. 2023b). Mission Écologie, développement et mobilité durables. rapport d'information. URL : <http://www.senat.fr/rap/r22-354/r22-3541.pdf>.

- VICENTE-SERRANO, S. M., BEGUERÍA, S. et LÓPEZ-MORENO, J. I. (2010). A Multiscalar Drought Index Sensitive to Global Warming: The Standardized Precipitation Evapotranspiration Index. Volume 23, issue 7.
- WIKIPEDIA (juin 2021a). Evapotranspiration potentielle. Wikipédia - L'encyclopédie libre [en ligne]. URL : [https://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89vapotranspiration\\_potentielle](https://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89vapotranspiration_potentielle) (visité le 06/09/2023).
- WIKIPEDIA (juin 2021b). Forçage radiatif. Wikipédia - L'encyclopédie libre [en ligne]. URL : [https://fr.wikipedia.org/wiki/Forage\\_radiatif](https://fr.wikipedia.org/wiki/Forage_radiatif) (visité le 06/09/2023).
- WIKIPEDIA (mai 2022a). Loi log-logistique. Wikipédia - L'encyclopédie libre [en ligne]. URL : [https://fr.wikipedia.org/wiki/Loi\\_log-logistique](https://fr.wikipedia.org/wiki/Loi_log-logistique) (visité le 06/09/2023).
- WIKIPEDIA (mai 2022b). Réanalyse météo. Wikipédia - L'encyclopédie libre [en ligne]. URL : [https://fr.wikipedia.org/wiki/R%C3%A9analyse\\_m%C3%A9t%C3%A9orologique](https://fr.wikipedia.org/wiki/R%C3%A9analyse_m%C3%A9t%C3%A9orologique) (visité le 06/09/2023).
- WIKIPEDIA (déc. 2022c). Test de Kolmogorov-Smirnov. Wikipédia - L'encyclopédie libre [en ligne]. URL : [https://fr.wikipedia.org/wiki/Test\\_de\\_Kolmogorov-Smirnov](https://fr.wikipedia.org/wiki/Test_de_Kolmogorov-Smirnov) (visité le 06/09/2023).
- WIKIPEDIA (août 2023a). Copernicus(programme). Wikipédia - L'encyclopédie libre [en ligne]. URL : [https://fr.wikipedia.org/wiki/Copernicus\\_\(programme\)](https://fr.wikipedia.org/wiki/Copernicus_(programme)) (visité le 06/09/2023).
- WIKIPEDIA (août 2023b). Saint-Avé. Wikipédia - L'encyclopédie libre [en ligne]. URL : <https://fr.wikipedia.org/wiki/Saint-Av> (visité le 06/09/2023).
- WIKIPEDIA (août 2023c). Salles (Gironde). Wikipédia - L'encyclopédie libre [en ligne]. URL : [https://fr.wikipedia.org/wiki/Salles\\_\(Gironde\)](https://fr.wikipedia.org/wiki/Salles_(Gironde)) (visité le 06/09/2023).
- WÜTHRICH, M. V. et MERZ, M. (2023). Statistical Foundations of Actuarial Learning and its Applications.

# Annexe A

## Annexes

### A.1 Annexes Mathématiques

#### A.1.1 Appartenance des lois Gamma et Normale à la famille exponentielle

Si  $Y \sim \text{gamma}(\alpha, \tau)$ , alors sa densité s'écrit comme :

$$f(y) = \frac{\tau^\alpha}{\Gamma(\alpha)} y^{\alpha-1} \exp(-\tau y)$$

Une autre paramétrisation de la gamma est possible lorsque  $\alpha = \delta$  et  $\tau = \delta\mu$ . Sous cette forme, la densité s'exprime alors :

$$\begin{aligned} f(y) &= \left(\frac{\delta}{\mu}\right)^\delta \frac{1}{\Gamma(\delta)} y^{\delta-1} \exp\left(-\frac{\delta y}{\mu}\right) \\ &= \frac{\delta^\delta}{\Gamma(\delta)} y^{\delta-1} \left(\frac{1}{\mu}\right)^\delta \exp\left(-\frac{\delta y}{\mu}\right) \\ &= \frac{\delta^\delta}{\Gamma(\delta)} y^{\delta-1} \exp\left(\delta \log\left(\frac{1}{\mu}\right) - \frac{\delta y}{\mu}\right) \end{aligned}$$

qui appartient donc à la famille exponentielle avec :

$$\begin{aligned} a(y, \phi) &= \frac{\delta^\delta}{\Gamma(\delta)} y^{\delta-1} && \text{avec } \delta = \frac{1}{\phi} \\ \theta &= -\frac{1}{\mu} \\ k(\theta) &= -\log(-\theta) \\ \phi &= \frac{1}{\delta} \end{aligned}$$

