

Mémoire présenté le :
pour l'obtention du Diplôme Universitaire d'actuariat de l'ISFA
et l'admission à l'Institut des Actuaires

Par : DELYON MANIABLE Siméon

Titre : Projection de la sinistralité des inondations et sécheresses en France métropolitaine
à partir de données libres

Confidentialité : NON (Durée : 1 an 2 ans)

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

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

.....

.....

.....

*Membres présents du jury de
l'ISFA*

.....

.....

.....

Entreprise :

Nom : Seabird Conseil

Signature :

*Directeur de mémoire en entre-
prise :*

Nom : BADILLET Antoine

Signature :

Invité :

Nom :

Signature :

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

Signature du responsable entreprise

Signature du candidat

Résumé

Dans ses derniers rapports, le GIEC met en garde contre l'augmentation rapide des températures et des catastrophes naturelles, soulignant les conséquences en termes de sinistralité, notamment pour les assureurs qui devront faire face à ces nouveaux défis. C'est pourquoi l'ACPR a réalisé un deuxième exercice pilote d'évaluation des risques climatiques pour les banques et les assurances et qu'un rapport dit « Langreny » sur le régime Cat Nat a été mandaté par le gouvernement. Ce régime est particulièrement concerné par l'accroissement des sinistres liés aux inondations et aux sécheresses, périls les plus coûteux. Ce mémoire propose une étude approfondie de ces deux types de catastrophes naturelles en France métropolitaine, avec pour objectif de modéliser la projection de leur sinistralité à l'horizon 2050.

L'approche retenue dans ce mémoire se distingue par l'utilisation de données ouvertes pour développer des modèles de prévision de la fréquence des inondations et des sécheresses à une échelle fine, celle de la maille communale. Cette granularité permet d'obtenir des projections plus précises, en phase avec les scénarios climatiques du GIEC, et alignées sur les méthodes de reconnaissance des catastrophes naturelles utilisées par les assureurs.

Le mémoire débute par une présentation des enjeux climatiques actuels et de leur impact sur le secteur de l'assurance. Une deuxième partie est consacrée à l'analyse détaillée des données disponibles et aux limites de l'Open Data dans ce contexte. Les sections suivantes se concentrent sur la conception et l'implémentation des modèles prédictifs, qui permettent de projeter la sinistralité des inondations et des sécheresses à l'horizon 2050. Les résultats obtenus sont ensuite comparés aux études existantes, en particulier les travaux de l'ACPR, afin d'évaluer la robustesse des modèles proposés et leur pertinence pour les assureurs. Les résultats obtenus sont finalement intégrés dans un outil.

Mots-clés : Risques climatiques, Catastrophes Naturelles, Sécheresse, Retrait-gonflement des argiles, Inondation, Changement climatique, GIEC, rapport Langreny, ruissellement

Abstract

In its latest reports, the IPCC warns of the rapid increase in temperatures and natural disasters, highlighting the consequences in terms of claims, particularly for insurers who will have to face these new challenges. This is why the ACPR conducted a second pilot exercise to assess climate risks for banks and insurance companies, and a report known as the "Langreny Report" on the Cat Nat regime was commissioned by the government. This regime is particularly concerned with the increase in claims related to floods and droughts, the most costly perils. This thesis offers an in-depth study of these two types of natural disasters in metropolitan France, with the aim of modeling the projection of their claims at the 2050 horizon.

The approach taken in this thesis is distinguished by the use of open data to develop prediction models for the frequency of floods and droughts at a fine scale, that of the communal level. This granularity allows for more precise projections, in line with the IPCC climate scenarios, and aligned with the methods of recognizing natural disasters used by insurers.

The thesis begins with a presentation of current climate challenges and their impact on the insurance sector. The second part is dedicated to a detailed analysis of the available data and the limitations of Open Data in this context. The following sections focus on the design and implementation of predictive models that allow for the projection of flood and drought claims at the 2050 horizon. The results obtained are then compared with existing studies, particularly those by the ACPR, in order to evaluate the robustness of the proposed models and their relevance to insurers. The results are finally integrated into a tool.

Keywords: Climate Risks, Natural Disasters, Drought, Shrink-swell of clays, Flood, Climate change, IPCC, Langreny report, Runoff

Note de synthèse

Contexte et problématique

Le changement climatique représente un défi majeur pour le secteur de l'assurance, notamment en France, où les catastrophes naturelles telles que les inondations et les sécheresses sont de plus en plus fréquentes et intenses. Le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) alerte depuis plusieurs décennies sur l'accroissement des risques climatiques et ses conséquences économiques, notamment pour les acteurs de l'assurance. Dans ce contexte, l'Autorité de contrôle prudentiel et de résolution (ACPR) a mené plusieurs exercices d'évaluation des risques climatiques pour les banques et les assurances, tandis que le rapport Langrenoy, mandaté par le gouvernement français, a souligné l'urgence d'adapter le régime des catastrophes naturelles (Cat Nat) à ces nouvelles réalités .

L'augmentation prévisible de la fréquence et de la gravité des sinistres liés aux inondations et aux sécheresses pose la question de la pérennité du régime d'assurance actuel, qui repose sur une mutualisation des risques et une solidarité nationale. Si l'inassurabilité n'est pas encore une réalité immédiate, certaines zones géographiques sont d'ores et déjà à risque, avec des coûts assurantiels qui explosent, notamment en Californie, mais également en France .

En parallèle, l'ouverture des données publiques et l'essor de l'Open Data offrent de nouvelles opportunités pour modéliser et anticiper les risques. Cependant, ces données sont souvent limitées en termes de précision et de disponibilité, notamment pour les données de sinistralité, ce qui complique la tâche des modélisateurs et des assureurs . Un des problèmes majeurs rencontrés est la disponibilité de données sur l'ensemble du territoire métropolitain (voir figures ci-après). Il a alors fallu mettre en place 2 techniques de lissage spatial détaillées par la suite : pondération par inverse de la distance et recours aux polygones de Voronoï.

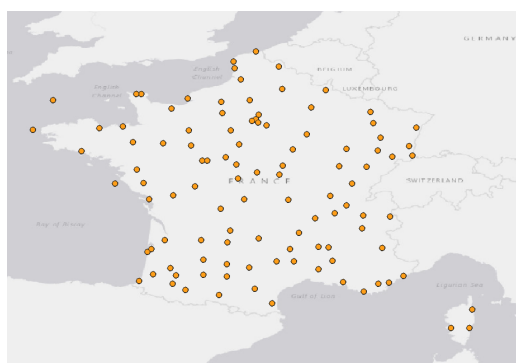


Figure 1 – Implantation des stations météorologiques (bulletins Météo France)

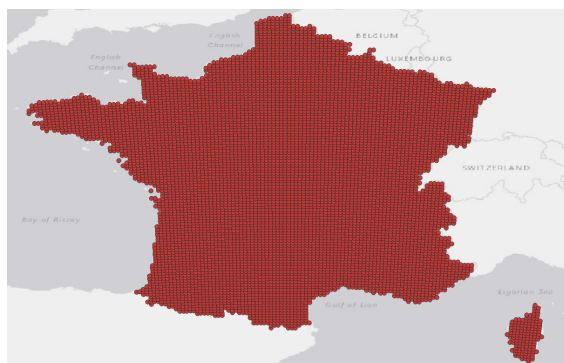


Figure 2 – Implantation des stations météorologiques (données de projection DRIAS)

Ainsi, ce mémoire s'attache à modéliser les risques de sinistralité liés aux inondations et aux sécheresses à l'horizon 2050, en exploitant au maximum les données ouvertes disponibles, tout en

soulignant leurs limites .

La problématique principale de cette étude est donc projeter la sinistralité liée aux principaux postes des catastrophes naturelles en France - soit les inondations et les sécheresses - ainsi qu'une solution permettant à tout un chacun, par le biais d'une application web, de se renseigner sur ses risques passés et futurs.

Modélisation des périls

La modélisation des risques liés aux inondations et aux sécheresses constitue une part cruciale de la prévision de la sinistralité à l'horizon 2050. Ces périls sont fortement influencés par le changement climatique, rendant la prévision de leur fréquence et de leur sévérité indispensable pour les acteurs de l'assurance. Dans ce contexte, l'approche adoptée dans ce mémoire repose sur une exploitation fine des données ouvertes disponibles, en combinant des projections climatiques du GIEC avec des données historiques et météorologiques locales. Cette section présente une analyse approfondie des méthodes utilisées pour modéliser la fréquence et la sévérité des sinistres liés à ces deux types de catastrophes naturelles.

Modélisation de la fréquence des reconnaissances Cat-Nat

Pour modéliser la fréquence, le mémoire s'appuie sur une vaste base de données historique couvrant plusieurs décennies de sinistralité liée aux inondations et aux sécheresses, à l'échelle communale. Ces données sont ensuite croisées avec des projections climatiques basées sur le scénario du GIEC RCP 4.5, qui représente une augmentation modérée des émissions de gaz à effet de serre d'ici 2050. Ce scénario permet de projeter l'évolution des conditions météorologiques à long terme, notamment en termes de précipitations pour les inondations et de périodes de sécheresse pour les phénomènes de retrait-gonflement des argiles.

La sécheresse fait l'objet d'une procédure de reconnaissance détaillée. Ce sera donc sans l'ombre d'un doute la méthode de projection retenue. Pour ce qui est des inondations, la proposition faite dans cette étude est de modéliser la fréquence par des méthodes intuitives. On part d'une définition de probabilité par dénombrement que l'on ajuste ensuite en fonction des limites rencontrées. Trois méthodes seront ainsi exposées.

La granularité des données est un facteur clé dans cette modélisation. À l'échelle communale, la disponibilité et la précision des données varient considérablement d'une région à l'autre. Cela implique un recours à des méthodes d'interpolation spatiale pour ajuster les données manquantes et ainsi obtenir une couverture géographique plus homogène. Plusieurs méthodes ont été testées, comme l'inverse de la distance ou encore une approche faisant recours aux polygones de voronoi, pour optimiser l'ajustement des données climatiques et historiques sur l'ensemble du territoire métropolitain.

Les résultats montrent une hausse notable de la fréquence des événements d'inondation et de sécheresse à l'horizon 2050, avec des variations régionales importantes. Par exemple, certaines régions traditionnellement peu affectées par les inondations pourraient connaître une hausse de la fréquence en raison des changements dans les régimes de précipitations, tandis que d'autres, déjà exposées, verront une augmentation du nombre d'événements extrêmes. Pour les sécheresses, l'impact est encore plus prononcé dans les zones géologiques vulnérables au retrait-gonflement des argiles, comme le centre et l'est de la France, où les sols argileux sont particulièrement sensibles aux changements d'humidité.

Modélisation de la sévérité des sinistres

La sévérité des sinistres correspond au coût des dommages causés par les événements naturels, en prenant en compte leur intensité et l'ampleur des dégâts. Pour modéliser la sévérité, il est nécessaire de prendre en compte plusieurs variables, telles que la valeur des biens assurés, l'intensité des événements climatiques, et l'évolution démographique et économique de la région.

Dans ce mémoire, l'évolution de la sévérité est modélisée à partir de données historiques relatives aux coûts de sinistralité, corrigées pour l'inflation et la variation des prix des matériaux et des biens assurés. Une analyse des tendances récentes montre une augmentation marquée des coûts moyens des sinistres, en partie due à l'accroissement de la densité urbaine dans les zones vulnérables et à l'augmentation de la valeur des biens. De plus, les catastrophes récentes montrent une hausse de l'intensité des événements climatiques, un facteur clé de l'augmentation des coûts de réparation et d'indemnisation.

La projection de la sévérité à l'horizon 2050 s'appuie sur une modélisation stochastique qui prend en compte non seulement l'évolution des variables climatiques (précipitations et températures), mais également l'évolution démographique et les projections économiques. Les résultats indiquent une augmentation particulièrement forte des coûts associés aux sécheresses, du fait des dommages causés par le retrait-gonflement des argiles sur les habitations. Ce phénomène, déjà observé dans plusieurs régions, pourrait s'aggraver avec l'augmentation des températures et la réduction des précipitations, causant des dégâts structurels importants sur les bâtiments, en particulier dans les zones résidentielles.

Résultats et outil

Résultats de la sinistralité liée aux inondations en 2050

La modélisation de la sinistralité liée aux inondations repose sur plusieurs méthodes comparées, notamment l'approche par seuils et une méthode binaire. La première méthode indique une hausse de la fréquence des sinistres de +23,65 % entre 2023 et 2050. Toutefois, cette méthode s'est révélée insuffisante en raison de la faible quantité de données historiques disponibles pour certaines communes. Cela a conduit à des projections exagérées, certaines communes passant d'une reconnaissance unique de catastrophe à plus de 20 en 2050. Ces résultats, bien qu'indiquant une tendance à l'augmentation de la sinistralité, doivent être interprétés avec prudence en raison de la forte variance observée dans certaines zones.

La méthode binaire a permis de corriger certaines erreurs de projection, mais s'est révélée trop restrictive, limitant l'ampleur des hausses anticipées dans les zones à risque. Finalement, une méthode hybride a été adoptée, combinant les avantages des deux premières approches. Cette méthode a conduit à une projection plus réaliste, avec une augmentation de +27 % de la fréquence des inondations d'ici 2050, cohérente avec les études existantes sur le sujet

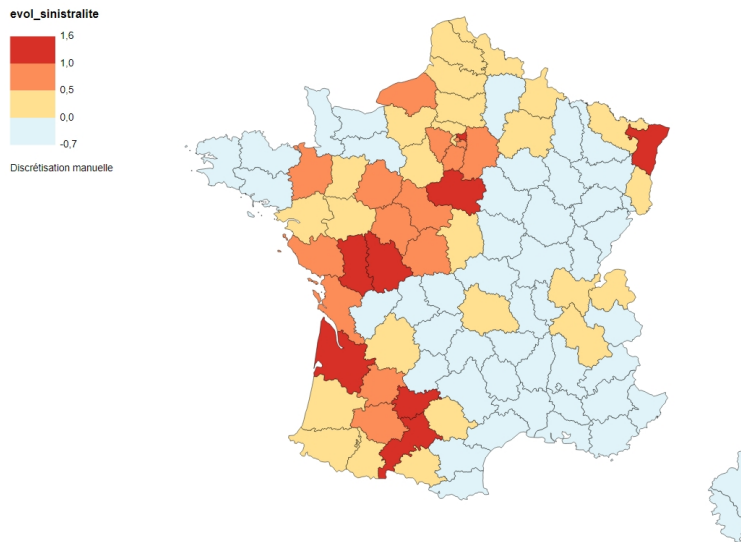


Figure 3 – Resultat final pour les inondations - projection à horizon 2050

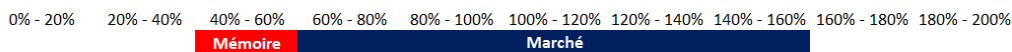


Figure 4 – Comparaison au marché

Résultats de la sinistralité liée aux sécheresses en 2050

Concernant la sinistralité liée aux sécheresses, les résultats montrent une augmentation encore plus marquée que pour les inondations. La méthode utilisée, qui repose sur des seuils de température et des données météorologiques fines, indique une hausse de la sinistralité de +125 % à l'horizon 2050. Cette augmentation s'explique par la multiplication des épisodes de sécheresse dans les régions sujettes au retrait-gonflement des argiles, un phénomène déjà observé dans de nombreuses régions en France.

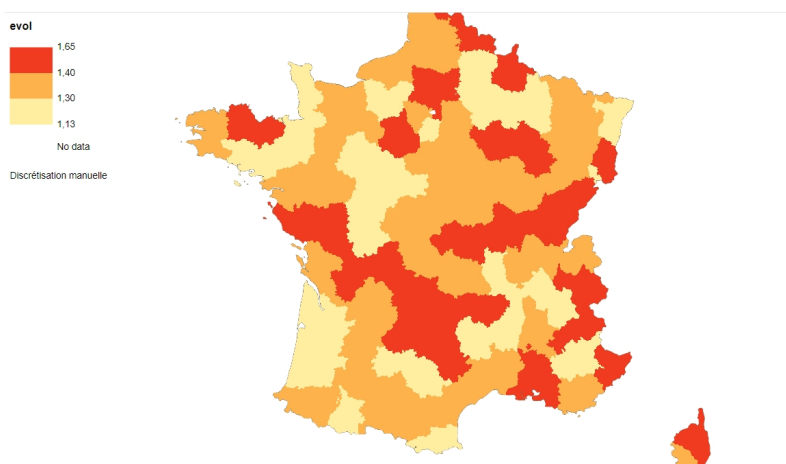


Figure 5 – Resultat final pour la sécheresse - projection à horizon 2050

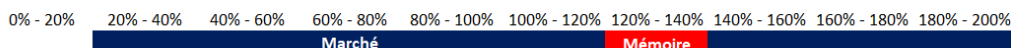


Figure 6 – Comparaison au marché

Construction de l’outil de visualisation des risques

Une des innovations majeures de ce mémoire est la création d’un outil de visualisation qui permet de représenter à la fois les risques passés et les projections de sinistralité à l’horizon 2050. Cet outil répond à plusieurs objectifs :

- Répertorier les types de périls ayant touché chaque commune (inondations, sécheresses, etc.) ;
- Afficher le nombre de reconnaissances officielles de catastrophes naturelles par commune ;
- Fournir un score de sinistralité pour chaque commune, en tenant compte des évolutions climatiques projetées ;
- Projeter l’évolution de la sinistralité d’ici 2050 pour les périls d’inondation et de sécheresse ;
- Offrir des indicateurs visuels (cartes, graphiques) pour faciliter la compréhension des risques climatiques à l’échelle locale ;

Exposition aux risques d'une adresse donnée

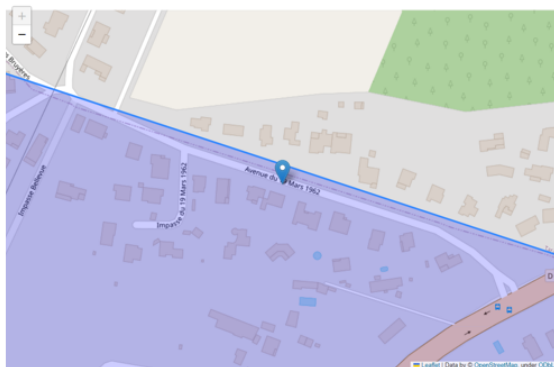
Commencez votre recherche

Adresse

Exemple: 15 rue de Bucarest, 75008 Paris



Avenue du 19 Mars 1962 83550 Vidauban



Type de catastrophe naturelle	Nombre de catastrophes naturelles reconnues entre 1982 et janvier 2023
Inondations et/ou Coulées de Boue	14
Mouvement de Terrain	3
Sécheresse	5

Risques recensés sur cette commune

Mouvement de terrain
Glissement de terrain
Tassements différentiels
Séisme
Feu de forêt
Transport de marchandises dangereuses
Radon
Affaissement minier

Evolution du coût de la sinistralité attendue horizon 2050 par rapport au climat 2023

Inondation	Sécheresse
+222.32%	+79.06%

Figure 7 – Interface utilisateur de l’outil

Cet outil (voir figure ci-dessus) se présente sous forme d’une application web. En entrant une adresse précise, il est possible d’obtenir une analyse détaillée des risques climatiques actuels et futurs. Cet outil vise à améliorer la connaissance des risques climatiques, permettant ainsi aux utilisateurs de prendre des décisions éclairées en matière d’assurance et de gestion des risques

Conclusion

Ce mémoire a mis en lumière l'impact croissant du changement climatique sur la sinistralité des inondations et des sécheresses en France d'ici 2050. En s'appuyant sur des données ouvertes et des projections climatiques, les résultats montrent une hausse significative de la fréquence et de la sévérité des sinistres, nécessitant une adaptation des stratégies des assureurs.

L'outil développé offre une visualisation fine des risques à l'échelle communale, utile aux acteurs du secteur. Cependant, des améliorations sont encore possibles, notamment par l'intégration de nouvelles méthodes de modélisation plus précises, comme celles proposées dans les travaux sur le ruissellement et les outils comme Cerema CartEau. Ce travail marque une étape vers une meilleure anticipation des risques climatiques et une gestion plus résiliente des sinistres futurs.

Synthesis note

Context and problem statement

Climate change represents a major challenge for the insurance sector, particularly in France, where natural disasters such as floods and droughts are becoming more frequent and intense. The Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) has been warning for several decades about the increasing climate risks and their economic consequences, especially for insurance actors. In this context, the Prudential Control and Resolution Authority (ACPR) has conducted several climate risk assessments for banks and insurers, while the Langreny report, commissioned by the French government, highlighted the urgency of adapting the natural disaster regime (Cat Nat) to these new realities.

The foreseeable increase in the frequency and severity of claims related to floods and droughts raises questions about the sustainability of the current insurance system, which relies on risk pooling and national solidarity. While uninsurability is not yet an immediate reality, certain geographical areas are already at risk, with insurance costs skyrocketing, particularly in California, but also in France.

At the same time, the opening of public data and the rise of Open Data offer new opportunities to model and anticipate risks. However, these data are often limited in terms of precision and availability, especially for claims data, which complicates the task of modelers and insurers. One of the major challenges encountered is the availability of data across the entire metropolitan territory (see figures below). Two spatial smoothing techniques were then implemented: inverse distance weighting and the use of Voronoi polygons.

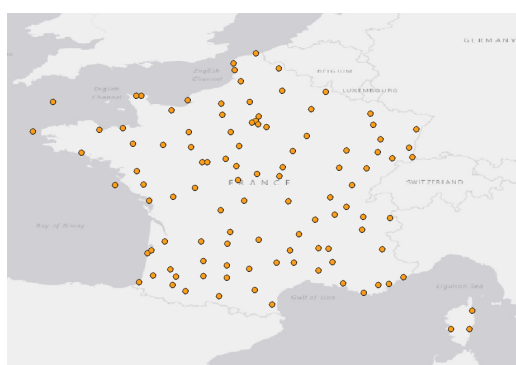


Figure 8 – Location of meteorological stations (Météo France bulletins)

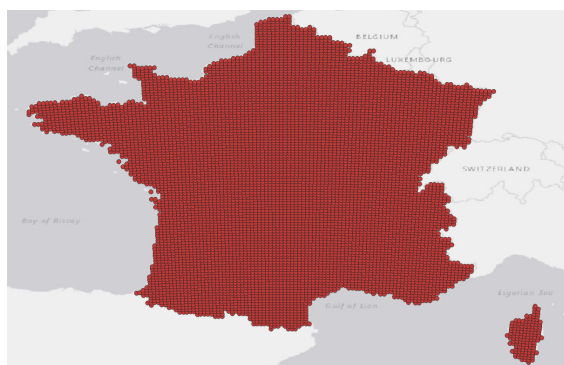


Figure 9 – Location of meteorological stations (DRIAS projection data)

Thus, this thesis focuses on modeling the claims risks associated with floods and droughts by 2050, using open data to the fullest extent possible, while highlighting their limitations.

The main issue in this study is to project the claims related to major natural disasters in France—namely floods and droughts—and provide a solution allowing anyone, through a web

application, to access information on their past and future risks.

Modeling of hazards

The modeling of risks related to floods and droughts is a crucial part of claims forecasting for 2050. These hazards are strongly influenced by climate change, making the prediction of their frequency and severity essential for insurers. In this context, the approach adopted in this thesis is based on a detailed exploitation of available open data, combining IPCC climate projections with historical and local meteorological data. This section provides an in-depth analysis of the methods used to model the frequency and severity of claims related to these two types of natural disasters.

Modeling the frequency of Cat-Nat recognitions

To model the frequency, the thesis relies on a vast historical database covering several decades of claims related to floods and droughts at the municipal level. These data are then cross-referenced with climate projections based on the IPCC RCP 4.5 scenario, which represents a moderate increase in greenhouse gas emissions by 2050. This scenario allows us to project the evolution of weather conditions in the long term, particularly in terms of rainfall for floods and drought periods for the shrink-swell phenomenon of clays.

Droughts are subject to a detailed recognition procedure, making it an unquestionable method for projection. For floods, the proposal in this study is to model the frequency using intuitive methods. We start with a probability definition based on counting, which is then adjusted depending on encountered limits. Three methods will be presented.

Data granularity is a key factor in this modeling. At the municipal level, the availability and accuracy of data vary significantly from one region to another. This implies the use of spatial interpolation methods to adjust missing data and thus obtain a more homogeneous geographic coverage. Several methods have been tested, such as inverse distance weighting and an approach using Voronoi polygons, to optimize the adjustment of climate and historical data across the entire metropolitan territory.

The results show a notable increase in the frequency of flood and drought events by 2050, with significant regional variations. For example, some regions traditionally less affected by floods could see an increase in frequency due to changes in precipitation patterns, while others, already exposed, will see an increase in extreme events. For droughts, the impact is even more pronounced in geologically vulnerable areas with shrink-swell clay soils, such as central and eastern France, where clayey soils are particularly sensitive to moisture changes.

Modeling the severity of claims

The severity of claims corresponds to the cost of damages caused by natural events, taking into account their intensity and the extent of the damages. To model severity, several variables must be considered, such as the value of insured assets, the intensity of weather events, and the demographic and economic evolution of the region.

In this thesis, the evolution of severity is modeled using historical data on claims costs, adjusted for inflation and the variation in the prices of materials and insured assets. An analysis of recent trends shows a marked increase in the average cost of claims, partly due to the growing urban

density in vulnerable areas and the increase in asset values. Additionally, recent disasters show a rise in the intensity of climate events, a key factor in the increase in repair and indemnity costs.

The projection of severity by 2050 is based on a stochastic model that takes into account not only the evolution of climate variables (precipitation and temperatures) but also demographic trends and economic projections. The results indicate a particularly strong increase in costs associated with droughts, due to damages caused by the shrink-swell of clays on buildings. This phenomenon, already observed in several regions, could worsen with rising temperatures and reduced rainfall, causing significant structural damage to buildings, particularly in residential areas.

Results and tool

Results of flood claims in 2050

The flood claims modeling is based on several compared methods, including threshold approaches and a binary method. The first method indicates a +23.65% increase in claims frequency between 2023 and 2050. However, this method proved insufficient due to the low amount of historical data available for certain municipalities, leading to exaggerated projections. Some municipalities jumped from a single catastrophe recognition to more than 20 by 2050. These results, while indicating a trend towards increased claims, should be interpreted with caution due to the high variance observed in some areas.

The binary method corrected some projection errors but was too restrictive, limiting the scope of anticipated increases in high-risk areas. Ultimately, a hybrid method was adopted, combining the advantages of the two previous approaches. This method led to a more realistic projection, with a +27% increase in flood frequency by 2050, consistent with existing studies on the subject.

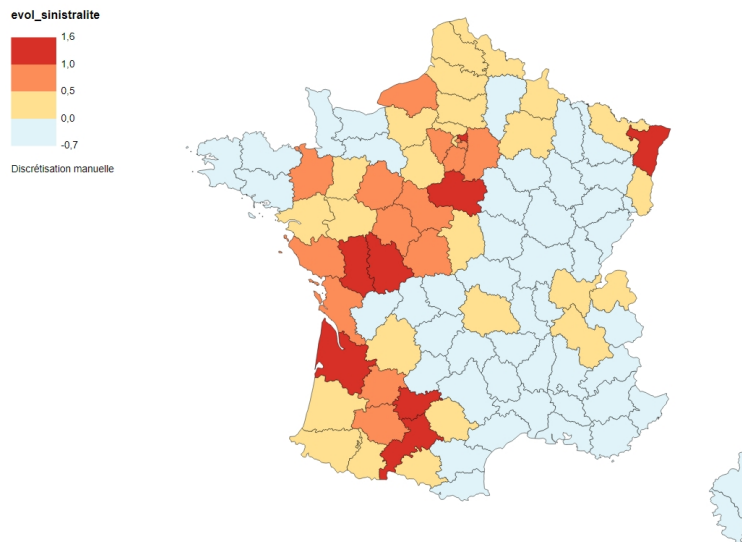


Figure 10 – Final result for floods - projection by 2050

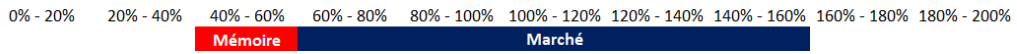


Figure 11 – Market comparison

Results of drought claims in 2050

Regarding drought claims, the results show an even greater increase than for floods. The method used, which relies on temperature thresholds and fine meteorological data, indicates a +125% increase in claims by 2050. This increase is explained by the multiplication of drought episodes in regions prone to shrink-swell of clays, a phenomenon already observed in many regions of France.

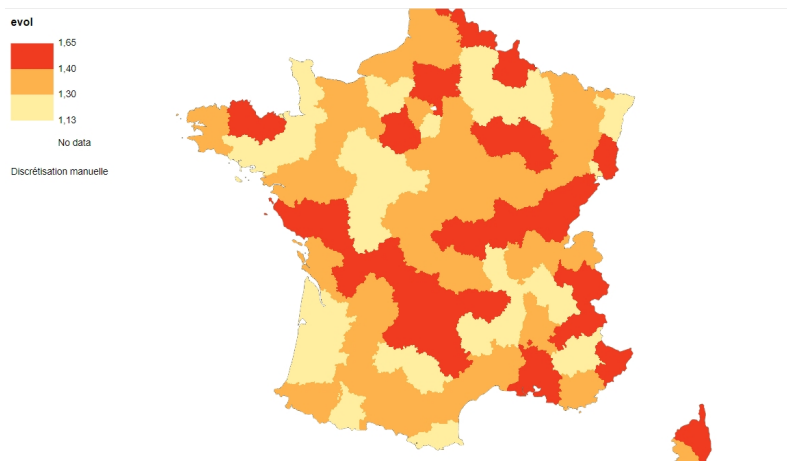


Figure 12 – Final result for drought - projection by 2050

Construction of the risk visualization tool

One of the major innovations of this thesis is the creation of a visualization tool that allows the representation of both past risks and claims projections for 2050. This tool serves several purposes:

- Catalog the types of hazards that have affected each municipality (floods, droughts, etc.);
- Display the number of official natural disaster recognitions per municipality;

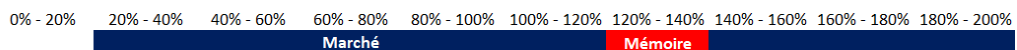


Figure 13 – Market comparison

Remerciements

Table des matières

Note de synthèse	1
Synthesis note	7
Remerciements	11
Table des matières	12
Introduction	14
1 L'assurance face au changement climatique	15
1.1 Changement climatique - Les travaux du GIEC	16
1.2 L'assurance des catastrophes naturelles en France	19
1.3 Focus sur les inondations et sécheresses	29
1.4 Exercice pilote ACPR	42
1.5 Inassurabilité et rapport Langreny	46
2 Présentation des données et limites de l'Open Data	48
2.1 Données de sinistralité	48
2.2 Données climatiques	52
3 Modéliser la sinistralité inondation et sécheresse	70
3.1 Modéliser la fréquence	70
3.2 Apport Météo France : application sur des données quotidiennes	79
3.3 Modéliser la sévérité	80
4 Résultats et construction d'un outil	88
4.1 La sinistralité inondation en 2050	88
4.2 La sinistralité sécheresse en 2050	92
4.3 Construction d'un outil	93

5	Vers une meilleure modélisation des inondations	95
5.1	Cerema CartEau	95
5.2	Le ruissellement	95
	Conclusion	101
	Bibliographie	102
	Annexes	104

Introduction

Le régime Cat-Nat tel que nous le connaissons aujourd’hui est-il pérenne? On le sait, la sinistralité est vouée à augmenter. On trouve dans la littérature plusieurs études - menées par des acteurs tels que Covéa, France Assureurs, l’ACPR etc. - détaillant cette évolution. Les méthodes et résultats obtenus diffèrent mais la tendance attendue fait consensus. Dans un premier temps, le présent mémoire tentera de mettre un chiffre sur la hausse attendue d’ici 2050 ; la problématique sous-jacente étant de savoir si le terme « risque » restera adapté ou si les périls concernés sont voués à définir des conditions normales de vie. Ensuite, il s’agira de créer un outil permettant de la visualiser à la maille la plus fine possible. En effet, selon une étude menée par l’Institut d’études opinion et marketing en France et à l’international (IFOP) pour Allianz ¹, 80 % des français déclarent aujourd’hui être inquiets quant au risque climatique mais très peu (un quart) se sont réellement informés sur le bilan d’exposition aux catastrophes naturelles lié à leur lieu de résidence.

Le présent mémoire propose une projection de la sinistralité liée aux principaux postes des catastrophes naturelles - soit les inondations et les sécheresses - ainsi qu’une solution permettant à tout un chacun, par le biais d’une application web, de se renseigner sur ses risques, et aux assureurs de connaître l’augmentation de leur sinistralité 2050 à partir de la connaissance de leur exposition jusqu’à la maille communale en prenant en compte le changement climatique mais aussi l’évolution démographique et l’inflation. Une meilleure connaissance du risque pourrait amener un consensus entre les individus et la volonté des institutions gouvernementales d’un habitat plus résilient et adapté à son environnement changeant. Pour cela sera implémentée une méthode pragmatique s’appuyant principalement sur des données libres.

En termes de structure, la première partie du mémoire est une partie définitionnelle et contextuelle. Elle traite des enjeux assurantiels autour du changement climatique et doit permettre au lecteur de comprendre l’ampleur et l’articulation des discussions autour des catastrophes naturelles en France en 2024. La deuxième partie sera l’occasion de s’intéresser aux données qui alimenteront les modèles proposés dans la partie suivante. La troisième partie, donc, propose de modéliser la sinistralité et s’essaie à construire des méthodes intuitives et applicable à partir de données libres. La disponibilité de ces données a été décuplée par la décision de Météo France de fournir l’accès à ses données à tous, au 01/01/2024. Il s’agira donc également de s’intéresser à l’apport de cette ouverture au publique. La dernière partie aura pour but de présenter les résultats issus du modèle, d’en discuter et de voir comment ils ont pu être intégrés à un outil. Elle sera aussi l’occasion de discuter d’améliorations et pistes potentielles.

1. <https://www.ifop.com/publication/les-francais-et-les-risques-climatiques/>

Chapitre 1

L'assurance face au changement climatique

C'est en 1949, lors de la Conférence scientifique des Nations unies pour la conservation et l'utilisation des ressources naturelles, que pour la première fois un organisme des Nations unies alerte sur l'épuisement des ressources naturelles . Un premier rapport sur l'état de l'environnement est alors publié par l'organisme alertant en 1951.

Le 1er mai 1967, la question du CO₂ et de l'évolution du climat est abordée dans une étude publiée par Syukuro Manabe et Richard T. Wetherakd. C'est la première fois qu'il est question de modéliser le climat et de prévoir l'évolution des quantités de CO₂. Le sujet prend peu à peu de l'ampleur par le biais d'évènements et publications visant tout d'abord à reconnaître l'existence du phénomène de réchauffement climatique puis de l'implication humaine dans ce phénomène. Dans les années 1970-1980, les scientifiques reconnaissent l'influence humaine sur le climat. Le débat est alors de savoir si le changement climatique d'origine humaine a déjà commencé.

