

Mémoire présenté devant l'ENSAE Paris  
pour l'obtention du diplôme de la filière Actuariat  
et l'admission à l'Institut des Actuaire  
le 9 mars 2023

Par : **Eurydice Maucuer**

Titre : **Projection de la fréquence des inondations et sécheresses  
en France métropolitaine à horizon 2050**

Confidentialité :  NON  OUI (Durée :  1 an  2 ans)

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

*Membres présents du jury de la filière :*  
*Nom : Christian ROBERT*

*Entreprise : Sia Partners* **SIAPARTNERS**  
*Signature :*

*Membres présents du jury de l'Institut  
des Actuaire :*  
*Antoine Mantel*  
*Nicolas Zec*  
*Julie Surget Sun*  
*Cécile Vigouroux*  
*Steve Baumann*

*Directeur du mémoire en entreprise :*  
*Nom : Romain LAILY*  
*Signature :*

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

Secrétariat :

Signature du responsable entreprise

Bibliothèque :

Signature du candidat



## Résumé

---

Dans ses derniers rapports, le GIEC alarme les gouvernements sur l'augmentation rapide des températures et des catastrophes naturelles à l'échelle mondiale et sur les conséquences en termes de sinistralité. Cette hausse affectera fortement les assureurs qui devront faire face à ces dommages. C'est pourquoi l'ACPR a réalisé un premier exercice pilote d'évaluation des risques climatiques pour les banques et les assurances. Cet exercice révèle une exposition modérée des assureurs non-vie à l'augmentation des catastrophes naturelles.

Ce mémoire propose une étude des deux périls les plus coûteux du régime Cat Nat en France métropolitaine : les inondations et la sécheresse (nommée retrait-gonflement des argiles). L'objectif est de réaliser, pour chaque péril considéré, un modèle unique de projection de la fréquence de ces catastrophes naturelles pour l'ensemble du territoire métropolitain à la maille communale. Ces modèles permettront de projeter la fréquence des périls considérés pour un horizon de moyen terme (2050) à une maille communale à l'aide des scénarios du GIEC. Cette maille fine de modélisation et de restitution des résultats constitue une nouveauté dans ce domaine. La modélisation à cette maille fine permet d'éviter les effets de bord et de s'aligner sur la granularité utilisée par le dispositif de reconnaissance des catastrophes naturelles et les modèles de risque utilisés par les assureurs, généralement à la maille infra-communale.

Ce mémoire commence par une présentation des risques climatiques, de leurs conséquences sur le système financier et des travaux réalisés sur ce sujet. Une seconde partie est consacrée à l'étude plus précise des deux périls retenus. Les parties suivantes se concentrent sur la réalisation d'un modèle prédictif par péril permettant de projeter à une maille communale la fréquence des inondations et sécheresses à horizon 2050. Les résultats sont ensuite comparés et confrontés aux études réalisées sur ce sujet, notamment les travaux de l'ACPR.

---

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

## Abstract

---

In its latest reports, the IPCC warns governments about the rapid increase in temperatures and natural disasters on a global scale and the consequences in terms of claims. This increase will have a strong impact on insurers who will have to face these damages. This is why the ACPR has carried out a first pilot exercise to assess the climate risks for banks and insurance companies. This exercise reveals a moderate exposure of non-life insurers to the increase of natural catastrophes.

This paper proposes a study of the two most costly perils of the Cat Nat regime in metropolitan France: floods and drought (called clay shrinkage-swelling). The objective is to realize, for each peril considered, a unique model of projection of the frequency of these natural disasters for the whole metropolitan territory at the communal level. These models will make it possible to project the frequency of the perils considered for a medium-term horizon (2050) at a communal scale using IPCC scenarios. This fine scale of modeling and restitution of results is a novelty in this field. Modelling at this fine scale makes it possible to avoid side effects and to align with the granularity used by the natural disaster scheme and the risk models used by insurers, generally at the sub-municipal scale.

This thesis begins with a presentation of climate risks, their consequences on the financial system and the work done on this subject. A second part is devoted to a more precise study of the two selected perils. The following parts focus on the realization of a predictive model by peril allowing to project the frequency of floods and droughts at a communal level by 2050. The results are then compared and contrasted with the studies carried out on this subject, notably the work of the ACPR.

---

*Keywords : Climate risks, Natural catastrophes, Drought, Shrinkage-swelling of clay soils, Floods, Climate change, IPCC*

# Note de synthèse

## Contexte du mémoire

Le dernier rapport du GIEC, organisme international d'évaluation de l'état des connaissances scientifiques sur le changement climatique, montre que l'influence humaine sur le réchauffement climatique actuel est incontestable. Le GIEC alerte sur les conséquences potentiellement irréversibles du changement climatique telles que la montée des eaux, les sécheresses, les incendies de forêts plus fréquents et plus intenses. Même en limitant le réchauffement climatique, les catastrophes naturelles devraient malheureusement se multiplier, avec des impacts importants sur les populations et les écosystèmes. Il est donc crucial d'agir rapidement et efficacement pour réduire les émissions de gaz à effet de serre et ainsi limiter les risques liés au changement climatique.

Le changement climatique peut avoir des impacts significatifs sur le système financier par les risques physiques (catastrophes naturelles : tempêtes, inondations, feux de forêts, sécheresses ...) et de transition (coûts de transition vers une économie bas carbone) qu'il représente. Il est important pour les acteurs du système financier de prendre en compte ces risques et de mettre en place des stratégies pour les atténuer afin de protéger leurs actifs et leur rentabilité à long terme. Les groupes d'assurance seront particulièrement concernés du fait de leur positionnement dans la société et de leur rôle dans la gestion des risques catastrophes.

L'ACPR a mené une étude pour sensibiliser les banques et les assureurs à ces risques. Cette étude pilote a montré que le système financier français est relativement peu exposé aux risques climatiques. L'ACPR identifie toutefois une augmentation des coûts des sinistres liés aux catastrophes naturelles avec une certaine hétérogénéité entre les départements. Les acteurs du monde assurantiel et bancaire (la Caisse Centrale de Réassurance, France Assureurs, Covéa...) se sont intéressés à l'évolution des dommages causés par les catastrophes naturelles en France dans un contexte de changement climatique. Ces différentes études prévoient une augmentation considérable du nombre de sinistres dans les années à venir, en particulier pour le péril sécheresse. L'un des dénominateurs communs de ces études est la publication des résultats d'évolution des dommages à une échelle départementale.

Dans la continuité des travaux conduits par ces différents acteurs, ce mémoire se propose d'étudier l'évolution de la fréquence de certaines catastrophes naturelles en France métropolitaine à une échelle communale pour un horizon 2050. La modélisation à cette maille fine permet d'éviter les effets de bord et de s'aligner sur la granularité utilisée par le dispositif de reconnaissance des catastrophes naturelles et les modèles de risque utilisés par les assureurs, généralement à la maille infra-communale. L'évolution des coûts des sinistres résultants de ces catastrophes naturelles n'a pas été étudiée dans ce mémoire. Ce mémoire repose sur l'utilisation de données Open Data, ainsi, la survenance d'une catastrophe naturelle est caractérisée par la prise d'un

arrêté interministériel de reconnaissance de l'état de catastrophe naturelle (arrêté de Cat Nat).

## Les périls étudiés

Ce mémoire se concentre sur l'étude de deux périls auxquels le territoire français est particulièrement exposé : les inondations et les sécheresses caractérisées par le phénomène de retrait-gonflement des argiles.

Ces deux types de catastrophes naturelles sont les deux premiers postes de dépense du régime Cat Nat. Créé en 1982, le régime d'indemnisation des catastrophes naturelles est un régime hybride d'assurance qui permet de couvrir les dommages causés par certains événements naturels considérés comme non assurables par le marché privé. Le phénomène de retrait-gonflement des sols argileux a été intégré à ce régime en 1988. Ce régime permet aux personnes qui subissent des dommages lors de ces événements d'être indemnisées par leur assurance habitation ou par des fonds publics. Afin de réduire les coûts supportés, l'État français incite à la mise en place de dispositifs de prévention des risques naturels pour minimiser les impacts des catastrophes naturelles.

Dans un but de modélisation des catastrophes naturelles et plus particulièrement des arrêtés de Cat Nat, la bonne compréhension des risques retenus et de leurs facteurs de déclenchement est essentielle. Par ailleurs, la connaissance des règles appliquées lors de la décision de déclaration de l'état de catastrophe naturelle à une commune est un outil majeur de détermination des informations nécessaires à la modélisation.

De plus, l'analyse des arrêtés de Cat Nat et de leur répartition géographique a permis d'identifier de fortes inégalités d'exposition du territoire à ces deux risques naturels. Certaines régions sont plus exposées et le risque de survenance d'un certain type de catastrophe naturelle y est accru. Les cartes suivantes permettent d'identifier les territoires particulièrement vulnérables aux risques d'inondation et de sécheresse.

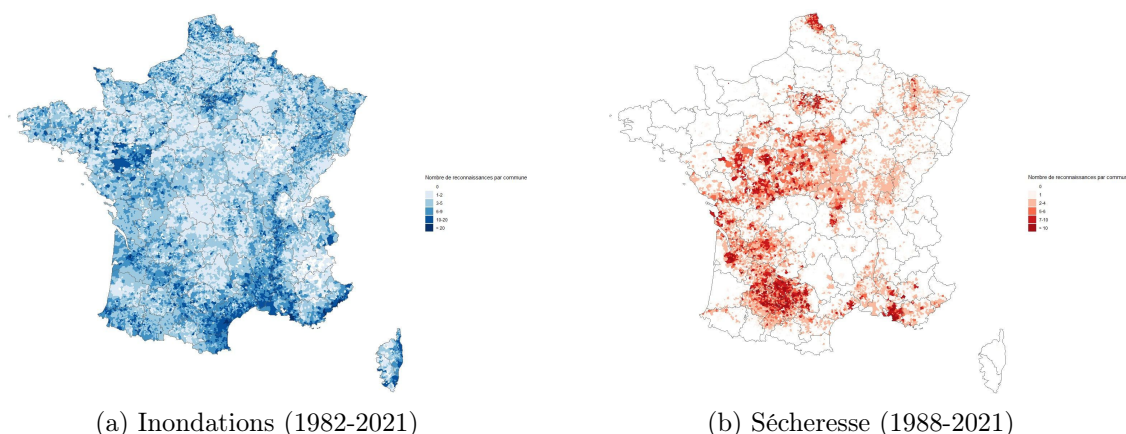


FIGURE 1 – Nombre de reconnaissances par commune pour les deux périls considérés depuis leur intégration au régime

Source : A partir des données Gaspar

La quasi-totalité des communes métropolitaines (95%) ont déjà été déclarées en état de catastrophe naturelle à cause des inondations mais les régions proches de cours d'eau importants (Loire, Rhône, Seine, Garonne) ou du littoral (côtes méditerranéenne et atlantique) sont les plus fortement touchées par les inondations. La sécheresse est quant à elle plus localisée sur le territoire français avec seulement 35% de communes déjà reconnues en état de catastrophe naturelle au titre de la sécheresse. Les régions les plus vulnérables se concentrent autour du Sud-Ouest, de la région Centre, du bassin parisien et du département du Nord.

Pour identifier les territoires les plus vulnérables, plusieurs cartographies de l'exposition aux inondations ont été conduites durant les dernières décennies dont les Atlas des Zones Inondables (AZI), les Enveloppe Approchées des Inondations Potentielles (EAIP) et les Territoires à Risque Important d'Inondation. En ce qui concerne l'exposition au phénomène de retrait gonflement des argiles, le BRGM a réalisé une carte d'exposition au RGA.

Afin de prévenir l'apparition des catastrophes naturelles et d'en limiter les dommages humains et matériels, la France s'est dotée d'outils de gestion des risques naturels notamment via la maîtrise de l'urbanisme à travers la mise en place par les communes de Plans de Prévention des Risques Naturels (PPRN). Ces plans se déclinent notamment en Plan de Prévention des Risques Inondation (PPRI).

## Construction des bases de modélisation et de projection

Le premier objectif est de modéliser, pour une certaine maille spatio-temporelle, les catastrophes naturelles retenues à partir de variables explicatives. Dans un deuxième temps, ces variables explicatives sont projetées à un horizon 2050 afin de réaliser une projection de la fréquence des catastrophes naturelles pour ce même horizon. Ainsi, toute variable explicative utilisée dans la phase de modélisation doit être disponible ou projetable pour un horizon 2050.

Afin de modéliser les catastrophes naturelles, il a été nécessaire de trouver des données disponibles en Open Data, de les collecter puis de les retraiter afin d'uniformiser les mailles géographiques et temporelles. Le traitement et la recherche de sources de données en Open Data fiables, avec un historique long et des granularités temporelles et géographiques suffisantes a représenté une part importante de ce mémoire.

Les bases de modélisation, une pour chaque péril considéré, sont constituées des informations qui permettraient d'expliquer et prévoir le nombre d'arrêtés de catastrophe naturelle par commune et par an. Ainsi, chaque base de modélisation se compose :

- De **données de sinistralité de type arrêtés de catastrophe naturelle** obtenues à partir de la base BD Gaspar qui recense l'ensemble des arrêtés interministériels à ce sujet depuis 1982. Après traitement et agrégation annuelle, elle permet de comptabiliser pour chaque commune de métropole le nombre de catastrophes naturelles survenues chaque année depuis la création du régime Cat Nat. Cependant, les montants des sinistres associées ne sont pas disponibles en Open Data, ce qui limite l'étude aux seuls chiffres sur la fréquence des catastrophes naturelles.
- De **variables climatiques** (températures minimales, maximales et moyennes, pluviométrie, indicateurs d'humidité des sols).

- Les variables de température et de pluviométrie sont issues du modèle climatique régional (RCM) Aladin 63 du jeu DRIAS 2020. Les résultats de cette modélisation font, dans le cadre du projet DRIAS, l’objet d’une correction de biais par rapport aux observations réelles. Ces variables climatiques sont disponibles pour un pas de temps annuel à la fois pour une période historique et pour une période de projection et sont projetées sur la maille SAFRAN, constituée de 8981 points en France Métropolitaine et d’une résolution de 8km.
  - L’indicateur d’humidité des sols SSWI (Standardized Soil Wetness Index) provient de la base de Données Météo France pour le dispositif Cat Nat. Les données projetées proviennent quant à elle de l’expérience d’impact CLIMSEC.
- De **variables caractéristiques de l’exposition du territoire et des moyens de prévention mis en place**. L’existence d’un PPRi pour la commune et la part de la commune exposée au RGA ont respectivement été retenus pour la modélisation des inondations et des sécheresses.
  - Enfin, de **facteurs liés à la présence d’un aléa** caractérisés par l’historique de reconnaissances antérieures de l’état de catastrophe naturelle.

Les étapes permettant la consolidation des bases de données et l’uniformisation des mailles temporelles et géographiques sont synthétisées dans le schéma suivant.

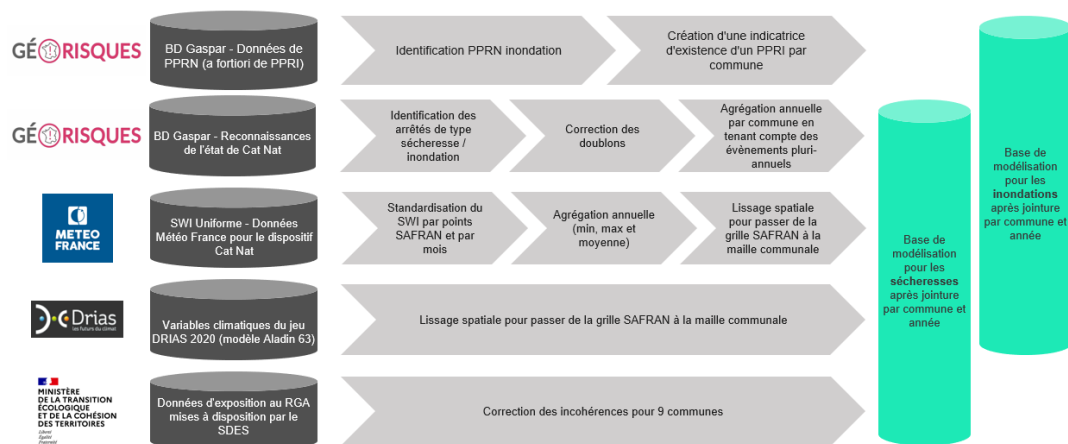


FIGURE 2 – Schéma récapitulatif de la construction des bases de modélisation pour les inondations et les sécheresses

Une fois les modèles entraînés, l’utilisation de variables explicatives projetées permet la projection de la fréquence des catastrophes naturelles à horizon 2050. Les variables d’exposition et de présence d’un aléa sont considérées constantes. Celles relatives au climat, notamment les variables de température, de pluviométrie et d’humidité des sols sont quant à elles projetées à partir des scénarios d’émissions de gaz à effet de serre du GIEC dits RCP (pour Representative Concentration Pathway). Le RCP2.6 est le scénario le plus **optimiste** en termes de réduction des émissions de GES, prévoyant une réduction rapide et continue des émissions jusqu’à ce qu’elles atteignent des niveaux très bas. RCP4.5 et RCP6.0 sont des **scénarios intermédiaires** avec des réductions plus modestes des émissions. RCP8.5 est le scénario le plus **pessimiste**, prévoyant une poursuite de l’augmentation des émissions de GES au rythme actuel.



## Modélisation et projections des catastrophes naturelles

L'objectif est de construire deux modèles, un pour les inondations et un pour les sécheresses, capables de prédire les arrêts de catastrophe naturelle pour le type de péril considéré. Ainsi, pour chaque péril considéré, un unique modèle est réalisé pour l'ensemble des communes de métropole. La variable modélisée est le nombre d'arrêts de catastrophe naturelle pris pour une commune et une année donnée. Les aspects spatio-temporels sont quant à eux pris en compte via des variables explicatives présentées précédemment.

### Inondations

Après une phase d'étude des corrélations entre variables explicatives et avec la variable à prédire, deux types de modèles sont considérés : les GLM et les *Random Forest*.

Les données disponibles en Open Data et les outils à disposition en termes de modélisation des catastrophes naturelles n'ont pas permis de réaliser des modèles particulièrement convaincants pour la modélisation des inondations. En effet, la modélisation des inondations est une tâche particulièrement complexe nécessitant des modèles sophistiqués afin de transformer l'impact d'une goutte de pluie sur le risque de survenance d'une inondation, et ce, pour chaque type d'inondation (ruissellement, crue par débordement, crue éclair...). Ils nécessitent la mise en place d'une chaîne de modélisation complexe élaborée par des experts en climatologie et météorologie.