Si  $Y \sim \text{Normal}(\mu, \sigma^2)$ , alors sa densité  $f(y)$  s'écrit comme :

$$\begin{aligned} f(y) &= \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left(-\frac{1}{2\sigma^2}(y - \mu)^2\right) \\ &= \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma^2} + \frac{2\mu y}{2\sigma^2} - \frac{\mu^2}{2\sigma^2}\right) \\ &= \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma^2}\right) \exp\left(\frac{\mu y}{\sigma^2} - \frac{\mu^2}{2\sigma^2}\right) \end{aligned}$$

qui appartient donc à la famille exponentielle avec :

$$\begin{aligned} a(y, \phi) &= \frac{1}{\sqrt{2\pi\phi}} \exp\left(-\frac{y^2}{2\phi}\right) \\ \theta &= \mu \\ k(\theta) &= \frac{\mu^2}{2} \\ \phi &= \sigma^2 \end{aligned}$$

### A.1.2 Queue de distribution de la loi log-logistique

Une loi de probabilité est dite à queue lourde à droite si elle vérifie :

$\forall t > 0, \lim_{x \rightarrow \infty} e^{tx} \bar{F}(x) = \infty$ . avec  $\bar{F}$  sa fonction de survie.

La fonction de répartition de la loi log-logistique est définie comme suit :

$$\begin{aligned} F(x; \alpha, \beta) &= \frac{1}{1 + \left(\frac{x}{\alpha}\right)^{-\beta}} \\ &= \frac{\left(\frac{x}{\alpha}\right)^{\beta}}{1 + \left(\frac{x}{\alpha}\right)^{\beta}} \\ &= \frac{x^{\beta}}{\alpha^{\beta} + x^{\beta}} \end{aligned}$$

où  $x > 0$ ,  $\alpha > 0$ , et  $\beta > 0$ .

Sa fonction de survie est donc égale à :  $\bar{F}(x) = \frac{\alpha^{\beta}}{\alpha^{\beta} + x^{\beta}}$

Ainsi,  $\lim_{x \rightarrow \infty} e^{tx} \bar{F}(x) = \lim_{x \rightarrow \infty} \frac{e^{tx} \alpha^{\beta}}{x^{\beta}} = \infty$ . Ainsi, il s'agit donc d'une loi de probabilité à queue lourde à droite.

**Definition**

Soit  $Y$  une variable aléatoire à valeurs réelles de support  $\mathbb{Y}$ . Cette distribution appartient à la famille exponentielle  $\mathcal{F}_{exp}$  si sa densité ou sa f.m.p s'écrit

$$f_Y(y; \lambda, w/\phi, b, c) = \exp\left(\frac{y\theta - b(\theta)}{\phi/w} + c(y; w/\phi)\right), y \in \mathbb{Y},$$

avec :

- $\theta \in \mathbb{R}$ , le paramètre canonique ;
- $\phi > 0$  le paramètre de dispersion ;
- $w > 0$  un poids individuels (on remplace aussi  $\phi/w$  par  $a(\phi)$  avec  $a$  une fonction réelle) ;
- $b$  et  $c$  des fonctions réelles connues qui caractérisent la loi.