Il faut attendre 1979 pour que Jule Charney, sur demande du président américain Jimmy Carter, établisse l'existence d'un réchauffement climatique dû aux gazs à effet de serre (GES) issus de l'usage de combustible fossile. En Juin 1988 James Edward Hansen (scientifique) est auditionné devant le Congrès américain. Il déclare que le changement climatique est déjà enclenché.

Quelques mois plus tard, en Novembre 1988, le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) est créé.

1.1 Changement climatique - Les travaux du GIEC

Présentation du GIEC

Le GIEC est aujourd'hui la référence en terme de changement climatique. Créé en 1988 par le Programme des Nations unies pour l'environnement (PNUE) et l'Organisation Météorologique Mondiale, il rassemble 195 États membres soit la quasi-totalité des pays du monde. Le GIEC vise à synthétiser les travaux des laboratoires du monde entier afin d'avoir une vue d'ensemble sur l'état des connaissances sur le changement climatique et le rôle de l'activité humaine. Il faut comprendre que ce qui émane du GIEC peut être appelé « vérité générale scientifique » puisque c'est un consensus scientifique mondial.

Intéressons nous à son fonctionnement¹. Une assemblée se réunit une ou deux fois par an. Chaque membre y dispose d'une voix. Toutes les décisions, à l'exception de l'élection des membres du Bureau, sont prises par les représentants des gouvernements, par consensus, en réunion plénière. Le bureau est l'organe exécutif du GIEC. Il est composé de scientifiques élus par l'assemblée plénière de manière à représenter les différentes disciplines et régions du monde. Ses membres sont élus pour un cycle complet qui dure de cinq à sept ans, ce qui correspond à la durée de l'établissement d'un rapport d'évaluation. L'expertise scientifique est conduite par trois groupes de travail et une équipe spéciale pour les inventaires nationaux de gaz à effet de serre (GES).

Les groupes de travail ont respectivement pour mission :

- évaluer les aspects scientifiques du système climatique et de l'évolution du climat
- traiter des questions concernant la vulnérabilité des systèmes socio-économiques et naturels aux changements climatiques, les conséquences négatives et positives de ces changements et les possibilités de s'y adapter.
- évaluer les solutions envisageables pour limiter les émissions de gaz à effet de serre ou atténuer de toute autre manière les changements climatiques.
- l'équipe spéciale pour les inventaires nationaux de gaz à effet de serre développe et améliore un guide méthodologique pour le suivi des émissions de GES.

L'activité du GIEC se présente donc sous la forme de cycles. Chaque cycle se voit mener par un bureau nouvellement élu et consiste en l'évaluation de l'état des connaissances les plus avancées relativement au changement climatique.

Il a ainsi pour mission la production de :

- un rapport d'évaluation composé de plusieurs volumes (six ont été publiés à ce jour).
- des rapports spéciaux qui fournissent une évaluation relative à thème spécifique. Au cours de son sixième cycle, le GIEC a produit 3 rapports spéciaux qui ont porté sur l'impact d'un réchauffement global de 1,5 °C, sur les terres émergées et sur les océans et la cryosphère. Ces thèmes ont été choisis par les États.

Il peut également produire des rapports méthodologiques dans lesquels les experts fixent les méthodes à appliquer pour les inventaires nationaux d'émissions de gaz à effet de

1. <https://www.ecologie.gouv.fr/politiques-publiques/comprendre-giec>

serre ainsi que des documents techniques sur des sujets qui nécessitent des informations et des avis scientifiques établis de façon collective, indépendante et transparente.

Au vu de la constitution, du fonctionnement mais surtout des objectifs du GIEC on peut considérer que tout ce qui fait l'objet d'un consensus dans les rapports du GIEC peut être tenu pour une certitude.

Il est alors certain que :

- la concentration de l'air en CO₂ est plus élevée qu'elle ne l'a jamais été ces 800 000 dernières années
- cette augmentation entraîne un changement climatique dont l'une des caractéristiques (mais pas la seule) est une augmentation de la température moyenne de la planète au niveau du sol. C'est l'ampleur de ce réchauffement qui demeure un objet de débat mais pas le fait que globalement le climat va changer et en particulier la moyenne des températures va monter.

Les scénarios

Si l'une des caractéristiques est l'augmentation de la température moyenne, il est alors naturel de se poser plusieurs questions. De combien de degrés est cette augmentation ? Quelles conséquences peuvent découler de l'augmentation de la moyenne de 1°C ? A quelle augmentation peut-on s'attendre suivant que l'on prenne des mesures ou non ? Le GIEC publie des scénarios climatiques qui répondent - du moins en partie - à ces questions.

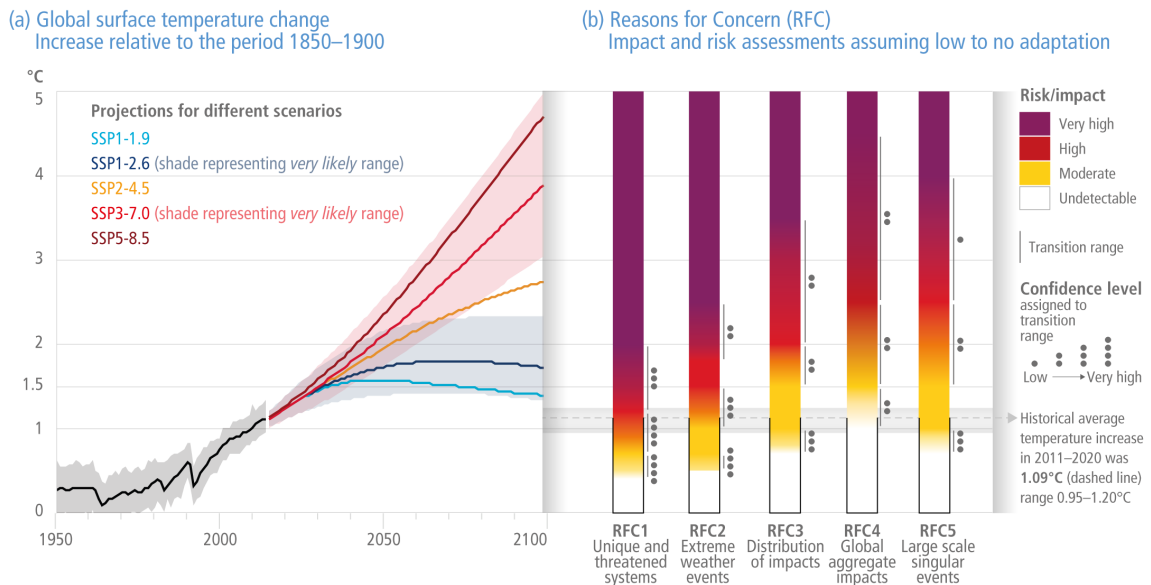


FIGURE 1.1 – Global and regional risks for increasing levels of global warming

On peut voir sur le graphique ¹ ci-dessus les différents scénarios d'évolution des températures prévues par le GIEC. Sont mis en parallèle des catégories de risques avec un niveau de

1. Source : <https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/figures/>

confiance et d'intensité de risque selon les seuils de températures. On peut y voir que les évènements climatiques extrêmes sont attendus avec un niveau de confiance relativement haut comme risque élevé ou très élevé pour l'ensemble des scénarios.

Si les scénarios SSP décrivent différentes trajectoires socio-économiques potentielles, ils peuvent être associés aux scénarios RCP qui eux se concentrent sur les projections des concentrations de gaz à effet de serre. Ainsi on peut regrouper les scénarios SSP5 et RCP8.5 qui correspondent à un développement économique rapide basé sur les énergies fossiles, entraînant des émissions de GES élevées et un réchauffement climatique significatif. Notons que le scénario RCP8.5 prévoit une augmentation de +5°C en moyenne à horizon 2100, ce qui - pour rappel - est la différence entre l'ère glaciaire et l'ère actuelle.

En 2023 a été publié le sixième rapport ¹ qui se divise en quatre parties : état des lieux, changements climatiques futurs et risques associés, réponses à long terme, réponses immédiates et par secteur. Dedans y est abordée notamment l'augmentation de la fréquence et de l'intensité de plusieurs types d'évènements météorologiques et climatiques extrêmes (canicules, fortes précipitations, sécheresses...). Et pour cause, en France - pays le plus touché d'Europe entre 1900 et 2022 - l'évolution du nombre d'évènements naturels dits "très graves" - dit des évènements dès lors qu'ils occasionnent entre 10 et 99 morts, ou entre 30 et 300 millions d'euros de dommages matériels - est bien réelle.

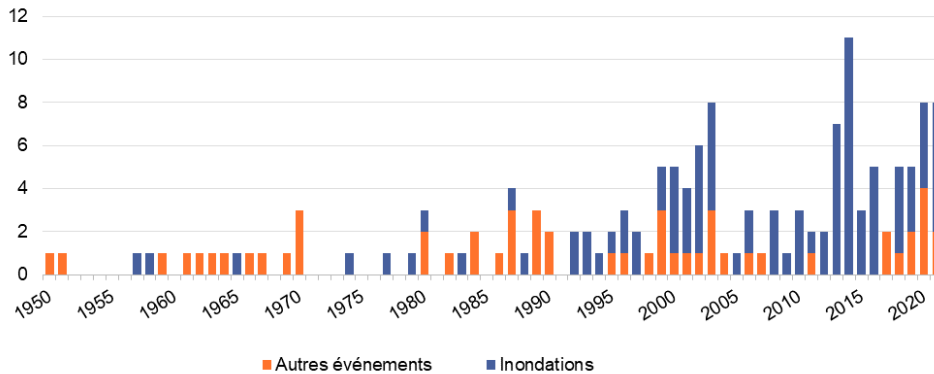


FIGURE 1.2 – Évolution de la sinistralité catastrophes naturelles non-auto entre 1982 et 2022 (M€ 2022). Source : MTECT (2022)

1. <https://www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-cycle/>

1.2 L'assurance des catastrophes naturelles en France

La situation avant 1982

Le territoire français connaît majoritairement un climat tempéré. Cette situation climatique lui permet d'avoir une exposition aux risques naturels relativement modérée. Pourtant, si l'on regarde le nombre d'événements très graves entre 1900 et aujourd'hui en Europe, la France se trouve être le pays le plus touché.

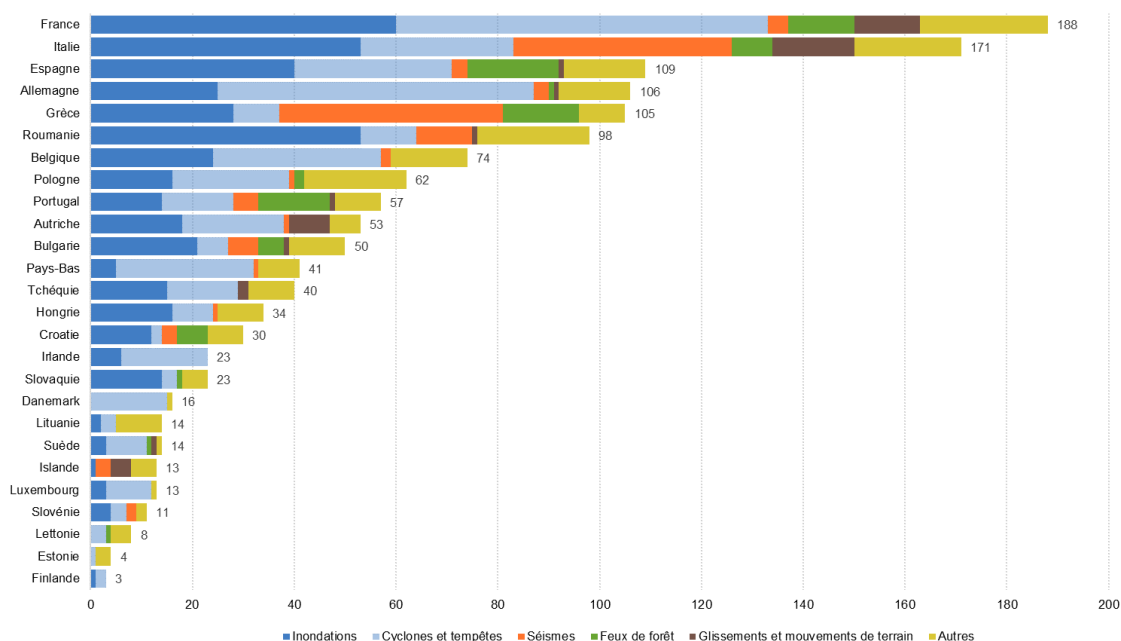


FIGURE 1.3 – Nombre de catastrophes naturelles survenues en Europe entre 1900 et 2022 (en nombre de catastrophes par type). Source : EM-DAT (2022)

Cela s'explique notamment par la diversité de ses territoires, tant sur plan géographique que géologique ainsi que par sa large façade maritime qui l'expose aux submersions marines et tempêtes. On peut également noter un vaste territoire en Europe et des DOM-TOM sensibles aux aléas climatiques.

Les événements climatiques ne sont donc pas rares et le territoire a été marqué par divers épisodes violents dont la crue de référence de 1856 qui reste une des plus importantes de l'histoire de France. Ces inondations dévastèrent notamment la ville de Lyon ou encore de Tarascon (dans laquelle 3 à 4 mètres d'eau furent enregistrés) et d'Avignon, allant jusqu'à nécessiter le déplacement de Napoléon III alors empereur pour constater les dégâts et le versement de plus de 27 millions de francs furent versés pour réparer les ponts, églises, etc. D'après Thierry Cohignac, ces divers événements n'étaient majoritairement que peu voir pas couverts par les contrats d'assurance.

En 1956 une première solution est proposée avec la création du Fonds de secours aux victimes de sinistres et calamités. Le principe de ce compte était de permettre la gestion d'urgences par des subventions de l'Etat, des collectivités et établissements publics, collectes nationales et autres mécanismes discrétionnaires. Pour voir le premier vrai mécanisme d'indemnisation, il faut attendre la création du fond de garantie des calamités agricoles en 1964 « chargé d'indemniser les dommages matériels causés aux exploitants agricoles par les calamités » Dans l'article 2 de la loi ¹, on définit la notion de calamité comme « les dommages non assurables d'importance exceptionnelle due à des variations anormales d'intensité d'un agent naturel, lorsque les moyens techniques de lutte préventive ou curative employés habituellement dans l'agriculture n'ont pu être utilisés ou se sont révélés insuffisants ou inopérants » .

De nouvelles inondations catastrophiques touchent un grande partie du territoire français lors de l'hivers 1981. Leur ampleur est telle que la Direction des Assurances sollicite les assureurs pour l'indemnisation des sinistrés, sous forme d'une subvention de 10 millions de francs (environ 1,5M€ financée par un prélèvement sur les encaissements « incendie risques simples ») C'est ainsi qu'un schéma fondé sur l'assurance et encadré par l'Etat naît. Cette naissance prend la forme d'une loi, celle du 13 juillet 1982 ².

Fondements du régime

Le régime est fondé sur l'alinéa 12 du préambule de la Constitution du 27 octobre 1946, qui dispose : « La Nation proclame la solidarité et l'égalité de tous les Français devant les charges qui résultent des calamités nationales ».

Lors de la conception de ce régime, le législateur doit répondre au cahier des charge suivant :

- assurer une couverture efficace, généralisée et pour tous les périls
- reposer sur un fonctionnement solidaire (ce qui s'exprime par un cout supportable par tous)
- concilier solidarité et responsabilité en mettant l'accent sur la prévention
- optimiser l'efficience par la collaboration du privé et du public
- garantir solvabilité et pérennité

Le régime repose entièrement sur les principes de solidarité et responsabilité. La solidarité se traduit par l'unicité des taux de prime additionnelle d'assurance. Ces taux sont fixés par l'Etat. Un tarif lissé indépendant de l'exposition aux risques ainsi que le caractère obligatoire de la garantie garantissent à tous d'en disposer. Ces taux étaient avant le 1er janvier 2025 de :

- 12 % de la prime afférente aux garanties dommages du contrat de base pour les biens autres que véhicules à moteur
- 6 % des primes vol et incendie (ou, à défaut, 0,50 % de la prime dommage) pour les véhicules terrestres à moteur

Ces taux sont respectivement fixés à partir du 1er janvier 2025 à 20% et 9%. Le régime disposera alors d'une capacité de couverture supplémentaire de 1,2Md€ annuels.

1. Loi n°64-706 du 10 juillet 1964 organisant un régime de garantie contre les calamités agricoles (n.d.).

2. <https://www.legifrance.gouv.fr/loda/id/JORFTEXT000000691989/1982-07-14/>

Le principe de responsabilité s’incarne dans les franchises et les plans de prévention. Les franchises sont fixées par l’Etat, obligatoires et non rachetables. Depuis le 01/01/2001 et jusqu’au 01/01/2024 elle suivent le schéma suivant ¹ :

Biens à usage d’habitation et autres biens à usage non professionnels	Dommmages directs Art A125-1 Annexe I d) du code des Assurances	380 €	Sécheresse 1520 €
Biens à usage professionnel	Dommmages directs Art A125-1 Annexe I d) du code des Assurances	10 % minimum 1140€*	Sécheresse 10% minimum 3 050 €*
	Pertes d’exploitation Art A125-1 Annexe II d) du code des Assurances	3 jours ouvrés minimum 1140 €*	

*La franchise prévue au contrat s’applique si elle est supérieure à ces montants.

FIGURE 1.4 – Matrice des franchises sur la période 2001 - 2023

Avant le 01/01/2024, si plusieurs états de catastrophe naturelle sont prononcés sur la même commune durant une période de 5 ans, et en l’absence d’un Plan de Prévention des Risques Naturels (PPRN), la franchise peut être modulée :

- 1 à 2 reconnaissances : la franchise de base s’applique
- 3 reconnaissances : doublement de la franchise
- 4 reconnaissances : triplement de la franchise
- 5 et plus : quadruplement de la franchise

L’indemnisation de l’assuré ne peut avoir lieu que si les biens de l’assuré sont garantis en assurance de dommages, que le maire fait une demande de reconnaissance de l’état de catastrophe naturelle et que suite à cette demande, un arrêt interministériel paraît au journal officiel et constate l’état pour l’aléa concerné.

1. <https://catastrophes-naturelles.ccr.fr/garantie-cat-nat>

Le fonctionnement du régime



FIGURE 1.5 – Mécanisme d'indemnisation dans le cadre du régime Cat Nat. Source : <https://www.ccr.fr/-/indemnisation-des-catastrophes-naturelles-en-france>

Dans les 24 mois après le début de l'évènement, le maire initialise la demande de l'état de reconnaissance en transmettant au Préfet un imprimé décrivant de manière détaillée les conditions de l'évènement ainsi que l'ampleur des dommages. Le Préfet mandate un service compétent pour réaliser un rapport technique et fait rédiger un rapport circonstancié par ses services. Il établit ensuite un dossier les comprenant, auquel il joint aussi les fiches des maires, les informations concernant ces communes ainsi que tout autre document qu'il juge utile à l'analyse. C'est ce dossier qui est examiné par une commission interministérielle dont le secrétariat est assuré par la Caisse Centrale de Réassurance (CCR).

Périmètre et périls couverts

La loi du 13 juillet 1982 couvre le territoire métropolitain (Monaco étant exclu), les Départements et Régions d'Outre-Mer ainsi que les Collectivités d'Outre-Mer. Il est décrit dans l'article premier ce qui est considéré comme étant effet d'une catastrophe naturelle mais il n'existe aucune liste exhaustive des périls couverts ou exclus.

Sont habituellement couverts :

- les inondations (ruissellement, débordement, remontée de nappe phréatique, rupture de barrage causée par un phénomène naturel)
- les coulées de boue
- les séismes
- les mouvements de terrains (sécheresse comprise)
- les affaissements de terrain dus à des cavités souterraines et à des marnières (sauf mines)
- les raz-de-marée
- les avalanches
- les vents cycloniques de grande ampleur (supérieurs à 145 km/h en moyenne sur 10 mn ou 215 km/h en rafales) .

Sont au contraire généralement exclus du fait de leur prise en charge par des garanties d'assurance (la dénommée TGN) :

- les tempêtes
- la grêle
- la neige
- le gel

Les chiffres du régime

Le régime, notamment par son caractère obligatoire, a permis depuis sa création l'indemnisation de 3.5 millions de sinistres Non-Auto soit un montant de 49.9 milliards d'euros. Le poste des sinistres Auto représente lui en 1 078 millions d'euros depuis l'an 2000.

En 2022, l'assurance des catastrophes naturelles c'est 110.4 millions de biens assurés et 1.88 milliard d'euros de primes Cat Nat. Le coût global des dommages assurés est très largement dominé par les inondations (entre 250 et 360 millions d'euros) et la sécheresse (2.9 milliards).

Au cours de la dernière décennie, si ce sont toujours ces deux périls qui dominent l'éventail des périls de la sinistralité des catastrophes naturelles¹, la répartition a connu un réajustement avec une progression de la sécheresse. Cela peut en partie s'expliquer par l'évolution de la procédure de reconnaissance.

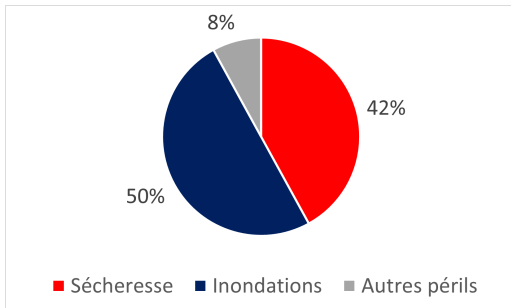


FIGURE 1.6 – Répartition de la sinistralité Non-Auto cumulée depuis 1982

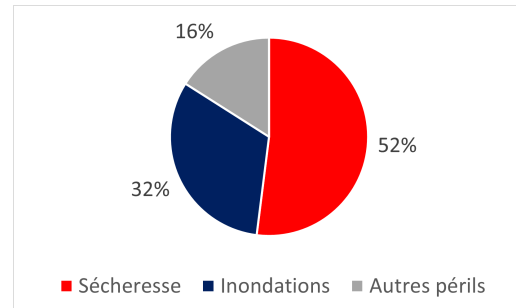


FIGURE 1.7 – Répartition de la sinistralité Non-Auto cumulée sur les 10 dernières années

Si l'on regarde comment se dessine cette sinistralité dans le temps, on peut faire les constats suivants :

- il n'est pas possible de répartir la sinistralité par péril avant 1989, soit l'apparition du péril sécheresse. La sinistralité a donc été considérée comme due aux inondations ;
- le montant cumulé comme la charge afférente aux différents périls varie fortement d'une année à l'autre.

1. Figures 1.6 et 1.7 réalisées à partir de chiffres issus de la CCR

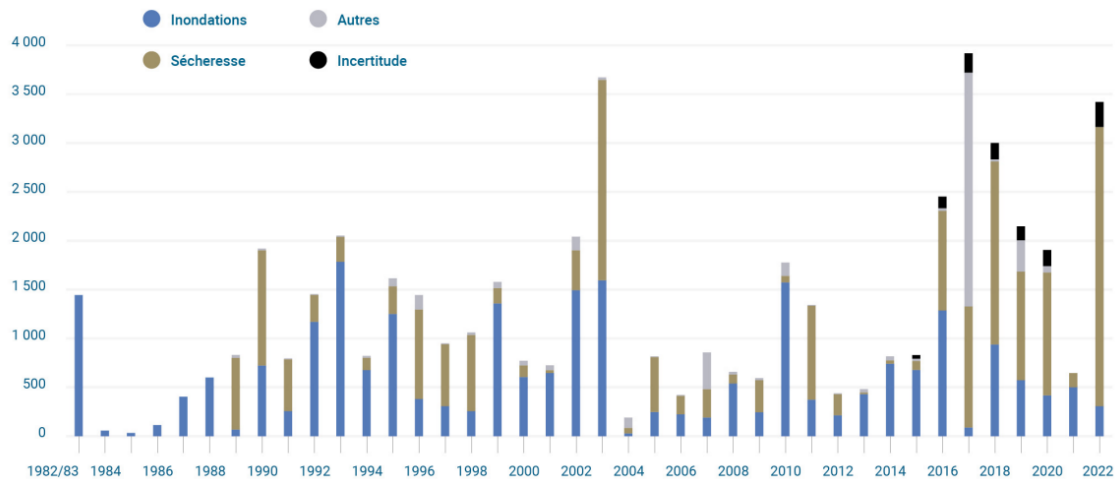


FIGURE 1.8 – La sinistralité Cat Nat Non-Auto de 1982 à 2022

Le graphique suggère un impact croissant des catastrophes naturelles sur les sinistres hors automobile en France, particulièrement en ce qui concerne les inondations et les sécheresses. Cette tendance, marquée par une volatilité et une sévérité accrues au cours des deux dernières décennies. On peut également remarquer que les périls inondations et sécheresse s’opposent. Une année très fortement marquée par l’un a de grandes chances de l’être significativement moins par l’autre.

Dernières évolution et inassurabilité

Le régime Cat Nat a apporté une solution en 1982 en couvrant une carence dans le système d’indemnisation, permettant de protéger un grand nombre d’habitants contre le risque catastrophes naturelles. Ce régime réputé opaque et la sinistralité grandissante, a dû connaître des modifications.

C’est tout d’abord la **loi Baudu du 28 décembre 2021**¹ qui vient répondre à ce besoin. Elle facilite les démarches de reconnaissance de l’état de catastrophe naturelle, améliore et accélère l’indemnisation des victimes, tout en renforçant la transparence des procédures vis à vis des maires et sinistrés.

Ainsi :

- le délai de déclaration d’un sinistre qui était de 18 mois passe à 24 ;
- le délai de déclaration au Journal Officiel est abaissé de 3 à 2 mois ;
- L’assureur dispose d’un mois à réception de l’état estimatif ou du rapport d’expertise pour proposer une indemnisation ou une réparation en nature. À partir de l’accord de l’assuré sur sa proposition d’indemnisation, il aura 21 jours pour verser l’indemnisation à l’assuré ou un mois pour missionner une entreprise pour réaliser les travaux ;
- sont intégrés à l’indemnisation : frais de relogement d’urgence des sinistrés, frais d’architecte, maîtrise d’ouvrage ;
- les modulations de franchises pour les communes non pourvues de Plan de Prévention des Risques (PPR) sont supprimées ;

1. <https://www.legifrance.gouv.fr/loda/id/JORFTEXT000044589864/>

- instauration de la possibilité de contester le refus d'assurance pour cause d'une trop forte exposition du bien devant la BCT.

Elle apporte également des mesures spécifiques au risque sécheresse-réhydratation des sols. Elles visent une meilleure information de l'assuré tout au long de l'expertise en cas de sinistre causé par la sécheresse, les indemnités dues au titre de ces sinistres devront permettre de financer des réparations mettant réellement un terme aux désordres existants, le délai de prescription au cours duquel l'assuré peut exiger de l'assureur le règlement de l'indemnité qui lui est due en cas de dommages causés par le risque RGA est porté de deux à cinq ans sur amendement du Sénat.

Suite à la réforme, les délais de traitement ¹ sont les suivants :

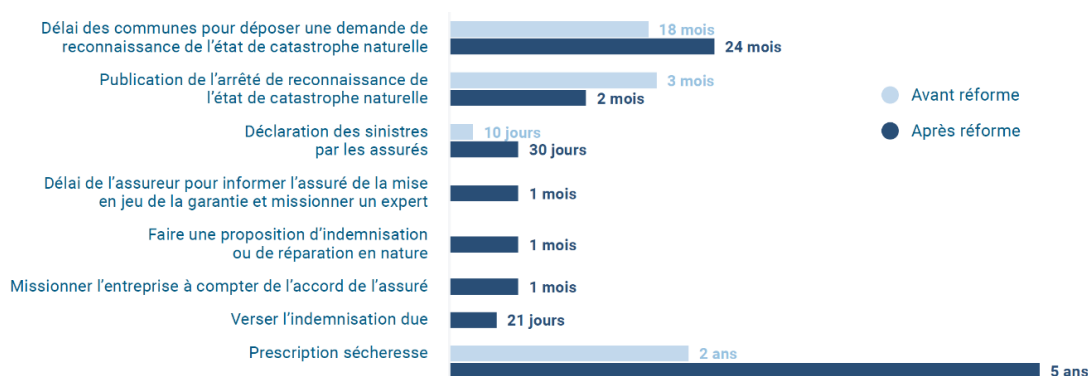


FIGURE 1.9 – Evolution des délais de traitement suite à la réforme du 28 décembre 2021

Cette loi est appuyée en ce qui concerne la sécheresse par l'**ordonnance n° 2023-78 du 8 février 2023** ², applicable au 1er janvier 2024 (sauf certaines, au 1er janvier 2025).

Elle permet :

- la reconnaissance de communes ayant subi une succession anormale de sécheresses d'ampleur significative mais dont l'intensité mesurée année par année ne remplit pas les critères actuels
- de préciser les conditions d'indemnisation des sinistres en se concentrant sur les sinistres susceptibles d'affecter la solidité ou d'entraver l'utilisation normale du bâtiment endommagé
- d'exclure du droit à la garantie "Cat Nat" les bâtiments ne respectant pas le cadre légal ou les critères de la loi du 23 novembre 2018
- d'encadrer les conditions de réalisation de l'expertise désignée par les assureurs et de prévoir des contrôles et des sanctions pesant sur les experts ne remplissant pas les exigences de qualité prévues par la loi
- de fixer une obligation pour les assurés d'affecter l'indemnité perçue au titre d'un sinistre reconnu "Cat Nat" à la réalisation effective des travaux de réparation durable de leur habitation

Dans la continuité de cette ordonnance, **deux décrets publiés le 12 décembre 2023** enrichissent et précisent le cadre de la construction et des travaux des bâtiments.

1. <https://geoportail.ccr.fr/portal/apps/sites/#/bilancatnat/pages/actualite-reglementaire>

2. <https://www.legifrance.gouv.fr/loda/id/JORFTEXT000047106316>

Déjà en discussions à propos du régime Cat Nat, les assureurs ont de nouveaux coûts à absorber. Le régime des catastrophes naturelles est déficitaire depuis 2015, année 2021 exceptée.

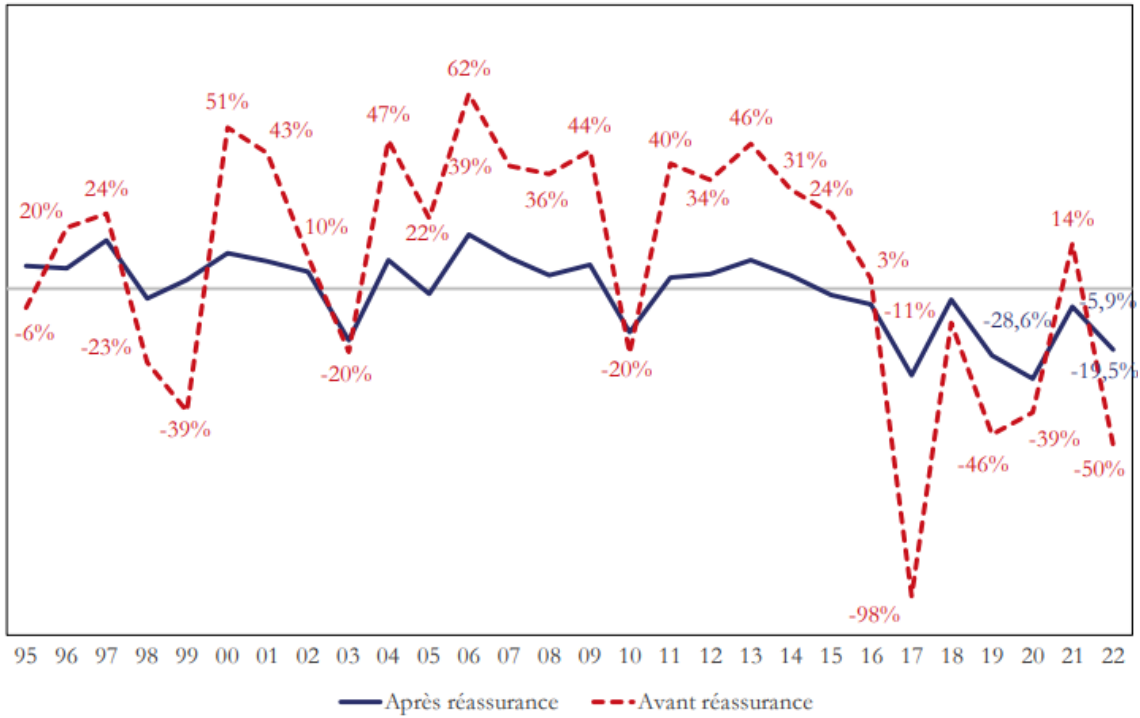


FIGURE 1.10 – Évolution du solde technique depuis 1995 (en % des primes nettes) (avec et sans réassurance)

Pour répondre à ce besoin ainsi qu'à la hausse de sinistralité une solution de court terme est trouvée dans la **hausse du taux de surprime**. Cela est établi par un arrêté publié au Journal Officiel le 22 décembre 2023, applicable au 1er janvier 2025 aux primes et cotisations additionnelles dues au titre des contrats conclus ou renouvelés à compter de cette date.

Cette hausse se traduira par une augmentation des primes d'environ 16 € par an et par contrat pour une assurance habitation, d'après Franck Le Vallois dans un article de l'Argus de l'assurance. Le montant de la surprime, qui n'avait pas augmenté depuis 25 ans, passera donc de 25 à 41 € pour une MRH dont la prime atteignait 268 € en moyenne l'an dernier, selon France Assureurs.

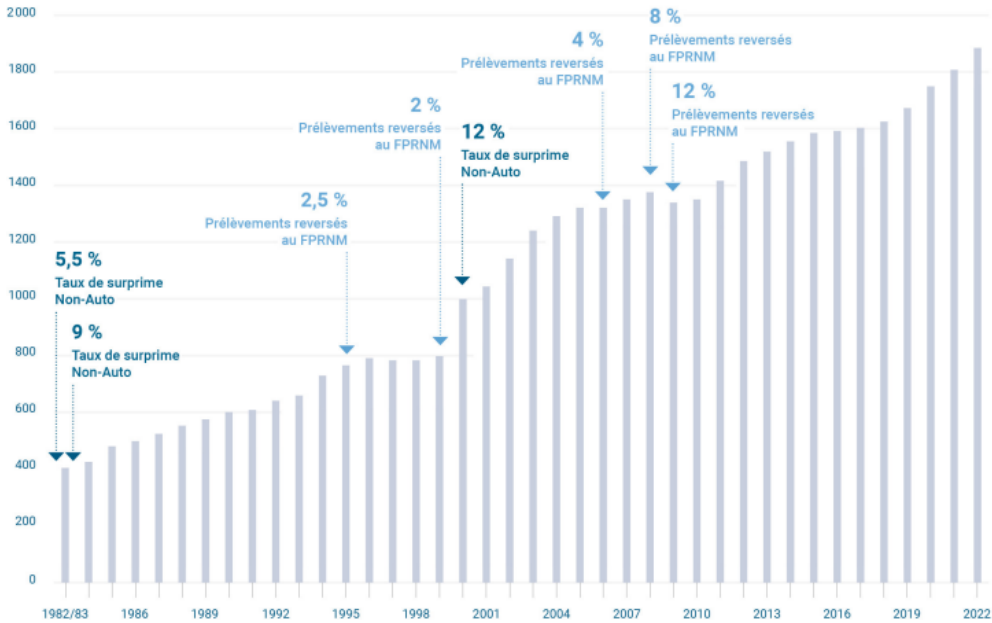


FIGURE 1.11 – Evolution des primes CATNAT

Le **décret du 5 février 2024** vient mettre en application les nouvelles mesures : limitation de garantie pour le risque sécheresse-réhydratation aux dommages susceptibles de compromettre la solidité du bâti ou d'entraver son usage normal et obligation d'utiliser l'indemnisation dans un but de reconstruction et solidification sous peine de sanction.