Les modèles construits permettent tout de même de projeter la fréquence des inondations en gardant à l'esprit les défauts du modèle retenu.

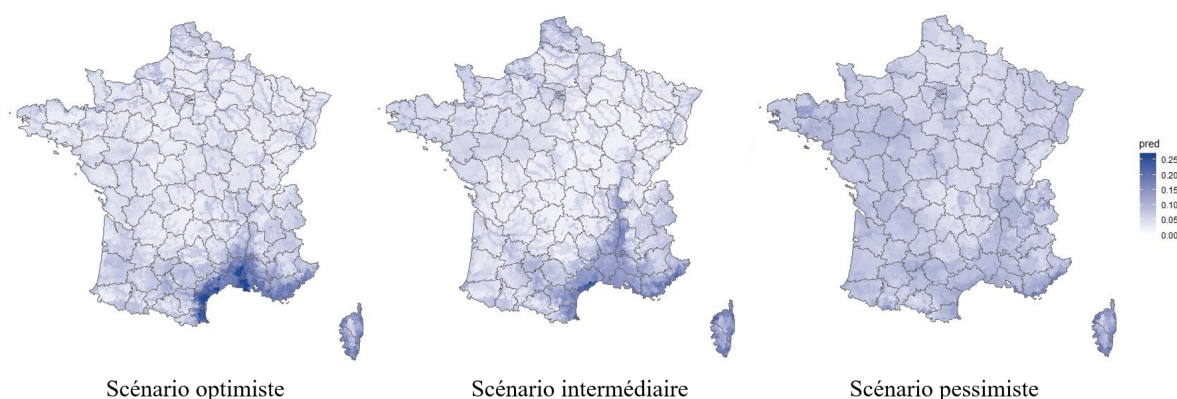


FIGURE 3 – Projections à horizon 2050 par commune de l'aléa inondation

Alors que pour le scénario optimiste certaines régions de France se démarquent tout particulièrement comme le pourtour méditerranéen et le couloir rhodanien, les projections obtenues avec le scénario le plus pessimiste apparaissent plus lissées sur l'ensemble du territoire. L'influence du PPRI sur les projections est remarquable pour le scénario optimiste et le scénario intermédiaire sur lesquels une projection de fréquence plus élevée autour des cours d'eau peut être observée. Cet effet est moins visible pour le scénario le plus pessimiste.

## Sécheresses

Comme pour les inondations, l'objectif a été de construire un modèle unique de prédiction des arrêtés de Cat Nat annuel par commune. Ici encore, ce sont les GLM et *Random Forest* qui ont été considérés.

Une analyse des corrélations entre les variables explicatives et la variable cible ainsi que des corrélations entre les variables explicatives elles-mêmes a permis de simplifier la liste des variables pertinentes pour la modélisation. Cette étape a notamment fait ressortir l'indicateur d'humidité des sols (SSWI) comme particulièrement pertinent pour la modélisation des sécheresses.

D'un point de vue macroscopique à l'échelle de la métropole, les modèles construits sont capables de capter les évolutions annuelles de reconnaissance au titre de la sécheresse, y compris pour des années fortement sinistrées comme en 2005 et en 2011. Néanmoins pour l'année 2003, exceptionnellement sinistrée, le modèle ne parvient pas à parfaitement refléter l'ampleur des épisodes de sécheresse.

Les modèles de type *Random Forest* obtiennent de légèrement meilleurs résultats en termes de généralisation et ont donc été retenus pour la réalisation des projections de fréquence. On observe néanmoins une surévaluation de fréquence pour la Bretagne et la Normandie, deux régions aujourd'hui peu sujettes aux sécheresses.

A partir de la projections des variables climatiques, et notamment de l'indicateur d'humidité des sols, la fréquence des sécheresses a été projetée selon trois scénarios du GIEC pour un horizon 2050. Les résultats par commune sont donnés par les cartes suivantes représentant pour chaque scénario, d'une part la projection de la fréquence et d'autre part le delta de fréquence par rapport à celle observée sur la période historique.

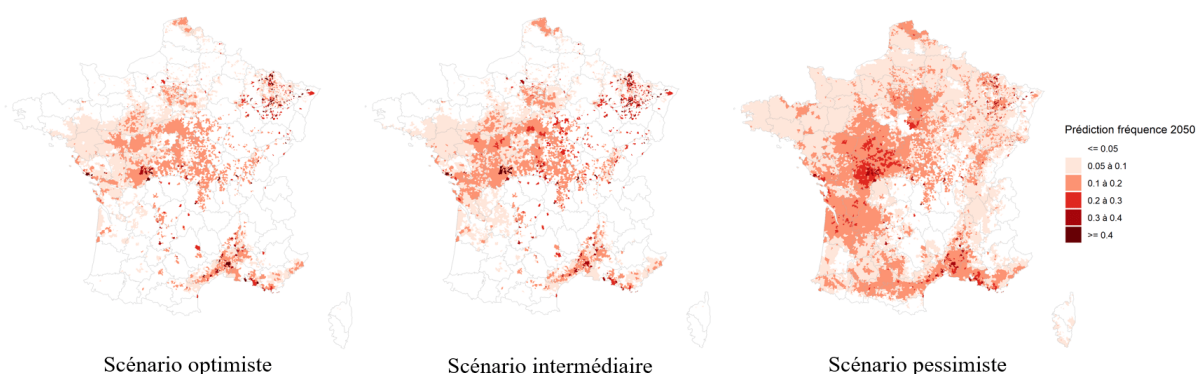


FIGURE 4 – Projections à horizon 2050 par commune de l'aléa sécheresse

Il ressort de ces cartes que les zones les plus sinistrées dans le futur sont celles déjà exposées aujourd'hui comme le croissant argileux, la région parisienne et le département du Nord. Le scénario pessimiste fait ressortir une certaine augmentation de la fréquence sur des territoires aujourd'hui peu exposés comme la Bretagne et la Normandie. Ainsi dans un monde où les températures augmenteraient de près de 5°C en 2100, l'ensemble du territoire pourrait être vulnérable aux sécheresses. Il faut néanmoins garder à l'esprit les conclusions dressées précédemment concernant la surévaluation prédite par le modèle sur ces régions.

Le second jeu de cartes permet de dresser la conclusion suivante : dans le cas du scénario le

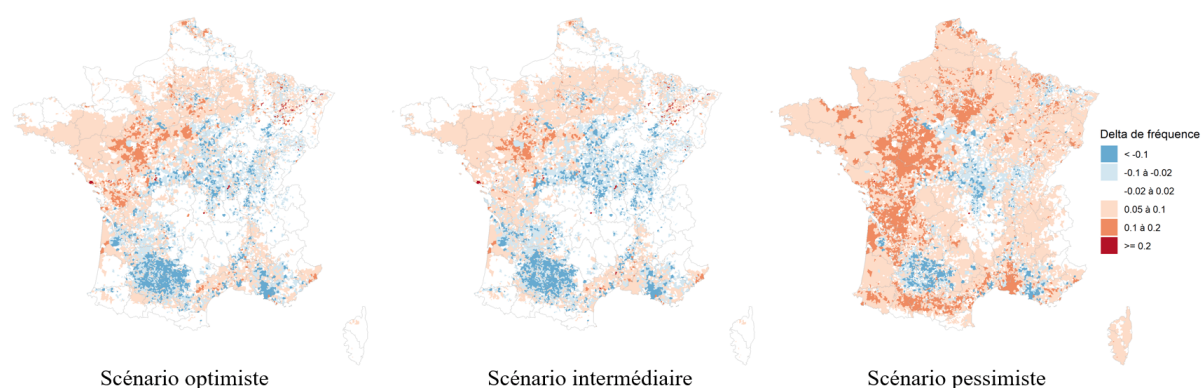


FIGURE 5 – Delta de fréquence par rapport à la période historique pour les différents scénarios retenus

plus pessimiste, la quasi-totalité des communes subirait une augmentation de la fréquence des sécheresses, y compris des régions aujourd'hui épargnées.

Il n'est pas possible de calculer l'évolution de fréquence par commune, certaine commune n'ayant jamais été sinistrée au titre de la sécheresse. L'évolution de la fréquence à horizon 2050 est donc calculée par département.

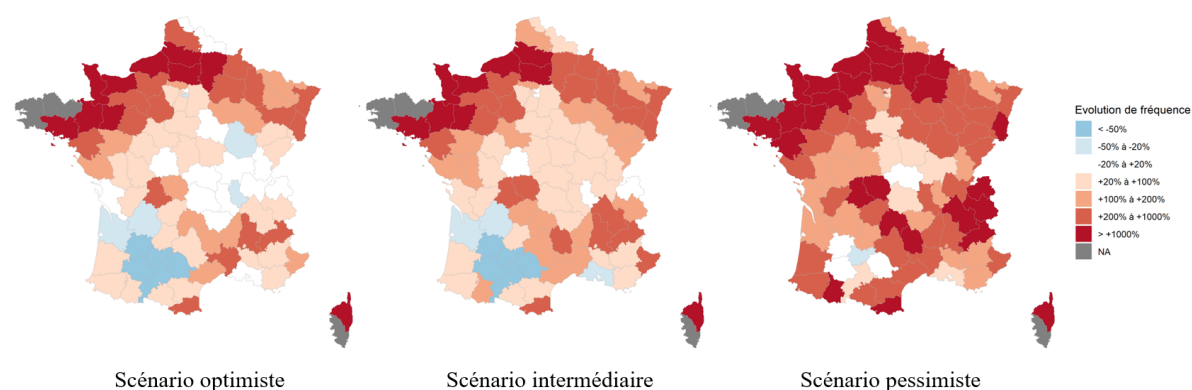


FIGURE 6 – Évolution de la fréquence des Cat Nat sécheresse à horizon 2050

Ainsi, l'augmentation des fréquences concerne la majeure partie des départements métropolitains. Certaines zones sont cependant plus marquées comme les côtes bretonnes, normandes et du Nord. Les résultats obtenus ici apparaissent comme plus pessimistes que ceux disponibles dans la littérature, notamment pour ces zones. A l'inverse, le bassin rhodanien, souvent mentionné comme susceptible de subir de fortes augmentations de fréquence dans le futur, ne semble pas se détacher des autres régions de métropole.



# Synthesis note

## Context and objectives

The latest report from the IPCC, an international body that assesses the state of scientific knowledge on climate change, shows that the human influence on current global warming is indisputable. The IPCC warns of the potentially irreversible consequences of climate change such as rising sea levels, droughts, and more frequent and intense forest fires. Even if global warming is limited, natural disasters are unfortunately expected to multiply, with significant impacts on populations and ecosystems. It is crucial to act quickly and effectively to reduce greenhouse gas emissions and thus limit the risks associated with climate change.

Climate change can have significant impacts on the financial system due to the physical risks (natural disasters: storms, floods, forest fires, droughts, etc.) and transitional risks (costs of moving to a low-carbon economy) that it represents. It is essential for financial system players to take these risks into account and to put in place strategies to mitigate them to protect their assets and their long-term profitability. Insurance groups will be particularly concerned because of their position in society and their role in disaster risk management.

The ACPR has conducted a study to raise awareness of these risks among banks and insurers. This pilot study showed that the French financial system is relatively unexposed to climate risks. However, the ACPR identified an increase in the cost of claims related to natural disasters, with some heterogeneity between departments. Actors from the insurance and banking world (the Caisse Centrale de Réassurance, France Assureurs, Covéa, etc.) have taken an interest in the evolution of damage caused by natural disasters in France in the context of climate change. These various studies predict a considerable increase in the number of claims in the coming years, especially for drought. One of the common denominators of these studies is the publication of the results of the evolution of damages on a departmental scale.

In the continuity of the work carried out by these different actors, this paper proposes to study the evolution of the frequency of certain natural disasters in metropolitan France on a communal scale for a 2050 horizon. Modelling at this fine scale makes it possible to avoid side effects and to align with the granularity used by the natural disaster scheme and the risk models used by insurers, generally at the sub-municipal scale. This paper has not studied the evolution of the costs of the claims resulting from these natural disasters. Given the data available in Open Data, the occurrence of a natural disaster is characterised by an interministerial order recognising the state of natural disaster (natural catastrophe decree).

## Hazards studied

This thesis focuses on two perils to which the French territory is particularly exposed: floods and droughts characterized by the phenomenon of shrinking-swelling of clays.

These two types of natural disasters are the first two items of expenditure of the Natural Disaster Compensation Scheme (Cat Nat scheme). This compensation scheme created in 1982 is a hybrid insurance scheme that covers damage caused by certain natural events considered uninsurable by the private market. The phenomenon of clay shrinkage-swelling has been integrated into this scheme in 1988. This scheme allows people who suffer damages during these events to be compensated by their home insurance or by public funds. To reduce the costs incurred, the French government encourages the implementation of natural risk prevention measures to minimise the impact of natural disasters.

A good understanding of the risks and their triggering factors is essential to model natural disasters and more particularly Cat Nat decrees. Moreover, the knowledge of the rules applied during the decision to declare a community in a state of natural disaster is a major tool for determining the information necessary for modelling.

In addition, the analysis of Cat Nat decrees and their geographical distribution has made it possible to identify significant inequalities in the territory's exposure to these two natural risks. Some regions are more exposed and the risk of occurrence of a certain type of natural disaster is increased. The following maps allow us to identify the territories particularly vulnerable to the risks of flooding and drought.

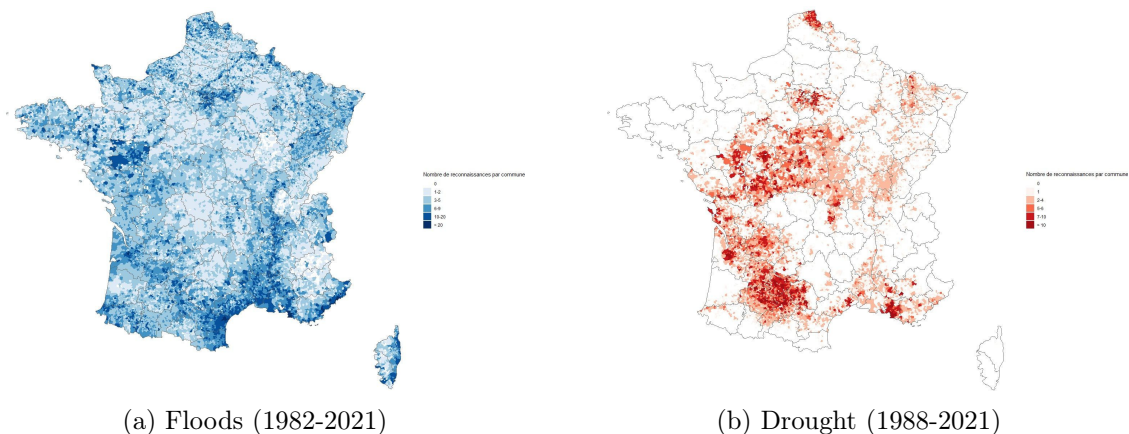


Figure 7 – Number of natural catastrophe per town for the two perils considered since their integration into the Natural Disaster Compensation Scheme

Source : Based on Gaspar data

Almost all of the communes in metropolitan France (95%) have already been declared a state of natural disaster due to flooding. Still, the regions close to major rivers (Loire, Rhône, Seine, Garonne) or the coast (Mediterranean and Atlantic coasts) are the most heavily affected by flooding. The drought is more localized on the French territory with only 35% of communes already recognized as natural disasters due to drought. The most vulnerable regions are concentrated around the South West, the Centre region, the Paris basin, and the North department.

To identify the most vulnerable territories, several maps of exposure to flooding have been conducted in recent decades, including the Atlas of Flood Zones (AZI), the Approximate Envelope of Potential Flooding (EAIP), and the Territories at High Risk of Flooding. Regarding the exposure to the phenomenon of shrinking-swelling of clays, the BRGM has produced a map of exposure to this phenomenon.

In order to prevent the occurrence of natural disasters and to limit human and material damage, France has developed natural risk management tools, notably through the control of urban planning by the municipalities through the implementation of Natural Risk Prevention Plans (PPRN in french). These plans are declined in Flood Risk Prevention Plan (PPRI in french).

## Construction of modelling and projection databases

The first objective is to model, for a certain space-time grid, the natural disasters selected from explanatory variables. In a second step, these explanatory variables are projected to a 2050 horizon in order to realise a projection of natural disasters for this same horizon. Thus, any explanatory variable used in the modelling phase must be available or projectable for a 2050 horizon.

In order to model natural disasters, it was necessary to find data available in Open Data, to collect them and then to reprocess them in order to standardise the geographical and temporal grids. The processing and search for reliable Open Data sources with a long history and sufficient temporal and geographical granularity was an important part of this thesis.

The modelling bases, one for each considered peril, are constituted of information that would allow to explain and predict the number of natural disaster decrees per commune. Thus, each modelling base is composed of :

- **Data of sinistrality of type decrees of natural disaster** obtained from BD Gaspar database which lists all the interministerial decrees on this subject since 1982. After annual processing and aggregation, it allows us to count the number of natural disasters that have occurred each year since the creation of the system for each commune in mainland France. However, the amounts of associated claims are not available in Open Data, which limits the study to figures on the frequency of natural disasters.
- From **climatic variables** (minimum, maximum and average temperatures, rainfall, soil moisture indicators).
  - The temperature and rainfall variables are derived from the Aladin 63 regional climate model (RCM) of the DRIAS 2020 set. The results of this model are, within the framework of the DRIAS project, subject to a bias correction with respect to real observations. These climate variables are available for an annual time step for both a historical period and a projection period and are projected onto the SAFRAN grid, consisting of 8981 points in Metropolitan France with a resolution of 8km.
  - The Standardised Soil Wetness Index (SSWI) comes from the Météo France database for the Cat Nat system. The projected data come from the CLIMSEC impact experiment.

- De **variables characteristic of the exposure of the territory and the prevention means implemented**. The existence of a PPRi for the commune and the share of the commune exposed to the RGA were respectively retained for the modelling of floods and droughts.
- Finally, **factors related to the presence of a hazard** characterised by the history of previous natural disaster recognitions.