**Exemples de distributions usuelles**

Distribution	Domaine	Paramètre $\theta$	Paramètre $\phi$	Fonction $b(x)$	Fonction $c(x, \phi)$
Bernoulli	$\{0, 1\}$	$\log\left(\frac{p}{1-p}\right)$	1	$\log(1 + e^x)$	0
Poisson	$\mathbb{N}$	$\log(\mu)$	1	$e^x$	$-\log(x!)$
Gaussian	$\mathbb{R}$	$\mu$	$\sigma^2$	0	$-\frac{1}{2} \log(2\pi\phi)$
Gamma	$]0, +\infty[$	$\frac{-1}{\mu}$	$\frac{1}{\nu}$	$-\log(-x)$	$\frac{\log(x/\phi)}{\phi} - \log(x) - \log \Gamma\left(\frac{1}{\phi}\right)$
Inv. Gauss.	$]0, +\infty[$	$\frac{-1}{2\mu^2}$	$\frac{1}{\sigma^2}$	$-\sqrt{-2x}$	$-\frac{1}{2} \log(2\pi\phi x^3) - \frac{1}{2\phi x}$

FIGURE A.1 : Mesures de dispersion par famille exponentielle

## A.2 Cartes de la sécheresse

Ci-dessous sont présentées les cartes de la sécheresse observées suite à la mise en place de certaines réformes. Pour ces cartes, les gradients évoluent, pour garder plus de précision.

### Modification de la période de retour

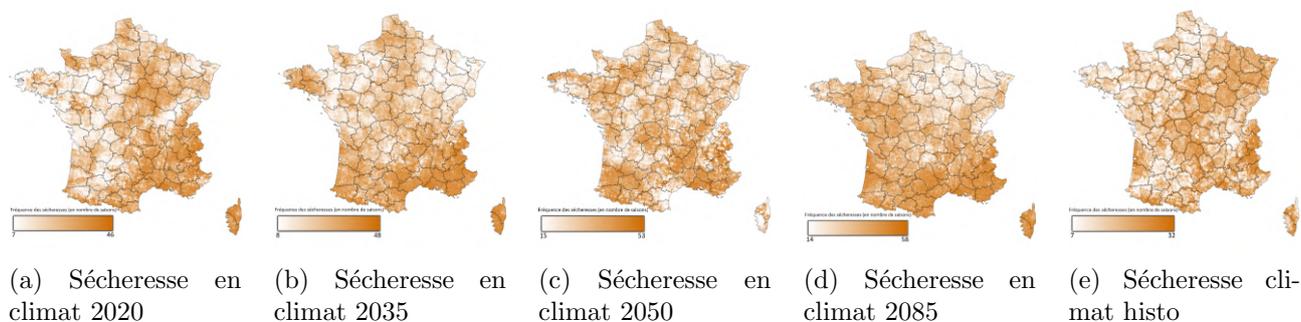


FIGURE A.2 : Effets de la modification de la période de retour sur les projections climatiques

### Communes limitrophes

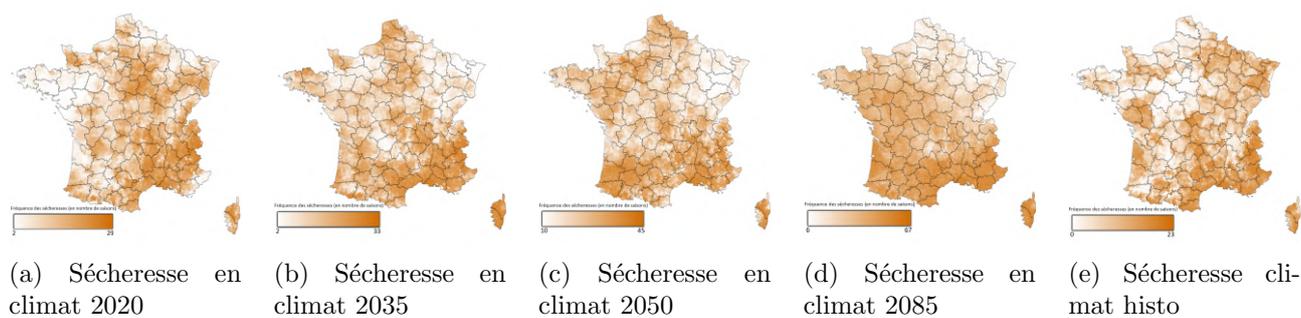


FIGURE A.3 : Effets de la prise en compte des communes limitrophes sur les projections climatiques