Ainsi au 01/01/2024 les franchises Cat Nat suivront le schéma suivant :

Type de bien	Type de péril	Franchise
Biens à usage d'habitation (dès lors que leur propriétaire ne les détient pas à des fins d'activités économiques exercées en tant que professionnel), VTM à usage non professionnel et autres biens à usage non professionnel. Ne sont pas visées ici « les collectivités territoriales ou (...) leur groupement »	RGA	1520 €
	Autres aléas	Franchise contractuelle tempête avec un minimum supérieur à 0 et un maximum de 380 € ou bien 380 €
VTM à usage professionnel	Tous périls	Montant le plus élevé entre : • 380 € • « montant de la franchise prévu au contrat pour ces mêmes biens ou à défaut, le montant de la franchise le plus élevé figurant au contrat pour les garanties couvrant ces mêmes biens »
Biens à usage professionnel détenus par les entreprises avec ou sans personnalité morale (hors VTM)	RGA	10 % du montant des dommages avec un montant minimum librement fixé (franchise Cat Nat spécifique possible) qui ne peut pas être inférieur à 3 050 €
	Autres aléas	10 % du montant des dommages avec un montant minimum librement fixé (franchise Cat Nat spécifique possible) qui ne peut pas être inférieur à 1 140 €
Collectivités territoriales	RGA	Montant le plus élevé entre : • Franchise contractuelle incendie ou franchise contractuelle la plus élevée • 10 % du montant des dommages avec minimum de 3 050 €
	Autres aléas	Montant le plus élevé entre : • Franchise contractuelle incendie ou franchise contractuelle la plus élevée • 10 % du montant des dommages avec minimum de 1 140 €
Pertes d'Exploitation		3 jours ouvrés avec montant minimum de 1 140 €

FIGURE 1.12 – Tableau des franchises au 01/01/2024. Source : geoportail.ccr.fr

On voit donc qu'aujourd'hui, dans un contexte de hausse de la sinistralité due au changement climatique, la question de l'assurabilité se pose. Si l'on regarde du côté des Etats-Unis, il arrive que les assureurs fuient la Californie et la Floride. En France, le caractère obligatoire de l'assurance de catastrophes naturelles ne le permet pas.

Dans un rapport¹ publié en 2023 par l'université des Nations unies publié à un mois de la COP28, les auteurs alertent sur ce problème. C'est un point de discussion de premier plan également entre les différents acteurs assurantiels et du gouvernement. Il est question de modifier le régime Cat Nat.

En janvier 2024, Jean-Marc Jancovici déclarait² que « le but de l'assurance n'est pas de nous couvrir financièrement contre tout événement dont les conséquences dépasseraient notre capacité à y faire face » C'est ce qui nous permet d'assurer, c'est avant tout l'incertitude, le caractère aléatoire des événements. L'assurance des catastrophes naturelles en tant qu'indemnisation des personnes victimes d'un aléa climatique est rendue possible aussi bien par le caractère aléatoire de l'évènement que par ceux qui ne sont pas touchés.

1. <https://unu.edu/ehs/our-work/interconnected-disaster-risks>

2. voir Annexes

Si l'aléa devient une certitude pour une partie de la population seulement, la question est alors celle d'un transfert permanent (donc une redistribution), qui n'est pas du ressort de l'assurance.

Aujourd'hui, les acteurs du milieu assurantiel mettent en avant la prévention. Une étude menée par Allianz et France IFOP signale un manque de préparation et d'information.¹ En métropole, si une majorité de français pense que son logement est exposé à un risque climatique, seulement 25% se sont renseignés sur le niveau réel d'exposition de leur logement. Et seuls 24% l'ont équipé pour faire face à un événement climatique majeur.

1.3 Focus sur les inondations et sécheresses

Les inondations et sécheresses représentent 92% de la sinistralité Non-Auto cumulée depuis 1982 (84% sur les dix dernières années). Ce sont donc ces deux périls dont nous allons projeter la sinistralité en priorité.

1.3.1 Sécheresse

Les dommages dus à la sécheresse existent et sont connus depuis longtemps en France. Pourtant, ce n'est qu'en 1989 que le péril commence à être pris en charge. Soit 7 ans après la création du régime.

C'est à partir de 1987 et surtout 1989 que le phénomène a pris une ampleur importante. L'intensité du phénomène a varié avec des pics de déshydratation centrés sur les années 1990-1991, 1996-1997, 2003, 2005 et 2011. Plus récemment une séquence sèche continue s'est amorcée depuis 2015 et se localise dans la région centrale et le quart Nord-Est. L'ampleur des dommages liés à ce péril n'est pas tout de suite apparue du fait des parutions tardives des arrêtés reconnaissant l'état de catastrophe naturelle avec effet rétroactif et de la nature du péril, pouvant s'établir sur quelques mois comme années.

L'année 2022 a été marquée par un nouvel épisode de sécheresse d'une intensité exceptionnelle. D'après les analyses de Météo-France, l'été 2022 est le deuxième été le plus chaud observé en France depuis au moins 1900

Les types de sécheresse

La sécheresse est un épisode de manque d'eau plus ou moins long, mais suffisant pour que les sols et la flore soient affectés. Ce phénomène peut être cyclique ou exceptionnel. Il peut résulter d'un manque de pluie, quand la quantité d'eau est nettement inférieure aux normales

1. <https://www.ifop.com/publication/les-francais-et-les-risques-climatiques/>

saisonniers sur une période prolongée aussi d'une utilisation trop intensive ou inadaptée de l'eau disponible.

On distingue ainsi trois grands types de sécheresses :

- La sécheresse **météorologique** provoquée par un manque de pluie
- La sécheresse **agricole** causée par un manque d'eau dans les sols et qui nuit au développement de la végétation
- La sécheresse **hydrologique** lorsque les lacs, rivières, cours d'eau ou nappes souterraines ont des niveaux anormalement bas.

Exposition du territoire

Les zones exposées sont très localisées. Toutes les cartes, qu'elles représentent la fréquence ou le coût cumulé depuis l'intégration du péril au régime, se superposent presque parfaitement. Cela s'explique par la nature du sol français. En effet, les cartes des reconnaissances au titre de sécheresse et celle des terrains argileux coïncident (comme visible ci-dessous). Le caractère argileux du sol le rend sensible aux variations de sa teneur en eau et se comporte comme une éponge. Ainsi, il va se rétracter en période sèche (retrait) , et il va gonfler en période pluvieuse ou humide lorsque l'apport en eau est important (gonflement). Il s'agit du phénomène de retrait-gonflement des argiles. Il crée alors des mouvements de terrains et tassements différentiels qui fragilisent les constructions.

Le site gouvernemental Georisques¹ permet de télécharger un fichier contenant des informations à propos du risque RGA. Ce fichier est un ensemble de polygones auxquels sont attribués des valeurs de risque RGA : faible, modéré, élevé. La connaissance de cette géométrie nous permet de réaliser, en utilisant un logiciel de SIG nommé QGIS, une carte de France de ces zones.

Afin de compléter l'information apportée par cette carte, il s'agit de la mettre en parallèle avec les zones ayant cumulé le plus de reconnaissances depuis 1989. Pour cela a été réalisée une carte sur le logiciel QGIS à partir de données issues de la CCR. Ces données ont été récupérées à l'aide de requêtes sur une page web de la CCR : https://geoportail.ccr.fr/server/rest/services/CarteToutPublic/IA_COMMUNE/MapServer . Cette page web a été rendue accessible en inspectant les cartes interactives présentées sur la page :<https://geoportail.ccr.fr/portal/apps/sites/#/bilanecatnat/pages/reconnaissances-catnat-cartographies>. Il n'est pas possible de récupérer les données de 2000 communes par une requête simple. Le nombre de communes en France étant 34 935 au 01/01/2024, il s'agit d'automatiser le requête.

Ci-dessous l'on met en parallèle la manière dont le coût cumulé et la fréquence moyenne de sinistres (rapport entre le nombre de sinistres et le nombre de risques) du péril sécheresse se répartissent. Comme énoncé précédemment, ces cartes se superposent à la fois entre elles et avec celle des zones argileuses.

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

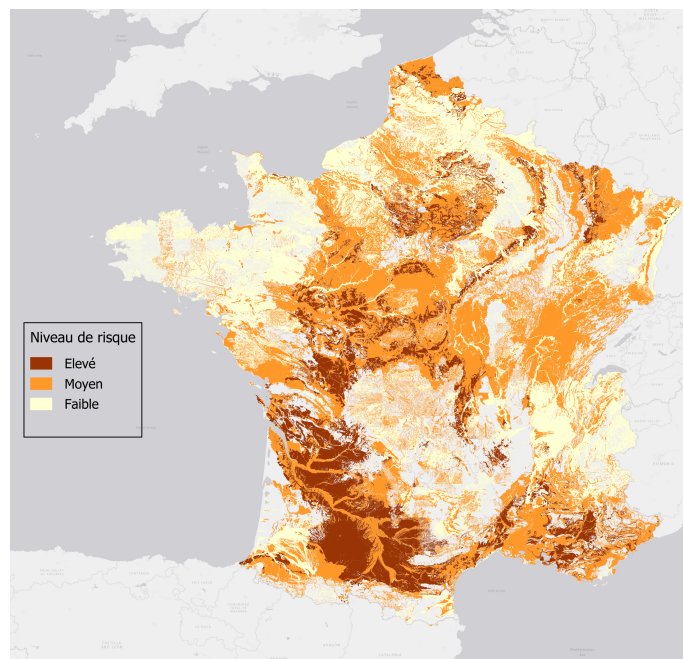


FIGURE 1.13 – Exposition au phénomène de retrait-gonflement des argiles

Evolution de la sinistralité

Le présent mémoire a pour raison d'être l'augmentation de la sinistralité Cat Nat liée au réchauffement climatique. Regardons ce qu'il en est de la sécheresse.

D'après ce graphique ¹, il y a bien une tendance haussière en ce qui concerne la sinistralité due à la sécheresse. Pour autant encore faut-il déterminer si cette tendance s'explique par une augmentation en fréquence, coût ou même par une combinaison des deux.

En omettant les risques professionnels qui ne représentent que 2.4 % du montant global depuis 1989, le coût moyen d'un sinistre (rapport entre la charge de sinistres corrigée de l'inflation et le nombre de sinistres) ne présente pas de tendance apparente. Si par contre l'on regarde le coût moyen d'une reconnaissance Cat Nat on constate alors une nette augmentation.

Cela s'explique par la mise en place des critères de reconnaissance à partir de décembre 2000. Les reconnaissances concernent les communes les plus impactées par la sécheresse. Elles concentrent donc les montants des sinistres les plus importants. Il reste l'évolution de la fréquence à interroger.

Pour cela, regardons le nombre de sinistres indemnisés et son évolution selon les années. Cet indicateur est préféré aux reconnaissances car comme vu avec la figure 1.16 les critères de reconnaissances ont un impact évident sur les courbes. La sécheresse est un phénomène qui dessine sur les courbes de sinistralité des pics de manière plus volatile que les inondations. Notons également qu'il peut s'étendre sur plusieurs mois voir plusieurs années. Sur le graphique ci-dessous, nous remarquons grossièrement la différence entre les périodes 1990 - 2005 et 2005 - 2020.

1. Source figure 1.16 : <https://geoportail.ccr.fr/portal/apps/sites/#/bilancatnat/pages/sinistralite-evolution>

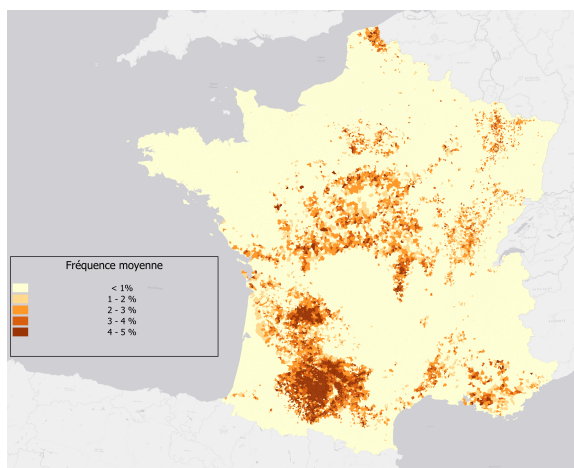


FIGURE 1.14 – Fréquence moyenne de sinistres (1995 - 2019)

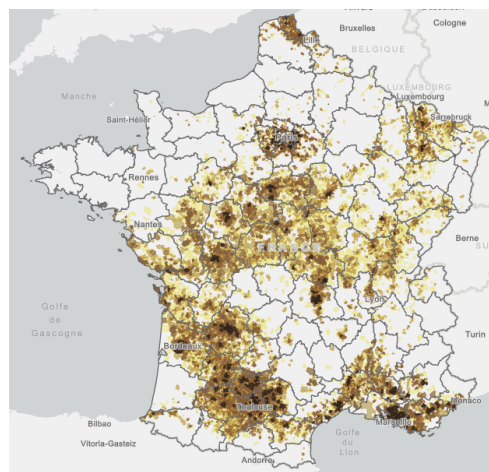


FIGURE 1.15 – Coût cumulé des sinistres (1995 - 2019)

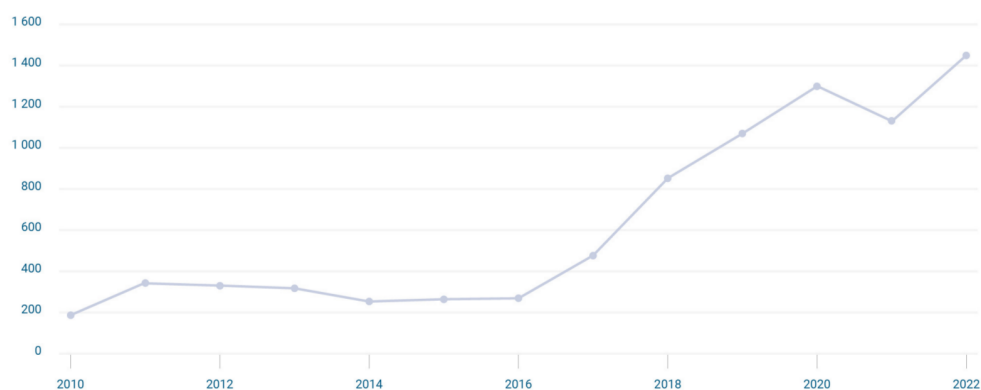


FIGURE 1.16 – Sinistralité annuelle moyenne sur une période glissante de cinq années (en millions d'euros)

Le besoin de construire un modèle prenant en entrée les données climatiques associées aux scénarios du GIEC et modélisant la sinistralité de la sécheresse se justifie par le fait que :

- une augmentation de sinistralité est constatée
- le péril sécheresse est par nature (le retrait-gonflement des argiles) sensible au changement climatique

Prévention et gestion du risque

La cartographie des terrains argileux ci-dessus est un exemple de résultat des travaux préventifs et de gestion du risque. Il est le fruit d'un travail mené par le Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM) depuis 1997 dans le but d'améliorer la connaissance du phénomène de retrait-gonflement des argiles. Ce programme a été cofinancé par le Fonds de Prévention des Risques Naturels Majeurs (FPRNM aussi appelé Fonds Barnier) et par la dotation de service public du BRGM.

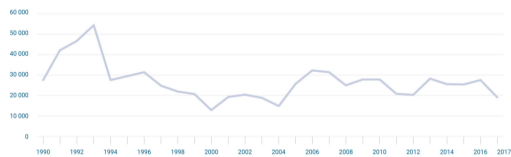


FIGURE 1.17 – Coût moyen d'un sinistre pour les risque de particuliers (en euros 2022)

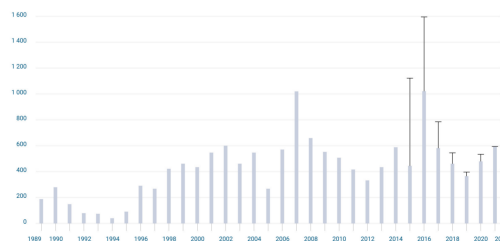


FIGURE 1.18 – Evolution du coût moyen d'une reconnaissance (milliers d'euros)

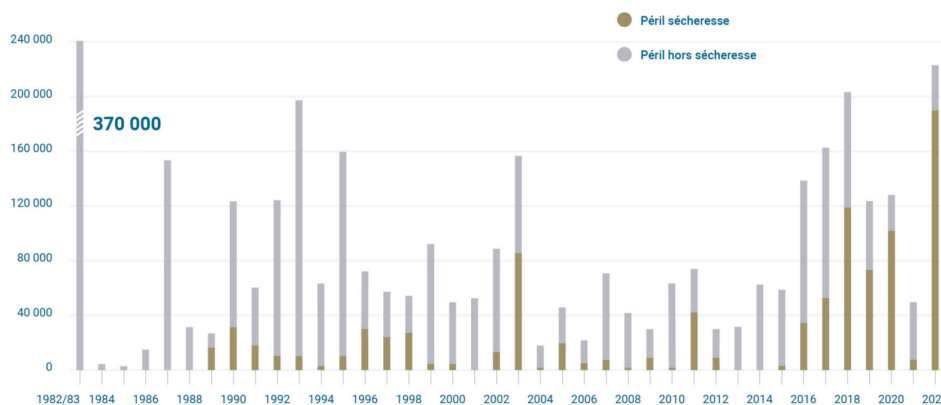


FIGURE 1.19 – Nombres de sinistres indemnisés hors véhicules terrestres à moteur

Comme vu précédemment, lors du passage en revue des récentes évolutions réglementaires, des ordonnances et décrets viennent consolider les normes tant au niveau assurantiel que du point de vue construction, dans le but de renforcer la résilience.

Le BRGM préconise également des mesures de construction pour pallier les conséquences de la sécheresse :

- approfondir les fondations pour qu'elles soient ancrées dans un terrain peu sensible aux variations saisonnières d'humidité
- homogénéiser ces profondeurs d'ancrage pour éviter les dissymétries (terrains en pente)
- réaliser un trottoir étanche autour de la maison pour limiter l'évaporation à proximité immédiate des façades
- maîtriser les eaux de ruissellement et les eaux pluviales pour éviter les infiltrations au pied du mur
- ne pas planter d'arbres trop près de la maison

Une mission préventive conforme à ces recommandations a été lancée par France Assureurs, CCR ainsi la Mission Risques Naturels (MRN). Le but est de fournir une analyse des solutions de prévention et de protection additionnelles aux méthodes de réparation préconisées par les experts sur plus de 300 maisons sur une durée de 5 ans. 100 d'entre elles serviront à étudier l'effet dans le temps des solutions de prévention et les 200 autres pour l'évolution des solutions de réparations.

1.3.2 Inondations

Les inondations constituent le premier poste de sinistres à charge du régime des catastrophes naturelles. Elles représentent 50% du coût total assuré des indemnisations versées depuis 1982. Ce chiffre passe à 32 % sur les dix dernières années.

Si traditionnellement le terme « inondation » fait référence au débordement de cours d'eau, il en existe plusieurs types auxquels le territoire français est soumis.

Les types d'inondations

On retrouve tout d'abord les **crues**. Ces inondations se subdivisent en deux types. Premièrement, il y a les crues lentes ou inondations de plaine. Elles concernent les grands bassins versants tels que la Seine ou la Loire et ont pour origine des précipitations successives et soutenues voir fonte des neiges s'exerçant sur de vastes superficies et entraînant des crues lentes. Leur durée varie de quelques jours à plusieurs semaines pour les bassins à faible pente. Lorsque des précipitations intenses et localisées sur des petits bassins versants provoquent des montées des eaux rapides et brutales, on parle alors de crues éclaires ou inondations torrentielles.

Viennent ensuite les **inondations par remontée de nappe**. Alimentées par la pluie, il arrive que le niveau des nappes phréatiques atteigne la surface du sol provoquant alors des inondations. Ces inondations durent généralement plusieurs mois et couvrent de vastes zones. Elles peuvent s'accompagner d'effondrements de terrain.

Les **inondations littorales ou submersions marines** correspondent aux inondations de la zone côtière par la mer du fait de conditions météorologiques et marégraphiques sévères (tempêtes en métropole et cyclones dans les DOM). Trois modes de submersion peuvent être distingués :

- le débordement : lorsque le niveau de la mer est supérieur au niveau des ouvrages ou du trait de côte naturel
- le franchissement du trait de côte par paquet de mer résultant du déferlement des vagues
- la rupture d'ouvrage ou la destruction de cordons dunaires sous l'action de la marée et des vagues. L'eau est alors susceptible d'envahir les espaces protégés par ces éléments si leurs altitudes sont inférieures au niveau de la mer

Enfin, il y a ce qu'on appelle les **inondations par ruissellement**. Ce type d'inondation apparaît lorsque les eaux de pluie ne peuvent pas ou plus s'infiltrer dans le sol et y ruissellent. Cela arrive donc généralement à l'occasion de pluies de très forte intensité ou d'un cumul important de pluie sur plusieurs jours. Elles affectent tout particulièrement les espaces urbains, l'imperméabilité du sol réduisant fortement l'infiltration. Ce risque est encore mal appréhendé, notamment par son aspect diffus.

SYNTHÈSE DES INDICATEURS D'EXPOSITION AU RUISSELLEMENT
CALCULÉS À PARTIR DES MODÈLES DE CCR

Part de la surface métropolitaine exposée aux inondations	Part ruissellement	Part débordement et submersion marine
	10 %	10 %
Part de la population métropolitaine exposée aux inondations	Part ruissellement	Part débordement et submersion marine
	21 %	19 %
Part des sinistres en-dehors de l'aléa débordement et submersion marine de CCR (France métropolitaine)	Part du nombre de sinistres	Part du coût des sinistres
	65 %	52 %

FIGURE 1.20 – Exposition au ruissellement

Exposition du territoire

Le péril "inondation" est moins localisé que la sécheresse. La quasi-totalité des communes de France métropolitaine a déjà été reconnue au moins une fois à ce titre. Son climat et son territoire à la topographie variée en font la cible des différents types d'inondations évoqués ci-dessus. ¹

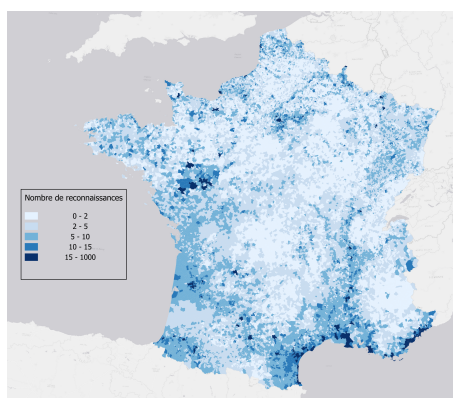


FIGURE 1.21 – Nombre de reconnaissances - Tous types d'inondations (1982-2022)

Néanmoins les reconnaissances au titre de ce péril se concentrent de manière évidente aux environs des principaux fleuves (l'influence du Rhône, la Garonne, la Loire et la Seine sont par exemple notables) et de la côte Atlantique. Le caractère diffus de ce péril s'explique par les inondations par remontée de nappe ainsi que par ruissellement. La grande majorité des inondations ayant eu lieu à l'écart des fleuves peuvent en réalité très certainement être attribuées au ruissellement. C'est le type d'inondations le moins bien cerné. Il n'est toutefois pas à négliger car il se trouve accentué par l'urbanisation.

En ce sens, il est intéressant d'entrer dans le détail et décomposer cette carte entre les différents types d'inondations (hormis le ruissellement, étant moins bien identifié).

1. Les figures 1.21 à 1.23 sont réalisées à l'aide du logiciel QGIS à partir de données issues de la CCR

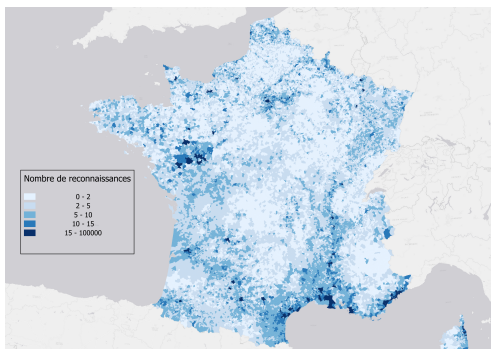


FIGURE 1.22 – Nombre de reconnaissances (1982-2022) - Inondation et/ou coulée de boue

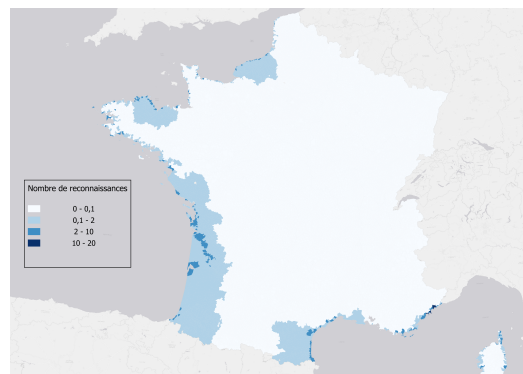


FIGURE 1.23 – Nombre de reconnaissances (1982-2022) - submersion marine

Evolution de la sinistralité

Regardons comment a évolué la sinistralité due aux inondations. A partir de données disponibles au téléchargement sous format excel sur le même site de la CCR, on peut reproduire le graphique de sinistralité annuelle moyenne.

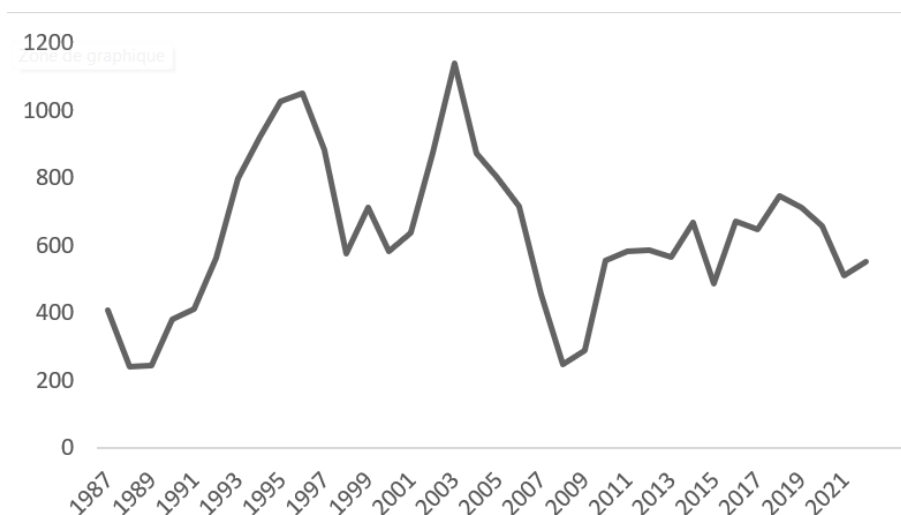


FIGURE 1.24 – Sinistralité annuelle moyenne sur une période glissante de cinq années (millions d'euros)

L'évolution est ici moins évidente que pour la sécheresse. On dénote des à-coups. Le creux autour de 1989 coïncide avec la période d'entrée dans le régime et la sécheresse de 1989 ayant coûté 740M€ (en euros 2022). On observe ensuite un fort pic de sinistralité autour de l'année 1995, porté par de fortes inondations dans le Nord (sixième évènement d'inondations le plus coûteux en termes de dommages assurés, sur la période 1989-2022 avec 810M€ en euros 2022). En 2002 et 2003, 2 évènements parmi les 3 plus coûteux (pour les inondations) touchent le Rhône et le Gard pour un coût cumulé entre 2,9Md€ et 3,6Md€ (euros 2022). Ensuite on retrouve successivement en 2010 les inondations du Var et l'impact de la tempête Xynthia, un fort évènement d'inondations en main-juin 2016 et l'ouragan Irma en 2017. Sur la figure 1.25 (ci-après) l'on peut voir que le coût moyen d'un sinistre inondation pour les risques de particulier augmente effectivement dans le temps. La figure 1.26 permet de voir

comment les coûts se ventilent, et cela dans le temps. Il est intéressant de remarquer que le graphique confirme ce qui pouvait nous sembler naturel, à savoir que les années de forte sécheresse sont en général peu marquées par les inondations.

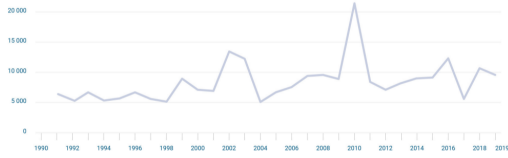


FIGURE 1.25 – Coût moyen d’un sinistre inondation pour les risques de particuliers (en euros 2022)

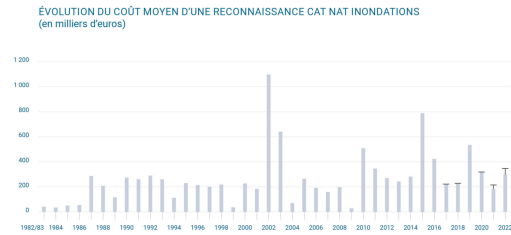


FIGURE 1.26 – Evolution du coût moyen d’une reconnaissance CAT NAT inondation (en milliers d’euros)

Prévention et gestion du risque - le fonds Barnier

Depuis 1995, le Fonds de Prévention des Risques Naturels Majeurs (FPRNM) dit « Fonds Barniers » finance différentes actions de prévention des risques naturels. Il est géré par la CCR et est en partie financé par les cotisations des contrats MRH : environ 12 % du montant de la prime MRH lui est destiné.

Les sommes investies sont, selon les mesures, cofinancées par d’autres acteurs comme les collectivités territoriales. Sur la période 2009-2020, les sommes investies par le FPRNM s’élèvent à un peu plus de 2 Md€ et les cofinancements à près de 2,5 Md€. Au total, 4,5 Md€ ont été mobilisés soit près 375 M€ par an. Les inondations sont de loin le premier poste de dépenses à ce titre.

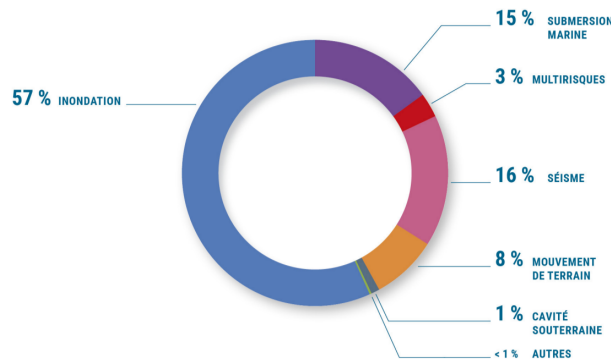


FIGURE 1.27 – Répartition des engagements publics totaux à travers le FPRNM. Source : geoportail.ccr.fr

Ce fonds a pour but de contribuer à l’adaptation des territoires au changement climatique. Il est mobilisable par les particuliers pour les risques non couverts par leur contrat MRH, les collectivités territoriales, les petites entreprises (moins de 20 salariés), les établissements publics fonciers et les services de l’État.

Le taux de prise en charge du Fonds est variable et s'adapte au type de mesure ainsi qu'au maître d'ouvrage. A titre indicatif, ces taux peuvent être :

Type de mesure	Maître d'ouvrage	Taux de prise en charge
Expropriations de biens en cas de risques naturels majeurs	Etat, communes ou groupement de communes	100 %
Reconnaissance et comblement de cavités souterraines	Entreprises de moins de 20 salariés ou particuliers	30 %
Etudes et travaux imposés par un PPRN (définition au paragraphe suivant)	Entreprises de moins de 20 salariés ou particuliers	20-40 %

TABLE 1.1 – Tableau indicatif des taux de subvention

Une collectivité désireuse de bénéficier de subventions du Fonds Barnier pour prévenir les inondations sur son territoire doit bâtir un programme d'actions répondant à un cahier des charges établi par l'État en concertation avec les parties prenantes au niveau national, nommé PAPI. Le périmètre du PAPI (programme d'actions de prévention des inondations) s'appuie sur un territoire de taille variable mais très souvent supérieur à plusieurs dizaines de communes et, en règle générale, en cohérence avec l'aléa qu'il traite (bassin versant, cellule hydro sédimentaire). C'est un programme d'actions pensé pour un territoire donné et tenant compte de ses spécificités. Afin de proposer des réponses au problème "inondations", sont mises en places diverses actions telles que la réalisation d'ouvrages hydrauliques de défense ou de ralentissement des écoulements.

Aujourd'hui, et car presque toutes les communes françaises ont déjà été reconnues au moins une fois comme touchées par des inondations, une grande partie du territoire métropolitain français est couvert par un PAPI. A noter également que les communes couvertes par un PAPI concentrent 77 % de la sinistralité inondation et submersion marine (1995-2019)

On précise que la taxe sur les conventions d'assurance (TSCA) n'est pas le Fonds Barnier. C'est une taxe principalement perçue sur les contrats d'assurance de bien et qui contribue au financement des services départementaux d'incendie et de secours.

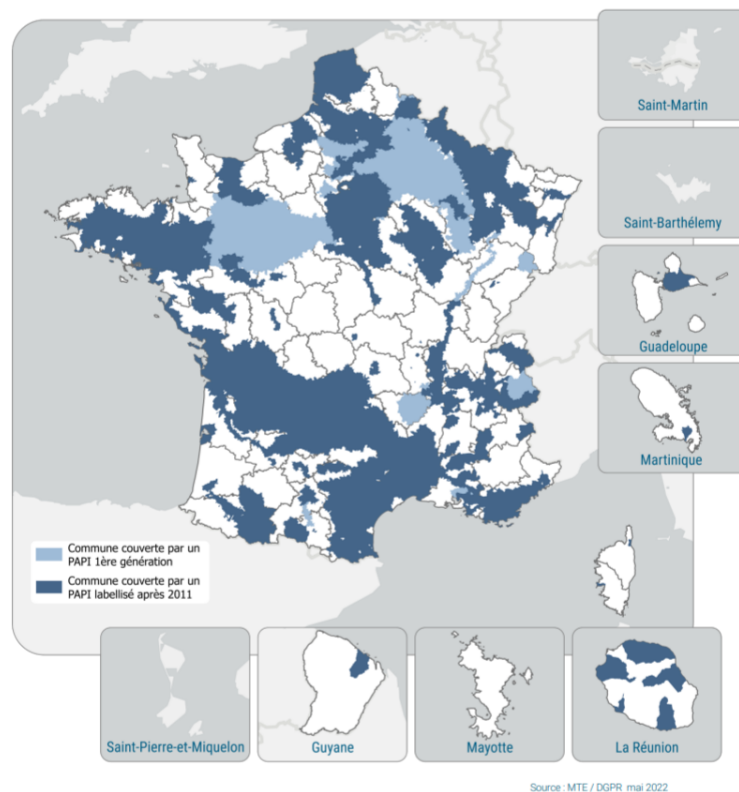


FIGURE 1.28 – Communes couvertes par au moins un PAPI. Source : geoportail.ccr.fr

Les Plans de Prévention des Risques Naturels (PPRN)

Les PPR ont été institués par la loi du 2 février 1995 et se justifient par la survenance d'inondations dramatiques mettant en exergue un urbanisme non contrôlé dans les zones les plus exposées. Ces dispositifs prennent la relève des Plans d'Exposition aux Risques (PER) mis en place en 1982 avec le régime d'indemnisation des Cat Nat.