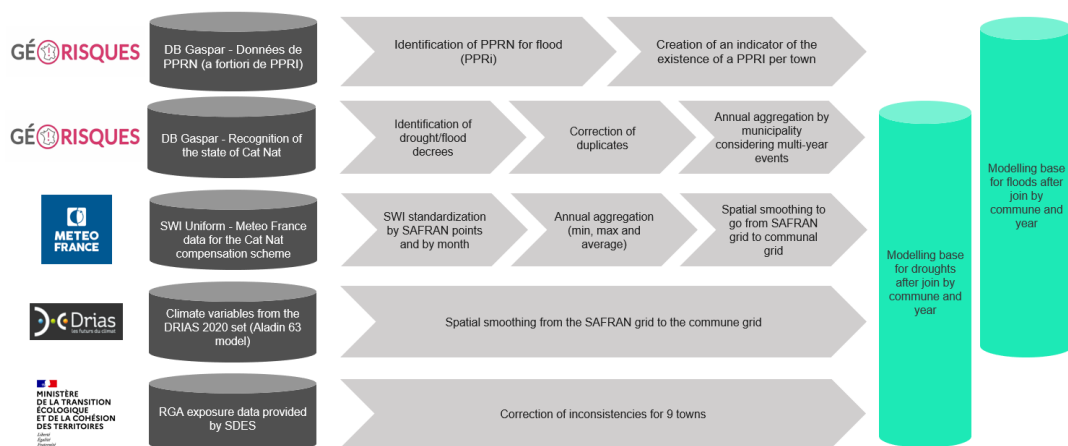


Figure 8 – Summary diagram of the construction of the modelling bases for floods and droughts

Once the models have been trained, the use of projected explanatory variables allows the projection of the frequency of natural disasters to 2050. Exposure and hazard variables are held constant. Climate variables, including temperature, rainfall, and soil moisture, are projected from the IPCC Representative Concentration Pathway (RCP) greenhouse gas emission scenarios. RCP2.6 is the most **optimistic scenario** in terms of GHG emission reductions, projecting a rapid and continuous reduction in emissions until they reach very low levels. RCP4.5 and RCP6.0 are **intermediate scenarios** with more modest emission reductions. RCP8.5 is the most **pessimistic scenario**, predicting a continued increase in GHG emissions at the current rate.

## Modelling and projections of natural disasters

The objective is to build two models, one for floods and one for droughts, capable of predicting natural disaster orders for the type of hazard considered. Thus, for each hazard considered, a single model is produced for all the municipalities in mainland France. The variable modelled is the number of natural disaster decrees that have occurred for a given municipality and a given year. The spatio-temporal aspects are taken into account via the explanatory variables presented previously.

### Floods

After a phase of study of the correlations between the explanatory variables and the variable to be predicted, two types of models are considered: the GLM and the Random Forest.



The data available in Open Data and the tools available in terms of natural disaster modelling did not allow us to produce particularly convincing models for flood modelling. Indeed, flood modelling is a particularly complex task requiring sophisticated models to transform the impact of a raindrop on the risk of flooding for each type of flood (runoff, overflow, flash flood, etc.). They require the implementation of a complex modelling chain developed by experts in climatology and meteorology.

The models constructed nevertheless allow the frequency of floods to be projected, bearing in mind the shortcomings of the model selected.

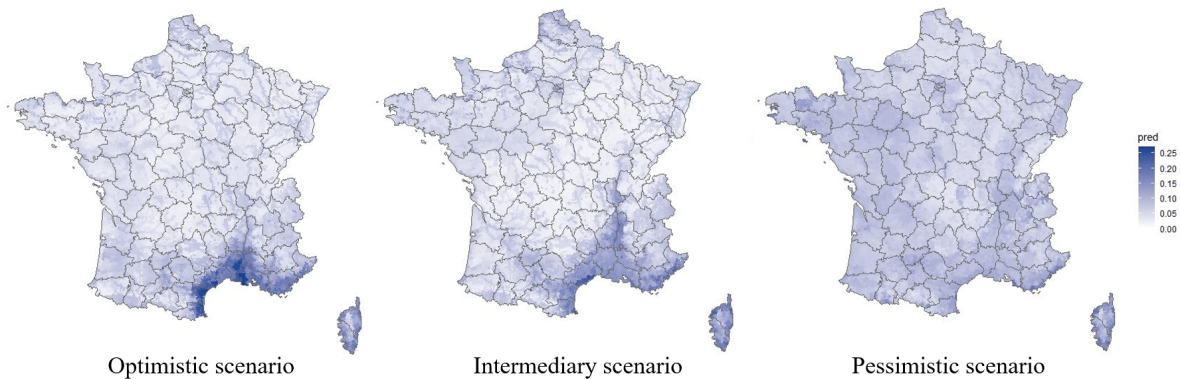


Figure 9 – Projections for 2050 by municipality of the flood hazard

While for the optimistic scenario some regions of France stand out in particular, such as the Mediterranean and the Rhone corridor, the projections obtained with the most pessimistic scenario appear smoother over the whole territory. The influence of the PPRI on the projections is remarkable for the optimistic scenario and the intermediate scenario in which a higher frequency projection around the rivers can be observed. This effect is less visible in the most pessimistic scenario.

## Droughts

As for floods, the objective was to build a single model for predicting annual Cat Nat decrees by town. Here again, GLM and Random Forest were considered.

An analysis of the correlations between the explanatory variables and the target variable, as well as the correlations between the explanatory variables themselves, made it possible to simplify the list of relevant variables for the modelling. This step highlighted the soil moisture indicator (SSWI) as particularly relevant for drought modelling.

From a macroscopic point of view at the scale of the metropolis, the models constructed are capable of capturing the annual evolution of drought recognition, including for years with a high level of disaster such as 2005 and 2011. Nevertheless, for the exceptionally disaster-prone year 2003, the model fails to perfectly reflect the extent of the drought episodes.

The Random Forest type models obtain slightly better results in terms of generalisation and have therefore been retained for the frequency projections. Nevertheless, an overestimation of frequency is observed for Brittany and Normandy, two regions that are currently less prone to

droughts.

Based on the projections of the climatic variables, and in particular the soil moisture indicator, the frequency of droughts was projected according to three IPCC scenarios for a 2050 horizon. The results per municipality are given by the following maps representing for each scenario, on the one hand the frequency projection and on the other hand the frequency delta compared to the one observed over the historical period.

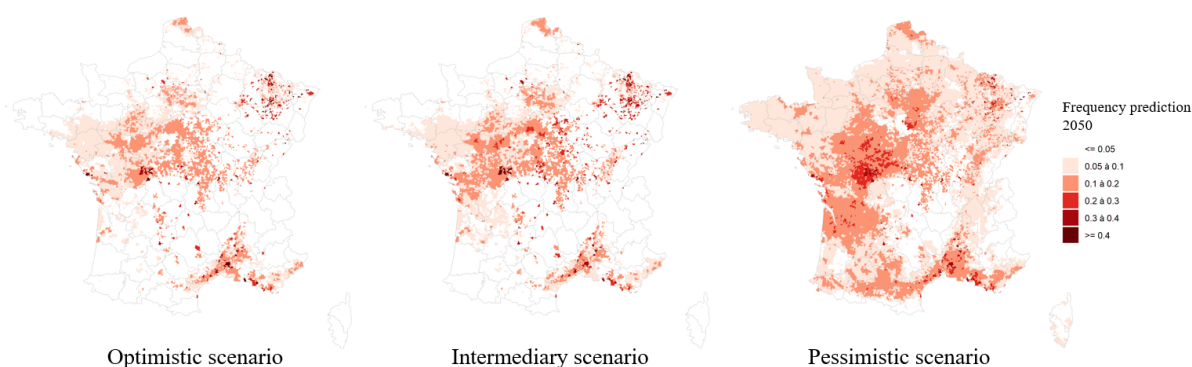


Figure 10 – Projections to 2050 by commune of the drought hazard

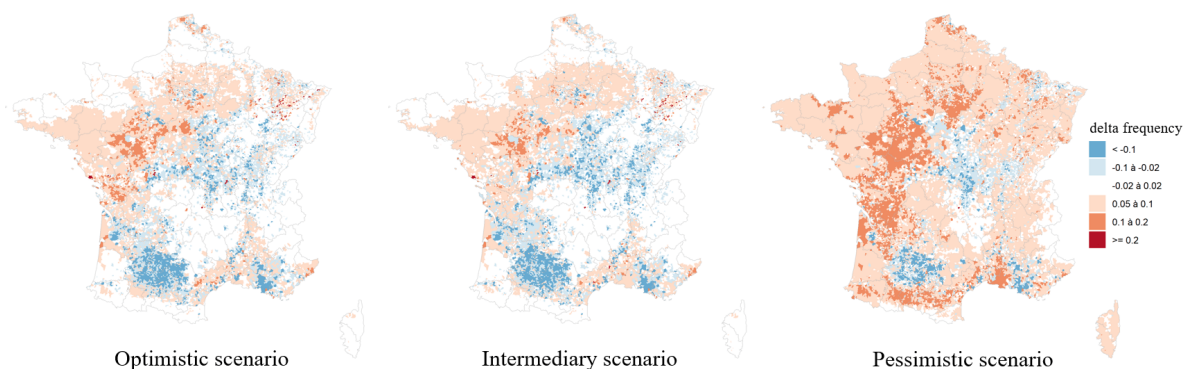


Figure 11 – Frequency delta compared to the historical period for the different scenarios

The maps show that the most affected areas in the future are those already exposed today, such as the clay crescent, the Paris region and the Nord department. The RCP8.5 scenario shows a certain increase in frequency in areas that are not very exposed today, such as Brittany and Normandy. Thus, in a world where temperatures would increase by almost 5°C in 2100, the whole territory could be vulnerable to droughts. Nevertheless, the conclusions drawn above concerning the overestimation predicted by the model for these regions should be borne in mind.

The second set of maps leads to the following conclusion: in the worst-case scenario, almost all municipalities would experience an increase in drought frequency, including regions that are currently drought-free.

It is not possible to calculate the evolution of frequency per commune, as some communes have never been affected by drought. The evolution of the frequency by 2050 is therefore calculated by department.

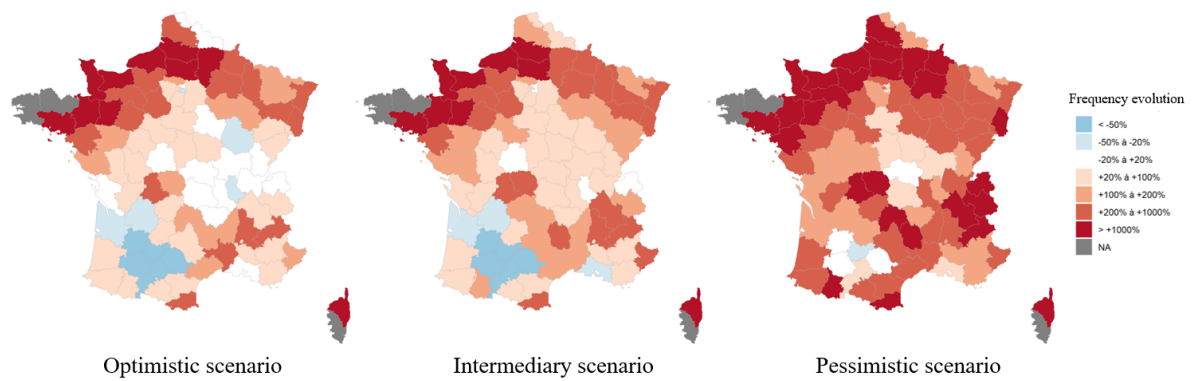


Figure 12 – Evolution of the frequency of Cat Nat droughts by 2050

Thus, the increase in frequency concerns most of the metropolitan departments. Some areas are however more marked, such as the Breton, Norman, and Northern coasts. The results obtained here appear to be more pessimistic than those available in the literature, particularly for these areas. Conversely, the Rhone basin, which is often mentioned as likely to experience a sharp increase in frequency in the future, does not seem to stand out from the other regions of mainland France.



# Remerciements

Je remercie tout d'abord les associés de l'équipe actuariat de Sia Partners, Michael DONIO, Ronan DAVIT et Pierre-Antoine MERLE pour l'opportunité professionnelle qu'ils m'ont offerte.

Je remercie également l'ensemble de l'équipe Actuarial and Quantitative Services pour leur accueil. Je tiens à remercier tout particulièrement Romain LAILY, Claire NICOLLE et Julien LE BLOA pour leur encadrement, leurs conseils et leur expertise qui m'ont permis de mener à bien ce mémoire.

Enfin, je remercie mon encadrant académique Christian ROBERT pour ses commentaires judicieux et le temps qu'il a accordé à la relecture de ce mémoire.



# Table des matières

<b>Résumé</b>	<b>i</b>
<b>Abstract</b>	<b>ii</b>
<b>Note de synthèse</b>	<b>iii</b>
<b>Synthesis note</b>	<b>xi</b>
<b>Remerciements</b>	<b>xix</b>
<b>Table des matières</b>	<b>xxi</b>
<b>Introduction</b>	<b>1</b>
<b>1 Changement climatique &amp; assurance</b>	<b>3</b>
1.1 Le changement climatique . . . . .	3
1.1.1 Les travaux du GIEC . . . . .	4
1.1.2 Scénarios d'émissions de gaz à effet de serre . . . . .	5
1.2 Les assureurs français face au changement climatique . . . . .	11
1.2.1 Classification du risque climatique . . . . .	11
1.2.2 Les conséquences du risque physique pour les assureurs . . . . .	13
1.2.3 Les conséquences du risque de transition pour les assureurs . . . . .	15
1.3 L'exercice pilote de l'ACPR . . . . .	17
1.3.1 Contexte et caractéristiques principales de l'exercice pilote . . . . .	17
1.3.2 Un risque de transition plutôt modéré pour les assureurs . . . . .	17
1.3.3 Une sinistralité liée aux risques physiques en hausse . . . . .	18
1.4 Problématique et état de l'art . . . . .	22
1.4.1 Contexte et enjeux du mémoire . . . . .	22

1.4.2	État de l'art . . . . .	24
<b>2</b>	<b>Les inondations et sécheresses en France</b>	<b>31</b>
2.1	Le régime d'indemnisation des catastrophes naturelles . . . . .	31
2.1.1	Création du régime . . . . .	31
2.1.2	Champs d'application . . . . .	32
2.1.3	Les primes . . . . .	33
2.1.4	Procédure d'indemnisation . . . . .	34
2.1.5	Le montant des franchises . . . . .	35
2.2	Les inondations . . . . .	37
2.2.1	Les types d'inondation . . . . .	37
2.2.2	Facteurs déclenchants et aggravants . . . . .	38
2.2.3	Exposition du territoire . . . . .	38
2.2.4	Gestion et prévention du risque inondation . . . . .	41
2.3	Les sécheresses (phénomène de retrait-gonflement des argiles) . . . . .	46
2.3.1	Description du phénomène . . . . .	46
2.3.2	Exposition du territoire . . . . .	46
2.3.3	Prévention du risque . . . . .	48
2.4	Statistiques du régime d'indemnisation des catastrophes naturelles . . . . .	51
2.4.1	Étude des arrêtés de reconnaissance de l'état de catastrophe naturelle . . . . .	51
2.4.2	Étude de la sinistralité Catastrophe Naturelle . . . . .	55
2.4.3	Couverture du territoire par les plans de prévention des risques . . . . .	58
<b>3</b>	<b>Les données de modélisation et de projection</b>	<b>61</b>
3.1	Les données de sinistralité . . . . .	62
3.1.1	La base de données GASPAR . . . . .	62
3.1.2	Les données de type "Reconnaissance de l'état de catastrophes naturelles" . . . . .	62
3.2	Les données climatiques . . . . .	64
3.2.1	Les modèles climatiques . . . . .	64
3.2.2	Les projets Euro-Cordex et DRIAS . . . . .	65
3.2.3	Les modèles mis à disposition et choix . . . . .	65
3.2.4	Les indicateurs DRIAS . . . . .	67
3.3	Un indicateur d'humidité des sols : le SSWI . . . . .	69



3.3.1	Le projet CLIMSEC . . . . .	69
3.3.2	L'indicateur SWI mis à disposition par Météo France . . . . .	71
3.4	Les données d'exposition aux risques . . . . .	73
3.4.1	Exposition aux inondations . . . . .	73
3.4.2	Exposition au retrait-gonflement des argiles . . . . .	73
3.5	Retraitements et consolidation des données . . . . .	76
3.5.1	Déduplication et agrégation des données GASPAR Cat Nat . . . . .	76
3.5.2	Retraitement de l'indicateur d'humidité des sols . . . . .	77
3.5.3	Lissage des données climatiques . . . . .	78
3.5.4	Correction des RGA . . . . .	79
3.6	Statistiques descriptives de la base de modélisation . . . . .	82
3.6.1	Quelques caractéristiques de la base de données . . . . .	82
3.6.2	Corrélation de variables . . . . .	82
3.6.3	Évolution des reconnaissances de l'état de catastrophe naturelle . . . . .	84
3.6.4	Étude des indicateurs climatiques et météorologiques . . . . .	84
<b>4</b>	<b>Modélisation et résultats</b>	<b>89</b>
4.1	Modélisation . . . . .	89
4.1.1	GLM . . . . .	89
4.1.2	Random Forest . . . . .	90
4.1.3	Critères d'évaluation des modèles . . . . .	92
4.2	Modèles et résultats pour les inondations . . . . .	93
4.2.1	Étude des corrélations . . . . .	93
4.2.2	Résultats et comparaison des modèles . . . . .	93
4.2.3	Évolution des variables climatiques à horizon 2050 . . . . .	97
4.2.4	Projection de la fréquence à horizon 2050 avec les 3 scénarios du GIEC . . . . .	98
4.3	Modèles et résultats pour la sécheresse . . . . .	101
4.3.1	Étude des corrélations . . . . .	101
4.3.2	Résultats et comparaison des modèles . . . . .	102
4.3.3	Évolution des variables climatiques à horizon 2050 . . . . .	107
4.3.4	Projection de la fréquence à horizon 2050 avec les 3 scénarios du GIEC . . . . .	107
4.3.5	Limites et pistes d'amélioration . . . . .	111

---

<b>Conclusion</b>	<b>113</b>
<b>Bibliographie</b>	<b>117</b>
<b>Glossaire</b>	<b>119</b>
<b>Table des figures</b>	<b>121</b>
<b>Liste des tableaux</b>	<b>125</b>
<b>Annexes</b>	<b>127</b>
<b>A Districts hydrographiques</b>	<b>127</b>
<b>B Correction et retraitement des données</b>	<b>129</b>
<b>C Graphiques et études descriptives des données</b>	<b>133</b>
C.1 Le SSWI . . . . .	133

# Introduction

La Conférence de Paris de 2015 sur les changements climatiques (COP 21) et l'accord de Paris illustrent la détermination de nombreux pays à mettre en œuvre des moyens de lutte contre le changement climatique. Malgré les engagements pris par les États, le GIEC alarme dans son dernier rapport sur une accélération de l'augmentation des températures. Dans ce contexte, une hausse toujours plus importante des dommages causés par les catastrophes naturelles a été observée. En France, si les dommages aux biens assurés restent relativement stables, les récents événements climatiques rappellent l'exposition du territoire français. Bien que le lien direct entre l'intensité d'un aléa naturel et le changement climatique soit difficile à établir, le GIEC estime comme probable l'augmentation de la sévérité et de la fréquence des précipitations et des sécheresses à la fin du siècle.