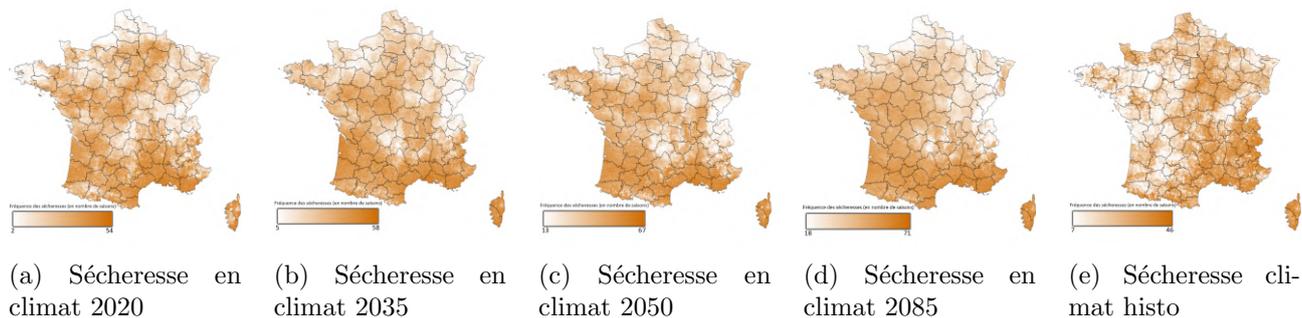
**Accumulation de la sécheresse (3 mois)**

FIGURE A.4 : Effets de la prise en compte de l'accumulation de sécheresses (3 mois) sur les projections

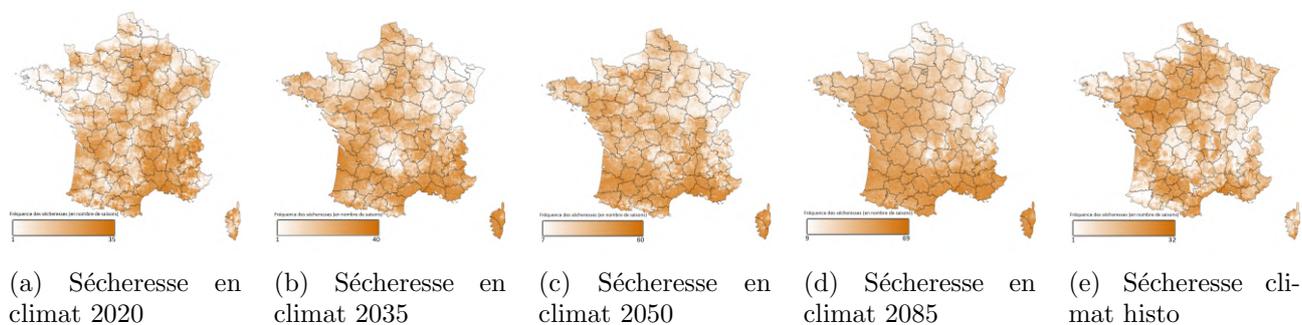
**Accumulations de la sécheresse (accu6)**

FIGURE A.5 : Effets de la prise en compte de l'accumulation de sécheresses(6 mois) sur les projections