Ils ont donc pour but d'empêcher la construction de bâtiments non compatibles avec l'existence de l'aléa naturel dans les zones les plus à risques afin de limiter la croissance des futurs dommages potentiels. Cela passe par la réglementation de l'urbanisation à une échelle locale (communale ou intercommunale) en délimitant notamment :

- les zones exposées qui devront faire l'objet d'une interdiction de construire ;
- les zones exposées qui pourront faire l'objet d'autorisations de constructions nouvelles sous réserve de l'application de mesures d'adaptation des bâtiments.

C'est indiscutable, les PPRN ont connu une très forte augmentation. Une autre métrique intéressante est la part de sinistralité couverte pour chaque péril par les PPR. Là encore, le péril inondation est très bien cerné.

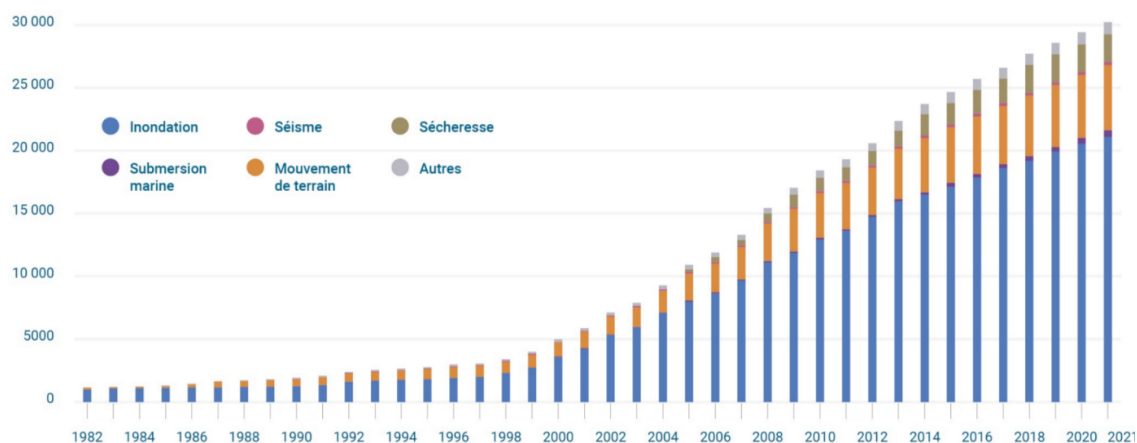


FIGURE 1.29 – Evolution du nombre de PPRN approuvés et dispositifs similaires



FIGURE 1.30 – Part de la sinistralité (1995-2019) couverte par les PPR

L' Alerting météo

Le développement de l'alerting météo en France a connu une évolution significative au cours des dernières décennies, passant de systèmes rudimentaires à des dispositifs sophistiqués et intégrés. Initialement, les alertes météorologiques étaient émises principalement par Météo-France via des bulletins diffusés par la radio et la télévision. Avec l'avènement de l'ère numérique, le système d'alerte s'est modernisé pour inclure des notifications en temps réel par SMS, applications mobiles et réseaux sociaux, permettant une diffusion plus rapide et plus ciblée des informations. Les technologies satellitaires et les modèles de prévision météorologique ont considérablement amélioré la précision et la fiabilité des alertes, permettant de mieux anticiper les phénomènes extrêmes comme les tempêtes, les inondations et les canicules. Cette évolution a été soutenue par des collaborations entre divers organismes gouvernementaux et scientifiques, visant à renforcer la résilience des infrastructures et des populations face aux aléas climatiques.

1.3.3 Sensibiliser l'assuré

La prévention n'est pas un sujet mis de côté et de nombreuses mesures sont prises sur les plans administratifs, financiers, techniques et réglementaires. Cependant il s'agit aussi de sensibiliser les particuliers. En matière de sensibilisation aux risques naturels, l'année 2022 a été marquée par une modification de l'information acquéreur-locataire. Mise en place en 2006, elle a pour objectif d'informer les nouveaux acquéreurs ou locataires sur l'exposition de leur futur bien aux risques naturels. Depuis le 1er janvier 2023, cette information doit être indiquée dès l'annonce immobilière et non plus au moment de la signature du contrat de location ou de vente.

Le ministère de la Transition écologique et de la Cohésion des territoires a développé, en partenariat avec l'établissement public français pour les applications des sciences de la Terre

(BRGM) un portail nommé Géorisques¹ permettant en rentrant une adresse d'accéder à l'ensemble des risques naturels et technologiques recensés près de chez soi. Sur le marché concrètement, on a récemment vu émerger une action similaire de la part des assureurs. Certains l'ont déjà mis en place et d'autres le développent encore actuellement. Ils développent des applications webs permettant à l'assuré ou particulier d'obtenir des informations sur l'exposition de son adresse à ces risques. Parfois des informations complémentaires sont disponibles sur les infrastructures et l'économie de la ville en général : évolution du prix du mètre carré, commerces, plan d'exposition au bruit etc. Parmi les assureurs disposant de telles applications on retrouve Generali² et la MAIF³.

La réalisation de cette veille permet de se rendre compte que des outils sont mis en place pour informer les particuliers de l'exposition actuelle d'une adresse mais que aucun (ou très peu) ne présente l'exposition "future" ou projetée, pourtant d'actualité au vu du contexte climatique et du régime des catastrophes naturelles. Le présent mémoire s'inscrit dans ce cadre et vient apporter une réponse pratique sous la forme d'un outil à ce besoin.

1. <https://www.georisques.gouv.fr/>

2. <https://ensemble-face-aux-risques.generalif.fr/>

3. <https://www.maif.fr/habitation/risques-climatiques-logement#carte>

1.4 Exercice pilote ACPR

Le but de cette partie est de comprendre les choix et hypothèses retenues dans le présent mémoire.

Les enjeux liés au changement climatique ayant été abordés préalablement, on comprend la double mission de l’Autorité de contrôle prudentiel et de résolution dans ce contexte. Elle doit en effet veiller à ce que les institutions financières identifient clairement les risques liés au changement climatique auxquels elles sont exposées et ont mis en place une structure et des modalités appropriées de gestion de ces risques. Elle doit également contribuer à la mise en place des conditions favorables au financement d’une transition ordonnée vers une économie équilibrée et soutenable afin de lutter efficacement contre le réchauffement climatique. Cela passe notamment par une plus grande transparence des institutions financières sur leurs expositions, un contrôle et une évaluation de leurs engagements publics, qui visent à permettre une allocation avisée et optimale des financements et des capitaux

En mai 2021 l’ACPR publiait les résultats de son premier exercice climatique, conduit de juillet 2020 à avril 2021 et en tirait ses premières conclusions et leçons pour l’exercice suivant. Il est important de rappeler que cet exercice était une première. Il est alors motivé par la démarche engagée avec l’Accord de Paris de 2015 et la Loi sur la transition énergétique et la croissance verte pour mieux mesurer et lutter contre le réchauffement climatique. C’est une réussite puisqu’il a largement mobilisé. Les répondants représentent 85% du total des bilans bancaires et 75% du total du bilan et des provisions techniques des assureurs. Les états à renseigner permettaient deux types de projections, à court et moyen terme (2025) et long terme, allant jusqu’à 2050. Cet exercice a permis de cerner les risques de transition ainsi que physique sur deux types d’échéance.

Pour ce qui est du risque physique et plus particulièrement de la projection à horizon 2050, les assureurs ont pu s’appuyer sur les projections de la CCR, ou bien utiliser leurs propres scénarios fondés sur le scénario 8.5 du GIEC (soit le plus pessimiste du GIEC). Cet exercice a montré de manière indéniable que la sinistralité des branches CatNat pourrait augmenter (prévoyant alors une hausse de 174 % entre 2019 et 2050). Cette évolution est surtout attendue dans les départements exposés aux inondations et à la sécheresse. Les assureurs peuvent y répondre par des réallocations de portefeuilles, des hausses de cotisations, des révisions de garanties ou des modifications des programmes de réassurance. La plupart ont choisi d’augmenter les primes d’assurance de 130% à 200% d’ici 2050, bien au-delà de l’inflation prévue.

Un des plus grand apport de cet exercice est les leçons que l’on peut en tirer pour adapter la méthodologie et les hypothèses. L’ACRP note ainsi les points suivants :

- la projection sur 30 ans est inhabituelle pour les assureurs et un effort d’uniformisation est requis
- difficulté à identifier les secteurs sensibles au changement climatique
- d’autres hypothèses pourraient être prises en compte, par exemple le lien entre taux d’intérêt et changement climatique
- aucun assureur n’a voulu remettre trop profondément en cause ni sa stratégie d’allocation d’actifs, ni sa politique de réassurance

Il fut alors question de conduire un exercice 2023 afin de revoir et ajuster les hypothèses et objectifs.

Hypothèses de l'exercice 2023

Nous détaillons ici les hypothèses concernant le risque physique à long terme uniquement.

Horizon et pas-de-temps

Par volonté de cohérence avec l'horizon tendanciel des risques physiques, l'exercice retient du moins pour cette partie un horizon moyen - long terme avec une fin de période au 31 décembre 2050. Le point de départ des projections est fixée au 31/12/2022, date de remise prudentielle et comptable.

Scénario climatique

Le risque physique aigu est évalué sur la base du scénario « RCP 4.5 » du GIEC. Cela constitue une différence avec l'exercice pilote précédent, dans lequel le risque physique au passif était évalué sur la base du scénario RCP 8.5 qui correspondait à une hypothèse de hausse des températures comprise entre 1,4°C et 2,6°C en 2050 (contre 0,9°C et 2,0°C en 2050 pour le scénario RCP 4.5, pour la période 2046-2060).

Ce choix est dicté par plusieurs raisons. Pour commencer, il est important de préciser que les différences entre les RCP 4.5 et RCP 8.5 (et les RCP intermédiaires) à horizon 2050 sont limitées, y compris concernant la survenance d'aléas extrêmes. On rappelle que les RCP (Representative Concentration Pathways) sont des trajectoires de concentration de gaz à effet de serre utilisées pour modéliser les impacts du changement climatique. Le scénario RCP 4.5 représente une situation où des mesures modérées sont prises pour réduire les émissions de gaz à effet de serre, tandis que le scénario RCP 6.0 représente un scénario intermédiaire avec des efforts de réduction des émissions plus limités.

S'agissant des inondations fluviales, le RCP 4.5 ne se révèle pas moins adverse pour le France que le RCP 8.5 en 2050. Pour les autres périls (submersion marine, subsidence, tempêtes), le scénario RCP 8.5 reste légèrement plus adverse.

Ce choix repose donc principalement sur :

- une plus grande cohérence avec les trajectoires de température des scénarios NGFS « Below 2°C » et « Delayed Transition » à horizon 2050
- Il est possible de considérer des impacts plus adverses en restant dans le cadre d'une même trajectoire d'émissions. Pour l'évaluation de la sinistralité relevant de régime d'indemnisation des catastrophes naturelles en France, la CCR proposera des projections de dommages correspondant à la fois à la moyenne du scénario RCP 4.5 mais aussi au 98e percentile des dommages associés à cette trajectoire, ce qui permettra de considérer des impacts potentiellement plus adverses à trajectoire socio-économique constante.
- le RCP 8.5 est sujet à controverses quant à son caractère atteignable, notamment en raison des hypothèses relatives à l'évolution de l'utilisation des énergies fossiles sur lesquels il s'appuie. Sa pertinence en tant que scénario *business as usual* est ainsi sujette à caution

Projection de la sinistralité

Les participants sont autorisés à utiliser leur propre modèle de projection de sinistralité. Le scénario considéré devra être proche du scénario RCP 4.5 du GIEC. Ces participants devront décomposer les effets de la sinistralité projetée liés :

- l’inflation
- l’aléa climatique
- les mouvements et évolution de population

Le guide technique précise les hypothèses à utiliser. Les hypothèses d’inflation fournies pour les différents scénarios pour les zones FR/RoEU/US/RoW sont à utiliser comme proxy de l’évolution de l’indice du coût de la construction. Pour ce qui est des enjeux assurés, sont recommandées les projections démographiques départementales de l’INSEE.

Variables climatiques

Cet exercice requiert des exigences d’harmonisation en termes de variables climatiques. Ces exigences s’expriment par péril.

Dans l’étude des inondations fluviales, il est demandé une cohérence des modèles utilisés l’évolution relative médiane de 2020 à 2050 de la variable Precipitation (en moyenne par Pays), en RCP 4.5 ou RCP 6.0. Ces inondations présentent une solution open source directement exploitable, avec CLIMADA et son interface simplifiée développée par l’EIOPA.

Pour ce qui est du risque de subsidence, aucune contrainte sur les variables n’est imposée mais il est demandé une cohérence avec une trajectoire RCP 4.5.

Conclusions de l’exercice

Présentons les résultats de l’exercice climatique 2023 de l’ACPR, parus en mai 2024, sur le plan du risque physique à long terme.

Comme en 2020, l’impact de l’augmentation des catastrophes naturelles sur les assurances dommages a été évalué avec le concours de la CCR, qui a fourni les données d’augmentation des sinistres par département. Les assureurs pouvaient ajuster leur politique à partir de 2025 en réallouant leurs portefeuilles, augmentant les primes, révisant les réassurances ou adaptant les contrats. Les modifications prévues des surprimes en 2025 n’ont pas été incluses. La sinistralité en France métropolitaine augmente de 105,3 % entre 2022 et 2050, et de 42 % en scénario adverse par rapport au scénario de référence. Les écarts de sinistralité pour 2050 sont de 39,7 % pour la sécheresse et 44 % pour les inondations, avec une répartition hétérogène sur le territoire. Le rapport détaille l’écart de sinistralité entre les scénarios de référence et adverse. Cette décomposition permet de se rendre compte de l’impact du changement climatique. On trouve dans le rapport la figure ci-après :

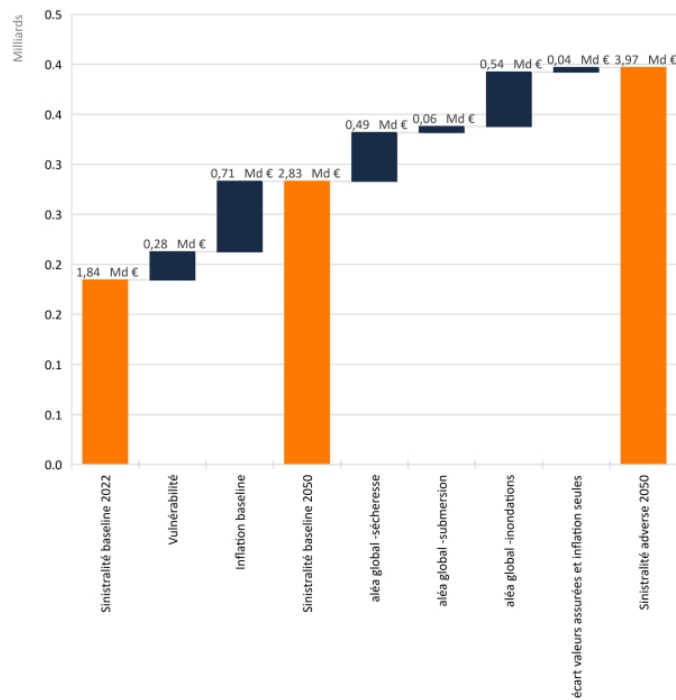


FIGURE 1.31 – Décomposition de l'écart de sinistralité en % entre scénarios adverse et de référence en 2050. Source : rapport sur l'exercice 2023

L'écart de sinistralité est principalement dû à l'aléa et résulte donc du changement climatique. Il est alors intéressant de se demander comment cela se dessine pour les inondations et sécheresse et voir comment le territoire métropolitain réagit à l'évolution du climat. Des cartes sont données dans le rapport.

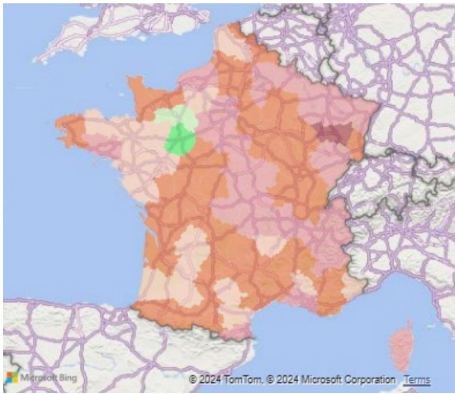


FIGURE 1.32 – écarts de la sinistralité Cat Nat entre les scénarios adverse et de référence en 2050 - Sécheresse

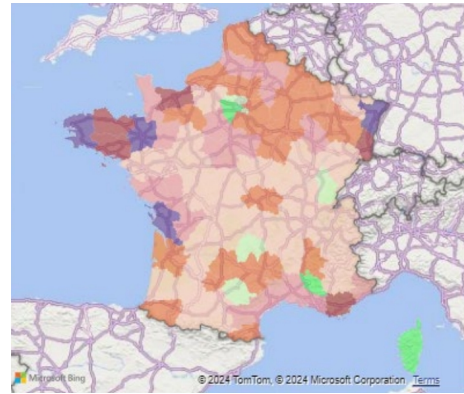


FIGURE 1.33 – écarts de la sinistralité Cat Nat entre les scénarios adverse et de référence en 2050 - Inondation

1.5 Inassurabilité et rapport Langreney

Les auteurs du rapport 2023 de l'université des Nations unies, *Interconnected Disaster Risks*, publié à un mois de la COP28, alertent sur six « points de bascule » de risques susceptibles d'altérer les systèmes dont dépend sa survie. Parmi ces six on retrouve l'inassurabilité. Il y a possibilité d'assurer lorsque qu'il y a un risque (donc aléa) et que l'assurance est financièrement proposable. Hors, le changement climatique a pour impact la hausse de la fréquence de catastrophes naturelles et de la sinistralité. Ceci conduit à une hausse des prix voir à ce que le risque perde à certains endroits son aspect aléatoire. Certaines zones sont d'ores et déjà inassurables. Aux Etats-Unis plusieurs assureurs ont déjà cet action de recul face au changement du profil de risque. Ainsi State Farm, Allstate et AIG se retirent en Californie.

Ce phénomène, bien que moins marqué, n'est pas étranger à la France. Il est au coeur des débats actuels. Du côté du marché en 2024 pour ce qui est de l'assurance MRH, les produits que les assureurs cherchent à lancer concernent les locataires d'appartement ; ils évitent les maisons. Du côté régulateur, l'inassurabilité fait partie des points d'attention de l'exercice climatique 2023 de l'ACPR. Ce point est traité par d'une part l'estimation d'un taux d'inassurabilité des biens et d'autre part par un questionnaire. Il en ressort que :

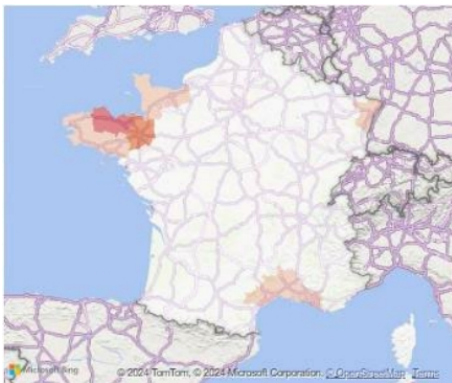


FIGURE 1.34 – Taux de résiliation en 2050 - scénario adverse

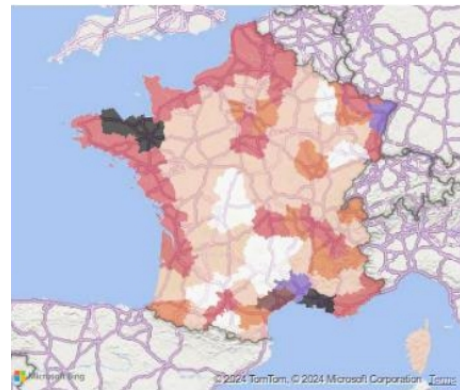
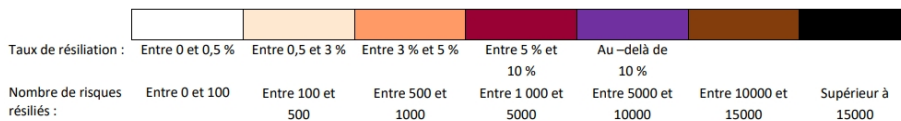


FIGURE 1.35 – Nombre de résiliations en 2050 - scénario adverse



Le questionnaire révèle qu'une large proportion d'assureurs envisage ou met en œuvre des politiques tarifaires basées sur une localisation plus précise des risques. Pour faire face au dérèglement climatique, les mesures prioritaires incluent l'augmentation et l'ajustement des tarifs. Six assureurs excluent déjà les zones trop exposées. En termes de prévention, douze organismes ont mis en place des dispositifs pour aider les assurés à gérer les risques climatiques.

La question de l'inassurabilité a fait l'objet d'une requête de Bruno Le Maire, alors Ministre de l'économie. Thierry Langreney, Myriam Merad et Gonéri Le Cozannet ont été missionnés pour formuler des propositions concrètes permettant au régime de faire face aux enjeux climatiques et aux bouleversements qu'ils induisent. Ce rapport fut publié le 2 avril 2024. ¹

1. <https://www.ecologie.gouv.fr/presse/remise-du-rapport-mission-lassurabilite-risques-climatiques>

Le « rapport Langreney » conclut sans surprise à un « déséquilibre structurel significatif » . Il poursuit 11 objectifs s'articulant autour de 3 grands axes : adaptation, prévention et atténuation. A cet effet, il formule 37 recommandations. On retrouve principalement :

- Rééquilibrage financier du régime : révision des primes pour mieux refléter les risques et création d'un fonds de financement pour la relocalisation des biens exposés à l'érosion côtière ;
- Renforcement des efforts de prévention : mise en place d'une plateforme dédiée, introduire des prêts à taux zéro pour les travaux de prévention en zones à risque, améliorer l'indemnisation en favorisant la réparation plutôt que le remplacement ;
- Maintenir un système assurantiel accessible et mutualisé
- Décarbonation des portefeuilles d'assurances

Plusieurs acteurs du milieu tels que Thierry Langreney ou encore Édouard Vieillefond (directeur général de la CCR) dans son mot de conclusion de la 15e Journée CCR CAT soulignent le besoin d'une cartographie triple : des risques, des solutions et de la présence des assureurs. Elle aurait pour but de détecter les éventuels risques de désengagement en veillant au respect des principes de la libre concurrence et préférer l'incitation économique au *name and shame*.

NB : Si l'inassurabilité est une question importante aujourd'hui pour l'assurance de catastrophes naturelles, certains points sont à rappeler. Premièrement, la volonté est de conserver le système actuel et une protection solidaire de la population. Ensuite, Thierry Langreney précise dans un webinaire organisé par l'Institut de la gestion publique et du développement économique (IGPDE) que l'on est très loin d'un niveau de prime amenant un décrochage et donc un risque d'inassurabilité. On est à environ 25€ de prime annuelle par contrat aujourd'hui. L'augmentation qui paraît nécessaire à climat 2020 porte à moins de 40€ par an par contrat. Ces chiffres se vérifient à l'aide du « Bilan CatNat » de CCR, où l'on trouve par exemple pour l'année 2022 1006M€ de primes CatNat et 44.8M de risques assurés pour ce qui est des risques de particuliers. Cet argent supplémentaire sert à payer les sinistres mais l'on vient en plus d'augmenter les droits des assurés en incluant la prise en charge des frais de relogement, en terme de reconnaissance de communes en sécheresse etc.

Chapitre 2

Présentation des données et limites de l'Open Data

2.1 Données de sinistralité

2.1.1 Les arrêtés CAT NAT

Le premier enjeu dans le cadre de la modélisation des CAT NAT inondation et sécheresse est de disposer de données relatives à la sinistralité. Ne disposant pas en accès libres de données aussi précises que celles dont disposent les assureurs, et souhaitant travailler à la maille la plus fine possible, il semble naturel de s'orienter vers le site de la CCR. Le portail des catastrophes naturelles² permet de télécharger les arrêtés. Sur cette page web il est possible de sélectionner les arrêtés selon le type de péril, l'année, le département et la commune. Le téléchargement se fait par clic sur un bouton et il y a 77 arrêtés. La méthode mise en oeuvre est donc de récupérer ces fichiers par scrapping. Une fois les fichiers téléchargés, il s'agit de les concaténer. On obtient la base complète des arrêtés.

La base ainsi constituée donne accès aux informations suivantes :

- code insee
- nom de la commune
- date de début de reconnaissance (début de l'évènement)
- date de fin de reconnaissance
- date de l'arrêté
- date de parution au Journal Officiel
- nom du péril
- franchise (simple ou double)
- décision de reconnaissance

En plus du travail de collecte, il a été nécessaire de mettre à jour certaines informations. En effet, certaines communes ont changé de code insee, fusionnées etc. Pour cela, on utilise les fichiers excel mis à disposition par l'INSEE.

2. <https://catastrophes-naturelles.ccr.fr/les-arretes>

On dispose alors d'une base à l'échelle communale et d'informations qui nous permettront, en les croisant aux données météorologiques, d'identifier les conditions de reconnaissance CAT NAT par péril. A titre informatif, cela réduit d'environ 3% le nombre de communes différentes dans la base.

Dans cette base d'arrêtés, on peut retrouver la répartition des périls (ici en nombre). On y voit la progression du péril sécheresse.

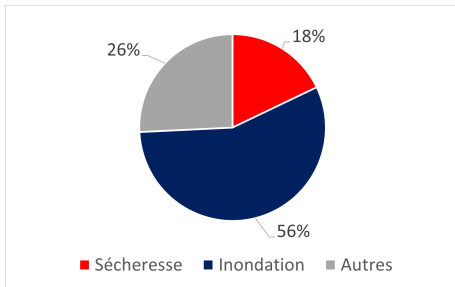


FIGURE 2.1 – Répartition des périls en nombre (cumul 1982-2024)

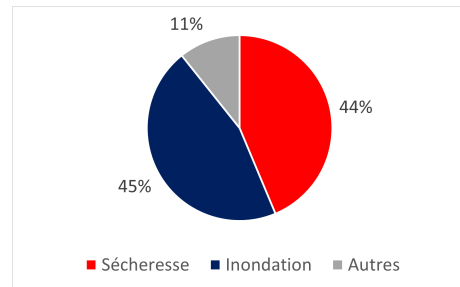


FIGURE 2.2 – Répartition des périls en nombre (cumul 2010-2024)

Il est également intéressant de regarder leur évolution dans le temps et la manière dont les différents évènements (comme la tempête Lothar et Martin) viennent marquer les courbes.

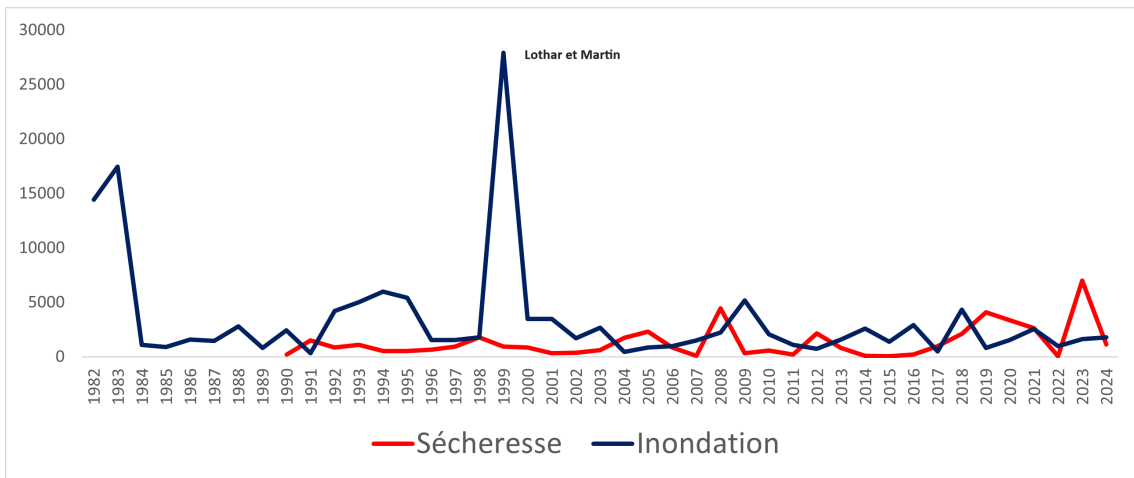


FIGURE 2.3 – Evolution du nombre de reconnaissances des périls inondation et sécheresse depuis 1982. Source : analyses d'après la base GASPARG.

Ces périls diffèrent sur de nombreux points et réagissent presque de manière contraire aux caprices climatiques. Ces différences de profil se retranscrivent sur leur saisonnalité. Prêtons attention aux graphiques ci-après.

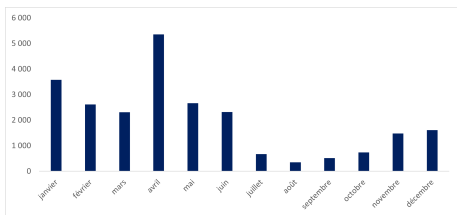


FIGURE 2.4 – Nombre d’occurrences par mois - inondations

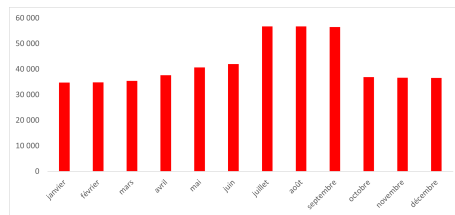


FIGURE 2.5 – Nombre d’occurrences par mois - sécheresse

On a compté le nombre d’occurrence des mois dans les périodes reconnues. Il en résulte que janvier et avril (et non pas mars, communément appelé mois des giboulées) sont propices aux inondations tandis que pour la sécheresse ce sont sans surprise les mois de juin, juillet et août.

Durée de l’évènement	Sécheresse	Inondation
Moyenne (jours)	332	6
Médiane (jours)	91	3
Ecart-type (jours)	512	24
Maximum vérifier car absurde	9 ans et 9 mois	7 ans et 4 mois

TABLE 2.1 – Statistiques descriptives des périls étudiés

La plus longue inondation reconnue correspond à la commune 91228 entre 1990-01-01 et 1997-04-30 (arrêté du 12/03/1998). Pour la sécheresse, c’est 65342 (en Occitanie) avec un évènement renseigné entre 1989-01-01 et 1998-09-30.

2.1.2 Données de portefeuille assureur

Nous disposons de données d’un portefeuille climatique d’assureur. Ce portefeuille concerne 1478 communes (soit 4.26% des communes de la métropole française) sur la période 2005 - 2022. On dispose des informations suivantes :

- id
- mois de survenance
- année de survenance
- code postal
- id d’évènement
- lob (MRH ou Auto)
- type de péril : inondation, sécheresse ou autre
- règlement
- psap : provisions pour sinistres à payer
- recours
- prevec
- charge sinistre
- cession

— nombre de sinistres

Notre portefeuille est à 94% MRH et contient un nombre relativement faible de communes différentes. Nous avons dressé la carte des départements avec au moins une commune assurée en dissociant les deux périls étudiés.

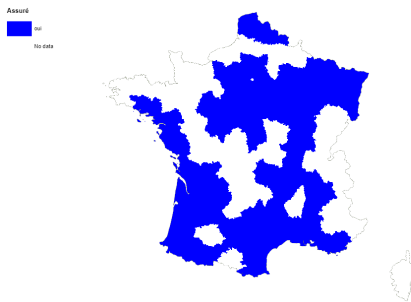


FIGURE 2.6 – Départements représentés dans la base - Inondation

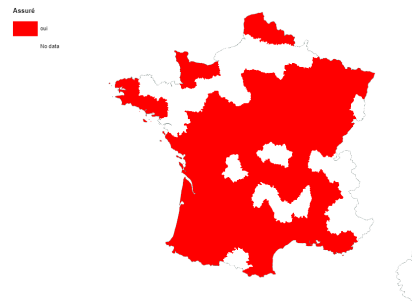


FIGURE 2.7 – Départements représentés dans la base - Sécheresse

Nous disposons au total de 4935 lignes, 4934 sinistres et 110 évènements (tous types confondus). Nous avons regardé comment se répartissait la charge cumulée sur toute la période disponible dans le portefeuille entre les périls : inondation (sans Xynthia, mais la prendre en compte n'a pas un énorme impact), sécheresse et autres périls.

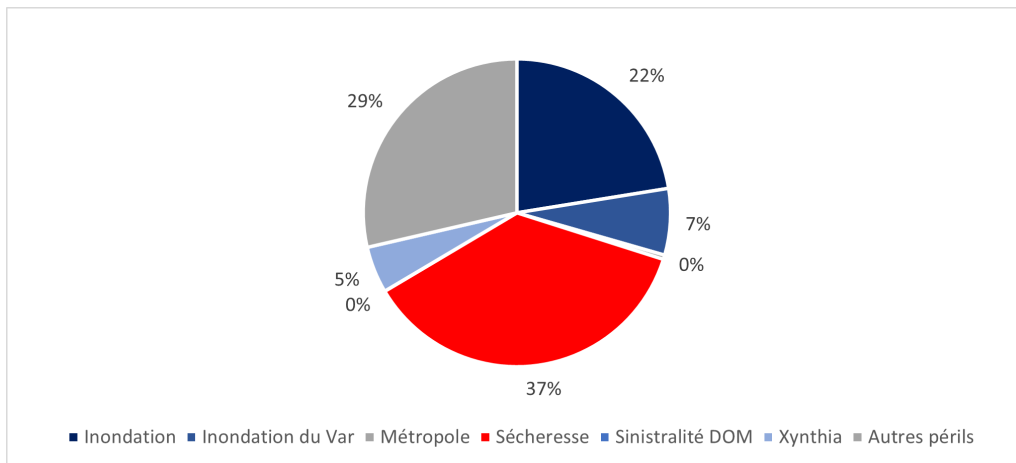


FIGURE 2.8 – Répartition des règlements cumulés sur la période 2005-2022

2.2 Données climatiques

Cette section a pour but de présenter le raisonnement sous-jacent au choix des données climatiques utilisées pour la projection de la sinistralité à l'horizon 2050 et en particulier la fréquence des inondations et sécheresses. Il faudra ainsi choisir une trajectoire climatique, un modèle et des variables explicatives.

Dans ce cadre, il est bon de garder à l'esprit que notre chaîne de modélisation comporte de nombreuses sources d'incertitudes. On parle de cascade d'incertitudes. Les méthodes de régionalisation et les études utilisant des modèles d'impacts (modèle hydrologique etc.) s'appuient sur des simulations de modèles climatiques globaux, eux-mêmes conditionnés par des hypothèses de développement socio-économiques, formant ainsi une chaîne de modélisation ?. Ainsi notre étude est impactée par les incertitudes réflexive, épistémique et stochastique. La première fait référence aux incertitudes socio-économiques liées à la question des scénarios futurs d'émission des gaz à effet de serre. La deuxième provient d'une connaissance imparfaite des phénomènes et de leur représentation dans les modèles (non parfaitement fidèle à la réalité). Enfin la variabilité naturelle du climat dûment à son aspect chaotique et à l'existence de conditions initiales à définir dans la modélisation d'un système climatique est également une source d'incertitude.