Plusieurs régulateurs et superviseurs ont alerté les acteurs financiers concernant le risque climatique et son impact potentiel sur le secteur financier et l'économie en général. En mai 2021, l'ACPR publiait les résultats de l'exercice climatique conduit de juillet 2020 à avril 2021. Cet exercice s'inscrit dans une démarche internationale de sensibilisation et d'évaluation du risque climatique sur le secteur financier, également suivie par les régulateurs britanniques et néerlandais, ainsi que par plusieurs institutions européennes et internationales (BCE, EIOPA, Comité de Bale...).

Les effets du changement climatique sur le secteur de l'assurance sont divers, complexes et incertains. Afin de traduire le changement climatique en risques financiers, la littérature introduit le concept de facteurs de risque climatique. Il existe un large consensus dans la littérature sur le fait que ces facteurs peuvent être regroupés en trois catégories :

- Le risque physique qui résulte des effets directs du changement climatique sur les biens et les personnes ;
- Le risque de transition qui correspond aux conséquences des politiques permettant la transition vers une économie bas-carbone ;
- Et le risque de responsabilité (juridique et de réputation).

L'exercice mené par l'ACPR est inédit sur le marché français et a regroupé 9 groupes bancaires et 15 groupes d'assurance sur la base du volontariat. Il couvre les risques physiques et de transition sur un horizon de 30 ans. Pour cela, plusieurs scénarios en accord avec les orientations du NGFS ont été retenus. Avec l'aide de la Caisse Centrale de Réassurance, les assureurs ont réalisé une modélisation de leur portefeuille physique et ainsi établi une estimation de la sinistralité à la maille départementale pour les périls inondation, sécheresse et submersions marines.

L'exercice conclut à une forte hausse de la sinistralité liée au risque physique.

Ce mémoire a pour objectif de mettre en œuvre une démarche permettant d'établir une évolution de la fréquence des périls sécheresse et inondation pour un horizon de moyen terme (2050) à une maille communale. La modélisation à cette maille fine permet d'éviter les effets de bord et de s'aligner sur la granularité utilisée par le dispositif de reconnaissance des catastrophes naturelles et les modèles de risque utilisés par les assureurs, généralement à la maille infra-communale.

Cette simulation d'évolution de la fréquence reposera sur des modèles propres à chaque péril. L'objectif est de construire deux modèles, un pour les inondations et un pour les sécheresses, capables de prédire les arrêtés de catastrophe naturelle pour le type de péril considéré. Ainsi, pour chaque péril considéré, un unique modèle est réalisé pour l'ensemble des communes de métropole. La variable modélisée est le nombre d'arrêtés de catastrophe naturelle survenues pour une commune et une année donnée. Les aspects spatio-temporels sont quant à eux pris en compte via des variables explicatives climatiques, d'expositions du territoires ou de démographie.

Une projection à horizon 2050 sera réalisée à partir différents scénarios définis par le GIEC (du plus au moins optimiste : RCP2.6, RCP4.5 et RCP8.5). Une évolution de la fréquence des catastrophes naturelles par rapport à la période actuelle pourra ensuite en être déduite pour chaque commune. Les résultats pourront être comparés avec les études disponibles dans la littérature.

# Chapitre 1

## Changement climatique & assurance

Le changement climatique est aujourd'hui une réalité. Il affecte notre planète, notre santé ainsi que notre économie.

Depuis la révolution industrielle, l'augmentation de la concentration de gaz à effet de serre induite par l'activité humaine a déjà eu une incidence visible sur le climat. En 2020, les scientifiques évaluent l'augmentation des températures moyennes planétaires par rapport à l'ère pré-industrielle à  $1,25^{\circ}\text{C}$ <sup>1</sup>. Ils estiment que cette augmentation pourrait atteindre les  $5^{\circ}\text{C}$  d'ici la fin du siècle. Par ailleurs, une élévation du niveau de la mer et une acidification des eaux superficielles des océans ont été observées par les scientifiques sur les dernières décennies.

Ces signaux d'alarme ont conduit de nombreux gouvernements à signer l'Accord de Paris en 2015 afin de définir un cadre mondial de lutte contre le changement climatique. L'objectif de cet accord est de maintenir l'augmentation des températures en dessous de  $+2^{\circ}\text{C}$  d'ici à 2100 par rapport à l'ère pré-industrielle, de préférence en dessous des  $+1,5^{\circ}\text{C}$ . Afin d'y parvenir les pays devront, selon le GIEC, réduire très fortement leurs émissions de gaz à effet de serre et atteindre un niveau d'émissions nettes nulles en 2050.

Les effets du changement climatique et de cette transition pour en limiter les conséquences entraîneront des répercussions sur l'économie mondiale et pourraient constituer un risque pour le système financier. L'ACPR et d'autres régulateurs et banques centrales se sont alors emparés du sujet afin d'évaluer l'exposition des acteurs financiers (banques et assurances notamment) et de les sensibiliser aux risques financiers qui pourraient découler du changement climatique.

### 1.1 Le changement climatique

Cette partie est dédiée à la présentation du GIEC et de ses conclusions concernant le changement climatique. Les scénarios du GIEC, régulièrement cités dans la presse et dans les articles scientifiques, seront également présentés dans cette partie.

---

1. <https://www.ecologie.gouv.fr/impacts-du-changement-climatique-atmosphere-temperatures-et-precipitations>

### 1.1.1 Les travaux du GIEC

#### Présentation du GIEC

Le Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat (GIEC) a été créé en 1988 par Organisation Météorologique Mondiale (OMM) et le Programme des Nations Unies pour l'Environnement (PNUE), deux institutions des Nations Unies. Il s'agit d'une organisation de gouvernements membres des Nations Unies qui compte aujourd'hui 195 membres. Ce groupe a été fondé en vue de « *fournir des évaluations détaillées de l'état des connaissances scientifiques, techniques et socio-économiques sur les changements climatiques, leurs causes, leurs répercussions potentielles et les stratégies de parade* »<sup>1</sup>. Il est le principal organisme international pour l'évaluation du changement climatique.

Le GIEC est composé d'un secrétariat, d'un Bureau élu par cycle, de trois groupes de travail (*Working Group* WG) et d'une *Task Force*. Chaque groupe de travail se focalise sur un sujet en particulier en lien avec le changement climatique :

- Le groupe de travail I évalue les aspects scientifiques de l'évolution du climat et du système climatique.
- Le groupe de travail II évalue les impacts, l'adaptation et les vulnérabilités liés au changement climatique.
- Enfin, le groupe de travail III se concentre sur l'évaluation des méthodes d'atténuation du changement climatique et de réduction des émissions de gaz à effet de serre.

Depuis sa création, le GIEC fonctionne par cycle et en est actuellement à son 6ème. L'une des activités principales du GIEC consiste à réaliser à intervalles réguliers une évaluation des connaissances sur le changement climatique. Ainsi, pour chaque cycle, il produit :

- Des rapports spéciaux qui fournissent une évaluation sur un sujet spécifique ;
- Un rapport d'évaluation<sup>2</sup>.

Chaque rapport d'évaluation se compose des contributions des trois groupes de travail, des rapports spéciaux et d'un rapport de synthèse<sup>3</sup>. Les différents éléments composant le 6ème rapport ont été publiés entre mi-2021 et mi-2022, à l'exception du rapport de synthèse qui n'a pas encore été publié à ce jour.

La contribution de chacun des groupes de travail comporte : un résumé à l'intention des décideurs<sup>4</sup>, un résumé technique<sup>5</sup> et le rapport complet<sup>6</sup> qui, en général, est long de quelques milliers de pages. Pour rédiger ce rapport d'évaluation, des experts et chercheurs donnent bénévolement de leur temps en tant qu'auteurs du GIEC. Ils évaluent des milliers d'articles sur le climat et le changement climatique publiés chaque année. Ce travail leur permet de fournir un résumé complet des connaissances sur le changement climatique, ses impacts et sur les méthodes d'atténuation du changement climatique et de réduction des émissions de gaz à effet de serre. Un examen ouvert et transparent par des experts et des gouvernements du monde entier est une partie essentielle du processus du GIEC. Il permet de garantir une évaluation complète et

---

1. Site internet du GIEC [www.ipcc.ch](http://www.ipcc.ch)

2. *Assessment Report*, AR

3. *Synthesis Report*, SYR

4. *Summary for policymakers*, SPM

5. *Technical summary*, TS

6. *Full report*, FR

objective et de refléter un éventail diversifié de points de vue et d'expertises.

Afin de refléter l'incertitude inhérente au changement climatique, le GIEC utilise des qualificatifs indiquant le niveau de confiance pour chaque assertion faite dans ses rapports. Cela permet également de représenter l'ensemble des points de vue de la littérature.

## Les conclusions du GIEC

Dans son dernier rapport [31], le groupe III du GIEC établit une liste de points essentiels à retenir concernant l'état actuel du climat et les futurs possibles.

Le GIEC rappelle que les changements climatiques récents ont été généralisés, rapides et intensifiés et sont sans précédent depuis des milliers d'années. Ces changements induisent une augmentation de la fréquence et de la sévérité des phénomènes météorologiques extrêmes, tels que les vagues de chaleur, les fortes pluies et les sécheresses. Ils contribuent également à la perte d'oxygène et à l'acidification des océans. Le changement climatique est généralisé ; il affecte la planète dans son ensemble et aucune région n'est épargnée.

Il est incontestable que l'activité humaine est responsable du changement climatique. Les preuves permettant d'attribuer les événements météorologiques et climatiques extrêmes à l'influence humaine se sont renforcées depuis le dernier rapport (5ème rapport publié en 2014).

Concernant les conséquences du changement climatique à venir, le GIEC travaille avec des scénarios d'émissions et des trajectoires socio-économiques. Nous présenterons plus en détail ces scénarios dans la partie suivante.

Quel que soit le scénario considéré, la température à la surface de la Terre continuera de croître jusqu'à 2050. Limiter le réchauffement à 1,5°C sera hors de portée à moins que les émissions de dioxyde de carbone et d'autres gaz à effet de serre ne soient réduites immédiatement, rapidement et à grande échelle. Le seuil des 2°C sera probablement dépassé d'ici la fin du siècle.

Ce réchauffement climatique aura des conséquences d'autant plus importantes et généralisées que le niveau de réchauffement est élevé. Il est très probable que l'intensité et la fréquence des événements météorologiques extrêmes s'accroîtront. Les vagues de chaleurs, pluies intenses, méga-feux... seront plus nombreux et auront de graves conséquences pour les personnes ainsi que pour l'agriculture, la faune et la flore.

La France, bien que moins affectée que d'autres régions du monde, n'est et ne sera pas épargnée par les effets du changement climatique. Située dans la région WCE *Western and Central Europe*, une augmentation des sécheresses et des fortes précipitations a déjà été observée en France métropolitaine depuis 1950, comme en témoignent les cartes 1.1 issues du résumé de synthèse du groupe I à l'intention des décideurs [31].

### 1.1.2 Scénarios d'émissions de gaz à effet de serre

Les scénarios du GIEC sont régulièrement cités dans les études et articles qui s'intéressent au changement climatique et à son évolution. Ces scénarios représentent des évolutions possibles du climat pour un horizon long. Ils ne représentent pas une prédiction du futur mais bien un panel de futurs plausibles.

Depuis sa création, le GIEC a proposé plusieurs jeux de scénarios en fonction de l'état des

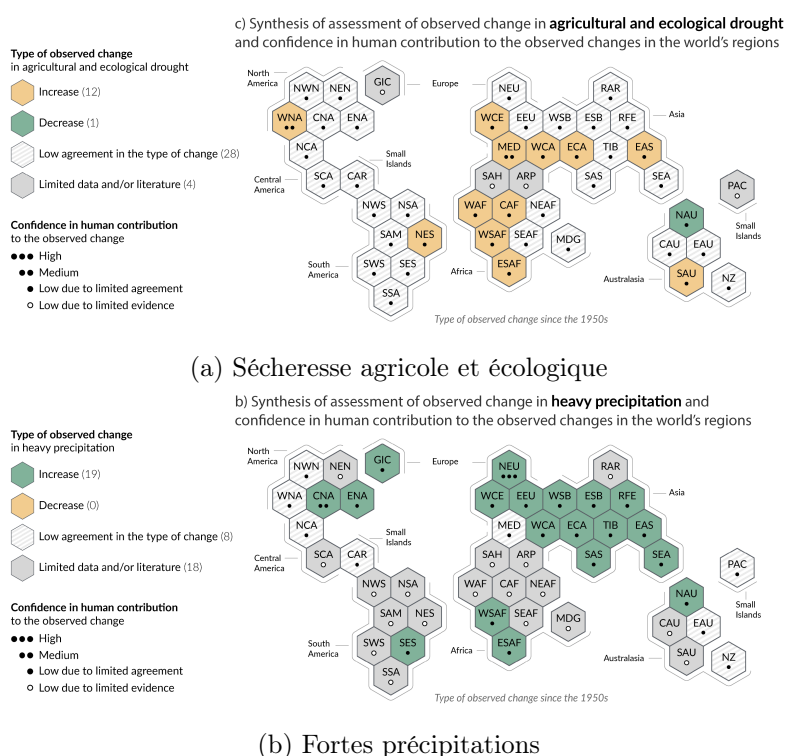


FIGURE 1.1 – Synthèse de l'évaluation des changements observés  
Sources : Figure SPM.3 [31]

connaissances disponibles. Les tous premiers scénarios ont été publiés lors de la parution du premier rapport du GIEC en 1990.

Dans cette partie, nous nous concentrerons principalement sur les scénarios RCP<sup>1</sup> et SSP<sup>2</sup> respectivement utilisés dans le 5ème rapport et les 5ème et 6ème rapports. Les scénarios précédents, utilisés dans le 4ème rapport, nommés SRES<sup>3</sup>, seront également présentés car ils sont encore utilisés dans certaines modélisations climatiques.

### Les anciens scénarios SRES

Les scénarios SRES ont été introduits en 2000 à l'occasion de la publication du rapport spécial [29] à leur nom. Ces scénarios reposent sur une approche séquentielle : les scénarios socio-économiques d'évolution de nos sociétés et mode de vie sont traduits en scénarios climatiques.

Pour cela des scénarios socio-économiques (qui incluent les évolutions des économies nationales, la démographie, l'offre technologique, les choix énergétiques, les comportements individuels...) ont été définis à partir de la synthèse des travaux de modélisation économique de l'époque. Ils ont ensuite été traduits en scénarios d'émission de GES qui, à partir des connaissances des cycles biogéochimiques, permettent de dresser des scénarios de concentration de GES. Enfin, des modèles climatiques permettent d'établir des projections climatiques.

1. *Representative Concentration Pathways*  
 2. *Shared Socioeconomic Pathways*  
 3. Du nom du rapport spécial *Special Report on Emissions Scenarios* à leur sujet



Les scénarios SRES se répartissent en quatre grandes familles :

- La famille de scénarios A1 décrit un monde avec une population en croissance jusqu'au milieu du 21ème siècle suivi d'un déclin. Cette évolution de la démographie s'accompagne de l'introduction de nouvelles technologies. Ces scénarios proposent une réduction des inégalités Nord-Sud. Cette famille de scénarios se décompose en 3 sous catégories : A1FI (accent mis sur les combustibles fossiles), A1T (accent mis sur les sources d'énergie autres que fossiles) et A1B (équilibre entre les sources d'énergie).
- Les scénarios de la famille A2 décrivent une vision très hétérogène du développement des différentes régions du monde. Ils prévoient notamment un accroissement continu de la population avec une convergence lente.
- La famille de scénarios B1 décrit un monde où la population croît jusqu'au milieu du siècle puis décroît (comme pour la famille A1). L'accent est placé sur l'environnement et l'utilisation judicieuse des ressources et des matières premières.
- La famille de scénarios B2 décrit un monde où la population continue de croître mais à un rythme moins soutenu que dans la famille A2. Cette croissance s'accompagne d'un développement par région soucieux de l'environnement et du développement durable.

Ces scénarios ont été définis à la fin des années 1990 dans un contexte socio-économique différent de celui du 21ème siècle. Le GIEC a donc décidé de définir un nouveau jeu de scénarios capable de mieux prendre en compte ce nouveau contexte.

### Les scénarios de concentration de GES : RCP

Introduit lors du 5ème rapport, ce nouveau jeu de scénarios répond à deux enjeux du GIEC. Premièrement, ils représentent une vision plus actuelle du contexte mondial et deuxièmement, la nouvelle approche adoptée par le GIEC permet aux économistes et aux climatologues de ne plus travailler de manière séquentielle mais parallèle.

Pour cela, les scientifiques ont défini ex ante des profils de référence appelés RCP (*Representative Concentration Pathways*) représentatifs de l'évolution de la concentration des gaz à effet de serre. Ces profils de référence basés sur le forçage radiatif servent de base aux travaux des climatologues, qui établissent les projections climatiques, et des sociologues et économistes qui élaborent des scénarios cohérents avec les RCP. Le forçage radiatif est défini comme "*le changement du bilan radiatif (rayonnement descendant moins rayonnement montant) au sommet de la troposphère (10 à 16 km d'altitude), dû à un changement d'un des facteurs d'évolution du climat comme la concentration des gaz à effet de serre*" [41]. Il s'exprime en  $Wm^{-2}$  soit une puissance par unité de surface.

La figure 1.2 décrit les quatre scénarios RCP retenus sur la centaine proposée. Ces scénarios se répartissent en deux scénarios extrêmes (RCP2.6 et RCP8.5) et deux scénarios intermédiaires (RCP4.5 et RCP6).