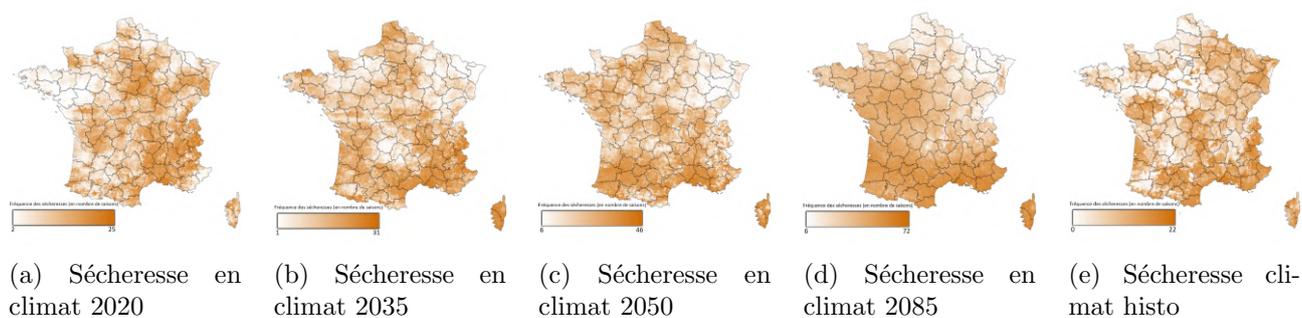
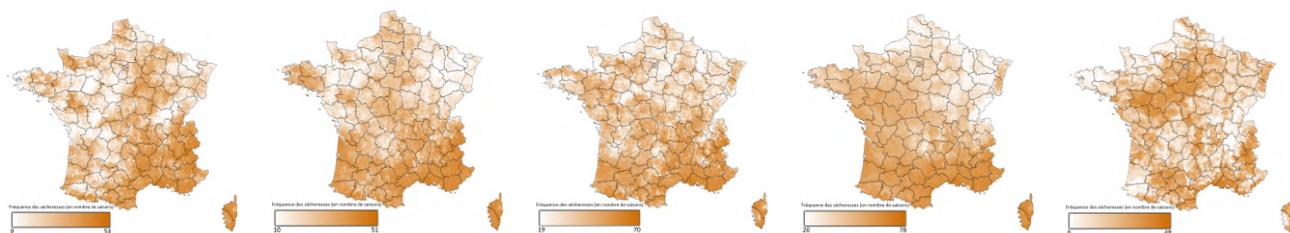
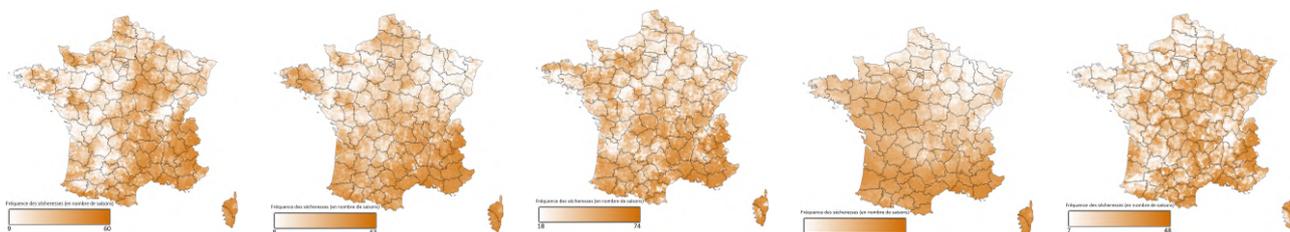
**Accumulations de la sécheresse (accu24)**

FIGURE A.6 : Effets de la prise en compte de l'accumulation de sécheresses(24 mois) sur les projections

**Tout en 1 (accu6)**

(a) Sécheresse en climat 2020    (b) Sécheresse en climat 2035    (c) Sécheresse en climat 2050    (d) Sécheresse en climat 2085    (e) Sécheresse climat histo

FIGURE A.7 : Effets de l'application de toutes les réformes(accu 6) sur les projections climatiques

**Tout en 1 (accu 24)**

(a) Sécheresse en climat 2020    (b) Sécheresse en climat 2035    (c) Sécheresse en climat 2050    (d) Sécheresse en climat 2085    (e) Sécheresse climat histo

FIGURE A.8 : Effets de l'application de toutes les réformes(accu 24) sur les projections climatiques

## A.3 Etudes accumulation des sécheresses sur 3 et 6 mois

### Accumulation des sécheresses

#### Impact sur les résultats historiques

##### Accu 3 mois (figure A.4e)

La première méthode est la plus violente et sans doute la moins probable. Elle n'est pas en adéquation avec la cinétique lente du RGA. Ici, une durée de 3 mois ne représente pas une contrainte suffisamment restrictive pour ne concerner que des communes exposées à la sécheresse. Il ne s'agit d'ailleurs donc pas non plus de « l'esprit de la réforme », comme expliqué précédemment, qui a pour but d'indemniser les communes dont la reconnaissance CatNat est bloquée par la méthode de calcul. Toutefois, elle permet de mieux se rendre compte du rôle déterminant joué par la durée sélectionnée dans la réforme. Les régions touchées varient énormément. Il s'agit ici plutôt de régions du croissant argileux et de l'Ouest de la France et de la région parisienne, au profit d'une relative accalmie pour le sud et l'est de la France. Le nombre de sécheresses éligibles est multiplié sur la période historique par 5,5 et le coût par 4,4 ce qui montre la contrainte trop faible de 3 mois de sécheresse.