2.2.1 Choix des données historiques

Dans un premier temps, contruisons une base de données climatiques sur la période historique. Une possibilité est de télécharger les données du scénario dit « de référence » disponible sur le site du DRIAS. Ce sont des données issues de simulations. Nous avons fait le choix de la construire à partir des bulletins météorologiques mensuels de Météo France pour la période allant du 01/01/2000 au 31/12/2022 ¹. Notons qu'on perd alors la possibilité d'analyser le début du régime CatNat (soit depuis 1982). La base ainsi obtenue donne pour les 112 stations météorologiques disponibles les variables :

- TN : moyenne des températures minimales (degrés Celsius et dixièmes)
- TX : moyenne des températures maximales (degrés Celsius et dixièmes)
- H.RR : hauteur des précipitations (millimètres et dixièmes)
- INST : durée d'insolation (heures)
- TNN/D : température minimale absolue avec date
- TXX/D : température maximale absolue avec date
- RMAX/D : hauteur maximale de précipitations avec date
- FXI/D : vitesse de vent maximale instantanée (m/s)/date

L'indicateur SWI (*Soil Wetness Index*), pour cette période, est téléchargeable sur le site de Météo France et est calculé conformément à la circulaire du 20 mai 2019 (Procédure de reconnaissance de l'état de catastrophe naturelle – Révision des critères permettant de caractériser l'intensité des épisodes de sécheresse-réhydratation des sols à l'origine de mouvements de terrain différentiels). Avant le 01/01/2024 les données correspondant au "futur" n'étaient pas disponibles. Nous ne le retiendrons pas dans un premier temps, mais il sera présenté et utilisé dans une partie ultérieure.

1. <https://donneespubliques.meteofrance.fr/>

Les scénarios d'émission de gaz à effet de serre présentés en partie 1.1 sont utilisés comme input des modèles climatiques globaux. Ces modèles ont une résolution insuffisante (carrés de 150-200 km de côté) pour les besoins du présent mémoire. Notre choix se portera donc sur des modèles auxquels ont été appliqués des méthodes de régionalisation. Ces méthodes permettent de descendre à des échelles de l'ordre de la dizaine de kilomètres par augmentation artificielle de la résolution. La descente d'échelle se fait soit en résolvant explicitement la physique et la dynamique du système climatique régional, soit de manière statistique en cherchant une relation entre les variables locales et les prédictors modèles. Cela permet d'obtenir une grille de résolution finale de 8km.

Les projections régionalisées sont globalement biaisées par rapport aux observations et leur échelle spatiale est trop grossière pour certaines applications. Des méthodes de correction de biais et de descente d'échelle statistiques sont donc employées. La façon la plus exhaustive d'analyser le comportement en une station étant de comparer les fonctions de densité probabiliste pour chaque saison et variable.

Sur le portail du DRIAS, les méthodes de correction utilisées sont les suivantes :

Méthodes	Avantages	Inconvénients
DSCLIM (<i>CERFACS</i>)	<ul style="list-style-type: none"> – Préserve la cohérence spatiale et inter-paramètres. – Permet d'accéder au pas de temps infra-quotidiens. – Élimine les biais efficacement. 	<ul style="list-style-type: none"> – Problèmes de transférabilité de la méthode du passé au climat futur. – La classification par saison crée des limites artificielles entre les jours analogues possibles. – Ne tient pas compte des rétro-actions entre le sol (humidité et couverture de neige) et les variables.
Quantile-Quantile (<i>M. Déqué</i>)	<ul style="list-style-type: none"> – Prise en compte des rétroactions et des modifications des extrêmes. – Permet d'éliminer les biais dans les deux premiers moments statistiques. Il peut saisir l'évolution et la variabilité de la moyenne du modèle tout en faisant correspondre tous les moments statistiques. 	<ul style="list-style-type: none"> – Les erreurs du modèle et les paramétrisations physiques sont considérées invariantes entre le futur et le passé. – Aucun ajustement n'est apporté à la structure temporelle des précipitations quotidiennes. – Impossible de capturer les durées des périodes de sécheresse et d'humidité modélisées. – Il n'est pas en mesure de générer une variabilité interannuelle des précipitations.
CDF-t (<i>IPSL</i>)	<ul style="list-style-type: none"> – Prise en compte de l'évolution des propriétés statistiques des données désagrégées avec le changement climatique. – Ajustement de la fréquence des précipitations. – Capable de simuler la durée des périodes d'humidité et de sécheresse. 	<ul style="list-style-type: none"> – Dépendance inter-variables du modèle climatique n'est pas corrigée mais est préservée. – Les données sont désaisonnalisées et la tendance retirée. – N'est pas développée spécifiquement pour les événements extrêmes.
ADAMONT (<i>Météo-France</i>)	<ul style="list-style-type: none"> – Permet d'accéder au pas de temps infra-quotidiens. – L'hypothèse de stationnarité a de meilleures chances d'être vérifiée au sein d'un même types de temps de la même saison. Le changement climatique se traduit par un changement de fréquence des types de temps. 	<ul style="list-style-type: none"> – La classification par saison crée des limites artificielles entre les jours analogues possibles. – La consistance entre les variables n'est plus assurée au terme de la chaîne de traitement.

FIGURE 2.10 – Méthodes de corrections que l'on trouve sur le portail DRIAS

La plupart des méthodes de correction et de descente d'échelle statistiques s'appuient sur l'hypothèse que la relation statistique établie lors de la construction du modèle (période historique) sera vérifiée lors de son application (scénarios futurs), c'est l'hypothèse de stationnarité. Pour une même série observée et un même modèle, les résultats peuvent varier. La correction de biais est donc aussi une source d'incertitude à prendre en compte, en plus de celles provenant des données observées, des modèles, du scénario et du modèle d'impact.

Notre choix se porte sur le jeu de données DRIAS – CNRM2014, produit par le CNRM. Sa construction se décompose comme suit :

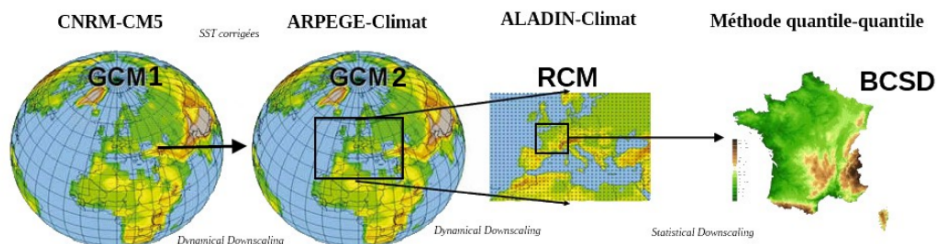


FIGURE 2.11 – Les étapes de descente d’échelle depuis la modélisation climatique globale à régionale jusqu’à la désagrégation aux petites échelles spatiales

Les données se répartissent en une partie dite « historique » ou de référence (issues de simulations sur le passé) correspondant aux années 1951-2005 et la période de projection correspondant aux divers scénarios et aux années 2006-2100. Sur ce jeu de données, la période qui nous intéressera pour la constitution de notre base climatique représentant le "futur" est 2023-2050.

Le jeu de données retenu pour la période de projection a comme autre avantage que l’on dispose de plus de stations ou points d’observations des variables climatiques (environ 8690 contre 112 pour la période historique).

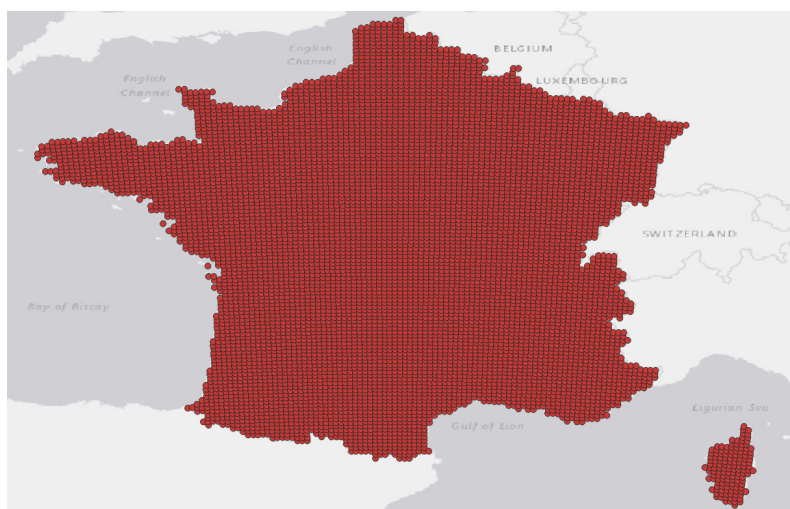


FIGURE 2.12 – Implantation des stations

A noter que ces données ne sont aujourd’hui plus disponibles au téléchargement (depuis la fin d’année 2023). C’est vrai pour le pas mensuel uniquement. Elle sont disponibles au pas quotidien. Néanmoins cette précision prend son sens lorsque l’on souhaite des données mensuelles pour l’ensemble de la France métropolitain ; le besoin en stockage et calcul est conséquent.

2.2.3 Visualisation du changement climatique

Nous souhaitons nous faire une idée de l'évolution des indicateurs climatiques dans ce contexte de changement climatique. L'idée est de vérifier qu'il y a en effet une hausse conséquente. Pour cela on visualise simplement les valeurs annuelles de cumul des précipitations. A cet effet les graphiques présentés dans cette section concernent la France métropolitaine uniquement.

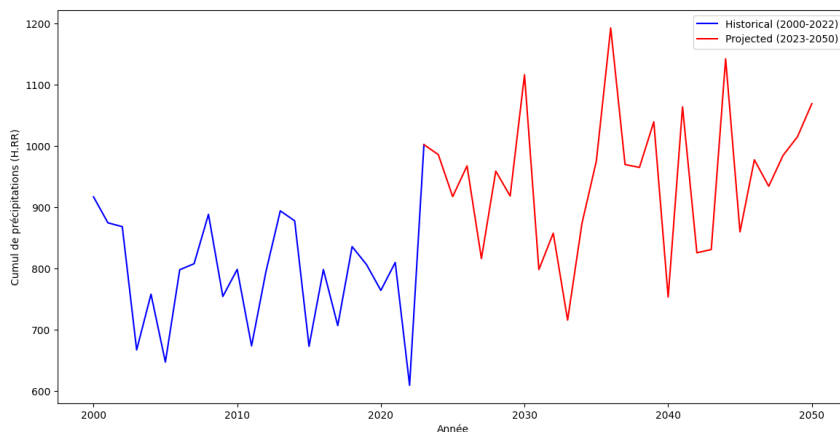


FIGURE 2.13 – Evolution du cumul annuel de précipitations

Une bonne manière de se rendre compte également de l'impact du changement climatique sur les indicateurs climatiques est de se rendre sur la page dédiée du Ministère de la Transition écologique et de la Cohésion des territoires ¹.

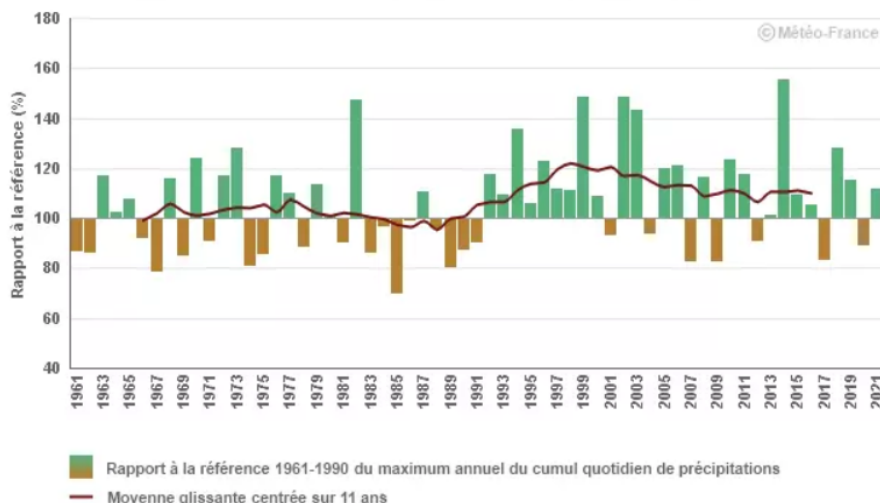


FIGURE 2.14 – Évolution de l'intensité des pluies extrêmes sur les régions méditerranéennes de la France à partir de 1961

On se conforte sur l'idée d'une incidence sur le profil des précipitations. Il faut toutefois garder à l'esprit que la région représentée, à savoir le bassin méditerranéen, est peut-être

1. <https://www.ecologie.gouv.fr/politiques-publiques/impacts-du-changement-climatique-atmosphere-temperatures-precipit>

l'une des plus sensibles au changement climatique en France ¹.

Pour ce qui est des températures, on dispose du graphique ci-dessous ². Il montre l'écart des températures moyennes par rapport à la normale de 1961-1990 depuis 1900. On observe une tendance nette au réchauffement global, particulièrement marquée depuis les années 1980, avec des écarts de température de plus en plus importants au-dessus de la moyenne. Les décennies précédentes, notamment avant 1980, montrent des variations plus équilibrées avec plusieurs années en dessous de la normale, soulignant l'accélération récente du réchauffement climatique.

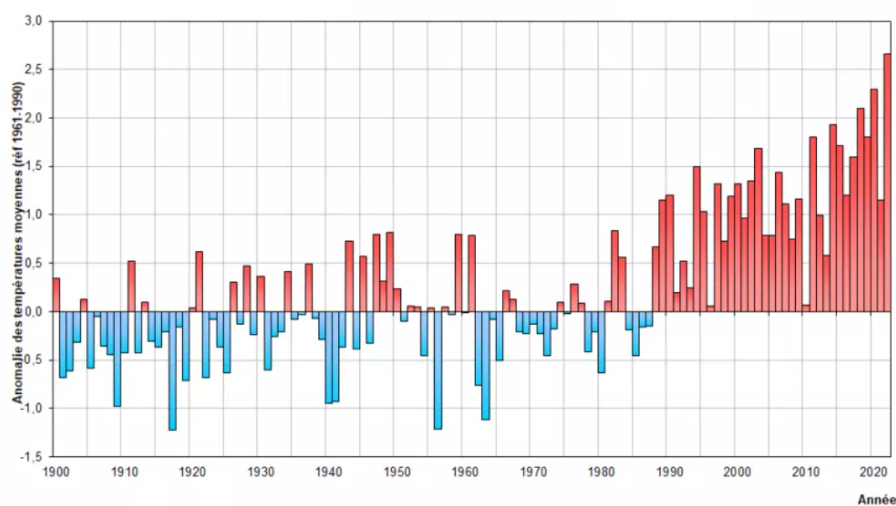


FIGURE 2.15 – Ecart à la normale des températures moyennes depuis 1900 (normale 1961-1990)

1. *confere* notamment le mémoire <https://www.institutdesactuaires.com/docs/mem/904bc305c1f329d8a7ea8313c69d208a.pdf>

2. <https://www.ecologie.gouv.fr/politiques-publiques/impacts-du-changement-climatique-atmosphere-temperatures-precipit>

2.2.4 Choix des variables

L'ACPR dans la partie sur les catastrophes naturelles du guide technique de l'exercice 2023 émet des exigences d'harmonisation pour cet exercice en ce qui concerne les variables selon le péril. Toutefois, ces exigences ne sont pas très contraignantes.

Pour les inondations fluviales, il est demandé une cohérence des modèles utilisés avec l'évolution relative médiane de 2020 à 2050 de la variable « Précipitation » (en moyenne par Pays), en RCP 4.5 ou RCP 6.0. Il semble alors judicieux d'utiliser la variable « H.RR » (hauteur des précipitations). Ce choix est celui que l'on ferait naturellement. Nous tâcherons tout de même de le conforter par analyses.

En ce qui concerne le risque de subsidence, la cohérence avec le scénario RCP4.5 est fortement encouragée mais on ne trouve aucune recommandation en ce qui concerne une ou plusieurs variables de référence. Conformément à la circulaire du 20 mai 2019¹, c'est le *Soil Wetness Index* (SWI) sur 3 mois qui est utilisé comme critère pour les phénomènes de sécheresse-réhydratation des sols dans le cadre de la procédure de reconnaissance. Cet indice se calcule à partir d'indicateurs tels que l'évapo-transpiration qui ne figurent pas dans les bulletins météorologiques. De plus, le produit correspondant de Météo France est issu de modèles numériques de terrain et donc ne correspond pas à notre volonté de commencer par une période historique de relevés. C'est donc lui que nous retiendrons dans le modèle final, mais nous essaierons de trouver une alternative dans un premier temps. On commence par construire la base suivante :

TN	TX	...	H.RR	Inondation	Sécheresse
...	0	1

TABLE 2.2 – Tableau des variables climatiques et cibles

Les variables climatiques n'ont pas la même unité. Un changement d'un degré n'a pas évidemment pas la même valeur qu'un changement d'un millimètre de précipitations. Il nous faut donc centrer et réduire les variables. L'étape qui suit est d'explorer les corrélations entre nos variables. Le but est de se rendre compte des différentes catégories de variables et de voir si certaines sont corrélées avec nos variables cibles (sécheresse et inondation).

1. <https://www.legifrance.gouv.fr/download/pdf/circ?id=44648>

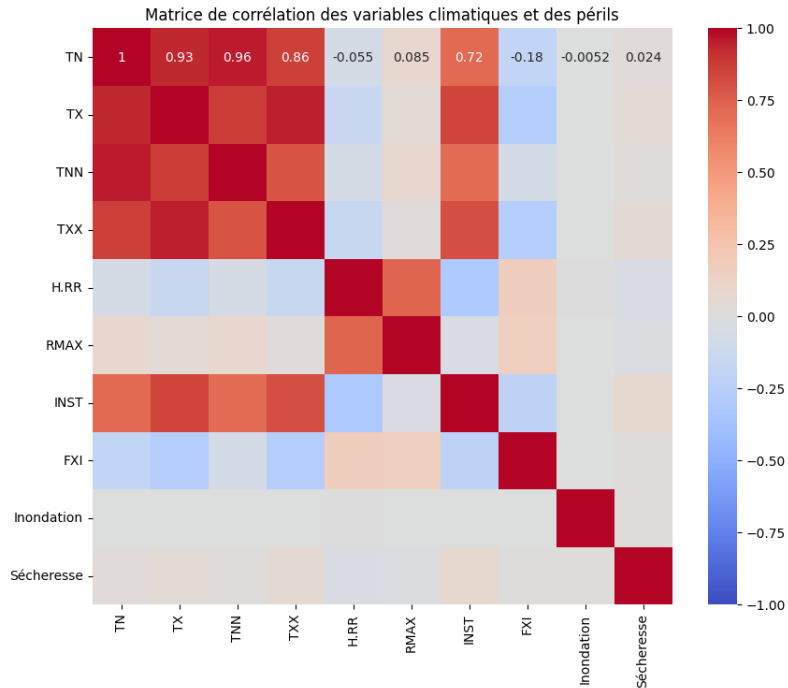


FIGURE 2.16 – Corrélations entre nos variables climatiques et cibles (périls)

Ce premier résultat rend compte de groupements de variables. Ainsi l'on a d'une part les variables de température ainsi que l'insolation, et de l'autre les précipitations. Remarquons qu'aucune variable climatique n'est vraiment corrélée à nos périls. C'est une remarque que l'on retrouve dans plusieurs mémoires d'actuaire.¹ Il semblerait donc qu'il nous faille chercher la meilleure variable plutôt qu'une variable avec une corrélation élevée.

On introduit pour cela la notion d'**importance**.

Les forêts aléatoires sont une méthode d'apprentissage automatique puissante et polyvalente, largement utilisée pour les tâches de classification et de régression. Une des caractéristiques clés des forêts aléatoires est leur utilité dans la sélection de variables. En construisant une multitude d'arbres de décision sur des sous-échantillons aléatoires du jeu de données, les forêts aléatoires évaluent la pertinence de chaque variable en mesurant son impact sur la réduction de l'impureté (comme l'entropie ou l'indice Gini) à chaque division de l'arbre. Cela permet d'estimer l'importance de chaque variable, facilitant ainsi l'identification des variables les plus influentes pour le modèle. Dans le contexte de la prévision des phénomènes climatiques, comme les inondations et les sécheresses, cette capacité à déterminer les variables climatiques les plus pertinentes (par exemple, les précipitations, les températures et le vent) est cruciale. En sélectionnant les variables les plus importantes, les forêts aléatoires aident à simplifier les modèles, à améliorer leur interprétabilité et à augmenter leur précision, tout en réduisant le risque de surajustement.

L'importance permet de déterminer quelles variables influencent le plus les prédictions d'un modèle. L'importance d'une variable se mesure par son impact sur les performances du modèle : plus une variable est importante, plus son inclusion améliore la précision des prédictions. Cette évaluation peut se faire par différentes techniques, comme les forêts aléatoires donc, qui estiment l'importance en mesurant la réduction de l'impureté à chaque division d'arbre de

1. <https://www.institutdesactuaire.com/docs/mem/e62c52b6478771a617ff2e5a2bf26842.pdf>

décision, ou l'analyse en composantes principales (ACP), qui identifie les variables expliquant le plus de variance. En focalisant l'analyse sur les variables les plus importantes, on réduit le bruit et la complexité du modèle, ce qui conduit à des prédictions plus fiables et plus faciles à interpréter.

On calcule cette importance pour les inondations puis la sécheresse. On le fait par random forest. On représente en bleu l'importance pour les inondations, et en rouge pour la sécheresse.

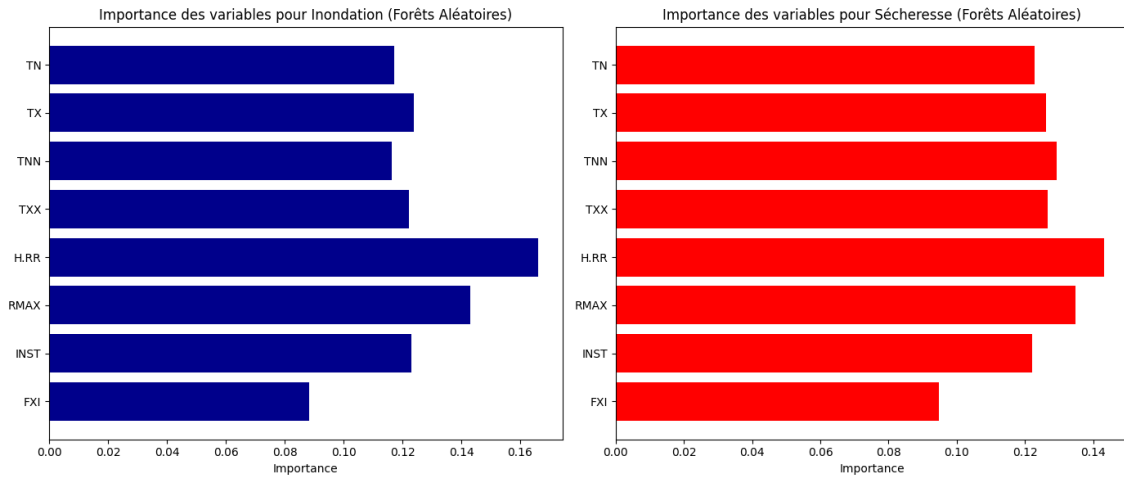


FIGURE 2.17 – Importance des variables

Ces graphiques peuvent s'expliquer par la difficulté précisément la survenance de ces périls à partir des données utilisées ou encore le nombre réduit de données sur lesquelles ils s'appuient. Dans le but d'alimenter la décision finale, on réalise une ACP. Si l'on s'attendait à un conclusion plus évidente à lire, on discerne tout de même de tendances (notamment pour ce qui est de la sécheresse). Finalement, on décide de valider le choix de variables que l'on pensait faire.

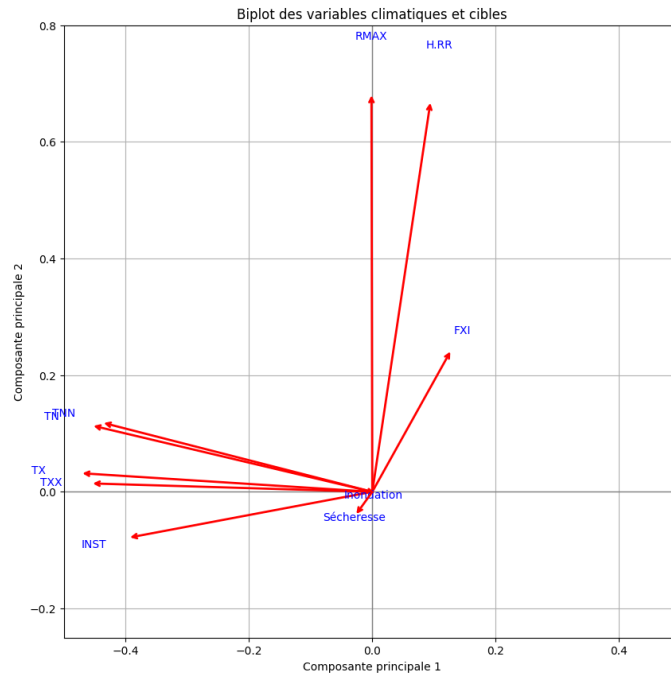


FIGURE 2.18 – Biplot de l'ACP

2.2.5 Ouverture des données Météo France

Les apports

Les équipes de Météo France, la Direction interministérielle du numérique et « data.gouv.fr » ont collaboré dans un but d'ouverture et d'accessibilité aux données météo. Ils lancent le 01/01/2024 la plateforme <http://meteo.data.gouv.fr/> en version bêta. Cela s'inscrit dans la stratégie de Météo France d'ouverture des données publiques, sans frais et gratuitement réutilisables. Pour reprendre les termes que l'on trouve sur la plateforme :

meteo.data.gouv.fr vise à référencer, héberger et diffuser les données publiques météorologiques produites par Météo-France. Vous y trouverez des données téléchargeables et utilisables de manière libre et gratuite.

En premier lieu y figuraient des premiers jeux de données sur le climat avec notamment les données sur toutes les stations françaises depuis leur ouverture, pour tous les paramètres disponibles. La plateforme est progressivement enrichie. A été par exemple ajoutée entre temps la possibilité de télécharger des paquets de données des modèles de prévision numérique du temps ARPEGE et AROME.

Les données sont téléchargeables directement à partir de la plateforme, accessibles en API ou depuis des packages développés en python ou R.^{1 2}

La plateforme du DRIAS connaît aussi des changements. On voit l'apparition d'une nouvelle trajectoire « TRACC-2023 » qui concrétise la volonté du président Emmanuel Macron de se doter d'une trajectoire de réchauffement de référence pour l'adaptation au changement climatique afin d'avancer de manière coordonnée. On remarque globalement la disparition et l'apparition de données. On a par exemple indiqué un peu plus tôt le remplacement des données mensuelles par des données quotidiennes corrigées au titre de « DRIAS-2020 » et pour divers scénarios et modèles. Nous nous intéresserons aux scénarios du GIEC et au modèle ALADIN63_CNRM-CM5.

Les modèles présentés ci-après avaient été pensés et utilisés sur des données au pas de temps mensuels car les données quotidiennes n'étaient pas disponibles gratuitement. L'apport en données que cette ouverture engendre permet de les repenser, avoir des résultats peut-être un peu plus fins et surtout de comparer les résultats obtenus. Ainsi, on pourra se faire une idée de l'impact de la précision et qualité des données sur la projection de la sinistralité à l'horizon 2050.

Dans ce but il s'agira de télécharger les données quotidiennes de la simulation DRIAS-2020 pour les différents scénarios ainsi que la période de référence (1951-2005) car les données dont nous disposons pour cette période sont au pas de temps mensuel. Notre période de données historiques débutaient en janvier 2000 mais désormais elle permet de s'intéresser aux reconnaissances dès la création du régime, ce qui aura aussi un impact sur les seuils (qui peuvent, non nécessairement, changer). Notons tout de même qu'un biais est introduit, puisque les données historiques alors utilisées sont des données simulées et non des observations.

1. <https://plmlab.math.cnrs.fr/dutangc/metefranceopendb>

2. <https://portail-api.meteofrance.fr/>

Modèle retenu

Nous retenons donc le jeu de données DRIAS-2020 qui s'appuie sur des simulations climatiques régionales à haute résolution issues de l'ensemble Euro-Cordex et corrigées par une méthode statistique. Par rapport au jeu DRIAS-2014, il est basé sur une sélection plus récente de 6 ans. Il se base ainsi sur plus de simulations, des simulations plus récentes des modèles climatiques ainsi que sur la réactualisation d'anciennes simulations. On voit ainsi la correction d'anomalies dans certaines simulations ainsi que l'évolution des GES par les modèles régionaux qui fait maintenant et des versions améliorées de certains RCM (Aladin53 devient Aladin63). Le jeu DRIAS-2020 compte au total 30 projections climatiques contre 18 pour le DRIAS-2014.

Pour le scénario RCP 8.5 on constate qu'à l'échelle annuelle et aux différents horizons temporels, le jeu DRIAS-2020 affiche un réchauffement globalement plus important d'environ +0,45 °C que l'ensemble DRIAS-2014 par rapport à la même période historique (1976-2005). Le constat est le même pour le scénario RCP 4.5.

En ce qui concerne les précipitations,

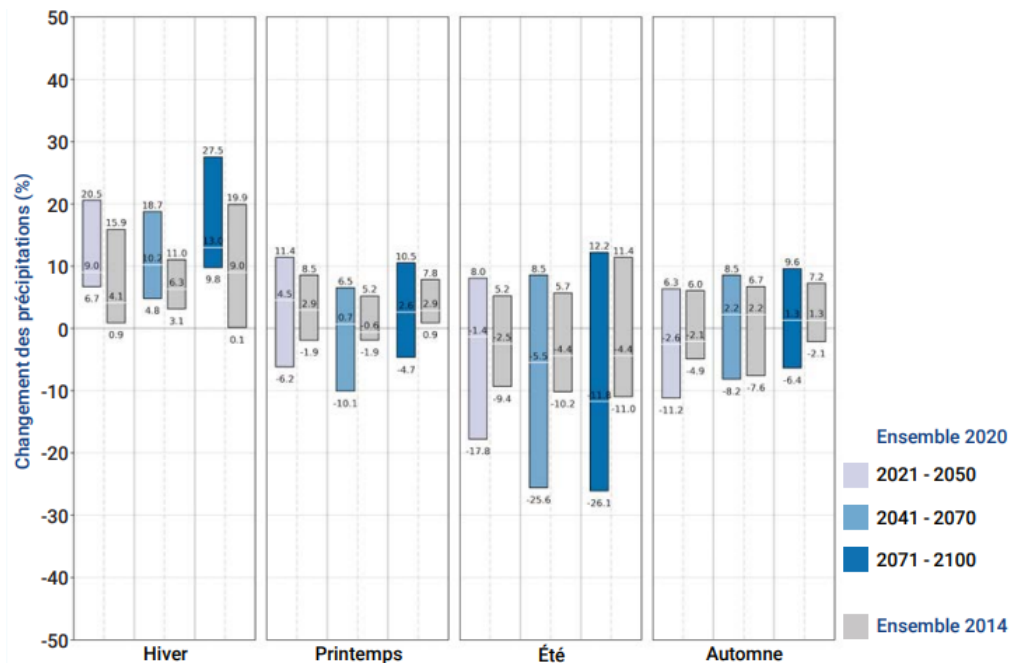


FIGURE 2.19 – Ecarts de précipitations saisonnières des jeux DRIAS 2014 et DRIAS 2020 par rapport à la référence (1976-2005), RCP 4.5

Pour mieux comprendre encore comment s'inscrit le modèle retenu (CNRM-CM5 / Aladin63) parmi ceux disponibles, regardons les tableaux suivants ¹ :

1. Source : https://www.drias-climat.fr/document/20200914_DRIAS-ScenariRCP4.5_support_selection_modeles_v3.pdf

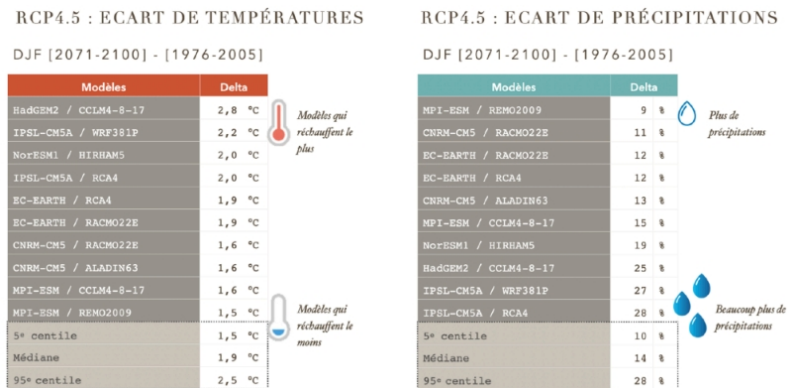


FIGURE 2.20 – Classement des modèles par variable

C'est un modèle plutôt modéré que ce soit sur la hausse des températures ou des précipitations.

2.2.6 Lissage spatial

Nous souhaitons connaître les valeurs des indicateurs climatiques pour la période historique et future aux 34000 points ou communes françaises. Or, un problème de granularité des données est rencontré. Nous disposons de données à 112 points sur la période historique et 8096 pour la période future. Il s'agit donc d'interpoler.

Dans cette section nous présentons les deux méthodes considérées : le lissage spatial par inverse de la distance et par le biais des polygones de Voronoï. Le but étant d'obtenir des données pour l'ensemble des communes de France sur une période de temps très étendue, que le pas de temps soit mensuel ou quotidien, nous retiendrons des méthodes "simples".

La méthode *IDW*

La méthode de lissage spatial ici présentée est référencée dans la littérature comme *Inverse Distance Weighted* ou *IDW*. Des fonctions existent en python (par exemple le projet *pyidw*) et R, et des fonctionnalités permettant de l'appliquer sont utilisables dans des logiciels tels que QGIS ou ArcGIS (payant).

L'essai d'utilisation de la fonction *pyidw* s'étant révélé peu concluant, j'ai décidé d'écrire l'algorithme. Le principe est d'attribuer une valeur à un point qui n'en a pas à partir de ceux qui en ont en faisant une moyenne pondérée. Pour ce qui est de la pondération, elle repose sur l'hypothèse que l'influence de la variable considérée décroît avec la distance. Plus une commune est proche d'une autre et plus elles partageront des similarités météorologiques. Cette méthode repose donc sur le choix du voisinage du point à interpoler, et sur la manière de pondérer. Il faut choisir :

- un coefficient de pondération

- un rayon maximal au-delà duquel on considère qu'il n'est pas pertinent de prendre les données en compte

Le cahier des charges auquel doit répondre le coefficient de pondération est qu'il réduit l'influence avec la distance, et que la somme des coefficients fait 1. Pour une commune A, on choisit naturellement :

$$X_A = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{X_i}{d_i^p}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{d_i^p}}$$

avec X_i la valeur de la variable climatique au point i , d_i la distance entre le point A et le point i , P un coefficient appliqué à la distance pour moduler les disparités spatiales.