Le scénario RCP2.6 est le plus optimiste et est le seul qui permettrait d'atteindre les objectifs fixés par l'Accord de Paris<sup>1</sup>. Il s'agit d'un scénario à très faibles émissions intégrant les effets de

1. "*Traité international contraignant sur le changement climatique*" adopté en 2015 à l'occasion de la COP21. Il a pour objectif de "*limiter le réchauffement climatique à un niveau bien inférieur à 2, de préférence à 1,5 degré Celsius, par rapport au niveau préindustriel.*" <https://unfccc.int/fr/a-propos-des-ndcs/1-accord-de-paris>

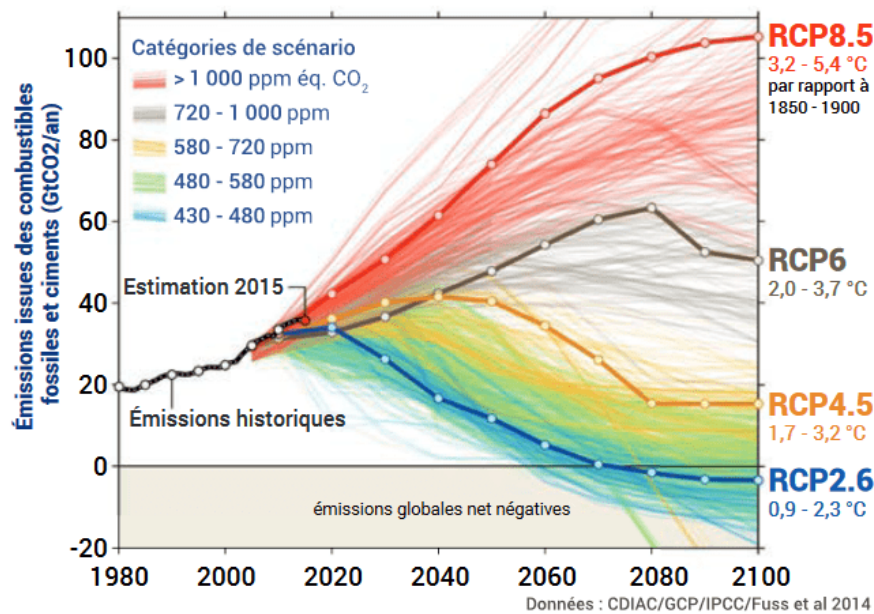


FIGURE 1.2 – Scénarios RCP

Sources : Global Carbon Project d'après CDIAC, GCP, IPCC et Fuss et al. 2014

politiques de réduction des émissions de gaz à effet de serre. Un plateau serait atteint dès 2050 et une décroissance des émissions serait enclenchée dès lors. Dans les deux scénarios intermédiaires, le RCP4.5 et le RCP6.0, les émissions atteindraient un point de stabilisation au cours du 21ème siècle, avec un niveau plus élevé pour le second scénario. Enfin, le scénario RCP8.5 est le plus pessimiste et correspond à un niveau d'émissions en croissance constante au rythme actuel. Il est aujourd'hui considéré comme le scénario "*Business as Usual*".

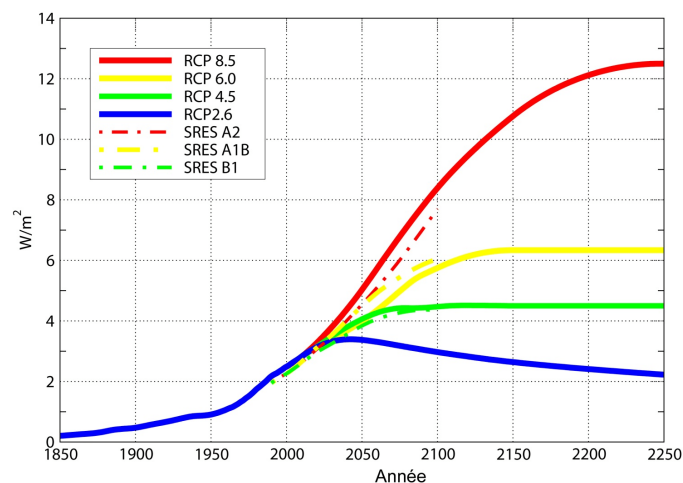


FIGURE 1.3 – Comparaison des scénarios SRES et RCP

Source : DRIAS d'après S.Planton

Le graphique 1.3 présente une comparaison entre les anciens scénarios SRES et les profils de

référence RCP. Nous remarquons que le scénario RCP8.5 est légèrement plus pessimiste que le scénario A2. Les scénarios intermédiaires RCP6.0 et RCP4.5 se rapprochent respectivement des scénarios A1B et B1. Enfin, seul le scénario le plus optimiste RCP2.6 n'a pas d'équivalent dans les familles de scénarios SRES.

### Les scénarios socio-économiques : SSP

Parallèlement au travail des climatologues, les économistes et sociologues s'efforcent d'évaluer les effets des évolutions de nos sociétés en lien avec les scénarios de référence (RCP). La construction de ces scénarios repose sur une visualisation matricielle qui permet de définir pour chaque famille de scénarios socio-économiques (SSP1 à SSP5) les évolutions de nos sociétés à l'échelle mondiale pour atteindre une distribution de concentration correspondant à chaque scénario de référence (RCP).

Ces scénarios SSP doivent permettre d'évaluer les politiques en matière de changement climatique et doivent inclure un large éventail d'avenirs possibles pour nos sociétés. Il est donc important de décrire ces scénarios avec précision. D'après le rapport de la DGECC [41], les scénarios peuvent être présentés suivant deux axes : l'un représente le défi de l'adaptation de la société au changement climatique ; l'autre axe représente l'enjeu de réduction des émissions de gaz à effet de serre.

Les cinq scénarios sont présentés selon ces deux axes en figure 1.4 :



FIGURE 1.4 – Représentation des cinq scénarios SSP

Source : Adapté de l'article de N. Arnell et al. publié en 2014 [4]

Une deuxième version des scénarios SSP a été définie pour le 6ème rapport du GIEC. Nous ne rentrerons pas plus dans les détails de ces scénarios car ils ne seront pas utilisés pour ce mémoire. Les lecteurs intéressés pourront se renseigner d'avantage grâce à l'article [32] publié sur le site internet de Carbone 4.

Créé en 1988, le GIEC est le principal organisme international pour l'évaluation du changement climatique. A intervalle régulier, il établit une synthèse de l'état des connaissances "scientifiques, techniques et socio-économiques sur les change-

*ments climatiques, leurs causes, leurs répercussions potentielles et les stratégies de parade".*

Une 6ème version du rapport d'évaluation est en cours de publication. Les conclusions sont alarmantes : l'influence humaine dans le réchauffement climatique est incontestable et ses effets sont déjà observables sur l'ensemble de la planète. Les pays devront réduire leurs émissions de gaz à effet de serre afin de respecter les objectifs définis par l'Accord de Paris et limiter le réchauffement à 1,5°C par rapport à l'ère pré-industrielle. Limiter au maximum le réchauffement climatique permettrait d'en réduire les conséquences.

Le travail du GIEC comporte aussi une étude des futurs possibles. Le climat futur dépendra des émissions et de la concentration de gaz à effet de serre. Ainsi le GIEC propose un ensemble d'hypothèses sur l'évolution des sociétés et des émissions, que l'on appelle scénarios, afin de simuler l'évolution du climat. Le GIEC a proposé plusieurs jeux de scénarios depuis sa création, notamment les RCP et SSP qui sont les plus récents. Ces scénarios sont régulièrement cités dans les études et articles qui s'intéressent au changement climatique et à l'évolution du climat. Ils ne représentent pas une prédiction du futur mais ont pour but de prendre en considération l'incertitude liée aux évolutions futures de nos sociétés et du climat.

## 1.2 Les assureurs français face au changement climatique

Le changement climatique fait aujourd'hui parti des principales inquiétudes des assureurs français comme le rapporte la dernière cartographie prospective réalisée par France Assureurs [27]. Arrivant en deuxième et troisième position dans le classement des risques majeurs à horizon 5 ans selon les assureurs, le risque climatique s'accroît depuis plusieurs années et préoccupe les acteurs du marché. Les risques environnementaux et écologiques intéressent les assureurs depuis plusieurs décennies comme le rapporte la Prudential Regulation Authority (PRA) dans son rapport de 2015 [46].

Le positionnement des groupes d'assurance dans la société en fait des acteurs de premier plan dans la gestion des risques catastrophes. Ils ont également un rôle à jouer dans la prévention et l'information sur les risques liés au changement climatique. Ils peuvent, par exemple, encourager la mise en place de mesures préventives pour mitiger le risque. Par ailleurs, leur position d'investisseur leur permet de participer activement à la transition de nos sociétés vers une économie bas-carbone.

Cette partie discute de l'impact du changement climatique sur le secteur de l'assurance. Elle commence par une présentation des composantes du risque climatique avant de dresser un bilan de son incidence sur le plan de l'actif et du passif des assureurs.

### 1.2.1 Classification du risque climatique

La notion de risque climatique est la traduction en risque financier du changement climatique. Elle englobe les effets négatifs du changement climatique sur les vies, les moyens de subsistance, l'état de santé, les actifs économiques, sociaux et culturels, les services et les infrastructures.

Il existe un consensus dans la littérature sur l'existence de trois grands canaux par lesquels le changement climatique peut affecter la stabilité du système financier :

- le risque physique ;
- le risque de transition ;
- le risque de responsabilité.

Ils ne constituent pas de nouveaux types de risques financiers mais affectent les risques financiers traditionnels (risque de crédit, de marché, de liquidité...). Cette catégorisation a été introduite pour la première fois en 2015 par Mark Carney, ancien Gouverneur de la Banque d'Angleterre, lors de son discours « Briser la tragédie de l'horizon » [10].

#### Risque physique

Le risque physique correspond aux impacts du changement climatique et des événements météorologiques, tels que les inondations ou les tempêtes, sur le système financier. Il comprend à la fois les effets directs de ces événements (destruction de biens par exemple) et indirects qui pourraient en découler (par exemple une perturbation de l'économie et des chaînes d'approvisionnement).

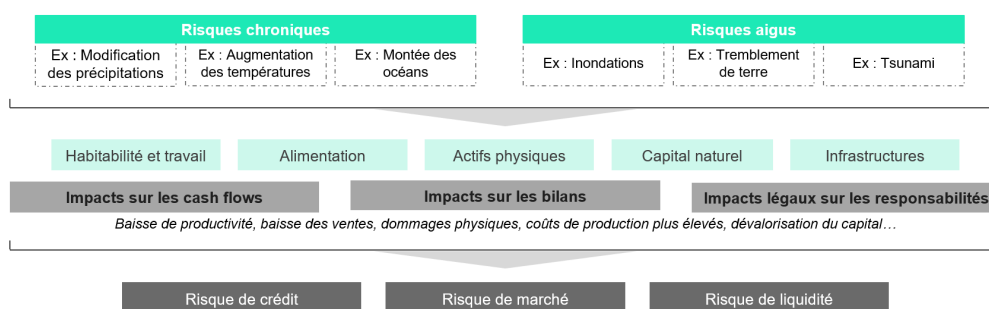


FIGURE 1.5 – Transmission des risques physiques aux risques financiers classiques

Ce risque est habituellement segmenté en deux catégories :

- Les risques aigus (ou d’occurrence) proviennent de la réalisation d’évènements extrêmes comme les inondations, tsunamis et tremblements de terre. Ces évènements météorologiques extrêmes peuvent causer la destruction d’actifs physiques (effets directs) et conduire à une perturbation de l’économie locale voir mondiale (effets indirects).
- Les risques chroniques émanent des modifications graduelles et à long terme du climat. La montée et l’acidification des océans, l’augmentation des températures ou la modification des régimes de précipitation en sont des exemples. Cette catégorie de risques peut détériorer de manière progressive la productivité de certains secteurs d’activité comme l’agriculture par exemple.

### Risque de transition

Le risque de transition est la conséquence du processus d’ajustement de nos sociétés vers une économie bas-carbone via l’introduction de politiques énergétiques ou d’avancées technologiques permettant de réduire les émissions de gaz à effet de serre.

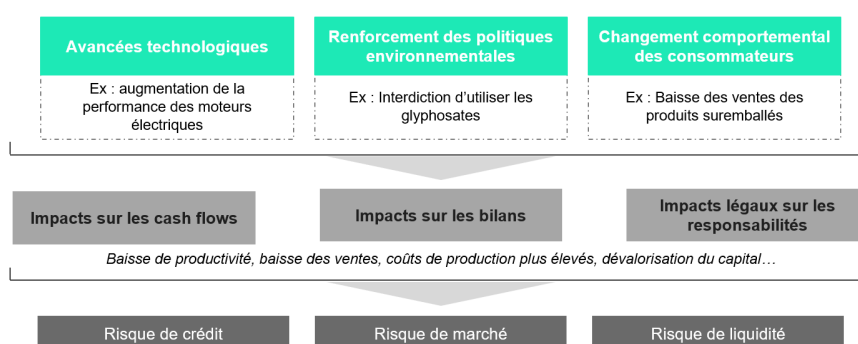


FIGURE 1.6 – Transmission des risques de transition aux risques financiers classiques

Les secteurs producteurs d’énergie (entreprises pétrolières, groupes miniers) et consommateurs d’énergie (métallurgie, transport, agro-alimentaire) sont les plus vulnérables face à cette transition. Les conséquences sur les entreprises sont d’autant plus importantes que les ajustements effectués en vue d’une transition vers une économie plus verte sont désordonnés et surviennent brutalement.

Cette transition vers une économie bas-carbone peut déprécier des actifs financiers et réduire la rentabilité des entreprises. Cette transition énergétique peut ainsi se répercuter sur les institutions financières et sur la valeur de leurs portefeuilles. Nous discuterons plus en détail des répercussions du risque de transition sur les assureurs dans la partie 1.2.3. Certains établissements financiers choisissent de réduire dès maintenant leurs investissements dans les secteurs les plus vulnérables pour mitiger leur exposition au risque de transition. À mesure que les entreprises divulguent davantage d'informations sur le changement climatique, les sociétés financières seront en mesure de prendre des décisions plus éclairées sur leurs investissements.

### Risque de responsabilité

Le risque de responsabilité est sûrement le moins connu et le moins cité des trois comme le souligne l'ACPR dans son rapport publié en 2019 [1]. Il correspond aux répercussions qui pourraient être engendrées si les parties qui ont subi des pertes ou des dommages du fait du changement climatique demandent réparation à ceux qu'elles tiennent pour responsables. Ces demandes pourraient survenir dans plusieurs décennies, mais elles sont susceptibles de frapper le plus durement les extracteurs et les émetteurs de carbone et, s'ils disposent d'une couverture de responsabilité, leurs assureurs.

#### 1.2.2 Les conséquences du risque physique pour les assureurs

Dans cette partie nous présenterons les impacts du risque physique sur le secteur de l'assurance et tenterons d'analyser ses effets aussi bien sur le passif que sur l'actif. Pour cela nous nous basons sur les rapports publiés par le régulateur anglais (Prudential Regulation Authority, PRA) en 2015 [46] et le régulateur français en 2019 [1].

##### Au passif

Au passif, ce sont principalement les assureurs non-vie qui sont concernés par les effets directs du risque physique. L'assurance des catastrophes naturelles comme les inondations, les tempêtes ou les sécheresses place les acteurs de l'assurance dommages au cœur des enjeux du risque physique. La branche habitation est identifiée par les deux régulateurs comme particulièrement concernée par ce type de risque. L'augmentation du coût et de la fréquence des événements météorologiques extrêmes a des conséquences directes sur cette branche d'activité.

Les régulateurs soulignent que les assureurs non-vie sont plutôt préparés et avertis de ce risque. Selon l'ACPR, 83% des assureurs français se disent d'ailleurs en mesure d'évaluer leur exposition au risque physique sur leur passif. Les outils d'évaluation du risque physique dont disposent les assureurs depuis plusieurs années, la diversification du portefeuille, le recours à la réassurance et la courte durée des contrats permettant d'ajuster les primes d'assurance à mesure que le risque s'accroît semblent indiquer que les assureurs dommages sont sûrement bien équipés pour gérer ce risque. L'augmentation de la sinistralité peut néanmoins poser la question de la frontière d'assurabilité dans certaines régions fortement exposées.

Les assureurs vie peuvent, dans une moindre mesure, être également concernés par les effets directs du risque physique. En effet, d'après le GIEC [30] il est probable que le changement climatique, via des modifications dans les conditions météorologiques (augmentation des températures, dérèglement du régime de précipitation), aura des conséquences sur la santé et la

mortalité de la population. Une augmentation de certaines maladies vectorielles [44] y compris en France et une hausse de la fréquence et de la sévérité des vagues de chaleurs seraient à prévoir dans les décennies à venir. Ainsi les branches santé, vie et incapacité/invalidité sont également concernées par ce risque. Le PRA nuance néanmoins et souligne qu'il s'agit d'un risque de long terme certainement moins pertinent pour les assureurs vie que d'autres risques tels que les pandémies ou les changements démographiques.

Le régulateur anglais identifie également un vecteur indirect par lequel le risque physique pourrait affecter le passif des assureurs. Les risques physiques indirects affectent un large éventail de secteurs d'activité, tels que les pertes d'activité, les risques agricoles ou politiques. Le régulateur souligne que ces risques sont souvent exclus des modèles des groupes d'assurances. L'incertitude inhérente à ces risques indirects et les impacts futurs probables du changement climatique rendent ces risques plus difficiles à évaluer.

## A l'actif

Les risques physiques directs et indirects sont également pertinents pour l'actif des bilans des sociétés d'assurance. En effet, les risques physiques peuvent avoir une incidence sur l'investissement dans des actifs financiers tels que l'immobilier et, de manière plus générale, peuvent affecter une grande partie des portefeuilles par le biais des effets sur l'économie réelle.

Selon l'étude France Assureurs réalisée en 2021 [26], les actifs immobiliers représentent 5% de la part des investissements des entreprises d'assurance à fin 2020. Aujourd'hui, les conséquences du risque physique sur ces actifs sont gérées par l'achat d'une couverture d'assurance et par la diversification du portefeuille. Il existe tout de même un risque lié à la question de l'assurabilité des biens immobiliers qui pourraient devenir de plus en plus exposés aux effets du changement climatique.