##### Accu 6 mois (figure A.5e)

Cette réforme est une alternative intéressante. Le but est de déterminer si les 6 derniers mois ont été anormalement secs. Une nuance à faire est toutefois la brutalité de la méthode de calcul (qui sera affinée avec la proposition suivante). En effet, le calcul pourrait être vu comme trop manichéen puisqu'une commune ayant un mois un peu moins sec que les autres pourrait briser sa série de 6 mois consécutifs tout en ayant 10 mois sur 11 en sécheresse alors qu'une autre pourrait recevoir sa déclaration CatNat en ayant que 6 mois en sécheresse pourvu qu'ils se suivent. Les zones touchées changent à nouveau énormément comparativement à la carte des sécheresses historiques mais sont très proches de celles de la carte pour l'accumulation de 3 mois. L'augmentation des sécheresses et des coûts est nettement plus faible que précédemment bien que les sécheresses éligibles et les coûts soient quand même multipliés par respectivement 2,5 et 2,2.

#### Projections climatiques

##### Accu 3 mois (figures A.4)

Les cartes obtenues sont claires et assez proches les unes des autres indiquant clairement que cette mesure a tendance à privilégier des endroits plus secs comme le sud de la France en remontant le croissant argileux jusqu'à la région parisienne. Le nombre de sécheresses éligibles et les coûts sont multipliés par 2,3 et 2 respectivement jusqu'en 2050 en moyenne. L'augmentation considérable des températures envisagée par le scénario 8.5 fait exploser la sinistralité à horizon 2080 où elle est multipliée par presque 3 frôlant ainsi les 150 milliards d'euros, soit 7,5 milliards d'euros par an au seul titre de la sécheresse.

##### Accu 6 mois (figures A.5)

Les cartes de la sécheresse pour cette période sont assez proches de celles pour la mesure des 3 mois. Le changement majeur s'opère au niveau des observations. Le nombre de sécheresses éligibles est multiplié par 1,5 et les coûts par 1,3 jusqu'en 2050. Une explosion du coût a lieu à horizon 2085 avec un doublement du coût « normal » et une multiplication par 2,3 des sécheresses éligibles.

## Evolution sur 2 communes-types

**Accu 6 mois** Pour cette partie, seule la dernière simulation de la mesure a été retenue (6 mois), la mesure de 3 mois ayant été jugée trop irréaliste. On observe une augmentation croissante et assez linéaire de la sinistralité avec une augmentation très importante du coût à horizon 2085. La dynamique suivie est donc la même que pour l'ensemble de la France. Il est tout de même à noter que la commune bretonne de Saint-Avé est moins marquée par les épisodes de sécheresses de 2085.

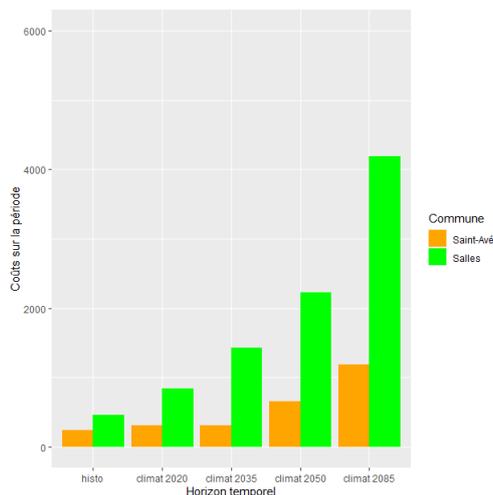


FIGURE A.9 : Coûts de la sécheresse sur 2 communes à différents horizons de temps( accu6)

**Sensibilité au scénario RCP** On observe une différence très importante d'augmentation des coûts entre les deux scénarios. En effet, l'optimisme du scénario 4.5 rend beaucoup plus rare les épisodes de sécheresse et donc l'impact de ces réformes. On remarque alors, une augmentation nettement plus faible des coûts pour le scénario 4.5 et ce, particulièrement, à partir de 2050. Avec ces méthodes, il y a au moins 2 milliards d'euros par an en plus d'augmentation pour le scénario 8.5 à horizon 2085. Ces chiffres présentent aussi l'étrange particularité d'avoir un coût moyen annuel plus élevé pour la période historique qu'en climat 2020 pour ac3 et ac6 ce qui montre que ces deux méthodes, contrairement à ac24, ne discriminent que trop peu les sécheresses et par conséquent leurs coûts.