Il existe plusieurs types de distances utilisables : euclidienne, Manhattan, Minkowski, géodésique etc. Nous retiendrons ici la distance géodésique correspondant à la fonction *haversine* en python et qui permet de déterminer la distance du grand cercle entre deux points d'une sphère, à partir de leurs longitudes et latitudes. Elle se formule comme suit :

$$d = 2R \cdot \arcsin \left(\sqrt{\sin^2 \left(\frac{\phi_2 - \phi_1}{2} \right) + \cos(\phi_1) \cdot \cos(\phi_2) \cdot \sin^2 \left(\frac{\lambda_2 - \lambda_1}{2} \right)} \right)$$

On va ensuite choisir un rayon d'interpolation noté R_{max} .

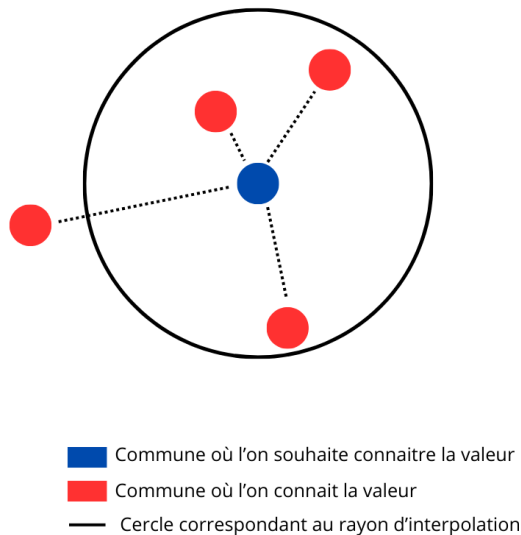


FIGURE 2.21 – Critère de sélection de points à prendre dans l'interpolation

Il s'agit donc de choisir un couple $(R_{max}; P)$. Le choix se fait par critère de minimisation de

l'erreur et validation croisée. On calcule à des points connus les valeurs par interpolation et on regarde l'erreur. On fait cela pour différentes valeurs du couple $(R_{max}; P)$ et on retient celui qui a l'erreur la plus faible.

Imaginons le propos en visualisant la prédiction des valeurs de précipitations pour une commune. Nous choisissons la commune de Fréjus (83061) aléatoirement parmi les communes auxquelles on dispose de valeurs. On commence par calculer une valeur par interpolation à une date et pour de multiples combinaisons des paramètres (P, R_{max}) . En résulte la grille ci-dessous :

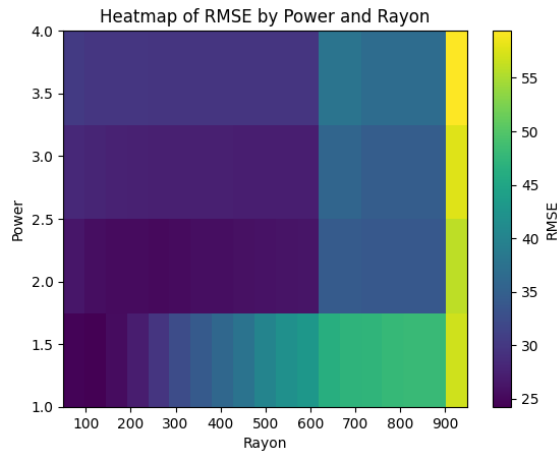


FIGURE 2.22 – Cross validation du choix de paramètres

Le meilleur couple de paramètres ainsi choisi (on retient $P=1$ et $R_{max} = 100$ km), on calcule nos valeurs par *IDW* pour la commune de Fréjus. En visualisant l'évolution des valeurs prédites et observées sur une période de 10 ans, on conclut que la précision de la méthode est acceptable et semble assez bien capter les variations importantes (en témoigne le pic à 300mm de précipitations au cours de l'année 2000).

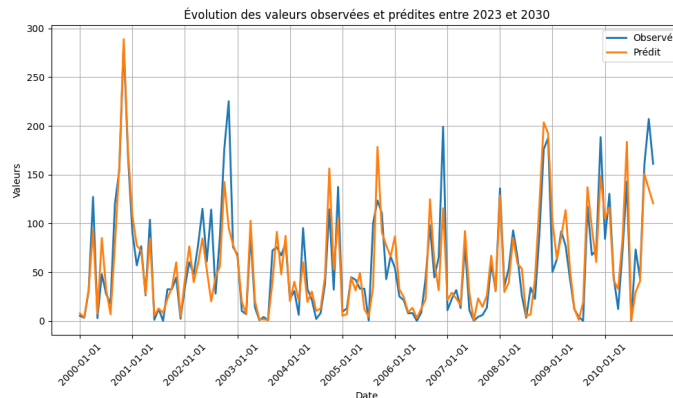


FIGURE 2.23 – Evolution des valeurs observées et prédites entre 2003 et 2030

A noter que cette méthode nécessite la construction de matrices de taille 34000 x nombre de

stations météo, elle implique des temps de calcul longs (plusieurs jours rien que pour calculer les distances entre les communes et les 8096 stations) ne sera utilisée et testée que sur la période historique. Il est donc nécessaire de proposer une autre méthode pour les données climatiques issues de prévisions.

Les polygones de Voronoï

Les polygones de Thiessen ou Voronoï sont des polygones formant un pavage intégral dans lequel chaque point est entouré par un espace comprenant tous les points plus proches de ce point que d'un autre. Autrement dit, à une station météo A on crée un polygone lui correspondant en attribuant à cet objet géométrique tous les points de l'espace plus proches de la station A que des autres stations.

Ainsi, on dispose de 8096 points et on divise la France en autant de polygones. On comprend alors pourquoi cette méthode ne sera pas utilisée sur les 112 stations météo des bulletins météorologiques. Cette étape est réalisée à l'aide du logiciel QGIS. On commence par importer le fichier shapefile des communes de France. Ce fichier est un ensemble de polygones correspondant aux communes françaises mis à disposition par l'IGN à l'adresse <https://geoservices.ign.fr/geofla>. On importe également le fichier avec l'ensemble de nos stations météo en tant que point. On utilise ensuite les fonctionnalités de QGIS et on génère les polygones de Voronoï pour ce fichier.

On dispose alors de deux couches de polygones. L'idée de l'interpolation est ici aussi de faire une moyenne pondérée. On souhaite néanmoins que cela soit moins coûteux en temps de calcul. On procède de la manière décrite ci-après.

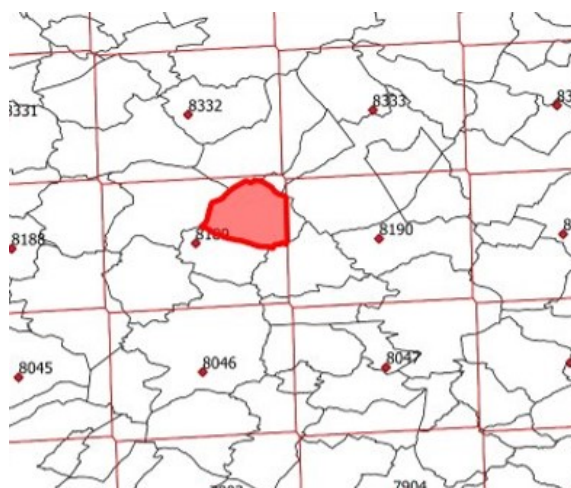


FIGURE 2.24 – QGIS - couches des polygones communes et stations

Sur la capture d'écran ci-dessus, les polygones aux contours rouges représentent les stations météo et les polygones aux contours noirs correspondent aux communes. On va intersecter les couches de manière à expliquer les surfaces des polygones communes en fonction des stations. L'information souhaitée est de la forme suivante : la commune A a 30 % de son polygone occupé par celui de la station 1, 65 % par la station 2 et 5 % par la station 3. C'est ce coefficientage que l'on appliquera pour l'interpolation.

L'intérêt d'employer cette méthode lorsque l'on dispose de 8602 points de station météo est que pour chaque commune on a bien moins d'information à utiliser.

Regardons si cette méthode fonctionne bien dans les faits. Pour cela on applique la méthode pour un point où l'on connaît les valeurs de précipitations. Il faut donc retirer ce point des stations météo qui servent de base de données pour l'interpolation. Les résultats obtenus sont

concluants. On note également un coefficient de détermination de 0,996.

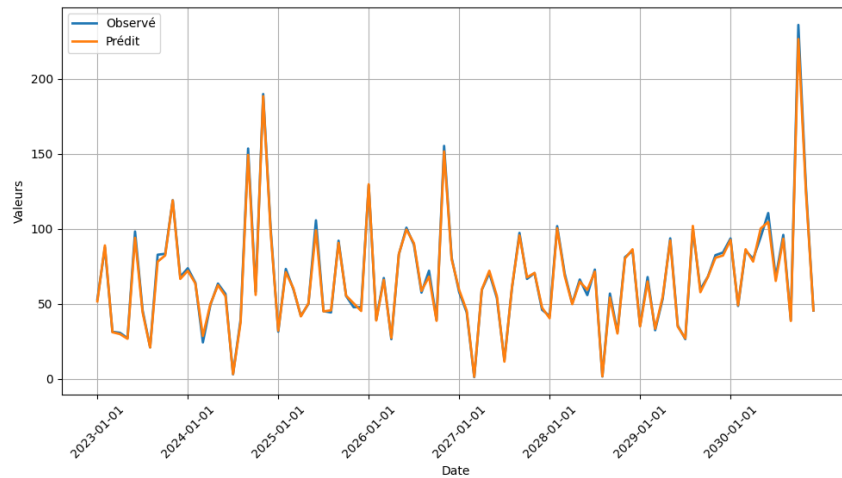


FIGURE 2.25 – Evolution des valeurs observées et prédites entre 2023 et 2030

2.2.7 Implémentation

L'application de ces méthodes de lissage nécessite d'adopter de bonnes pratiques. En effet, même en optant pour la méthode des polygones de Voronoï la première version du code écrit avait un temps de calcul estimé à 38.3 jours pour les données mensuelles. Il s'agit donc d'optimiser le code avec diverses pratiques comme la construction de dictionnaires au lieu de jointures sur les tables. Ces premières étapes faisant passer le code de 38.3 à 17 jours puis 19 heures. Une méthode utilisable outre l'optimisation pure du code est la parallélisation.

Paralléliser c'est distribuer une tâche à différents processeurs (CPU). Les processeurs exécutent le code simultanément ce qui accélère l'algorithme. Par exemple si l'on exécute une boucle for avec cette méthode, chaque processeur va exécuter la boucle à une itération différente.

Le principe est premièrement de connaître le nombre de CPU dont l'on dispose. Ensuite, l'on crée un espace d'exécution virtuel pour chaque CPU, appelés *pool*. On peut ensuite répartir le travail entre les différents *pool*. Pour plus de détails, voir la librairie *multiprocessing* de python.

Chapitre 3

Modéliser la sinistralité inondation et sécheresse

3.1 Modéliser la fréquence

Cette section a pour but d'introduire une manière de modéliser la fréquence des reconnaissances Cat-Nat d'inondations et sécheresses à partir des bases de données précédemment introduites et dans le but d'une projection et d'une estimation de la tendance de sinistralité à horizon 2050.

La nature agrégée des données limite la modélisation et introduit un biais. En effet, prendre un pas de temps mensuel entraîne une perte d'information et deux mois ayant connus des profils d'évènements pluviométriques totalement différents peuvent se retrouver avec la même valeur d'indicateur climatique. Cela ne pose en revanche pas de problème pour ce qui est de la sécheresse, étant un phénomène à caractère long.

L'hypothèse sous-jacente aux modèles présentés ci-dessous est l'existence de seuils historiques propres aux communes auxquels le territoire français va réagir et qui ne changent pas dans le temps. Là également un biais est introduit. Il faudrait tout d'abord des seuils plus précis qu'à la maille communale mais cela est complexe d'un point de vue technologique (acquisition d'information) et infiniment coûteux en temps de calcul et stockage. C'est également discutable dans le sens où la sensibilité d'un terrain et sa tendance à provoquer une inondation peut varier selon qu'il évolue ou non (par exemple avec l'urbanisation). Ces seuils pourront être mis à jour annuellement à partir des nouvelles reconnaissances CATNAT publiées au Journal Officiel.

3.1.1 Métriques de Performance

Dans cette sous-section nous introduisons des métriques de performance. Ces dernières seront interviendront dans les méthodes 2 et 3 de la modélisation des inondations. Dans ces méthodes interviendra la notion de voisinage. Dans ce cadre, le choix du voisinage est crucial. Plusieurs métriques peuvent être utilisées pour évaluer la performance des modèles prédictifs et ainsi guider le choix du voisinage optimal.

L'accuracy

L'accuracy mesure le pourcentage de prédictions correctes parmi l'ensemble des prédictions effectuées par le modèle. Elle se calcule selon la formule suivante :

$$\text{Accuracy} = \frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN}$$

où :

- TP (True Positives) représente le nombre de vrais positifs,
- TN (True Negatives) représente le nombre de vrais négatifs,
- FP (False Positives) représente le nombre de faux positifs,
- FN (False Negatives) représente le nombre de faux négatifs.

L'accuracy est une métrique simple et intuitive, mais elle peut être trompeuse dans le cas de classes déséquilibrées. Par exemple, si une classe est largement dominante, un modèle qui prédit toujours cette classe dominante peut afficher une accuracy élevée sans pour autant être performant.

La Précision

La précision est le rapport entre le nombre de vrais positifs et le nombre total de prédictions positives, et se calcule comme suit :

$$\text{Précision} = \frac{TP}{TP + FP}$$

Cette métrique est particulièrement utile lorsque le coût des faux positifs est élevé. Par exemple, dans le cadre de la détection de fraude, une haute précision indique que la majorité des transactions identifiées comme frauduleuses le sont effectivement.

Le *Recall* (ou Sensibilité)

Le recall, ou sensibilité, mesure la capacité du modèle à identifier correctement les vrais positifs. Il se calcule de la manière suivante :

$$\text{Recall} = \frac{TP}{TP + FN}$$

Cette métrique est essentielle lorsque le coût des faux négatifs est élevé. Par exemple, dans le dépistage de maladies, un haut recall est crucial pour s'assurer que le maximum de cas positifs soient correctement identifiés.

Le F1-score

Le F1-score est la moyenne harmonique de la précision et du recall, ce qui en fait une métrique particulièrement utile dans les situations où les classes sont déséquilibrées. Il se calcule comme suit :

$$\text{F1-score} = 2 \times \frac{\text{Précision} \times \text{Recall}}{\text{Précision} + \text{Recall}}$$

Le F1-score combine à la fois la précision et le recall, offrant ainsi un équilibre entre les deux. C'est une mesure robuste qui permet de comprendre la performance d'un modèle lorsqu'il est nécessaire de trouver un compromis entre la précision et la sensibilité.

3.1.2 Les inondations

Pour modéliser les inondations, nous allons proposer plusieurs méthodes. La première repose sur la notion de dépassements de seuils ainsi que sur les recommandations de l'ACPR pour l'exercice climatique 2023 qui nous pousse à considérer uniquement une variable de précipitations dans un premier temps. Les limites de cette première méthode donnent des pistes d'amélioration et fondent les principes de la deuxième. Enfin, ce mécanisme nous amène vers une troisième et dernière méthode qui sera celle retenue dans notre modèle final. Les calculs et différentes analyses sont réalisées sur des données mensuelles ici. Nous implémenterons la méthode retenue avec des données quotidiennes également. Cependant, les contraintes que sont le besoin en stockage et en puissance de calcul nous restreignent à ne l'appliquer que sur une commune. Nous choisirons à cet effet la plus sinistrée de France métropolitaine.

Méthode 1 : dépassements de seuils

Pour expliquer la méthode, prenons le cas d'une commune en particulier. On considère qu'elle a connu 5 reconnaissances au titre d'inondations entre le 01/01/2000 et le 31/12/2022. On note les précipitations des mois correspondants s_1, \dots, s_5 . Cette notation est motivée par le fait que ces valeurs vont constituer des seuils.

On fait l'hypothèse suivante : on ne peut avoir au maximum qu'une reconnaissance au titre d'inondation par mois. En d'autres termes soit il y a 1 reconnaissance, soit il n'y en a pas. On note :

- $N_k \in \{0, \dots, 12\}$, le nombre de reconnaissances dans l'année k
- $\delta_{k,j} \in \{0, 1\}$ l'indicatrice de reconnaissance pour le mois j de l'année k
- $P_{k,j}, k \in \{2000, \dots, 2050\}, j \in \{1, \dots, 12\}$ le cumul mensuel de précipitations de l'année k mois j
- $s_{k,j} = \max\{s_i; P_{k,j} \geq s_i\}$

Immédiatement on a $N_k = \sum_{j=1}^{12} \delta_{k,j}$. Notre but est de calculer les $\mathbb{E}[N_k]$. On écrit :

$$\mathbb{E}[\delta_{k,j} | P_{k,j} = p] = 0 \times \dots + 1 \times P(\delta_{k,j} = 1 | P_{k,j} = p)$$

Il s'agit maintenant de définir cette probabilité. On va le faire par dénombrement. La probabilité d'un évènement s'écrit comme le rapport entre le nombre de cas favorables et le nombre de cas total :

$$P(\delta_{k,j} = 1 | P_{k,j} = p) = \begin{cases} 0 & \text{si } p < s_{k,j} \\ \frac{\text{Card}\{(k,j); (\delta_{k,j}=1) \cap (P_{k,j} \geq s_{k,j}) \text{ pour } k \in [2000, 2022]\}}{\text{Card}\{(k,j); P_{k,j} \geq s_{k,j} \text{ pour } k \in [2000, 2022]\}} & \text{si } p \geq s_{k,j} \end{cases}$$

Et on a bien $P(\delta_{k,j} = 1 | P_{k,j} = p) \in [0, 1]$. Ensuite, on écrit :

$$\mathbb{E}[\delta_{k,j}] = \sum_{q=0}^{\infty} \mathbb{E}[\delta_{k,j} | P_{k,j} = q] P(P_{k,j} = q)$$

Cependant, sur 2023-2050 on "observe" ou "dispose" des précipitations car on a récupéré une base de précipitations simulées. Il en ressort finalement que :

$$P(P_{k,j} = q) = \begin{cases} 1 & \text{si } q = p \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

Donc :

$$\mathbb{E}[\delta_{k,j}] = \mathbb{E}[\delta_{k,j} | P_{k,j} = p] = \mathbb{E}[\delta_{k,j} | P_{k,j}]$$

Et :

$$\begin{aligned} \mathbb{E}[N_k] &= \sum_{j=1}^{12} \mathbb{E}[\delta_{k,j} | P_{k,j}] \\ &= \sum_{j=1}^{12} \mathbf{1}_{P_{k,j} \geq \max\{s_i; P_{k,j} \geq s_i\}} P(\delta_{k,j} = 1 | P_{k,j}) \\ &= \sum_{j=1}^{12} \mathbf{1}_{P_{k,j} \geq \max\{s_i; P_{k,j} \geq s_i\}} \frac{\text{Card}\{(k,j); (\delta_{k,j} = 1) \cap (P_{k,j} \geq s_{k,j}) \text{ pour } k \in [2000, 2022]\}}{\text{Card}\{(k,j); P_{k,j} \geq s_{k,j} \text{ pour } k \in [2000, 2022]\}} \end{aligned}$$

Le problème est que notre probabilité est mal définie et ne s'annule pas assez souvent, elle n'est pas assez sélective. On devrait plutôt dire qu'elle est bien définie mais qu'il faudrait beaucoup plus de reconnaissances dans l'historique. Elle n'est donc pas adaptée. Cela engendre trop de petites valeurs qui se cumulent (voir figure ci-dessous). Il faut donc la réécrire.

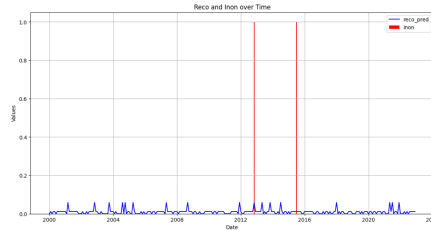


FIGURE 3.1

Méthode 2 : approche binaire

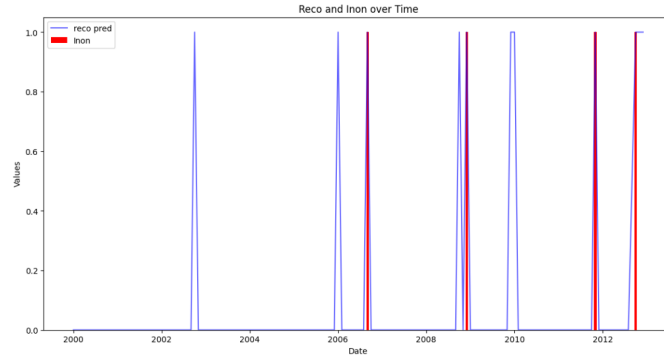
On part du principe qu'on reconnaît une inondation si et seulement si on se retrouve "à peu près" dans des conditions climatiques similaires à celles rencontrées lors des reconnaissances historiques. On écrit V_i le voisinage correspondant à ce que l'on appelait précédemment "seuil de précipitations" s_i et à la température associée. Il faudra définir cet "à peu près", ce voisinage, en minimisant l'erreur.

On définit alors notre proba comme suit :

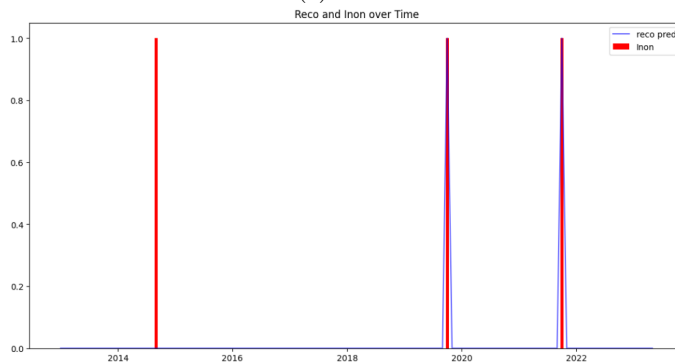
$$P(\delta_{k,j} = 1 | P_{k,j} = p, T_{k,j} = t) = \begin{cases} 0 & \text{si } (p, t) \notin \cup V_i \\ 1 & \text{si } (p, t) \in \cup V_i \end{cases}$$

L'enjeu de cette approche est de bien choisir le voisinage. Pour cela, plusieurs métriques peuvent être utilisées. Ces métriques ont été définies dans la partie 3.1.1. Au vu de ce qui a été précisé, c'est le *recall* qui semble le plus approprié. En effet, il est judicieux d'avoir recourt lorsque le coût des faux négatifs est élevé. C'est le cas qui se présente ici. On ne souhaite pas « oublier » de prédire des inondations.

Imagons cela en l'implémentant sur une commune. Cette commune a été reconnue au titre de Cat-Nat inondation 7 fois entre le 01/01/2000 et 31/12/2022. On décompose la période historique en une période "*train*" et une période "*test*".



(a) Train



(b) Test

Sur cet exemple, 2 des 3 reconnaissances de la période test ont été prédites. Le principe de prudence doit nous motiver à préférer une prédiction moins précise mais qui prédit suffisamment de reconnaissances. Cela passe par le choix d'un bon voisinage et repose donc potentiellement sur le choix de la métrique de mesure d'erreur.

Cette approche se verra peut-être un peu trop restrictive, faisant appel à des voisinages très réduits et à une modélisation qui ne nous semble pas naturelle pour ce qui est des conditions

météorologiques hors des voisinages.

Méthode 3 : approche hybride

Enfin, essayons de combiner les deux approches précédents. Nous souhaitons une forte identification des évènements très similaires aux inondations historiques tout en n'excluant pas directement les autres valeurs. On va suivre la logique suivante :

- si on rencontre "à peu près" (c'est la marge de tolérance de la méthode 2) des conditions historiques d'inondations on dit qu'il y a inondation
- si le niveau de précipitations est inférieur au minimum historique de précipitations ayant donné lieu à une inondation, on dit qu'il n'y a presque sûrement pas inondation
- sinon, on définit une proba qui augmente avec les précipitations mais diminue en s'éloignant des conditions historiques avec une pondération différenciée

La probabilité dont l'on souhaite disposer se veut avoir une décroissance très forte en "s'éloignant" des conditions historiques d'inondations. On se propose de lui donner la forme d'une exponentielle négative fonction d'une distance que l'on choisira.

$$P(\delta_{k,j} = 1 | P_{k,j} = p, T_{k,j} = t) = f(d(p, t)) = \exp(-q * d(p, t))$$

avec $q > 0$ et :

$$d(p, t) = \begin{cases} 0 & \text{si } (p, t) \in UV_i \\ \frac{(1 - \exp(-\alpha_1 |p - p^*|)) + (1 - \exp(-\beta |t - t_i|))}{2} & \text{si } p > p^* \\ \frac{(1 - \exp(-\alpha_2 |p - p^*|)) + (1 - \exp(-\beta |t - t_i|))}{2} & \text{si } p < p^* \end{cases}$$

avec p^* la valeur de précipitation historique la plus proche au sens de la valeur absolue de p et t^* la température correspondante, et $V_{i,a,b}$ un voisinage étendu et moins restrictif. Soit finalement :

$$P(\delta_{k,j} = 1 | P_{k,j} = p, T_{k,j} = t) = \begin{cases} 1 & \text{si } (p, t) \in UV_i \\ 0 & \text{si } p < \min(P_i, P_i \in UV_i) \\ \exp(-q * (\frac{(1 - \exp(-\alpha |p - p^*|)) + (1 - \exp(-\beta |t - t^*|))}{2})) & \text{si } (p, t) \in UV_{i,a,b} \end{cases}$$

Les résultats de cette approche seront discutés ultérieurement dans la partie 4.1

3.1.3 La sécheresse

La procédure de reconnaissance de la sécheresse en Cat-Nat a évolué au cours du temps mais est aujourd'hui décrite de manière précise dans la législation¹. Elle a recours à l'indicateur SWI. Cet indicateur n'étant pas disponible dans un premier temps, on définit une première méthode reposant sur la température qui nous permettra de comparer les résultats obtenus avec la procédure exacte une fois les données mises à disposition par Météo-France.

Méthode 1

Avant l'ouverture des données Météo France nous ne disposions pas en Open Data de l'indicateur SWI pour la période 1982-2050. Il a été fait le choix de mettre en place une méthode reposant sur la moyenne des températures maximales mensuelles TX . On emploie une approche similaire à celle vue dans la partie 3.1.2 pour définir notre indicatrice. On utilise exactement la même approche avec les températures qu'avec les précipitations.

Méthode 2 : Procédure officielle de reconnaissance de la sécheresse

Pour être reconnue au titre de la sécheresse géotechnique, les communes doivent remplir deux critères : géotechnique et météorologique. Le **critère géotechnique** est cohérent avec

l'aspect RGA du péril étudié. On considère qu'une commune est éligible au sens de ce critère si au moins 3% de son territoire présente des zones argileuses (et donc sensibles au phénomène). Cela se vérifie en s'appuyant sur les données techniques et les études cartographiques établies par le Bureau de Recherche Géologique et Minière (BRGM). Au regard de ce seuil de 3% on traite de manière identique les zones d'aléa faible, moyen ou fort car c'est l'existence d'une sensibilité qui importe ici. De manière concrète, ce critère peut se vérifier à l'aide du logiciel QGIS dans lequel on intersecte la couche des communes françaises à la carte des zones argileuses accessible sur le site Georisques²

Le **critère météorologique** est lui cohérent avec la teneur en eau des sols. L'analyse de ce critère lors de la procédure de reconnaissance s'appuie sur des travaux réalisés par Météo France. Ces derniers recueillent et traitent des données météorologiques et hydrologiques et établissent ainsi à l'échelle intercommunale l'indicateur SWI qui tient compte des particularités géographiques locales. Le modèle hydrométéorologique de Météo France prend en entrée des variables telles que : température de l'air, niveaux de précipitations, niveaux de rayonnement, vents, etc. Il permet de prendre en compte l'évapotranspiration³, le ruissellement, le drainage etc. Cela permet d'obtenir le SWI. Ces indicateurs sont établis par maille géographique. Une maille recouvre une zone de 64 km^2 , soit un carré de 8 km de côté. Le territoire de France métropolitaine est ainsi couvert par 8 981 mailles géographiques.

1. <https://www.legifrance.gouv.fr/download/pdf/circ?id=44648>

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

3. Evapotranspiration : processus biophysique de transfert d'une quantité d'eau vers l'atmosphère, par l'évaporation au niveau du sol et par la transpiration des plantes

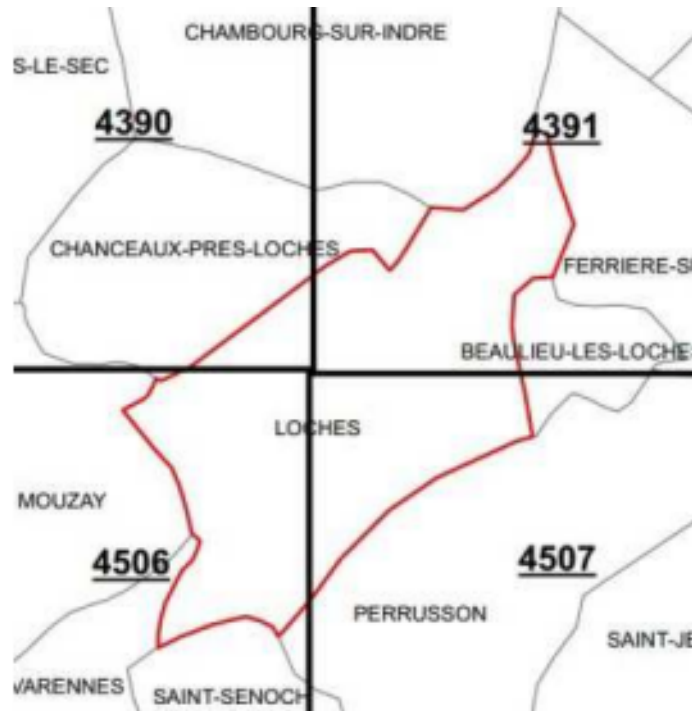


FIGURE 3.3 – Exemple de mailles (4390, 4391, 4506 et 4507)

Météo France établit donc les SWI par maille et par jour. Pour obtenir un indicateur mensuel utilisable pour la reconnaissance de sécheresse RGA, est prise la moyenne des indices d'humidité des sols superficiels journaliers au cours de ce mois et des deux précédents. Ainsi l'indicateur du mois de mars correspond aux données de janvier à mars.

$$SWI_{mars} = \frac{\sum_{jour \in [Janvier-Mars]} SWI_{jour}}{\sum_{jour \in [Janvier-Mars]} 1}$$

Ensuite, il s'agit d'établir les durées de retour de l'indicateur. La méthode utilisée est de considérer une période « glissante » de cinquante ans. On compare chaque mois (par exemple janvier) avec ceux des cinquante dernières années (les cinquante derniers mois de janvier). Cela permet de rester cohérent au niveau du mois et ne pas avoir l'influence de la saisonnalité, mais aussi d'intégrer les années les plus récentes et par cela tenir compte de l'évolution du climat.

L'autorité administrative considère que l'intensité d'un épisode de sécheresse est anormale dès lors que l'indicateur d'humidité des sols présente une durée de retour supérieure ou égale à 25 ans, soit être parmi les deux mois avec les plus hautes valeurs de SWI sur les cinquante dernières années. On définit donc une fonction rang qui s'applique à chaque maille individuellement :

$$Rang_{maille}(\text{Mois}, \text{Année}) = \text{Card}\{SWI_{\text{Mois},y}; SWI_{\text{Mois},y} \geq SWI_{\text{Mois},\text{Année}}, y \in [\text{Année}-49; \text{Année}]\}$$

La reconnaissance se fait par saison. Pour chaque saison de l'année (hiver, printemps, été, automne), l'autorité administrative retient l'indicateur d'humidité des sols présentant la durée

de retour la plus élevée. Il suffit donc qu'un seul des trois indicateurs d'une saison remplisse la condition pour qu'elle soit reconnue. Ce critère se vérifie par maille. On définit une fonction indicatrice de la reconnaissance d'une CATNAT sur une saison (le critère géotechnique étant supposé vérifié) :

$$Reconnaissance_{maille,saison}(\text{Mois}, \text{Année}) = \begin{cases} 1 & \text{si } \text{Max}_{\text{Mois} \in \text{saison}}(\text{Rank}_{\text{maille}}(\text{Mois}, \text{Année})) \leq 2 \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

Il s'agit ensuite de conclure sur la reconnaissance des communes. On considère que dès lors que "le critère est établi pour une maille couvrant une partie du territoire communal, il est considéré comme rempli pour l'ensemble du territoire communal pour la période concernée". Précisons que chaque commune de France est couverte par une ou plusieurs mailles géographiques en fonction de sa superficie. Ainsi pour une commune i qui voit son territoire décomposé entre les mailles de l'ensemble $Mailles_i$, on a :

$$Reconnaissance_{i,saison}(\text{Mois}, \text{Année}) = \text{Max}_{\text{maille} \in \text{Mailles}_i}(Reconnaissance_{maille,saison}(\text{Mois}, \text{Année}))$$

La modalité mise en oeuvre explique pourquoi des communes limitrophe puissent ne pas être reconnues pareillement, mais est également favorable aux communes.

3.2 Apport Météo France : application sur des données quotidiennes

Le but de cette section est d'implémenter les modèles proposés précédemment sur des données plus fines. Le 01/01/2024 Météo France a amorcé l'ouverture de ses données au grand public. Nous avons dès lors accès aux précipitations quotidiennes. Nous implémentons ici la méthode 2 uniquement. Le but étant de se rendre compte de ce qui diffère lorsque l'on utilise des données quotidiennes, des nouvelles difficultés et enjeux.

On choisit la commune de Nice. On récupère sur le site Drias les points dans un rayon de 10km où l'on connaît les valeurs de variables climatiques. Cette étape se fait à l'aide directement des fonctionnalités du site.

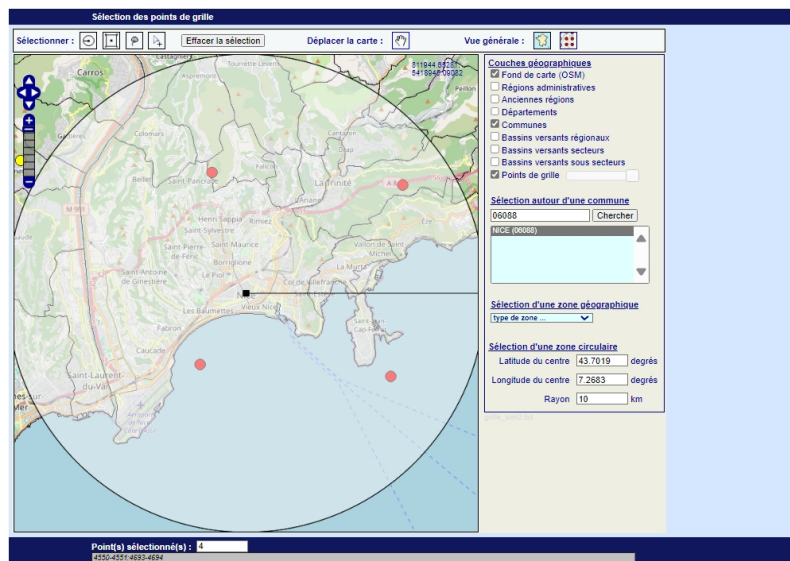


FIGURE 3.4 – Sélection de points d'observation météo

Une fois que l'on dispose de nos données, on applique les méthodes vues précédemment pour l'interpolation et l'identification d'inondations. On commence par chercher la tolérance du voisinage que l'on utilisera. Pour cela on essaie différentes valeurs et l'on utilise la métrique du *recall*.