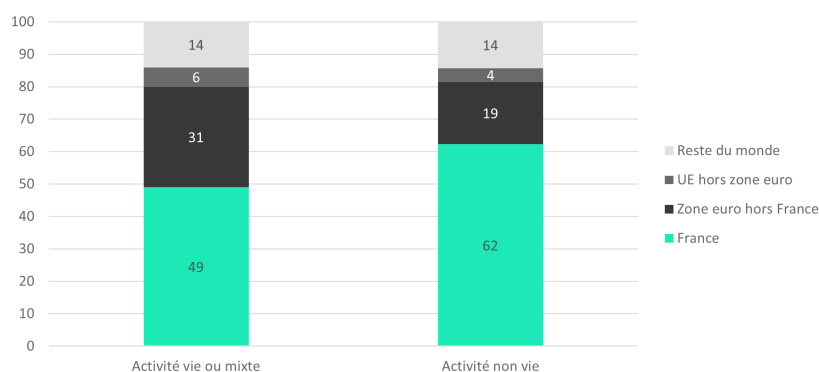


FIGURE 1.7 – Répartition des placements des organismes d'assurance selon leur activité par zone d'émission à fin 2017

Source : D'après le Bulletin de la Banque de France [28]

Néanmoins l'ACPR indique que les placements actuels des assureurs français sont relativement peu exposés au risque physique. Pour dresser cette conclusion, l'autorité de contrôle utilise la localisation géographique comme indicateur de risque et se base sur la classification réalisée par Standard & Poor's en 2014 pour déterminer l'exposition de chaque pays aux risques physiques. Il en ressort que la France et l'Europe sont peu exposées à l'exception des Pays-Bas. Selon le bilan



de la Banque de France [28], l'actif des assureurs français est majoritairement localisé en France et dans l'Union Européenne. Seuls 14% des actifs sont localisés hors de l'Union Européenne. Ainsi l'ACPR conclut que les actifs des assureurs français sont principalement localisés dans des pays peu vulnérables et que la part investie dans des pays soumis au risque physique est très limitée (6%).

### 1.2.3 Les conséquences du risque de transition pour les assureurs

L'objectif de cette partie est de présenter les impacts potentiels d'une transition vers une économie bas carbone sur les assureurs. Nous nous focalisons sur le portefeuille d'actifs des assureurs qui est le plus concerné par ce type de risque.

Afin de contenir le réchauffement climatique à 2°C par rapport à l'ère pré-industrielle, une réelle modification des trajectoires d'émission carbone doit être enclenchée. Cette transition de l'économie pourra avoir des conséquences sur les marchés financiers via cinq mécanismes déclencheurs identifiés par le régulateur anglais : la politique publique et la réglementation, la technologie, les préférences des investisseurs, les événements physiques et les développements de la science du climat. Il est reconnu qu'une transition anticipée et stable permettrait d'en réduire les effets en facilitant un ajustement en douceur de la valeur des actifs. A l'inverse, une politique de transition tardive et abrupte serait néfaste pour l'économie. Ainsi le risque de transition est à long terme un enjeu pour la stabilité financière.

Dans son rapport, l'ACPR identifie les secteurs particulièrement vulnérables au risque de transition en se basant sur l'article [5] publié en 2017 : *"les secteurs producteurs d'énergies fossiles, d'électricité, de gaz et d'eau (« Utilities ») et ceux consommateurs d'énergie (« Logement », « Secteurs intensifs en énergie », « Transport »).*"

La ventilation des encours des assureurs à fin 2017 par nature d'activité est donnée par le graphique 1.8 issu du Bulletin de la Banque de France [28].

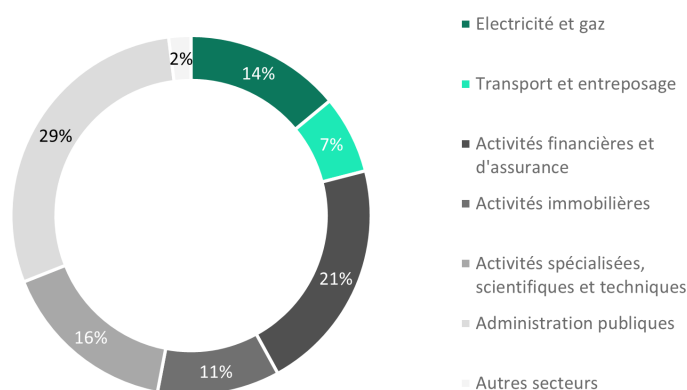


FIGURE 1.8 – Répartition des placements des assureurs par secteur à fin 2017

Source : D'après le Bulletin de la Banque de France [28]

A partir de cette liste de secteurs vulnérables et à partir des codes NACE<sup>1</sup>, l'ACPR dans son rapport de 2019, évalue à 10% la part du portefeuille actuel des assureurs français investie dans des secteurs soumis au risque de transition. Cela représente 250 Mds d'euros de placements.

Cette exposition du portefeuille des sociétés d'assurance se répartit entre les secteurs vulnérables de la manière suivante :

- Secteur immobilier : 33% des expositions totales ;
- Secteurs à forte consommation énergétique à l'exception des transports : 33% ;
- Secteurs fournisseurs d'électricité, de gaz et d'eau : 14% ;
- Les énergies fossiles et les transports représentent respectivement 12% et 9% de l'exposition totale.

L'ACPR note que les assureurs français évaluent principalement l'exposition de leurs investissements au niveau du secteur d'activité et qu'ils ont une bonne connaissance de l'empreinte carbone de leurs portefeuilles.

Par ailleurs, à travers le NGFS *Network of Central Banks and Supervisors for Greening the Financial System*, les banques centrales et organismes de régulation promeuvent un ensemble de bonnes pratiques d'évaluation et de réduction des risques climatiques dans le secteur financier. Les travaux et scénarios du NGFS sont aujourd'hui utilisés par de nombreux acteurs de la finance dans l'évaluation de leur exposition au risque de transition.

**Le changement climatique influence le système financier par trois canaux communément identifiés dans la littérature : le risque physique, le risque de transition et le risque de responsabilité.**

**Le risque physique entraînera majoritairement une augmentation de la fréquence et de la sévérité des catastrophes naturelles. Ainsi, les assureurs non-vie sont les plus concernés par ce risque via leur branche dommages. Les changements climatiques auront aussi pour conséquences une augmentation de la transmission des maladies vectorielles et une dégradation de la qualité de l'air ce qui se répercutera, dans une moindre mesure, sur les branches santé, prévoyance, incapacité/invalidité et vie des assureurs.**

**Le risque de transition aura principalement des répercussions sur l'actif des assureurs. Les avancées technologiques, le renforcement des politiques et les modifications de comportement des consommateurs entraîneront des conséquences financières pour les entreprises. Certains secteurs, notamment ceux consommateurs et producteurs d'énergie, sont plus vulnérables à cette transition vers une économie bas carbone. Les assureurs sont également exposés via leur portefeuille d'actifs. Néanmoins leur exposition à ces secteurs reste limitée selon l'ACPR.**

---

1. Il s'agit d'une nomenclature européenne pour les activités économiques des entreprises.

## 1.3 L'exercice pilote de l'ACPR

L'ACPR a publié les résultats de son premier exercice de stress test climatique. Nous commencerons par rappeler le contexte et les caractéristiques principales de cet exercice puis nous présenterons les conclusions que l'ACPR a pu dresser en nous focalisant sur les assureurs.

### 1.3.1 Contexte et caractéristiques principales de l'exercice pilote

En mai 2021, l'ACPR publiait les résultats de l'exercice climatique conduit de juillet 2020 à avril 2021 [3].

L'exercice pilote de l'ACPR vise à évaluer l'exposition et la vulnérabilité du système financier face aux risques climatiques au travers d'un test de résistance climatique. Il a également pour objectif de sensibiliser les banques et assurances sous la supervision de l'ACPR. C'est un exercice inédit en France autant par son périmètre de couverture que par son horizon long. Il a mobilisé 9 groupes bancaires et 15 groupes d'assurances représentant respectivement 85% du bilan des banques et 75% du bilan des assurances. L'horizon de projection retenu est de 30 ans ce qui contraste avec la durée habituelle des *stress tests* (3 à 5 ans).

Les risques évalués dans cet exercice sont les risques physiques et de transition. Pour mener son évaluation, l'ACPR a retenu trois scénarios pour le risque de transition et un pour le risque physique. Pour sélectionner ces scénarios, l'ACPR s'est basée sur les orientations données par le NGFS concernant l'évaluation des risques climatiques. Cet exercice s'inscrit donc dans une démarche internationale de sensibilisation et d'évaluation des effets du changement climatique sur le secteur financier, et fait suite à la publication de la banque centrale des Pays-Bas [42].

Notons que l'approche utilisée par l'ACPR est "Bottom-Up" et que ce sont donc les institutions financières, sous la supervision du régulateur, qui ont évalué leurs risques sur la base d'hypothèses communes.

Les résultats de cet exercice apportent une vision prospective des risques climatiques sur les banques et assurances françaises. Ils viennent compléter les résultats issus des études menées par l'ACPR en 2019 que nous présentions en partie 1.2.2 et 1.2.3.

Dans les parties suivantes nous discuterons des résultats de cet exercice concernant les assureurs en traitant le risque de transition d'une part et le risque physique d'autre part.

### 1.3.2 Un risque de transition plutôt modéré pour les assureurs

Afin d'évaluer les conséquences du risque de transition sur les assureurs, l'ACPR s'est dotée de trois scénarios de transition, dont deux issus du NGFS. Nous en rappelons brièvement les caractéristiques à partir du document de présentation des hypothèses retenues pour cette exercice publié par la Banque de France et l'ACPR [2] :

- Le premier scénario, que l'ACPR nomme scénario de référence, correspond à une "transition ordonnée" qui permettrait d'atteindre les objectifs fixés par l'Accord de Paris. Ce scénario est issu du NGFS. Il est schématisé en vert sur le graphique 1.9.
- Le premier scénario adverse, représenté en jaune sur le graphique 1.9, correspond à une "transition retardée". Dans ce scénario, les objectifs de réduction de GES ne seraient pas

atteints en 2030. Afin de rattraper le retard et maintenir les objectifs fixés pour 2050, les gouvernements devraient introduire des mesures plus drastiques entraînant une transition plus rapide. Ces mesures s'accompagneront de hausses du prix du carbone et de l'énergie.

- Le second scénario adverse, que l'ACPR nomme "transition accélérée", correspond à une transition rapide et désordonnée. Cette transition s'accompagne d'une hausse encore plus importante du prix du carbone. Il s'agit du scénario rouge présenté sur le graphique schématique 1.9.

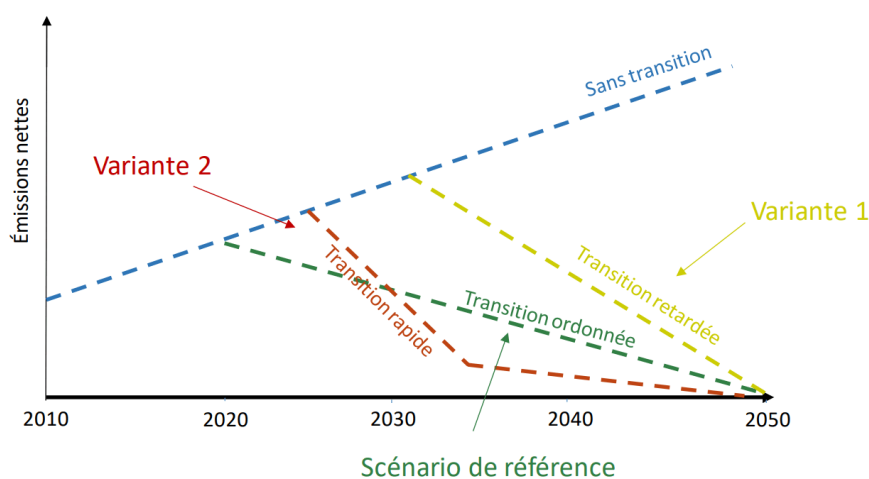


FIGURE 1.9 – Représentation des scénarios utilisés dans l'exercice pilote de l'ACPR

Source : Issu du document de présentation des hypothèses de l'exercice pilote [2]

A partir de ces trois scénarios, l'ACPR a évalué l'incidence du risque de transition sur les assureurs français. Pour cela, le régulateur évalue d'une part les effets sur les obligations. Il conclut à une répercussion "globalement limité[e]" sur les portefeuilles obligataires des assureurs quel que soit le scénario de transition retenu. D'autre part, il quantifie l'exposition du portefeuille actions au risque de transition. Celui-ci est plus sensible à la volatilité des marchés induite par une transition désordonnée, notamment pour les secteurs producteurs d'énergie (entreprises pétrolières, groupes miniers) et consommateurs d'énergie (métallurgie, transport, agroalimentaire). Néanmoins, l'exposition limitée des assureurs aux actions conduit l'ACPR à conclure à un impact moindre des effets de cette transition sur les portefeuilles des assureurs.

### 1.3.3 Une sinistralité liée aux risques physiques en hausse

Afin d'évaluer les conséquences du risque physique sur les assureurs, l'exercice de l'ACPR repose sur les hypothèses suivantes :

- Une augmentation des coûts et de la fréquence des événements climatiques extrêmes (Cat Nat) affectant les branches dommages des assureurs ;
- Une expansion des maladies vectorielles et une dégradation de la qualité de l'air particulièrement en métropole induisant une augmentation de la mortalité et des frais de santé.

## Les catastrophes naturelles (Cat Nat)

Pour la branche dommages des assureurs, l'ACPR utilise un unique scénario basé sur le scénario RCP8.5 du GIEC. Nous rappelons qu'il s'agit du scénario le plus pessimiste proposé par le GIEC.

Les assureurs ont pu travailler conjointement avec la Caisse Centrale de Réassurance afin d'évaluer l'évolution de la sinistralité à horizon 2050 induite par l'augmentation de la fréquence et de l'intensité des Cat Nat. La CCR a notamment fourni aux assureurs qui en faisaient la demande, l'augmentation de leur sinistralité pour 2050 par département à partir de leur exposition communale. Ces estimations prennent notamment en compte l'évolution de la démographie en France donnée par les projections de l'INSEE. Les assureurs ont ainsi pu étudier l'évolution des dommages entre 2019 et 2050 pour les périls inondation, sécheresse, submersion marine et tempêtes cycloniques, périls habituellement couverts par le régime Cat Nat (cf partie 2.1).

Au global, l'ACPR estime à 174% l'augmentation de sinistralité sur la branche dommages aux biens entre 2019 et 2050. La carte 1.10 présente les résultats par département. Elle informe à la fois de la sinistralité par habitant en 2019 et de l'évolution estimée à horizon 2050. Elle révèle une forte disparité entre les départements français autour de cette moyenne. L'ACPR note un "effet de rattrapage" : les départements aujourd'hui peu sinistrés sont ceux pour lesquels l'augmentation estimée pour 2050 est élevée.

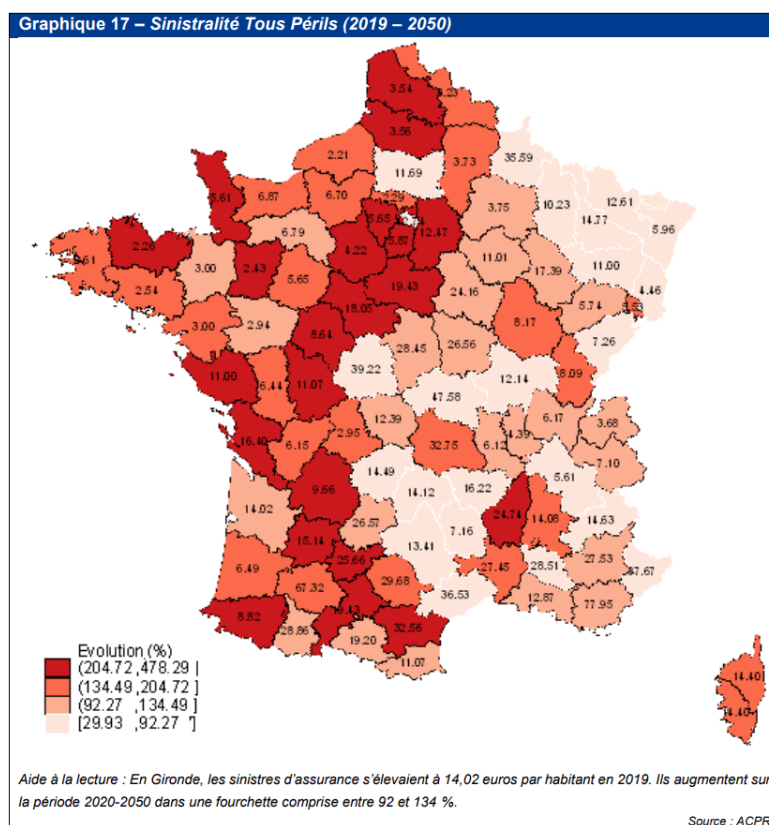


FIGURE 1.10 – Évolution de la sinistralité tous périls 2019-2050  
Source : Exercice pilote ACPR [3]

Cet effet de rattrapage est notamment visible pour le péril sécheresse présenté en carte 1.11b. Les résultats pour le péril inondation sont donnés par la carte 1.11a.