Période \ Scénario GIEC	RCP 4.5	RCP 8.5
Histo	2,03	2,03
Climat 2020	1,67	2,01
Climat 2035	3,02	2,30
Climat 2050	3,53	3,82
Climat 2085	3,95	7,26

(a) Tableau récapitulatif des coûts annuels (en milliards€)(ac3)

Période \ Scénario GIEC	RCP 4.5	RCP 8.5
Histo	1,01	1,01
Climat 2020	0,90	1,17
Climat 2035	1,73	1,34
Climat 2050	1,73	2,51
Climat 2085	1,97	4,69

(b) Tableau récapitulatif des coûts annuels (en milliards€)(ac6)

TABLE A.1 : Tableaux récapitulatifs des coûts suivant la méthode utilisée pour l'implémentation de la mesure

## A.4 Etude : toutes les réformes, accumulation sécheresse 6 mois

### Tout en 1 (accu6)

Dans cette partie, sera considérée l'adoption de l'intégralité des mesures présentées précédemment. Cette réforme est abrégée en *tt6* dans les tableaux.

**Impact sur les résultats historiques (A.7e)** Cette carte présente les mêmes régions exposées que la carte obtenue après implémentation de la réforme d'accumulation 6 mois seulement ce qui montre sa prépondérance et donc le poids qu'elle a parmi les autres réformes. Sur cette période, une augmentation des sécheresses et des coûts de plus de 300% est à prévoir. Le coût estimé correspond à 4,2 fois le coût de base.

**Projections climatiques (A.7)** A l'instar de la période historique, les projections climatiques sont très proches des résultats obtenus avec la réforme de l'accumulation de 6 mois de sécheresse seule en terme de zones touchées. Les coûts suivent également une dynamique similaire à celle de cette réforme. On observe donc un pic de sinistralité à horizon 2085 après une augmentation notable dès 2050. Toutefois, l'intensité est toute autre. En effet, le nombre de sécheresses est plus de 3 fois plus important d'ici la fin du siècle et près de 4 fois plus important en 2020/2035. Pour les climats 2020/2035, la modification de la période de retour joue un rôle prépondérant. Le coût est lui multiplié par 3 d'ici la fin du siècle dans le cas de l'adoption de l'ensemble des réformes et frôlerait les 145 milliards d'euros. Le coût est même multiplié par près de 3,5 avant 2050.

**Evolution sur 2 communes-types** L'évolution de la sinistralité des communes est symptomatique de celle de la France. On voit une valeur record atteinte à horizon 2085. La sinistralité augmente quasi-linéairement pour le reste de la période sinon. Cela est majoritairement dû à la modification de la période de retour pour le début du siècle puis à la prise en compte de l'accumulation de sécheresses pour la période 2040-2070.