Une fois cette étape réalisée, on implémente la modélisation fréquence. On le fait ici pour la méthode 2. Visuellement, le résultat obtenu est le suivant :

Ici, nous n'avons pas appliqué de filtre sur les précipitations historiques d'inondations. On se retrouve avec des valeurs parasites. Le fait de disposer de données plus fines apporte une richesse d'information mais également par cela de l'information parasite. Il s'agira de traiter ce problème. Une piste à explorer est de regarder sur des plages réduites de jours, par exemple 3. Notons que si l'on filtre les valeurs historiques de précipitations correspondant aux événements d'inondation, le résultat est alors plus précis. Le présent mémoire, pour des raisons chronologiques et de manque de temps, utilise des données mensuelles et la possibilité d'améliorer la prédiction avec des données quotidiennes ne sera ni optimisée ni exploitée.

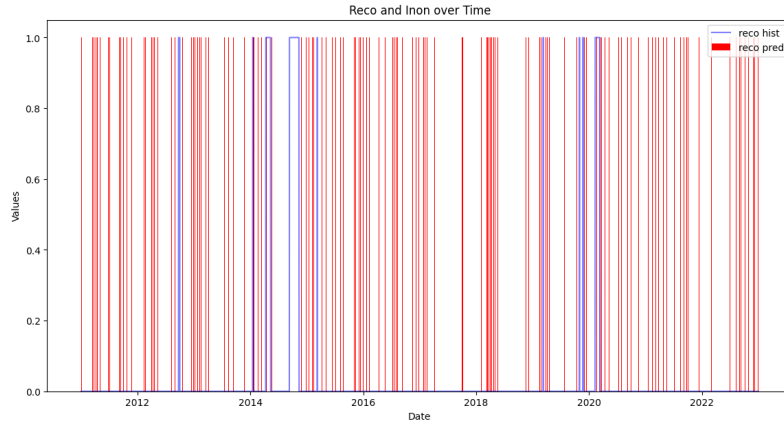


FIGURE 3.5 – Test de la prédiction d’inondations sur l’historique

3.3 Modéliser la sévérité

La fréquence des périls inondation et sécheresse ayant été modélisée, il s’agit dans cette partie de s’intéresser à la dynamique du coût. Pour cela nous traduirons dans un premier temps le lien entre l’intensité climatique et le coût des sinistres, puis nous prendrons en compte l’évolution des enjeux assurés ainsi que les aspects inflationnistes et démographiques.

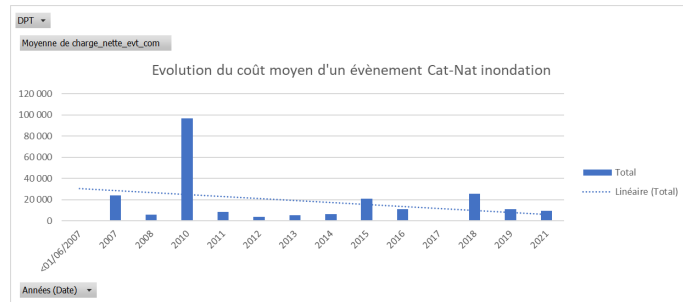
3.3.1 Modéliser le coût - Inondations

Nous disposons d’un portefeuille assureur présenté dans la partie 2.1 . Au vu de la manière dont est modélisée notre fréquence de reconnaissance Cat-Nat inondation, on va s’intéresser ici au coût d’un évènement par commune plutôt que d’un sinistre. On commence par regarder l’évolution du coût moyen net d’inflation d’un évènement inondation. L’idée est que si l’on ne constate pas de tendance particulière on pourra alors choisir de ne pas tenir compte de l’impact du changement climatique sur le coût moyen d’un évènement net de l’évolution des valeurs assurées. Si au contraire une tendance se dégage, il s’agira de la modéliser, de l’expliquer et de la prendre en compte dans le modèle final.

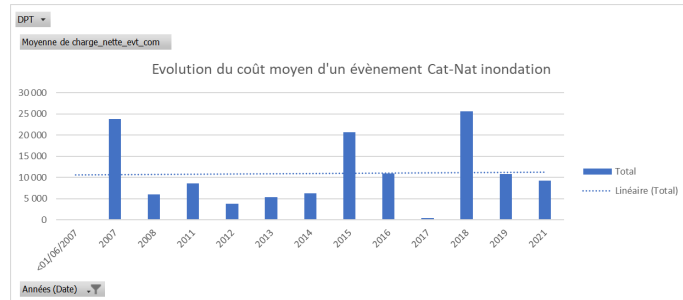
On commence donc par regarder si une tendance globale se dégage car même si l’on peut imaginer que le coût moyen net diminue dans certaines régions et qu’au global l’on ait des compensations, c’est bien une hausse du chiffre global qui devrait tout de même ressortir.

Il est frappant que les évènements extrêmes comme la tempête Xynthia ont un fort impact. Cependant, même sans cet évènement il est dur de lire avec certitude une tendance.

On regarde ensuite ce que cela donne sur les communes les plus touchées (voir Annexe). On remarque que les résultats sont assez disparate et que contrairement à ce à quoi l’on s’attendait, il n’y a pas de tendance haussière marquée. Ayant, même sur les communes les plus touchées, peu de données -ce qui est normal pour un évènement Cat-Nat- on décide de regarder par département. Là encore, les résultats sont disparate. Ces premiers résultats ne nous permettent finalement pas de conclure quand à une hausse certaine du coût moyen

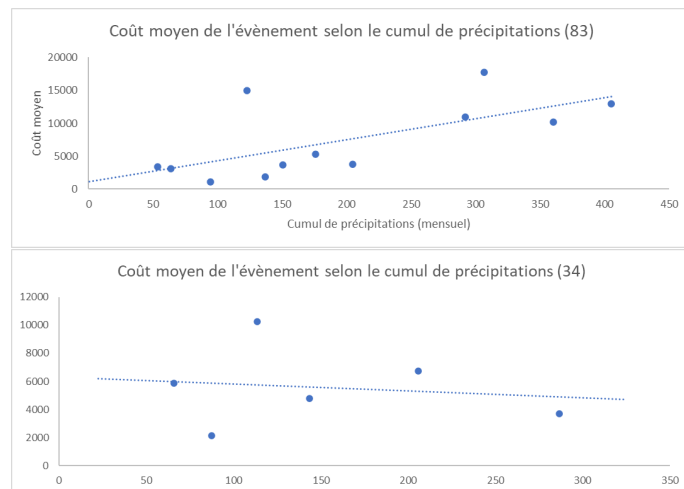


(a) Evolution du coût moyen net d'inflation d'un évènement inondation au global (avec Xynthia)



(b) Evolution du coût moyen net d'inflation d'un évènement inondation au global (sans Xynthia)

net d'un évènement dû au changement climatique. On va tout de même regarder ce que l'on obtient en rapprochant les coûts moyens nets des cumuls de précipitations pour les dates d'évènements d'inondation. Afin d'avoir un nombre de points suffisant mais de rester cohérent en terme de précipitations, on regarde à la maille département et sur les départements les plus touchés.



On va maintenant répéter ces analyses sur les sinistres graves uniquement. Il nous faut donc dans un premier temps séparer les sinistres attritionnels des sinistres graves. Cela passe par le choix d'un seuil. Pour l'identifier, plusieurs méthodes existent. On choisit d'utiliser la méthode graphique du *Mean Excess plot* qui repose sur la fonction des excès moyens. On

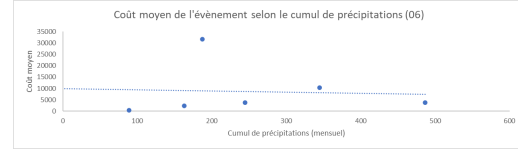
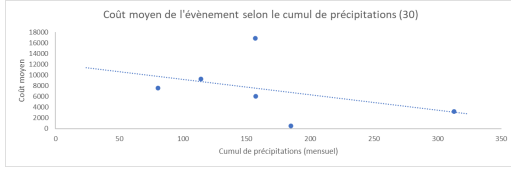


FIGURE 3.8 – Coût moyen net des évènements selon le cumul de précipitation mensuel

confortera ce choix avec un graphique des quantiles.

La fonction des excès moyens donne l'espérance de l'excédent d'une variable aléatoire X par rapport à un seuil conditionnellement au fait que ce seuil est dépassé. Elle est définie pour tout seuil u inférieur au point terminal x_F par :

$$e(u) = \mathbb{E}[X - u \mid X > u] = \frac{\int_u^{+\infty} (1 - F(x)) dx}{1 - F(u)} \quad (3.1)$$

Soit X_1, \dots, X_n , des variables aléatoires indépendantes et identiquement distribuées, et x_1, \dots, x_n , l'échantillon d'observations. Une estimation empirique de la fonction des excès moyens, notée $e_n(u)$ est définie par :

$$e_n(u) = \frac{\sum_{i=1}^n \max(0, x_i - u) 1_{x_i > u}}{\sum_{i=1}^n 1_{x_i > u}} \quad (3.2)$$

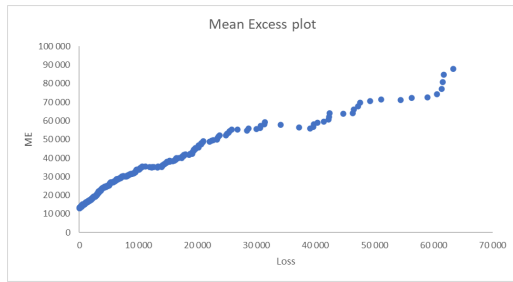
La fonction des excès moyens $e(u)$ est simplement estimée par la somme des excès au-delà du seuil u divisée par le nombre d'observations supérieures au seuil u . Pour tracer le graphique des excès moyens, il faut choisir des valeurs pour le seuil u .

En pratique, ce sont les différentes valeurs des observations $(x_i)_{1 \leq i \leq n}$ qui servent de seuil. Ainsi, en considérant l'échantillon d'observations ordonnées par ordre croissant $x_{(1)}, \dots, x_{(n)}$, une estimation empirique de la fonction des excès moyens vaut :

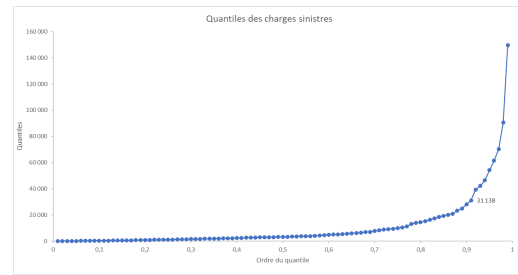
$$e_n(x_{(k)}) = \frac{1}{n - k} \sum_{j=1}^{n-k} (x_{(k+j)} - x_{(k)}) \quad (3.3)$$

Le graphe de la fonction des excès moyens (*mean excess plot* en anglais) consiste à représenter les points $\{x_{(k)}, e_n(x_{(k)})\}$ pour tout $k \in [1; n]$. En parallèle de ce graphique on trace celui des quantiles.

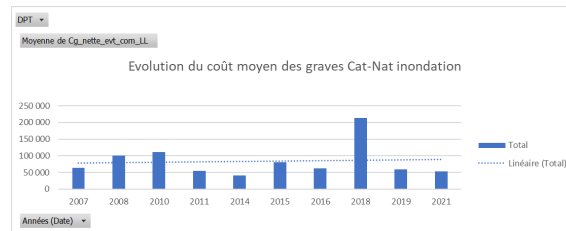
Les deux graphiques ci-dessus nous font retenir le seuil de 31 138. On isole alors les sinistres "graves". Si l'on reprend les représentations du coût moyen net aux mailles communale et départementale on fait les mêmes constats. Non seulement on dispose de moins d'observations, mais les résultats sont ici également disparate. Au global cela donne :



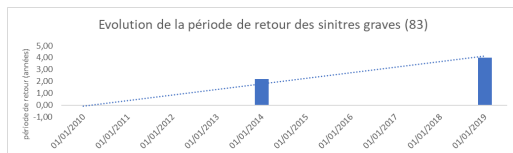
(a) Mean Excess plot



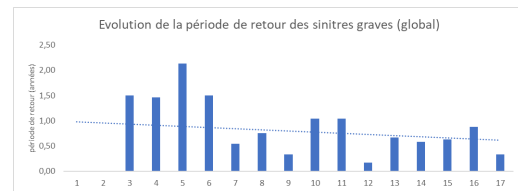
(b) Quantiles



Pour finir, on s'interroge sur l'évolution de la période de retour de ces événements "graves". La période de retour d'un événement de niveau x se définit comme le temps d'attente moyen pour que ce niveau soit à nouveau dépassé. On va regarder son évolution pour un département (le Var, département 83) et au global.



(a) Evolution de la période de retour du niveau "grave" (83)

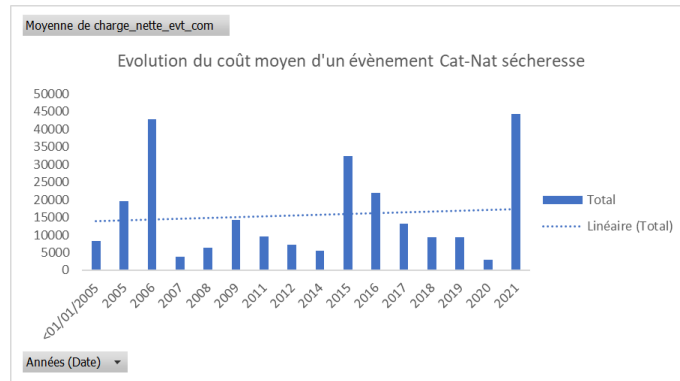


(b) Evolution de la période de retour du niveau "grave" (global)

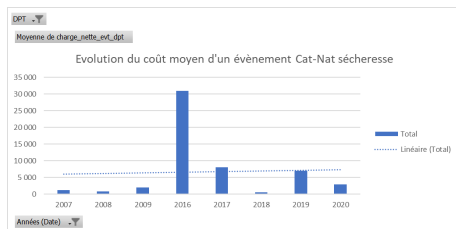
Le manque d'observations et le caractère disparate des graphes nous amène à choisir de ne pas tenir compte d'un potentiel impact du changement climatique sur le coût moyen net. Nous ne prendrons en compte dans le module coût pour les inondations que l'évolution des valeurs assurées (voir 3.3.3).

3.3.2 Modéliser le coût - Sécheresse

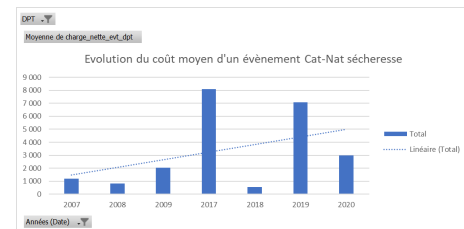
La démarche est la même que celle de la partie précédente sur les inondations. On commence par regarder l'évolution du coût moyen net d'inflation d'un événement de sécheresse. L'idée est que si l'on ne constate pas de tendance particulière on pourra alors choisir de ne pas tenir compte de l'impact du changement climatique sur le coût moyen d'un événement net de l'évolution des valeurs assurées. Si au contraire une tendance se dégage, il s'agira de la modéliser, de l'expliquer et de la prendre en compte dans le modèle final. On commence donc par regarder si une tendance globale se dégage.



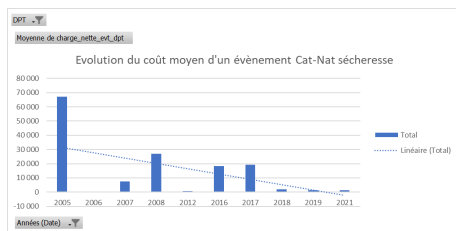
L'on ne dispose encore une fois pas assez d'observations à la maille commune. Il nous faut donc regarder comment cela se traduit sur les départements les plus touchés en fréquence.



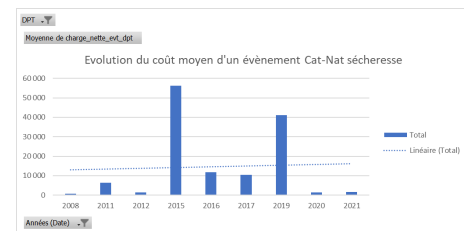
(a) Département 83 avec la sécheresse de 2016



(b) Département 83 sans la sécheresse de 2016



(c) Département 13



(d) 31

A ce stade, on se rend déjà compte que l'on va rencontrer le même problème. La hausse du coût moyen net d'inflation d'un évènement de sécheresse n'est pas évidente et son analyse à une maille satisfaisante (suffisamment fine) n'est pas possible en raison d'un manque d'observations. La réalisation de ces graphiques avec les valeurs des sinistres "graves" (le seuil se situant ici à 32 393€) mène au même constat. Nous choisissons donc également de ne considérer que l'évolution des valeurs assurées.

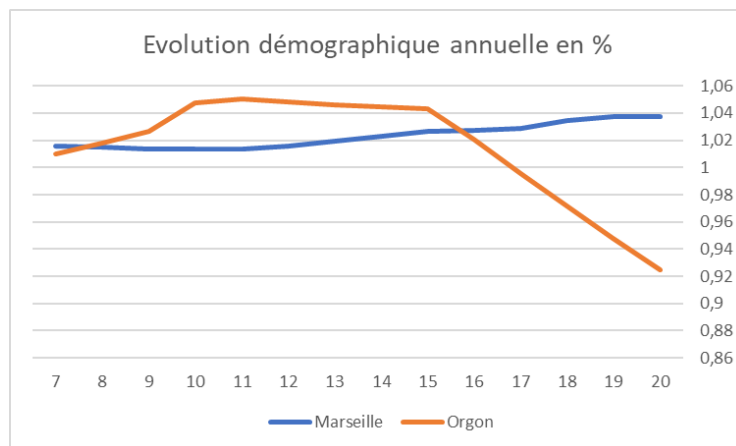
3.3.3 Evolution des valeurs assurées

Nous voulons projeter la sinistralité à horizon 2050. Dans ce but il nous faut connaître le nombre de dommages mais aussi la valeur du dommage. Le but de cette partie est de répondre à cette question et modéliser l'évolution des valeurs assurées.

Démographie

Le but de ce mémoire est de travailler à la maille la plus fine possible avec les données disponibles. Nous avons donc cherché s'il existait une base de données des populations communales ou à défaut départementales annuelles depuis 1982 et les projections jusqu'à 2050. Ces données ont pu être trouvées à la maille communale sur la période historique. Sur le site de l'Insee est disponible le fichier "base-pop-historique-1876-2020". Dans cette base, il manque des années (l'an 2000 par exemple). Ce problème a été abordé en affectant des valeurs par régression. Cela est acceptable et *a priori* sans conséquence majeure sur les résultats car l'évolution démographique est relativement stable en général.

Nous souhaitons ensuite disposer de projections. Elles n'ont pu être trouvées qu'à la maille départementale. On prend alors pour chaque département les évolutions annuelles et on les applique uniformément aux communes. Notons que l'on perd de l'information à cette étape. On introduit ici un biais qui est que l'évolution démographique est la même au sein d'un département, ce qui (conformément à la figure ci-dessous) est faux.



Si l'on regarde comment se représente graphiquement cette évolution, on remarque que ce sont les zones les plus sinistrées (par les périls submersion et RGA principalement) qui connaissent la plus forte évolution de nombre de logements également, induisant par cela une évolution de la valeur dommageable. Ce phénomène peut s'expliquer par un vieillissement de la population et la construction de logements dans un but d'une retraite dans un cadre plus vacancier.

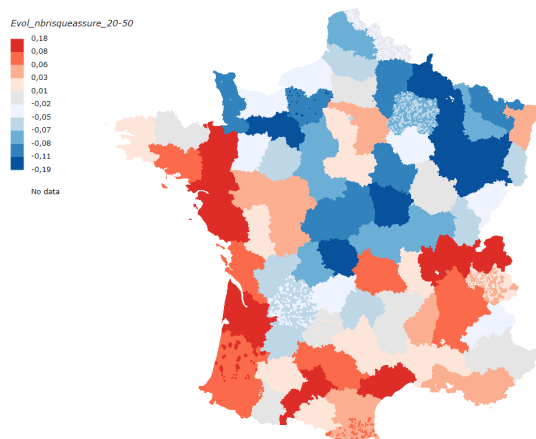


FIGURE 3.12 – Carte de l'évolution du nombre de risques assurés en France entre 2020 et 2050

Inflation

Nous avons dans un premier temps traité le cas de l'évolution du nombre de risques à la maille la plus fine possible. Nous allons maintenant nous employer à en faire de même pour ce qui est de l'évolution de leur valeur.

L'idée première est peut-être de prendre l'inflation au sens courant d'inflation à la consommation. Cependant, nous sommes dans un contexte de dommages causés par les inondations et sécheresses. A cet effet, nous souhaitons disposer d'un indice à une maille aussi fine que possible et semblable à l'Indice des Coûts à la Construction (ICC). La base de données qui a retenue notre attention est celles des indices Notaires-Insee des prix des logements anciens.

IDIAIK	IDFDCO	Libellé
Données brutes en base 100 en moyenne en 2015		
010567118	PLA-FE-E-BRUT-2015	France hors Mayotte (données brutes en base 100 en moyenne en 2015)
010567116	PLA-FE-A-BRUT-2015	France hors Mayotte - Ensemble
010567120	PLA-FE-M-BRUT-2015	France hors Mayotte - Appartements
		France hors Mayotte - Maisons
010567058	PLA-FM-E-BRUT-2015	France métropolitaine (données brutes en base 100 en moyenne en 2015)
010567056	PLA-FM-A-BRUT-2015	France métropolitaine - Ensemble
010567060	PLA-FM-M-BRUT-2015	France métropolitaine - Appartements
		France métropolitaine - Maisons
010567012	PLA-DEP75-A-BRUT-2015	Ile-de-France (données brutes en base 100 en moyenne en 2015)
010567014	PLA-DEP77-A-BRUT-2015	Paris - Appartements
010567020	PLA-DEP78-A-BRUT-2015	Seine et Marne - Appartements
010567026	PLA-DEP91-A-BRUT-2015	Yvelines - Appartements
010567032	PLA-DEP92-A-BRUT-2015	Essonne - Appartements
010567038	PLA-DEP93-A-BRUT-2015	Hauts de Seine - Appartements
010567044	PLA-DEP94-A-BRUT-2015	Seine St Denis - Appartements
010567050	PLA-DEP95-A-BRUT-2015	Val de Marne - Appartements
010567032	PLA-REG1_PC-A-BRUT-2015	Petite Couronne - Appartements
010567080	PLA-REG1_GC-A-BRUT-2015	Grande Couronne - Appartements
010567076	PLA-REG1_A-BRUT-2015	Ile-de-France - Appartements
010567086	PLA-REG1_H-A-BRUT-2015	Ile-de-France hors Paris - Appartements
010567016	PLA-DEP77-M-BRUT-2015	Seine et Marne - Maisons
010567024	PLA-DEP78-M-BRUT-2015	Yvelines - Maisons
010567030	PLA-DEP91-M-BRUT-2015	Essonne - Maisons
010567036	PLA-DEP92-M-BRUT-2015	Hauts de Seine - Maisons
010567042	PLA-DEP93-M-BRUT-2015	Seine St Denis - Maisons
010567048	PLA-DEP94-M-BRUT-2015	Val de Marne - Maisons
010567054	PLA-DEP95-M-BRUT-2015	Val d'Oise - Maisons
010567036	PLA-REG1_PC-M-BRUT-2015	Petite Couronne - Maisons
010567084	PLA-REG1_GC-M-BRUT-2015	Grande Couronne - Maisons
010567090	PLA-REG1_H-BRUT-2015	Ile-de-France - Maisons
010567016	PLA-DEP77-E-BRUT-2015	Seine et Marne - Ensemble
010567022	PLA-DEP78-E-BRUT-2015	Yvelines - Ensemble
010567028	PLA-DEP91-E-BRUT-2015	Essonne - Ensemble
010567034	PLA-DEP92-E-BRUT-2015	Hauts de Seine - Ensemble
010567040	PLA-DEP93-E-BRUT-2015	Seine St Denis - Ensemble
010567046	PLA-DEP94-E-BRUT-2015	Val de Marne - Ensemble
010567052	PLA-DEP95-E-BRUT-2015	Val d'Oise - Ensemble
010567034	PLA-REG1_PC-E-BRUT-2015	Petite Couronne - Ensemble
010567082	PLA-REG1_GC-E-BRUT-2015	Grande Couronne - Ensemble
010567088	PLA-REG1_H-E-BRUT-2015	Ile-de-France hors Paris - Ensemble
010567078	PLA-REG1-E-BRUT-2015	Ile-de-France - Ensemble
Provence-Alpes-Côte d'Azur (données brutes en base 100 en moyenne en 2015)		

FIGURE 3.13 – Indice Notaires-Insee

Cette base nous permet d'affecter des indices directement aux principales agglomérations et

à certains départements. Pour les communes qui ne sont pas particulièrement référencées, on leur attribue la valeur de l'indice pour la province selon que la commune ait plus ou moins de 10 000 habitants. Ces indices portent jusqu'à 2022. Pour obtenir des valeurs à l'horizon 2050, on réalise ici également une projection linéaire. Ici, deux sources d'erreur sont donc introduits à travers le manque de précision de l'affectation des indices ainsi que la projection des indices.

La représentation de l'évolution des valeurs montre une disparité moins marquée. Cela s'explique essentiellement parce que beaucoup de communes ont pris les mêmes valeurs d'indice (communes de province de moins de 10 000 habitants).

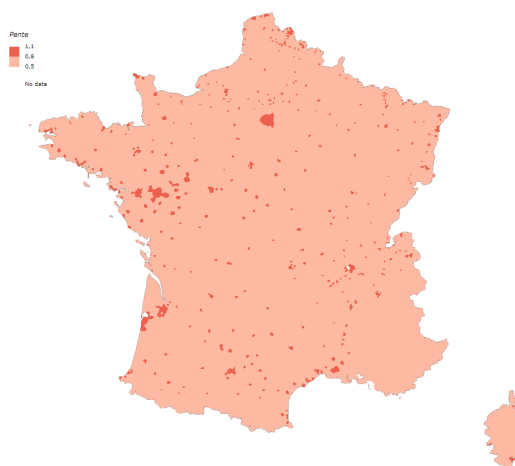


FIGURE 3.14 – Répartition de l'évolution du prix des logements

Indice de coût

Nous construisons à partir des éléments des deux parties précédentes un indice qui fonde notre partie coût. Cet indice est l'indice des valeurs assurées et se définit comme suit pour une commune :

$$Indice_{\text{valeurs assurées}} = Indice_{\text{nombre de valeurs assurées}} * Indice_{\text{valeurs}}$$

Chapitre 4

Résultats et construction d'un outil

4.1 La sinistralité inondation en 2050

Résultats en fréquence : comparaison des 3 méthodes

Nous l'avons précisé dans la partie [3.1.2](#) , les méthodes y étant détaillées ont plus ou moins de défauts et on s'attend à ce que cela se traduise en termes de résultats.

Méthode 1

La première méthode donne des résultats globaux plutôt satisfaisants avec une augmentation de +23.65% en fréquence si l'on compare le climat 2050 au climat 2023. Cependant, cette méthode est trop imprécise et non fiable. Le nombre d'observations (reconnaisances de Cat-Nat) dont nous disposons à la maille commune est insuffisant pour pouvoir ajuster une loi de probabilité continue. Si l'on regarde le détail par commune, certaines communes n'ayant qu'une reconnaissance dans leur historique se retrouvent avec une valeur projetée de +20 reconnaissances entre 2023 et 2050 soit un changement radical et extrême voir même absurde du profil de risque. Cette erreur se visualise également très bien sur une carte, car les zones à forte hausse de fréquence ne correspondent pas à celles attendues par expérience.

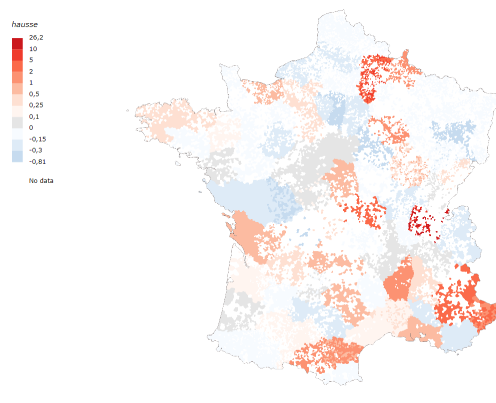
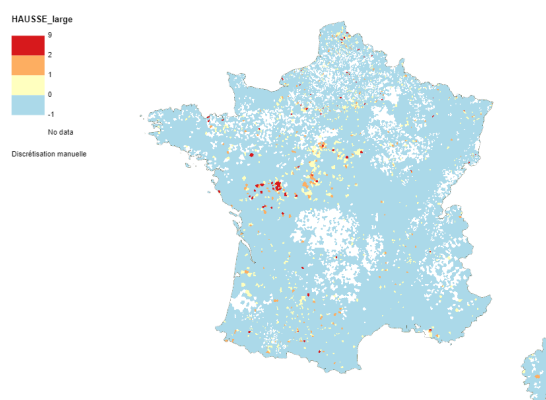


FIGURE 4.1 – Carte de France des évolutions de fréquence de reconnaissance Cat-Nat

Méthode 2

Nous avons alors choisi d'employer une méthode plus binaire dans le but d'être plus sélectif sur les événements que l'on reconnaît comme Cat-Nat. On peut alors s'attendre, selon la rigueur imposée au voisinage, à des résultats pouvant être très élevés ou au contraire faibles.

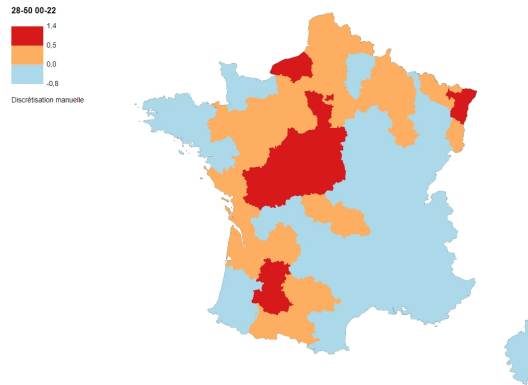


On obtient un résultat global de -15%. Ici, la méthode cible des plages de valeurs un peu trop réduite; elle est un peu trop restrictive. Ceci nous amène à partir de cette approche pour arriver à notre modèle final, plus souple.

Méthode 3

Finalement, nous avons essayé de combiner les deux premières approches et ainsi de corriger leurs défauts en les compensant. Au global, le nombre de reconnaissances annuel moyen attendu à l'horizon 2050 est en hausse de +27% par rapport au climat 2023. Visuellement, cela se répartit de la manière suivante :

Cette carte est bien plus satisfaisante que les précédentes. Non seulement l'échelle est moins absurde, mais la carte correspond également plus ou moins à celles que l'on peut trouver



dans la littérature. On se serait néanmoins attendus à une hausse en Bretagne voir même le long du Rhône. La différence entre le résultat qu'on obtient et ceux que l'on trouve dans la littérature est que l'on a une forte variance due à notre maille de travail et modèle. En effet, la région n'étant pas réellement concernée par la dynamique des enjeux assurés, c'est au niveau du module fréquence que se fait la différence.

Tableau récapitulatif des résultats du modèle fréquence

Méthode	Evolution de la fréquence	Répartition
Seuils	+23.65%	
Binaire	-13%	
Hybride	+27%	

Résultats

Finalement, on peut regrouper les modèles. En notant S_k la sinistralité de l'année k , on a :

$$E[S_k] = E[N_k] * E[Coût_k]$$

On obtient une hausse de sinistralité de +28% pour l'horizon 2050 par rapport au climat au climat actuel.

Finalement, le constat est le même que pour la fréquence. On obtient des résultats cohérents avec ce que l'on trouve dans la littérature même si l'on pourrait s'attendre à une hausse plus

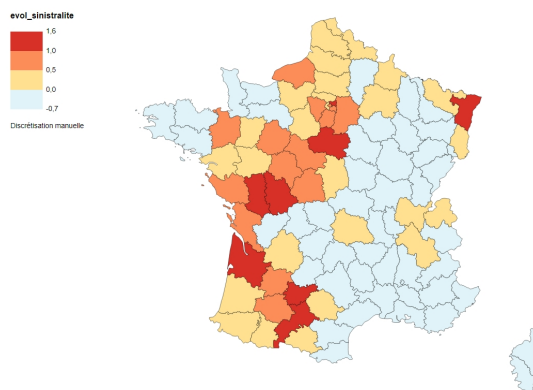


FIGURE 4.2 – Evolution de la sinistralité inondation à horizon 2050 par rapport au climat actuel

marquée pour la Bretagne. A titre comparatif, les cartes suivantes sont tirées d'un papier de la CCR. ¹ :

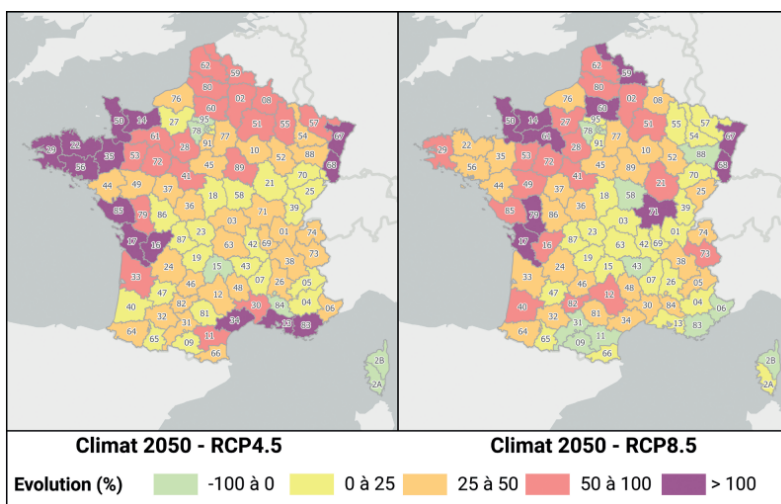
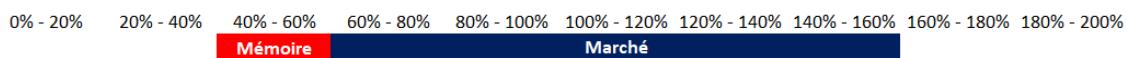


FIGURE 4.3 – Evolution de la sinistralité inondation à horizon 2050 par rapport au climat actuel - Etude CCR (septembre 2023)

Faire cette comparaison nous permet de faire un constat supplémentaire. Notre carte se superpose mieux à celle de la CCR correspondant au RCP8.5. Il est donc possible que notre manière de modéliser capte plus les évènements les plus intenses.

Comparaison au marché

Finalement, la hausse prévue par notre modèle est dans l'intervalle donné par la littérature.