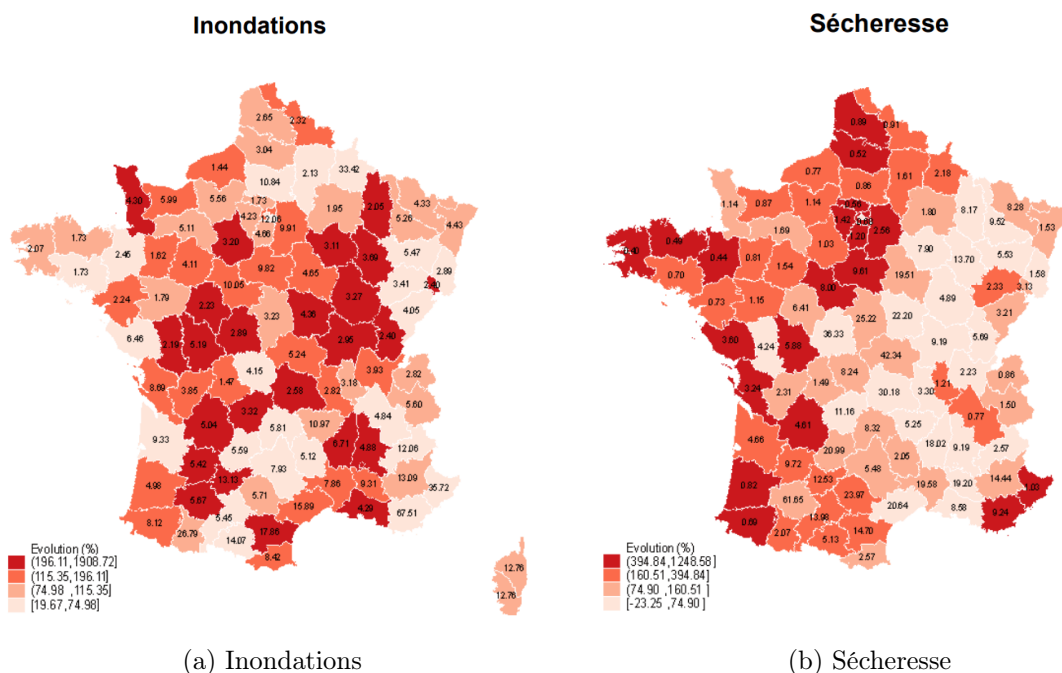


FIGURE 1.11 – Évolution de la sinistralité 2019-2050

Sources : Exercice pilote ACPR [3]

Afin d'évaluer la réaction des assureurs aux évolutions des risques climatiques, l'ACPR leur proposait de revoir et d'adapter leur politique de souscription afin notamment de réduire leur exposition dans les territoires les plus sinistrés. La réaction d'une majorité des assureurs a été de répercuter l'augmentation de la sinistralité sur les primes afin de maintenir un ratio S/P constant. Dans 30 ans, la hausse des primes est de 130% à 200%. Une telle augmentation pourrait influencer fortement le comportement des assurés et pose la question de la frontière d'assurabilité que les assureurs semblent ne pas avoir prise en compte.

## Périls santé

Concernant la dégradation de la santé due à l'expansion des maladies vectorielles et à l'augmentation de la pollution atmosphérique, l'ACPR a retenu deux scénarios de santé dont les hypothèses ont été fournies par AON, courtier d'assurance. Ces scénarios sont basés sur le RCP8.5 du GIEC. A travers l'étude de ces scénarios, l'ACPR souhaitait que les assureurs évaluent l'impact de l'augmentation des maladies vectorielles et de la pollution sur leur branche santé.

L'expansion des maladies vectorielles sera plus prononcée dans certaines zones comme le Sud de la France, en Bretagne ou en Corse. Concernant la dégradation de la qualité de l'air, l'ACPR estime une hausse moyenne de la sinistralité en santé de 119% en métropole. Un effet de rattrapage est ici aussi observable pour l'Île-de-France, qui est aujourd'hui très exposée mais aura une hausse moins forte que d'autres zones urbaines.

A travers cet exercice, l'ACPR ne cherchait pas à vérifier la solvabilité des banques et assurances face aux risques climatiques. Son objectif était surtout de les sensibiliser aux risques induits par le changement climatique et des répercussions qui en découlent sur leurs activités. Cet exercice inédit a largement mobilisé les acteurs bancaires et assurantiels.

L'exercice pilote conclut à une exposition globalement « modérée » des banques et assurances françaises aux risques climatiques car leur exposition est majoritairement localisée en France et en Europe, relativement peu affectées par le changement climatique selon le GIEC. A l'actif, l'exposition des assureurs aux risques de transition reste limitée. Au passif, l'ACPR identifie tout de même une forte hausse des coûts des sinistres liés aux catastrophes naturelles avec une certaine hétérogénéité entre les départements. La plupart des groupes d'assurance a répercuté cette augmentation de sinistralité sur les primes.

Cet exercice a soulevé plusieurs questions méthodologiques, à la fois sur l'étude du risque de transition et du risque physique. L'ACPR identifie notamment trois pistes d'amélioration principales : sur la conception des scénarios à horizon long et l'identification des secteurs vulnérables, sur la prise en compte du risque physique, et enfin sur l'amélioration des modèles utilisés par les institutions financières et les données à fournir pour réaliser ce type d'exercice.

Lors de cet exercice, l'ACPR a pu identifier plusieurs difficultés qui se sont présentées aux institutions financières lors de l'évaluation de leur exposition aux risques climatiques. L'utilisation de scénarios à horizon long, auxquels les institutions financières ne sont pas habituées, et la manipulation des données fournies par l'ACPR en accord avec le scénario RCP8.5 en sont deux exemples. Ces observations soulignent donc la nécessaire amélioration des modèles et méthodologies utilisés par les participants ainsi qu'une réflexion sur les données à leur fournir.

L'ACPR a également annoncé que ce premier exercice donnera lieu à d'autres groupes de travail afin de préparer un second exercice de *stress test* climatique pour 2023-2024. L'ACPR a par ailleurs participé au test de résistance climatique piloté par la Banque Centrale Européenne en 2022.

## 1.4 Problématique et état de l'art

### 1.4.1 Contexte et enjeux du mémoire

#### **Une prise de conscience des risques climatiques et de leurs répercussions sur le secteur financier**

Durant la dernière décennie, les régulateurs et les banques centrales se sont activement penchés sur le sujet du changement climatique et ses conséquences sur le système financier. Le discours de Mark Carney en 2015 fut un élément déclencheur de la prise de conscience croissante sur ces risques.

Depuis, plusieurs rapports d'évaluation des effets du changement climatique sur l'économie ont été publiés. Nous pouvons notamment citer les deux rapports publiés en 2019 par l'ACPR/BdF qui établissent un premier état des lieux des effets du changement climatique sur les banques et les assurances. Ce travail s'inscrivait dans la lignée des études menées par le régulateur britannique (Prudential Regulation Authority) en 2015 concernant les assurances [46], et 2018 pour les banques [47]. Le comité de Bâle s'est également emparé du sujet et a publié trois rapports sur les risques climatiques, leur transmission à l'économie et les initiatives et méthodologies d'évaluation de ces risques.

Les risques physiques et de transition sont particulièrement difficiles à modéliser. Ils sont le résultat d'interactions complexes entre les dynamiques économiques, climatiques et sociétales [11]. L'adaptation des stress test habituellement utilisés en finance aux particularités des risques climatiques a été vue comme une solution pour évaluer l'exposition des institutions financières à ces risques. Ainsi, en 2018 la Banque des Pays Bas devint l'une des premières banques centrales à réaliser un test de résistance liée à la transition énergétique. Cet exercice avait pour objectif de déterminer l'exposition des banques, des assurances et des fonds de pension néerlandais au risque de transition. Il s'agit d'un exercice « Top-Down » : les tests ont donc été conduits par la Banque des Pays-Bas à partir de scénarios qu'elle avait définis. La Banque Centrale Européenne a elle aussi réalisé un test de résistance climatique « Top-Down ». La particularité de cet exercice est son application à l'ensemble de l'économie grâce à l'utilisation de données sur des millions d'entreprises. La BCE a ainsi défini un ensemble de modèles et d'hypothèses afin d'évaluer de manière très granulaire l'exposition aux risques climatiques des banques et des sociétés non financières.

Une deuxième approche, dite « Bottom-Up » a été utilisée par d'autres régulateurs et banques centrales. Ce type d'exercice implique directement les banques et assurances dans l'évaluation de leurs risques climatiques à partir d'hypothèses et scénarios fournis par les superviseurs. Cette approche est celle employé par l'ACPR/BdF dans son exercice pilote dont les résultats ont été discutés en partie 1.3. La banque d'Angleterre a également suivi cette démarche et a lancé son propre exercice en 2021 reposant également sur une approche « Bottom-Up ». Les résultats de cet exercice ont été publiés en mai 2022 [7].

#### **Un durcissement des exigences de reporting des risques climatiques et une possible introduction des stress tests climatiques dans l'ORSA**

Ces exercices s'accompagnent d'un durcissement des exigences d'évaluation des risques climatiques de la part des banques et des assurances. Ces travaux permettent notamment d'élaborer



et d'améliorer les méthodologies d'évaluation en perspective d'exercices prudentiels à venir. En France, depuis 2015, l'article 68 de la loi sur la transition énergétique et la croissance verte (LTCEV)<sup>1</sup> établit une obligation d'information des investisseurs institutionnels concernant leur prise en compte des paramètres environnementaux et sociaux. Dans ce contexte, l'ACPR a poursuivi ses travaux et sa gouvernance sur les risques climatiques avec notamment la publication de guides de bonnes pratiques pour les secteurs bancaires et assurantiels.

L'EIOPA, entité de régulation à l'échelle européenne, s'est aussi emparée de cette problématique et a mené des consultations sur les initiatives existantes concernant les risques climatiques. Elle a également publié en avril 2021 un avis concernant l'évaluation des effets du changement climatique et l'intégration de scénarios de risques climatiques dans l'ORSA. Cet avis, à destination des régulateurs nationaux, propose de nouvelles exigences prudentielles pour les assurances, qui, à terme, pourront être intégrés dans les exigences de l'ACPR. Elle y indique la nécessité d'intégrer des scénarios d'évaluation des risques climatiques dans les processus ORSA des assureurs. L'Autorité mentionne plusieurs éléments qui devraient être intégrés dans ces scénarios : évaluation des risques climatiques à court terme, comme pour le reste de l'ORSA, ainsi qu'à long terme ; prise en compte des risques physiques et de transition ; utilisation d'au moins deux scénarios à long terme, un avec une hausse de température dans le respect de l'Accord de Paris (entre 1,5°C et 2°C) et un deuxième avec une augmentation des températures supérieure à 2°C. Elle y rappelle l'existence des scénarios fournis par le NGFS qui peuvent être utilisés par les assureurs qui n'auraient pas les capacités d'établir leurs propres scénarios.

## Enjeux du mémoire

Ces travaux mettent en avant la nécessité pour les assureurs de prendre la mesure de l'enjeu que représente l'évaluation de leur exposition aux risques climatiques. En ce qui concerne les assureurs français, les résultats de l'exercice de l'ACPR soulignent notamment l'importance de l'introduction de mesures du risque physique pour les assureurs non-vie. En effet, les résultats révèlent une forte hausse de la sinistralité liée au risque physique à horizon 2050, en particulier liée à l'augmentation de la fréquence et de l'intensité des catastrophes naturelles. Cette hausse est estimée à 174% entre 2019 et 2050. Pour établir ce résultat, l'ACPR, grâce au soutien de la Caisse Centrale de Réassurance, a étudié différents aléas climatiques couverts par le régime Catastrophes Naturelles dont les inondations et les sécheresses.

L'objectif de ce mémoire sera de tenter de modéliser la fréquence des aléas sécheresse et inondation à horizon 2050 compte tenu des données disponibles en *Open Data*. Ce travail devrait permettre de confronter les résultats obtenus par l'ACPR pour ces deux périls, selon les deux aspects suivants :

- Comme nous le précisons dans la partie 1.3, l'ACPR utilise un unique scénario, correspondant au scénario RCP8.5 du GIEC, pour l'évaluation du risque physique. L'EIOPA recommande l'utilisation d'au moins deux scénarios pour l'étude des risques climatiques. Ainsi, l'un des objectifs de ce mémoire sera d'étudier plusieurs scénarios, notamment un scénario qui serait conforme aux objectifs de l'Accord de Paris.
- Les résultats de l'étude de l'évolution de sinistralité à horizon 2050 ont été délivrés à la maille départementale, que ce soit tous périls confondus (cf carte 1.10) ou pour chaque péril indépendamment (cf cartes 1.11). Lors de la conférence organisée par SeaBird en

---

1. Loi n° 2015-992 du 17 août 2015 relative à la transition énergétique pour la croissance verte [https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/article\\_jo/JORFARTI000031045038](https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/article_jo/JORFARTI000031045038)

décembre 2021 [49], Thierry Cohignac révélait la déception des assureurs face à cette restitution à l'échelle départementale. En effet, les assureurs non-vie travaillent principalement avec des mailles très fines à l'échelle des communes, voir infra-communale, pour leur tarification des risques. Ainsi le deuxième objectif de ce mémoire sera d'obtenir une évolution de la fréquence des aléas sécheresse et inondation à la maille commune.

Pour réaliser et atteindre ces deux objectifs, nous tenterons de modéliser les arrêtés de catastrophe naturelle, dont nous disposons par commune depuis la création du régime, à partir de données météorologiques et d'exposition aux risques. Puis, à partir de modèles climatiques basés sur les projections du GIEC disponibles, nous établirons une projection de la fréquence de ces arrêtés Cat Nat à horizon 2050.

### 1.4.2 État de l'art

#### Les travaux de la CCR et Météo France

La Caisse Centrale de Réassurance joue un rôle central dans la gestion des sinistres liés aux aléas naturels. Le réassureur s'est associé à Météo France afin de réaliser des travaux prospectifs d'évaluation de la vulnérabilité du territoire français au changement climatique.

En 2015, à l'occasion de la COP21, le réassureur public français dévoilait les résultats de ses travaux concernant les risques climatiques à horizon 2050 [13]. Cette première étude portait sur la France métropolitaine et se focalisait sur les périls couverts par le régime Cat Nat (inondations, sécheresse, submersions marines)<sup>1</sup>. Cette étude propose d'étudier à la fois l'évolution du climat en intégrant le modèle ARPEGE de Météo France calibré sur le scénario RCP4.5<sup>2</sup>, et l'évolution de la vulnérabilité à partir des projections de l'INSEE. Il ressort de cette première étude que la sinistralité moyenne annuelle pour les périls étudiés devrait augmenter de **+100%** d'ici 2050. Le changement climatique serait responsable de 20% de cette augmentation, le reste serait dû à l'évolution de la répartition des valeurs assurées.

En 2018, la CCR publiait les résultats d'une deuxième étude [14] visant à actualiser les chiffres présentés auparavant. Ce deuxième rapport est basé sur le scénario RCP8.5 du GIEC afin d'estimer l'impact d'un scénario plus pessimiste que celui utilisé en 2015. Comme en 2015, la CCR évalue conjointement les effets de l'évolution du climat et de la démographie (concentration dans les zones à risque).

Concernant le changement climatique, la CCR a utilisé des données climatiques fournies par Météo France et obtenues à partir du modèle climatique ARPEGE Climat. Ces données sont utilisées pour alimenter les modèles d'aléa développés par CCR pour les périls inondation, submersion marine et sécheresse. Ces modèles d'aléa sont très sophistiqués et reposent sur des études fines des données météorologiques (pluviométrie, vent, température, ...) et de la topographie. Pour les inondations, la CCR est par exemple capable de modéliser les débits de cours d'eau à partir des données de pluviométrie.

Cette étude permet à la CCR de conclure à une augmentation de **23%** des pertes annuelles moyennes en sécheresse et de **38%** pour les inondations. Au global, pour les trois périls considérés, la perte annuelle augmenterait de **35%** sous l'effet du changement climatique (contre 20%

---

1. Voir partie 2.1 pour plus d'informations concernant ce régime et son champ d'application.

2. Les scénarios d'émission de gaz à effet de serre sont présentés partie 1.1.2.

dans l'étude précédente basée sur le RCP4.5). Les cartes 1.12 présentent les résultats d'évolution des dommages annuels moyens par département pour la sécheresse et pour les inondations.

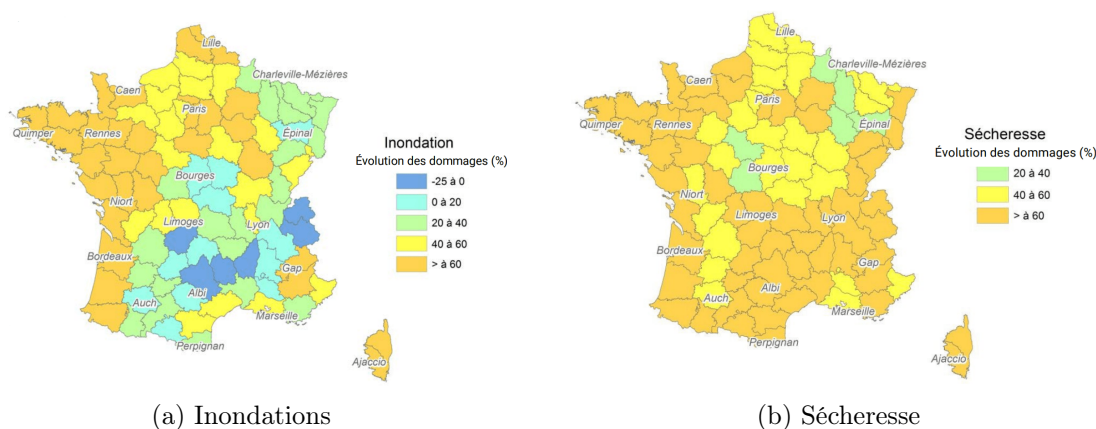


FIGURE 1.12 – Évolution des dommages annuels moyens (RCP8.5)  
Source : Étude CCR 2018 [14]

### Projections réalisées par France Assureurs

France Assureurs, anciennement Fédération Française de l'Assurance, a réalisé deux études sur les effets du changement climatique sur l'assurance.

La première étude [24] a été réalisée en 2014 et projetait la sinistralité pour un horizon 2040 pour quatre périls : la sécheresse, les inondations, les submersions marines et les tempêtes. Elle conclut à une augmentation de **90%** des coûts des dommages engendrés par ces périls. Le changement climatique est responsable de près d'un tiers de cette augmentation.

La deuxième étude [25], dont les résultats ont été publiés en 2021, actualise les chiffres présentés précédemment. France Assureurs y étudie les quatre mêmes périls pour une projection des coûts à horizon 2050. Au total, en prenant en compte les quatre périls, France Assureurs estime à **93%** l'augmentation des dégâts causés par les aléas naturels d'ici 2050 par rapport à la période passée, dont plus d'un tiers causé par le changement climatique. La sécheresse est identifiée comme le risque le plus menaçant avec une prévision d'un triplement de la charge moyenne annuelle. Pour les inondations hors submersions marines, une hausse de **81%** du coût cumulé des sinistres par rapport à la période passée serait à prévoir.

Pour établir ces conclusions, France Assureurs utilise à la fois une projection des données socio-économiques et une projection climatique. L'utilisation conjointe de ces deux types de projection permet à la Fédération d'évaluer l'augmentation de la sinistralité selon quatre facteurs : augmentation des richesses, répartition des richesses et de la population, variabilité naturelle du climat et changement climatique.