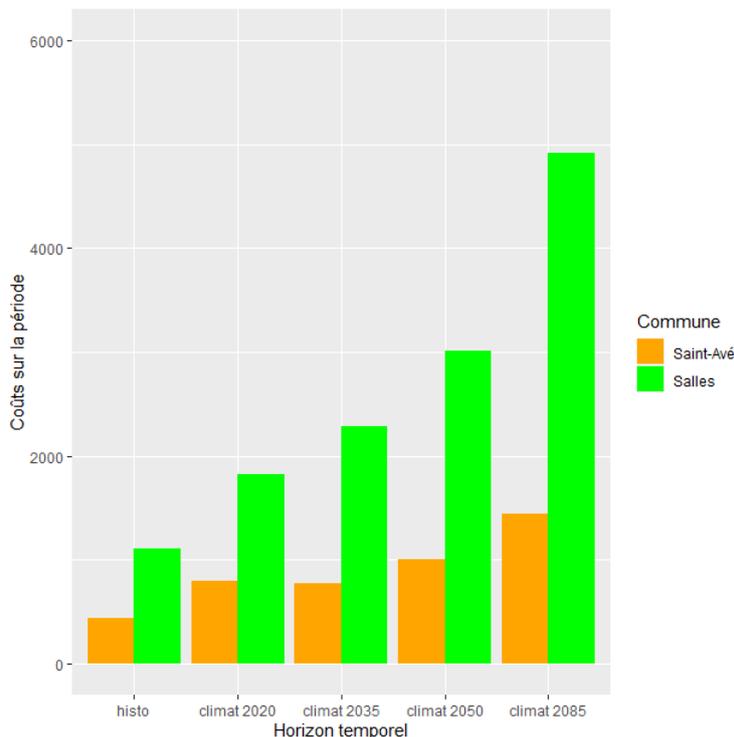


FIGURE A.10 : Coûts de la sécheresse sur 2 communes à différents horizons de temps (toutes les réformes( accu6))

**Sensibilité au scénario RCP** Les coûts, dans le cas de l’application de l’ensemble des réformes, sont extrêmement élevés : au moins 5 fois plus que sur la période historique avec des coûts moyens annuels de l’ordre de 3 milliards d’euros. On remarque des dynamiques typiques des scénarios 4.5 et 8.5 avec des valeurs véritablement élevés dans les deux cas. Les valeurs pour le scénario 4.5 sont peut être quelque peu surévalués car le modèle ne prend pas en compte l’intensité de la sécheresse. En effet, la méthode de calcul utilisée ne relève que la présence ou non de sécheresse.

Période \ Scénario GIEC	RCP 4.5	RCP 8.5
Histo	1,93	1,93
Climat 2020	3,07	3,30
Climat 2035	4,22	3,45
Climat 2050	4,15	4,80
Climat 2085	3,90	7,22

FIGURE A.11 : Tableau récapitulatif des coûts annuels (en milliards€)

**Conclusion** L’application de l’ensemble des réformes reviendrait à indemniser l’équivalent de la sécheresse de 2022 tous les ans. La modification de la période de retour alliée à l’accumulation des sécheresses augmente considérablement le coût de la sécheresse. Toutefois, il est indéniable que considérer cette forme de réforme de l’accumulation de sécheresses sur 6 mois produit des résultats pouvant paraître très élevés. La méthode la plus pertinente semble donc être celle utilisant l’accumulation de sécheresses sur 24 mois.

## A.5 Variables utilisées pour le GLM

- Nombre total de logements dans la commune (nl)
- Nombre de logements en exposition moyenne ou forte dans la commune (nlmf)
- Nombre de logements en exposition faible dans la commune (nlf)
- Nombre de logements en zone a priori non argileuse dans la commune (nlsa)
- Nombre de logements en exposition moyenne ou forte construits avant 1921 (nlmf20)
- Part de logements en exposition moyenne ou forte construits avant 1921 (plmf20)
- Nombre de logements en exposition moyenne ou forte construits entre 1921 et 1945 (nlmf45)
- Part de logements en exposition moyenne ou forte construits entre 1921 et 1945 (plmf45)
- Nombre de logements en exposition moyenne ou forte construits entre 1946 et 1975 (nlmf75)
- Part de logements en exposition moyenne ou forte construits entre 1946 et 1975 (plmf75)
- Nombre de logements en exposition moyenne ou forte construits après 1976 (nlmf0)
- Part de logements en exposition moyenne ou forte construits après 1976 (plmf0)
- Nombre de logements en exposition faible construits avant 1921 (nlf20)
- Part de logements en exposition faible construits avant 1921 (plf20)
- Nombre de logements en exposition faible construits entre 1921 et 1945 (nlf45)
- Part de logements en exposition faible construits entre 1921 et 1945 (plf45)
- Nombre de logements en exposition faible construits entre 1946 et 1975 (nlf75)
- Part de logements en exposition faible construits entre 1946 et 1975 (plf75)
- Nombre de logements en exposition faible construits après 1976 (nlf0)
- Part de logements en exposition faible construits après 1976 (plf0)
- Surface de la commune (en m<sup>2</sup>) (sc)
- Surface de la commune en exposition faible (en m<sup>2</sup>) (sfc)
- Part de la commune en exposition faible (en %) (pfc)
- Surface de la commune en exposition moyenne ou forte (en m<sup>2</sup>) (smfc)
- Part de la commune en exposition moyenne ou forte (en %) (pmfc)