1. <https://www.ccr.fr/documents/35794/1255983/CCR+Etude+climat+BAG+23102023+page+22mo.pdf/68b95f6e-8238-4dcc-6c56-025fa410257b?t=1698161402128>

4.2 La sinistralité sécheresse en 2050

4.2.1 Méthode seuils de température

Cette méthode donne une hausse de +125% rien qu'en considérant la fréquence. On pouvait s'y attendre mais l'on a le même problème que pour la méthode 1 proposée pour les inondations.

4.2.2 Procédure officielle

L'implémentation de la méthode officielle donne une hausse de la sinistralité globale de +125%. Géographiquement, cela se répartit comme suit :

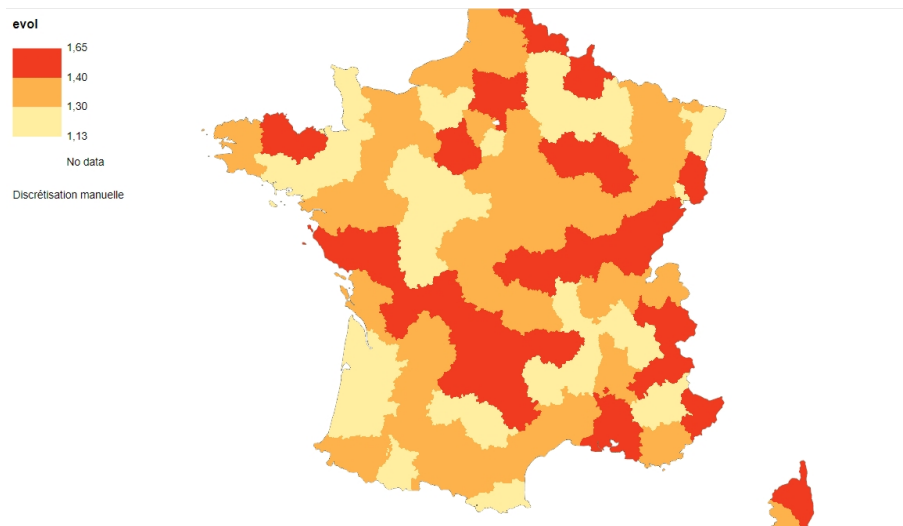
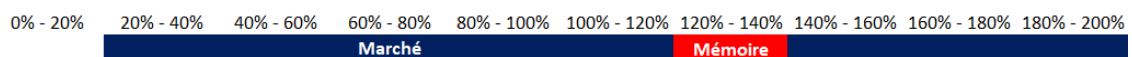


FIGURE 4.4 – Evolution de la sinistralité sécheresse annuelle moyenne à horizon 2050

Comparaison au marché



4.3 Construction d'un outil

Une des visées de ce mémoire était la création d'un outil répondant au cahier des charges suivant :

- répertorier les types de périls ayant déjà touché la commune
- donner les nombres de reconnaissances de la commune à date pour les périls inondation et sécheresse
- proposer un score de sinistralité de la commune
- fournir les évolutions de sinistralité attendues pour les périls inondation et sécheresse à l'horizon 2050
- fournir un maximum d'indicateurs visuels relatifs à la géographie et topographie (RGA etc)

On rappelle que selon une étude menée par l'IFOP pour Allianz France, 80 % des français déclarent être inquiets quant au risque climatique qu'à peine un quart se sont réellement informés sur le bilan d'exposition aux catastrophes naturelles lié à leur lieu de résidence. Notre but ici est, par le biais d'une application web, de permettre à tout un chacun de se renseigner sur ses risques, et aux assureurs de connaître l'augmentation de leur sinistralité 2050 à partir de la connaissance de leur exposition jusqu'à la maille communale en prenant en compte le changement climatique mais aussi l'évolution démographique et l'inflation.

Risques et sinistralité à l'adresse

De plus en plus, on voit apparaître sur les sites d'assureurs des applications web permettant d'accéder à un bilan des risques climatiques à l'adresse. Ces applications prennent une forme similaire à un moteur de recherche. Dans un souci de confort utilisateur et de simplicité, on place une barre de recherche dans laquelle il suffit de rentrer une adresse.

Notre but initial était de pouvoir représenter visuellement un maximum d'informations. On souhaitait représenter les zones RGA avec précision et selon le niveau de risque, les zones soumises au risque sismique, la distance à un site classé SEVESO ¹, la proximité de forêt et donc le risque d'incendie, les zones inondables etc. Cependant, il n'a jusqu'à présent pas été possible de présenter toutes ces informations. Les facteurs limitant sont le stockage, la puissance de calcul et le temps d'exécution de la recherche. En effet, il n'est pas convenable de proposer un outil avec un fort temps d'attente.

Pour synthétiser l'information de risque et rendre la lecture simple et rapide, nous avons défini un indicateur de sinistralité. L'indicateur retenu est un classement. Chaque commune dispose donc de l'information : "X/34 935 commune la plus sinistrée de France".

La principale plus-value que l'on souhaitait apporter avec ce mémoire par rapport aux applications webs existant déjà était l'apport d'un regard vers le futur. L'intérêt étant de sensibiliser la personne vivant ou projetant de vivre à l'adresse recherchée quant aux risques auxquels elle est soumise. Cela peut par exemple l'amener à mieux se renseigner sur les mesures préventives qu'elle peut prendre pour protéger son logement. Le rendu est le suivant :

1. La directive Seveso est une réglementation européenne visant à prévenir les risques d'accidents majeurs impliquant des substances dangereuses. Voici un aperçu de ses principaux aspects. Ils sont classés en deux catégories selon la quantité de substances dangereuses présentes

Exposition aux risques d'une adresse donnée

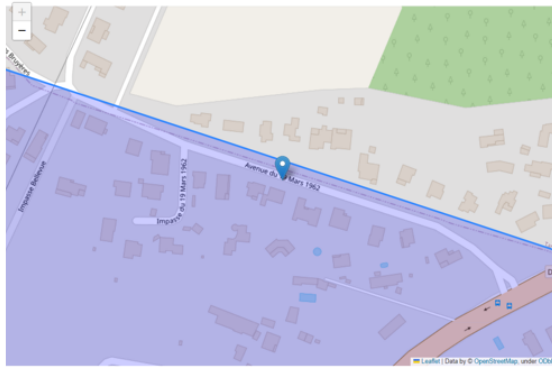
Commencez votre recherche

Adresse

Exemple: 15 rue de bucarest, 75008 Paris



Avenue du 19 Mars 1962 83550
Vidauban



Type de catastrophe naturelle	Nombre de catastrophes naturelles reconnues entre 1982 et janvier 2023
Inondations et/ou Coulées de Boue	14
Mouvement de Terrain	3
Sécheresse	5

Risques recensés sur cette commune

- Mouvement de terrain
- Glissement de terrain
- Tassements différentiels
- Séisme
- Feu de forêt
- Transport de marchandises dangereuses
- Radon
- Affaissement minier

Evolution du coût de la sinistralité attendue horizon 2050 par rapport au climat 2023

Inondation	Sécheresse
+222.32%	+79.06%

FIGURE 4.5 – Capture d'écran de la page web de l'outil

Etude assureur à l'horizon 2050

A ce stade du mémoire, nous pouvons donner un chiffre (à comprendre comme tendance) d'évolution de la sinistralité pour le péril inondation et sécheresse, à la maille commune. Sous certaines hypothèses (en considérant que la structure du portefeuille reste la même), on peut proposer une projection de celui-ci. Cela peut permettre à l'assureur de se rendre compte de comment le changement climatique peut changer la structure de son portefeuille en termes d'exposition.

Chapitre 5

Vers une meilleure modélisation des inondations

Ce chapitre a pour prétention d’apporter des clefs, pistes et outils qui auraient pu être exploitées dans une logique de continuité avec le présent mémoire et afin de mieux modéliser ou de modéliser de manière plus spécifique. Nous présenterons donc ce matériel, qui n’a pu être exploité faute de temps.

5.1 Cerema CartEau

Cerema CartEau² est un outil développé par le Centre d’études et d’expertise sur les risques, l’environnement, la mobilité et l’aménagement (CEREMA), en partenariat avec le Syndicat mixte pour le Schéma d’Aménagement et de Gestion de l’Eau SAGE de la Lys. Cet outil permet de visualiser les images satellites prises pendant une inondation et d’en extraire les zones inondées. Il est ainsi capable de recueillir des informations sur les zones inondées de manière quasi exhaustive sur des dizaines voire des centaines de km². Cette acquisition est également fine (résolutions submétriques) et a un avantage de revisite des satellites. Dans un soucis de facilité d’accès et de prise en main, il a été créé sous la forme d’un plugin QGIS.

Le manque de temps et de données d’assureur à une maille suffisamment fine ont fait que la piste n’a pas été exploitée, mais l’existence d’un tel outil suggère que le travail et l’outil proposé par le présent mémoire peuvent être menés à une maille plus fine encore.

5.2 Le ruissellement

Les inondations se ventilent en plusieurs types parmi lesquels on retrouve l’inondation par ruissellement. Ces inondations constituent quasiment la moitié de l’entièreté du péril. Elles résultent de précipitations intenses dépassant la capacité d’absorption du sol et des systèmes de drainage. Contrairement aux inondations fluviales, elles surviennent rapidement, souvent

2. <https://www.cerema.fr/fr/actualites/cerema-carteau-nouvel-outil-meilleure-gestion-du-risque>

en quelques heures après un épisode pluvieux, et sont exacerbées par l'urbanisation qui réduit les surfaces perméables. Les zones urbaines, en particulier, sont vulnérables en raison de l'imperméabilisation des sols par le béton et l'asphalte, entraînant un écoulement rapide des eaux de pluie. Les zones à sol très sec y sont également sensible. Le sol est, le cas échéant, paradoxalement trop sec pour pouvoir absorber l'eau. Ces inondations peuvent causer des dommages considérables aux infrastructures, aux habitations et aux biens, ainsi que des perturbations économiques et sociales importantes. La gestion efficace des inondations par ruissellement nécessite une planification urbaine adaptée, la mise en place de systèmes de drainage adéquats et des stratégies de gestion des eaux pluviales pour atténuer leurs impacts.

La modélisation de ces inondations est un réel enjeu au vu de ce qu'elles représentent en pourcentage de la sinistralité inondation globale et du fait que leurs conditions d'apparition *a priori* se voient favorisées par le changement climatique et l'urbanisation.

5.2.1 Identifier les inondations par ruissellement historiques

La première difficulté que l'on peut rencontrer lorsque l'on souhaite traiter le cas du ruissellement à part est d'identifier les arrêtés le concernant. On le comprend en regardant la nomenclature ci-dessous, qui fait état des types de risques retrouvés dans les arrêtés CAT-NAT.

Code_peril	lib_risque_jo	num_risque_jo
ALS	Algues Sargasses	1
AVA	Avalanches	2
CMV	Chocs Mécaniques liés à l'action des Vagues	3
COB	Coulée de Boue	4
DIV	Divers	5
ECB	Eboulement et/ou Chute de Blocs	6
EFA	Effondrement et/ou Affaissement	7
GER	Glissement et Eboulement Rocheux	8
GET	Glissement et Effondrement de Terrain	9
GLT	Glissement de Terrain	10
GRL	Grêle	11
ICB	Inondations et/ou Coulées de Boue	12
IRN	Inondations Remontée Nappe	13
LVT	Lave Torrentielle	14
MVT	Mouvement de Terrain	15
PDN	Poids de la Neige	16
RAZ	Raz de Marée	17
SEC	Sécheresse	18
SEI	Secousse Sismique	19
TMP	Tempête	20
VCY	Vents Cycloniques	21
VOL	Eruption Volcanique	22

FIGURE 5.1 – Nomenclature des risques

On pourrait penser que les inondations par ruissellement soit nommées "coulées de boue", mais on obtient pas le chiffre attendu d'environ 50% des inondations. On ne sait pas non plus comment se ventile le type "Inondations et/ou coulée de boue".

5.2.2 Modéliser les inondations par ruissellement

L'idée générale

La modélisation des inondations par ruissellement repose sur une approche intégrative combinant plusieurs éléments clés pour simuler avec précision le comportement des eaux en surface. Au cœur de cette modélisation se trouvent les Modèles Numériques de Terrain (MNT), qui fournissent une représentation détaillée de la topographie, essentielle pour comprendre les chemins d'écoulement de l'eau. La précision des MNT permet de repérer les pentes, les dépressions et les obstacles naturels ou artificiels influençant le ruissellement. En complément, l'occupation des sols joue un rôle déterminant, car les différents types de surfaces (urbaines, agricoles, forestières) ont des capacités d'infiltration et des comportements de ruissellement distincts. Par exemple, les surfaces imperméables, comme le béton et l'asphalte, augmentent le volume et la vitesse du ruissellement, tandis que les zones végétalisées favorisent l'infiltration et retardent l'écoulement. L'intégration de ces données permet de créer des modèles hydrologiques qui simulent les scénarios d'inondation en fonction des précipitations, des caractéristiques du terrain et de l'utilisation des sols. Cette approche systématique et multidimensionnelle aide à identifier les zones à risque, à prévoir les impacts potentiels des inondations et à planifier des mesures de prévention et de gestion adaptées.

Un modèle d'occupation des sols : Corine Land Cover

Le Corine Land Cover (CLC) est une base de données géographique européenne, qui fournit des informations détaillées sur l'occupation des sols et l'évolution des paysages. Ce projet, initié par l'Agence européenne pour l'environnement (AEE), offre une cartographie harmonisée et cohérente de l'utilisation des terres à travers l'Europe. Le CLC a été largement utilisé dans la modélisation des inondations par ruissellement, notamment par des organismes de recherche, des institutions gouvernementales et des entreprises d'ingénierie environnementale. En fournissant des données précises sur les types de surfaces (forêts, zones urbaines, terres agricoles, etc.), le CLC permet de mieux comprendre comment les différentes couvertures du sol influencent le comportement des eaux de ruissellement. Par exemple, des études menées par des chercheurs universitaires ont intégré ces données dans des modèles hydrologiques pour simuler les impacts des précipitations sur les surfaces imperméables et prédire les zones à risque d'inondation. Ainsi, le CLC est un outil précieux pour améliorer la précision des prévisions et la gestion des risques liés aux inondations.

Les Modèles Numériques de Terrain (MNT)

Les MNT jouent un rôle crucial dans la modélisation des inondations par ruissellement. Ces modèles tridimensionnels de la surface terrestre, basés sur des données topographiques précises, permettent de représenter fidèlement les variations d'altitude et les caractéristiques du terrain. En capturant les moindres détails des pentes, des dépressions et des structures géographiques, les MNT fournissent une base essentielle pour simuler le comportement des eaux de ruissellement. Leur intérêt réside dans leur capacité à améliorer la précision des prévisions d'inondations en identifiant les zones vulnérables et en anticipant les chemins d'écoulement de l'eau. Ainsi, ils permettent de mieux comprendre et de gérer les risques liés aux inondations, en aidant les décideurs à concevoir des infrastructures et des plans d'intervention plus efficaces. Les MNT sont également utilisés pour évaluer l'impact potentiel des changements climatiques et des aménagements urbains sur les régimes hydrologiques.

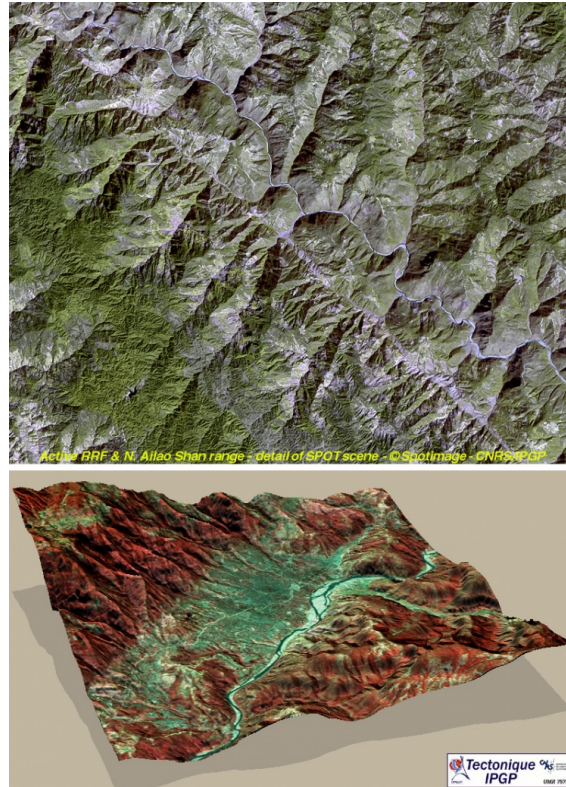


FIGURE 5.2 – Exemple de visuel d’un MNT (source : odr.inrae.fr)

locaux, renforçant ainsi leur importance dans la planification durable et la protection des populations. Le MNT peut par exemple ressembler à cela :

Des solutions existent

Plusieurs logiciels et solutions performantes sont disponibles pour la modélisation des inondations par ruissellement. HEC-HMS (Hydrologic Engineering Center’s Hydrologic Modeling System), gratuit, développé par le US Army Corps of Engineers, est largement utilisé pour simuler les processus hydrologiques des bassins versants. MIKE FLOOD, payant, créé par DHI, intègre des modèles hydrologiques et hydrauliques pour une analyse détaillée des inondations urbaines et fluviales. SWMM (Storm Water Management Model), également gratuit, développé par l’EPA, est utilisé pour planifier, analyser et concevoir des systèmes de gestion des eaux pluviales. InfoWorks ICM, payant, proposé par Innowyze, offre des capacités avancées de modélisation intégrée pour les systèmes de drainage, les rivières et les inondations urbaines. Enfin, TUFLOW, payant, est reconnu pour sa précision dans la simulation des inondations en combinant des modèles 1D et 2D, largement utilisé par les ingénieurs et les planificateurs. Ces outils sont essentiels pour prévoir les inondations, évaluer les risques et planifier des mesures d’atténuation efficaces.

Le modèle WaterSed

Dans le cadre de l'évaluation des risques d'inondation par ruissellement, le modèle WaterSed, développé par le BRGM (Bureau de Recherches Géologiques et Minières), constitue un outil de pointe pour simuler les processus de ruissellement et d'érosion des sols lors d'événements pluvieux. Ce modèle, s'appuyant sur des logiciels géomatiques tels que SAGA GIS et QGIS, offre la possibilité d'analyser l'impact de différents scénarios d'aménagement du territoire et de gestion hydraulique. L'objectif de cette section est de détailler les principes de fonctionnement de WaterSed, les données qu'il utilise, les équations qui le sous-tendent, ainsi que son application pratique dans la modélisation des inondations par ruissellement.

Pour réaliser des simulations précises, WaterSed nécessite une variété de données d'entrée. Parmi les données topographiques, le Modèle Numérique de Terrain (MNT) joue un rôle central. Le MNT, corrigé hydrologiquement pour supprimer les zones plates et les cuvettes, permet de modéliser le relief et les flux d'écoulement des eaux. Les sources de données incluent la BD ALTI de l'IGN et des levés LIDAR. En outre, l'occupation des sols, renseignée par des bases de données telles que le RPG (Registre Parcellaire Graphique) et la BD TOPO, est essentielle pour évaluer l'impact des pratiques culturales et des infrastructures sur le ruissellement.

Les propriétés des sols, telles que la texture et la structure, sont également intégrées dans le modèle. Ces informations, issues de l'IGCS et de la BDAT, influencent la capacité d'infiltration et de stockage des sols. Enfin, les caractéristiques des événements pluvieux, qu'ils soient observés ou simulés, sont des inputs cruciaux. Ils incluent la hauteur cumulée des pluies, la durée effective des précipitations, et l'humidité initiale du sol.

Le fonctionnement de WaterSed repose sur plusieurs équations fondamentales. Le ruissellement est modélisé par deux mécanismes principaux : l'excès d'infiltration (la pluie excède la capacité d'absorption du sol), et l'excès de saturation (le sol saturé ne peut plus absorber d'eau supplémentaire). L'érosion des sols est également modélisée, en tenant compte de la sensibilité du sol à l'arrachement par la pluie et le ruissellement. Les paramètres d'entrée incluent la concentration potentielle en sédiments (g/l) et l'érodibilité du sol, un indice variant de 0 à 1.

Des paramètres hydrologiques spécifiques, tels que la capacité d'infiltration (mm/h), le stockage de l'eau (mm) et le coefficient de rugosité de Manning ($s.m^{-1/3}$), sont utilisés pour affiner les simulations. Ces paramètres permettent de modéliser avec précision les processus de ruissellement et d'infiltration, ainsi que la dynamique de l'eau à la surface du sol.

L'une des équations centrales de WaterSed est celle de la balance hydrologique. Cette équation permet de quantifier la répartition entre le ruissellement et l'infiltration à l'échelle de chaque maille du modèle. Elle s'exprime comme suit :

$$HBi = P_i - I_i - R_i - WSi \quad (5.1)$$

où :

- HBi est la balance hydrologique de la maille i ,
- P_i est la précipitation totale sur la maille i ,
- I_i est l'infiltration dans le sol de la maille i ,

- R_i est le ruissellement de surface de la maille i ,
- WSi est la capacité de stockage en eau du sol de la maille i .

Cette équation est essentielle pour déterminer si l'eau de pluie va s'infiltrer dans le sol ou contribuer au ruissellement de surface. Une valeur positive de HBi indique un excès de ruissellement, tandis qu'une valeur négative suggère une infiltration suffisante ou un potentiel de réinfiltration.

Pour appliquer WaterSed à la modélisation des inondations par ruissellement, plusieurs étapes sont nécessaires. Tout d'abord, la préparation des données est essentielle. Les données topographiques, d'occupation des sols et hydrologiques doivent être collectées et formatées correctement. Par exemple, les grilles raster au format `.sgrd` sont utilisées pour les différents inputs du modèle, tels que le MNT corrigé hydrologiquement et les caractéristiques des précipitations.

Une fois les données préparées, elles sont intégrées dans le modèle pour lancer les simulations. WaterSed permet de générer divers outputs, notamment la pluie nette, l'infiltration totale, le volume de ruissellement de surface, et la vitesse d'écoulement de l'eau. Ces résultats sont analysés pour comprendre la répartition du ruissellement et de l'infiltration, et pour évaluer les vitesses de ruissellement et la durée de l'événement pour chaque maille du modèle. Les données sur l'érosion et les dépôts de sédiments sont également essentielles pour planifier des mesures d'atténuation.

Le modèle WaterSed constitue un outil sophistiqué et puissant pour la modélisation des inondations par ruissellement. En intégrant des données détaillées sur la topographie, l'occupation des sols, les propriétés des sols, et les événements pluvieux, WaterSed permet de simuler avec précision les processus de ruissellement et d'érosion. Les résultats obtenus offrent des insights précieux pour la gestion des risques et la planification des interventions sur le terrain. Ainsi, WaterSed joue un rôle crucial dans l'amélioration de notre compréhension et de notre capacité à gérer les risques d'inondation par ruissellement, contribuant ainsi à la protection des infrastructures et des populations.

Conclusion

Ce mémoire a permis de mettre en lumière les défis et enjeux majeurs auxquels le secteur de l'assurance est confronté face aux impacts croissants du changement climatique. À travers l'analyse détaillée des inondations et sécheresses, deux des périls climatiques les plus significatifs en France, nous avons pu démontrer l'augmentation prévisible de la sinistralité à l'horizon 2050.

La première partie du mémoire a posé les bases théoriques en expliquant les travaux du GIEC et l'évolution des réglementations assurantielles en France. Nous avons également abordé les limitations actuelles des données disponibles et les efforts pour les surmonter grâce à l'Open Data, en particulier avec l'apport de Météo France.

La seconde partie a détaillé la méthodologie employée pour modéliser la fréquence et la sévérité des sinistres liés aux inondations et sécheresses. Les modèles développés montrent une augmentation substantielle de la fréquence et de la sévérité des sinistres d'ici 2050, avec des variations régionales notables. Ces résultats mettent en évidence la nécessité pour les assureurs de réévaluer leurs portefeuilles et d'adapter leurs stratégies de couverture et de tarification.

Enfin, la construction d'un outil de projection intégré, capable d'analyser l'évolution future de la sinistralité à partir des données climatiques et de sinistralité, constitue un apport pratique significatif de ce travail. Cet outil pourra aider les assureurs à anticiper les impacts du changement climatique et à prendre des mesures préventives adéquates pour minimiser les risques futurs.

Ce mémoire s'inscrit dans une démarche proactive pour sensibiliser les acteurs de l'assurance à l'importance de l'adaptation au changement climatique. Les recommandations formulées, basées sur les projections et analyses effectuées, visent à promouvoir une résilience accrue du secteur face aux défis climatiques à venir. Il est essentiel que les assureurs, les régulateurs et les assurés collaborent étroitement pour développer des solutions innovantes et durables, garantissant ainsi une protection adéquate pour tous face aux aléas climatiques futurs.

Bibliographie

- **ACPR.** (2023). *Exercice climatique 2023 - guide technique*. ACPR. Technical report.
- **J.-L. Dufresne.** (2006). *Simulation de l'évolution récente et future du climat par les modèles du CNRM et de l'IPSL*. La Météorologie, 55.
- **GIEC.** (2023). *Climate change 2023 : Synthesis report*. GIEC. Technical report.
- **J. Boé.** (2007). *Changement global et cycle hydrologique : Une étude de régionalisation sur la France*. Université Paul Sabatier - Toulouse III. Thèse de doctorat.
- **Covéa.** (2022). *Livre Blanc Covéa Risques Climatiques*. https://www.covea.com/sites/default/files/2023-11/202202_Livre_Blanc_Cov%C3%A9a_Risques_Climatiques.pdf.
- **France Assureurs.** (2022). *Impact du changement climatique sur l'assurance à l'horizon 2050*. https://www.franceassureurs.fr/wp-content/uploads/2022/09/vf_france-assureurs_impact-du-changement-climatique-2050.pdf.
- **CCR.** (2023). *Rapport climat 2023*. <https://www.ccr.fr/-/ccr-rapport-climat-2023>.
- **F. Zhan.** (2021). *Risque de subsidence, prédiction via méthodes de machine learning et l'Open Data*.
- **A. Delorme.** (2023). *Assurances contre la sécheresse au XXIe siècle : perspectives d'évolution*.
- **K. Lecoublet.** (2024). *Risque RGA : projections climatiques et impact des changements des paramètres du régime CatNat*.
- **T. Kermorvant.** (2024). *Modélisation et projection du risque sécheresse : Étude de soutenabilité à horizon 2050*.
- **IFOP.** (2023). *Les Français et les risques climatiques*. <https://www.ifop.com/publication/les-francais-et-les-risques-climatiques/>.
- **Générali.** *Ensemble face aux risques*. <https://ensemble-face-aux-risques.generalif.fr/>.
- **MAIF.** *Risques climatiques logement*. <https://www.maif.fr/habitation/risques-climatiques-logement-carte>.
- **GeoRisques.** *Portail des catastrophes naturelles*. <https://www.georisques.gouv.fr/>.
- **EM-DAT, UCLouvain.** (2022). *The International Disaster Database*. Centre for Research on the Epidemiology of Disasters, Brussels, Belgium. <https://www.emdat.be>. Traitements : SDES, 2022.
- **MTECT.** (2022). *Ministère de la Transition Écologique et de la Cohésion des Territoires*.
- **Légifrance.** (1982). *Loi n°82-600 du 13 juillet 1982 relative à l'indemnisation des victimes de catastrophes naturelles*. <https://www.legifrance.gouv.fr/loda/id/JORFTEXT000000691989/1982-07-14/>.

- **Covéa.** (2022). *Livre blanc Covéa - Changement climatique Assurance : Quelles conséquences sur la sinistralité à horizon 2050 ?*. https://www.covea.com/sites/default/files/2022-02/202202_Livre_Blanc_Cov%C3%A9a_Risques_Climatiques.pdf.
- **France Assureur.** (2023). *Impact du changement climatique sur l'assurance à horizon 2050*. https://www.franceassureurs.fr/wp-content/uploads/2022/09/vf_france-assureurs_impact-du-changement-climatique-2050.pdf. Consulté le 26 février 2024.
- **CCR.** (2024). *ArcGIS REST Services Directory - CarteToutPublic*. Utilisation pour extraction des fréquences et coûts historiques par département et commune, <https://geoportail.ccr.fr/server/rest/services/CarteToutPublic>.
- **DRIAS.** *Les futurs du climat*. Utilisation pour extraction des données climatiques projectives du modèle ALADIN63, <https://drias-prod.meteo.fr/okapi/accueil/okapiWebDrias/index.jsp>.
- **INSEE.** (2022). *Historique des populations communales*. <https://www.insee.fr/fr/statistiques/3698339>.
- **INSEE.** (2022). *Projections de population 2018-2070 pour les départements et les régions*. <https://www.insee.fr/fr/statistiques/6652134>.
- **A. Badillet.** (2022). *La gestion du risque climatique : changement de norme et provisionnement - Mémoire d'actuaire*. <http://www.ressources-actuarielles.net/C12574E200674F5B/0/5D19A54CB83F9833C12589550027EB97>.
- **CCR.** (2024). *Garantie Cat Nat - Catastrophes naturelles en France*. <https://catastrophes-naturelles.ccr.fr/garantie-cat-nat>.
- **Seabird.** (2021). *Risque climatiques, comment modéliser la sinistralité à horizon 2050*.
- **ACPR.** (2023). *Scénarios et hypothèses principales de l'exercice de stress test climatique 2023*. <https://acpr.banque-france.fr/scenarios-et-hypotheses-principales-de-lexercice-de-s>
- **Ministère de la Transition Écologique.** (2023). *Comprendre le GIEC*. <https://www.ecologie.gouv.fr/politiques-publiques/comprendre-giec>.

Annexes

Revue littéraire : La projection de sinistralité CAT NAT

Le but de cette section est de passer en revue les principaux papiers et résultats de la littérature. On s'attardera sur les acteurs suivants : Covéa, la CCR, France Assureurs et quelques mémoires.

Le « Livre Blanc Covéa Risques Climatiques »¹ explore l'impact du changement climatique sur la sinistralité assurantielle à l'horizon 2050. Covéa, en collaboration avec RiskWeather-Tech, a réalisé des modélisations climatiques pour évaluer les risques d'inondations, tempêtes, sécheresses et grêles. Les projections climatiques EURO-CORDEX et des scénarios d'émission de gaz à effet de serre RCP 8.5 ont été utilisés pour simuler les futurs climats régionaux. Les résultats montrent une augmentation significative de la fréquence et de l'intensité des événements climatiques extrêmes, entraînant une hausse des coûts assurantiels. Pour les inondations, les dommages devraient augmenter de 110 % d'ici 2050, avec des débits de crue décennaux augmentant de 50 %. Pour les sécheresses, la sinistralité devrait augmenter de 60 %, avec une hausse de 70 % de la fréquence d'éligibilité CatNat.

L'étude « Impact du changement climatique sur l'assurance à l'horizon 2050 »², menée par France Assureurs, évalue les effets du changement climatique sur les coûts des sinistres en France métropolitaine et dans les DOM. Cette analyse repose sur une méthodologie combinant des projections climatiques et socio-économiques, ce qui permet de distinguer les coûts directement liés au changement climatique de ceux imputables à d'autres facteurs. Les projections climatiques, issues des travaux du Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement (LSCE) et basées sur le scénario RCP8.5 du GIEC, incluent des données telles que la vitesse du vent, les précipitations maximales et moyennes, ainsi que les températures. D'ici 2050, le coût cumulé des sinistres liés à la sécheresse est estimé à 43 milliards d'euros, dont 17,2 milliards directement attribués au changement climatique, représentant un triplement de la charge annuelle moyenne observée ces 31 dernières années. Les départements les plus touchés par la sécheresse seront la Haute-Garonne, la Gironde et le Tarn-et-Garonne. Pour les inondations, le coût cumulé atteindrait 50 milliards d'euros, avec une augmentation de 81 % par rapport à la période passée, principalement due à l'enrichissement des biens assurés.

CCR : <https://www.ccr.fr/-/ccr-rapport-climat-2023>

1. https://www.covea.com/sites/default/files/2023-11/202202_Livre_Blanc_Cov%C3%A9a_Risques_Climatiques.pdf

2. https://www.franceassureurs.fr/wp-content/uploads/2022/09/vf_france-assureurs_impact-du-changement-climatique-2050.pdf

Mémoires modélisant la sécheresse

Parmi les mémoires existants et proposant une modélisation de la sécheresse (en fréquence ou sinistralité), voici quelques uns qu'il est intéressant de parcourir :

- Fengyue Zhan ; « Risque de subsidence, prédiction via méthodes de machine learning et l'Open Data »(2021)
- A. DELORME ; « Assurances contre la sécheresse au XXIe siècle : perspectives d'évolution »(2023)
- K. LECOUBLET ; « Risque RGA : projections climatiques et impact des changements des paramètres du régime CatNat »(2024)
- T. KERMORVANT ; « Modélisation et projection du risque sécheresse : Etude de soutenabilité à horizon 2050 »(2024)

Les études convergent sur l'utilisation d'indices standardisés pour évaluer la sécheresse, permettant une comparaison cohérente entre différentes régions et périodes. Elles combinent également des données climatiques et non climatiques pour fournir une évaluation précise des risques. Cependant, les études varient dans leur focus régional, certaines se concentrant sur des zones spécifiques comme le bassin méditerranéen français. Les résultats des études indiquent une augmentation des épisodes de sécheresse, particulièrement dans les régions méditerranéennes, avec des impacts prévus sur l'agriculture et les ressources en eau. Les modèles climatiques valident la qualité des données de précipitations mensuelles, fournissant des prévisions plus fiables pour les sécheresses futures. Les conséquences économiques sont également mises en avant, incluant des pertes agricoles significatives et des coûts élevés de réparation des infrastructures endommagées. Face à l'augmentation prévue de la fréquence et de l'intensité des sécheresses, les études soulignent la nécessité d'adapter les stratégies d'assurance et de gestion des ressources pour mieux gérer ces risques croissants.

Les études sur la sécheresse employées dans les différents documents suivent des démarches similaires mais présentent également des différences notables. La démarche typique implique la modélisation des sécheresses à l'aide de modèles climatiques (comme Random Forest ou GLM Poisson) basés sur des variables climatiques et météorologiques spécifiques, ainsi que sur des variables liées à l'exposition de la commune aux risques de retrait-gonflement des argiles (RGA). Les similitudes dans les approches incluent l'utilisation de scénarios climatiques du GIEC (RCP2.6, RCP4.5, RCP8.5) pour projeter les tendances futures de la sécheresse. Cependant, les différences se manifestent dans les variables spécifiques retenues et les méthodes de traitement des données. Par exemple, certains modèles intègrent des indicateurs d'humidité des sols comme le SSWI, tandis que d'autres se concentrent davantage sur les données historiques des arrêtés de reconnaissance de catastrophe naturelle. Les résultats montrent généralement une augmentation de la fréquence et de l'intensité des sécheresses à horizon 2050, avec une variabilité régionale marquée. Le Sud de la France, la région parisienne et le croissant argileux apparaissent comme les zones les plus vulnérables, tandis que des régions comme la Bretagne et la Normandie, traditionnellement moins touchées, pourraient voir une augmentation significative de leur exposition aux sécheresses.

Mémoires qui font les 2 :

- E. MAYER ; « Projection de la fréquence des inondations et sécheresses en France métropolitaine à horizon 2050 »