Les projections socio-économiques permettent d'établir les enjeux (bâties, humains...) exposés aux aléas et prennent en compte l'évolution de la population et des richesses données par l'INSEE. Pour les projections climatiques, France Assureurs s'est allié au Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement (LSCE) afin d'établir un lien entre des données climatiques et les données de sinistralité. Puis, à partir de deux modèles climatiques reposant sur le scénario

RCP8.5<sup>1</sup>, France Assureurs a réalisé une projection des aléas pour les quatre périls considérés.

Pour établir ces projections, France Assureurs a étudié la corrélation entre la sinistralité et les variables socio-économiques et climatiques. Le tableau suivant récapitule les variables retenues pour les périls sécheresse et inondation.

	Sécheresse	Inondation
Variables socio-économiques	Nombre d'habitations exposées aux phénomènes de retrait-gonflement des argiles	Nombre d'habitations en zone inondable (croisement des AZI et TRI)
Variables climatiques	Niveaux de précipitations (moyenne journalière); températures maximales	Quantile à 90% et à 99% des précipitations maximales

TABLE 1.1 – Variables retenues par France Assureurs pour réaliser ses projections à horizon 2050

### Le livre blanc Covéa

En 2022, Covéa publiait son livre Blanc sur les risques climatiques [19]. Cette étude très complète englobe quatre périls : les inondations (avec distinction des ruissellement et des débordements<sup>2</sup>), les tempêtes, la sécheresse et la grêle.

Comme France Assureurs et la CCR, Covéa réalise ses projections de sinistralité en considérant à la fois une évolution climatique et une évolution démographique basée sur les projections de l'INSEE. En ce qui concerne les modélisations climatiques, Covéa réalise une approche multi-modèles qui présente l'avantage de prendre en compte toutes les évolutions possibles du climat et de filtrer les erreurs individuelles de chaque modèle. Cette méthode présente néanmoins le désavantage de lisser les signaux climatiques entre les modèles et de réduire la variabilité.

Covéa choisi d'utiliser la quasi-totalité des modèles de projection climatique régionale du projet Euro-Cordex<sup>3</sup> pour le scénario d'émission RCP8.5. Cette approche très complète est unique et n'a pas été réalisée dans d'autres études.

A partir de modèles destinés à modéliser les risques climatiques et les dommages (Coventéo), Covéa conclut à :

- Une augmentation de la fréquence des inondations induisant une augmentation de la sinistralité de **110%** pour les inondations par débordement et de **130%** pour les ruissellements.
- Une hausse de la charge de sinistre de **60%** pour la sécheresse.
- Une augmentation de **20%** de la charge sinistre pour les orages de grêle.
- Un maintien constant de la fréquence et de l'intensité des tempêtes (pas d'augmentation significative de la sinistralité).

1. Les modèles retenus sont celui de l'IPSL et celui de l'institut MPI (voir partie 3.2.1 pour plus de détails concernant les modèles climatiques).

2. Voir partie 2.2.1 pour plus d'informations.

3. Voir partie 3.2.1 pour plus de détails concernant les modèles climatiques et Euro-Cordex.

Les cartes suivantes présentent les résultats obtenus par Covéa pour les périls inondation et sécheresse en termes d'évolution de la sinistralité à horizon 2050 par rapport à la période de référence (2008-2018).

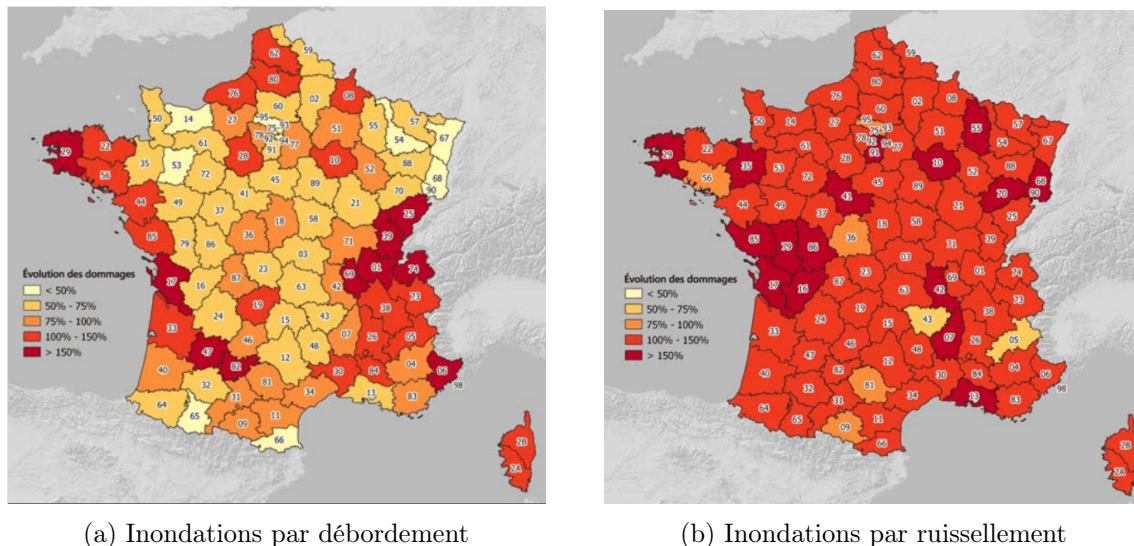


FIGURE 1.13 – Évolution des dommages annuels moyens dus aux inondations à horizon 2050 selon le scénario RCP8.5

Source : Livre blanc Covéa [19]

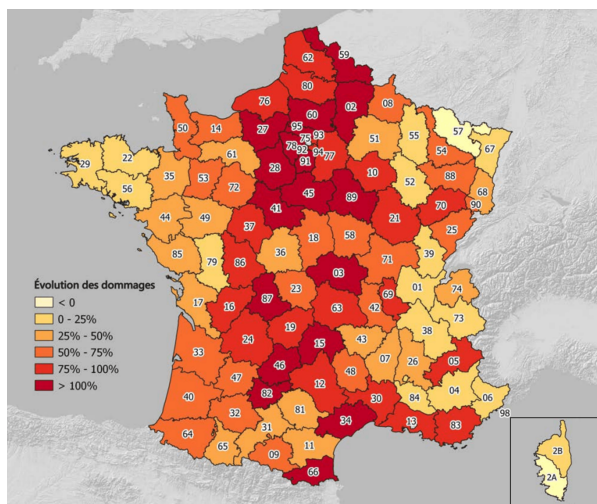


FIGURE 1.14 – Évolution des dommages annuels moyens dus à la sécheresse à horizon 2050 selon le scénario RCP8.5

Source : Livre blanc Covéa [19]

## Étude Seabird

SeaBird, cabinet de conseil en actuariat, propose un guide [48] étape par étape sur la façon de construire un modèle de simulation de la sinistralité liée aux catastrophes naturelles à l'horizon

2050 sur la base des différents scénarios du GIEC. Ce guide aborde notamment des questions relatives à l'utilisation, à la sélection et au traitement de données météorologiques issues de modélisations climatiques.

Ce guide propose un exemple de simulation pour les périls sécheresse et inondation. Pour cela, ils modélisent les arrêtés de Catastrophe Naturelle à partir des données du modèle Aladin Climat<sup>1</sup> suivant trois scénarios du GIEC (RCP2.6, 4.5 et 8.5). Puis, à partir d'une ACP et d'une régression sur composantes principales réalisées sur chaque commune, ils réalisent une projection d'évolution des dommages pour chaque péril entre 2020 et 2050. Ils proposent ensuite un rendu à la maille départementale. Pour la sécheresse, ils concluent à une hausse plus prononcée sur les régions qui concentrent déjà les zones d'aléas les plus fortes. Pour les inondations, l'augmentation sera principalement concentrée dans l'Est du pays.

## Synthèse des études

Le tableau 1.2 suivant propose une synthèse des résultats des études présentées dans cette partie.

	CCR et Météo France (2018)	FFA et LSCE (2021)	Seabird (2021)	Covéa (2022)
Modèle(s) climatique(s)	ARPEGE CLIMAT et modèle hydro-météorologique SIM2	Modèle IPSL et MPI	ARPEGE CLIMAT	Approche multi-modèles : Modèles EURO-CORDEX et Projections SWICCA (inondation) et CLIMSEC (sécheresse)
Scénario du GIEC retenu	RCP8.5	RCP8.5	RCP8.5 et RCP4.5	RCP8.5
Évolution de la sinistralité à horizon 2050 pour les inondations	x1,38 (x1,24 pour les débordements, x1,5 pour les ruissellements)	x1,81	Entre x1 et x1,4	Par débordement : x2,10 Par ruissellement : x2,30
Évolution de la sinistralité à horizon 2050 pour la sécheresse	x1,60 (x1,23 impact du climat seul)	x3,12	x1,18	x1,60

TABLE 1.2 – Comparaison des résultats des études existantes pour les inondations et la sécheresse

## Mémoires IA

Plusieurs mémoires présentés devant l'institut des actuaires ont pour sujet les catastrophes naturelles et leur modélisation. Nous pouvons notamment citer :

- Le mémoire de Corentin BOYEAU portant sur l'évaluation de l'impact du changement climatique sur le risque inondation en France métropolitaine [8].
- Le mémoire de Jorge OCHOA MAGANA qui propose une analyse de la reconnaissance de l'état de catastrophe naturelle à l'aide de l'*Open Data* [43].
- Le mémoire Adrien POTHON qui s'intéresse à la modélisation des inondations en France métropolitaine [45].
- Ainsi que le mémoire de Zejun ZHAO qui propose d'étudier l'impact du changement climatique sur le risque de grêle en France à horizon 2050 [53].

1. Voir partie 3.2.1 pour plus de détails concernant les modèles climatiques.

Plusieurs acteurs du monde assurantiel et bancaire se sont intéressés à l'évolution des dommages causés par les catastrophes naturelles en France dans un contexte de changement climatique. En 2014, France Assureurs publiait la première étude de ce type et établissait des premiers résultats de projection des dommages pour un horizon 2040. Cette publication a inspiré d'autres acteurs du monde de l'assurance (CCR, ACPR, Covéa...) qui ont publié à leur tour les résultats de leurs études sur le sujet.

Ces différentes publications proposent une projection des dommages causés par différents types de catastrophes naturelles par département et pour un horizon de moyen terme. Pour cela, ces études prennent en compte à la fois les aspects de changement climatique, en intégrant un ou plusieurs scénarios du GIEC, et les aspects relatifs à l'évolution de la population et de la répartition des richesses sur le territoire métropolitain.

Le phénomène de retrait-gonflement des argiles est au cœur de plusieurs études, rapports et webinaires récents comme la *master class* organisée par France Assureurs en septembre 2022, ou encore le projet ViSéGéo<sup>1</sup> qui tente d'établir un modèle prédictif des sécheresses.

Par ailleurs, plusieurs mémoires d'actuariat se sont intéressés à des problématiques de modélisation des catastrophes naturelles et à l'impact du changement climatique dans sur les risques de catastrophe naturelle.

---

1. Vigilance Sécheresse Géotechnique





## Chapitre 2

# Les inondations et sécheresses en France

En France, les catastrophes naturelles sont fréquentes et peuvent causer des dommages importants aux personnes et à leurs propriétés. Les types de catastrophes naturelles les plus courants en France incluent les inondations, les tempêtes, les sécheresses et les mouvements de terrain.

Certains événements naturels considérés comme non assurables par le marché privé sont aujourd'hui indemnisés par un régime hybride d'assurance nommé régime Cat Nat. Ce régime permet aux personnes qui subissent des dommages lors de ces événements d'être indemnisées par leur assurance habitation ou par des fonds publics.

Afin de réduire les coûts supportés par ce régime, l'État incite à la mise en place de dispositifs de prévention des risques naturels pour minimiser les conséquences des catastrophes naturelles.

Cette partie est consacrée à la présentation de la gestion de deux types de catastrophes naturelles en France : les sécheresses et les inondations. Cette partie balaye différents aspects notamment les notions d'exposition aux risques, de prévention, de gestion ainsi que d'indemnisation en cas de sinistre.

### 2.1 Le régime d'indemnisation des catastrophes naturelles

La France est l'un des rares pays à s'être doté d'un régime d'indemnisation des dommages en cas de sinistre causé par un phénomène naturel. Fondé il y a 40 ans, ce dispositif est connu sous le nom de régime Cat Nat. Cette partie présente sa création et décrit son champ d'application et son fonctionnement.

#### 2.1.1 Création du régime

L'article Variance « Le régime français des catastrophes naturelles : Historique du régime » [6] écrit par Patrick Bidan et Thierry Cohignac, permet de retracer la création du régime de la façon suivante :

Avant la loi du 13 juillet 1982<sup>1</sup>, les dommages résultant de phénomènes naturels n'étaient quasiment jamais couverts par les contrats d'assurance. Les sinistrés ne pouvaient compter que sur des aides publiques qui étaient limitées et très inférieures au montant réel des dommages subis. Il existait donc un vrai besoin de couverture, tant pour les particuliers que pour les entreprises.

Durant les années 70, les assureurs et les pouvoirs publics ont réfléchi à la mise au point d'un mécanisme d'indemnisation sans pour autant aboutir. Lors de l'hiver 1981, des inondations catastrophiques frappèrent une grande partie du territoire français et notamment les vallées de la Saône, du Rhône et de la Garonne. L'ampleur des dommages fut telle que de nombreux assureurs participèrent à l'indemnisation des sinistrés à la demande de la Direction des Assurances.

Cette initiative inspira la création du régime que l'on connaît aujourd'hui, fondé sur l'assurance mais encadré par l'État. Ce fut la genèse de la loi du 13 juillet 1982, qui permet à tout souscripteur d'un contrat d'assurance de dommages aux biens de bénéficier d'une couverture automatique, large et peu onéreuse, contre les risques de catastrophe naturelle.

Dans son article 1, la loi du 13 juillet 1982 stipule que : « *Les contrats d'assurance, souscrits par toute personne physique ou morale autre que l'État et garantissant les dommages d'incendie ou tous autres dommages à des biens situés en France, ainsi que les dommages aux corps de véhicules terrestres à moteur, ouvrent droit à la garantie de l'assuré contre les effets des catastrophes naturelles sur les biens faisant l'objet de tels contrats.* »

Ainsi, à sa création, le régime des catastrophes naturelles prévoyait la couverture des dommages matériels causés par un agent naturel d'intensité anormale, non garanti par des assurances traditionnelles. Le dispositif n'était censé couvrir que les risques non assurables, bien que ce ne fut pas clairement spécifié à l'époque.

### 2.1.2 Champs d'application

Depuis sa création, le régime s'applique sur l'ensemble du territoire métropolitain. En 1990, le régime a été étendu aux départements et régions d'outre-mer<sup>1</sup> ainsi qu'aux collectivités d'outre-mer<sup>2</sup>.

#### Périls couverts

La loi du 13 juillet 1982 ne prévoit pas une liste des phénomènes naturels couverts. Elle précise néanmoins que sont couverts « *les dommages matériels directs **non assurables** ayant eu pour cause déterminante l'intensité anormale d'un agent naturel* ». L'historique des dommages indemnisés à la suite d'événements naturels permet néanmoins d'établir une liste non exhaustive des phénomènes couramment garantis :

- inondations (par ruissellement, débordement de cours d'eau, remontées de nappe phréatique ou submersion marine) ;
- séismes ;

---

1. 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/>

1. DROM : Guadeloupe, Guyane, Martinique, Mayotte et la Réunion

2. COM : Saint-Barthélemy, Saint-Martin, Saint-Pierre-et-Miquelon, Wallis-et-Futuna et la Polynésie française

- mouvements de terrain ;
- sécheresses (notamment retrait-gonflement des argiles) ;
- cyclones de grande ampleur en Outre-Mer ;
- raz de marée ;
- avalanches.

La législation n'exclut pas la possibilité d'intégrer ou de supprimer certains périls du domaine d'application du régime Cat Nat. Ce fut notamment le cas pour les tassements différentiels provoqués par la rétraction de certaines argiles sous l'effet de la sécheresse qui furent intégrés au régime à partir de 1988.

Le critère de non assurabilité fut ajouté à l'article 1 suite à l'adoption de la loi du 16 juillet 1992<sup>1</sup>. Cette modification a permis l'exclusion du régime Cat Nat des périls tempête, neige, grêle et gel qui étaient considérés comme assurables par un contrat d'assurance classique. Il n'exclut néanmoins pas les phénomènes couverts par le régime et résultant de l'un de ces événements (inondation causée par une tempête par exemple).

### Biens couverts

Comme le précise l'article 1, le régime couvre tous les biens situés en France et assurés contre les dommages incendie ou tous autres dommages. Ainsi les biens habituellement couverts par le régime sont :

- les habitations et leur contenu ;
- les installations industrielles et commerciales et leur contenu ;
- les bâtiments appartenant aux collectivités locales et leur contenu ;
- les bâtiments agricoles et leur contenu ;
- les serres considérées en tant que bâtiment ou matériel ;
- les véhicules terrestres à moteurs ;
- les frais de nettoyage.

### 2.1.3 Les primes

La solidarité est l'un des piliers du régime Cat Nat [12]. Elle se traduit par un taux de surprime d'assurance unique par catégorie de contrat<sup>2</sup>. Quelle que soit l'exposition au risque, ce taux est fixé par l'Etat. S'agissant d'un taux fixe, les primes catastrophes naturelles évoluent avec l'assiette sur laquelle elles sont fixées.

En ce qui concerne les contrats auto, le taux de surprime est fixé à 6% des primes vol et incendie et à 0,5% de la prime dommages. Initialement fixé à 5,5% pour les contrats dommages non-auto, ce taux a été revu à deux reprises face aux difficultés financières du régime :

- Passage de 5,5% à 9% en 1985 ;
- Passage de 9 à 12% en 2000. Ce taux de 12% est toujours en vigueur aujourd'hui.

Une partie de ces primes est attribuée au fond Barnier<sup>3</sup> créé en 1995. Ce fond permet de soutenir

---

1. Loi n° 92-665 du 16 juillet 1992 portant adaptation au marché unique européen de la législation applicable en matière d'assurance et de crédit

2. Article 2 de la loi du 13 juillet 1982

3. Fonds de prévention des risques naturels majeurs (FPRNM), dit fonds Barnier

les actions de prévention et de protection contre les risques naturels.

L'évolution des primes ainsi que les principales modifications y afférentes sont présentées en figure 2.1.

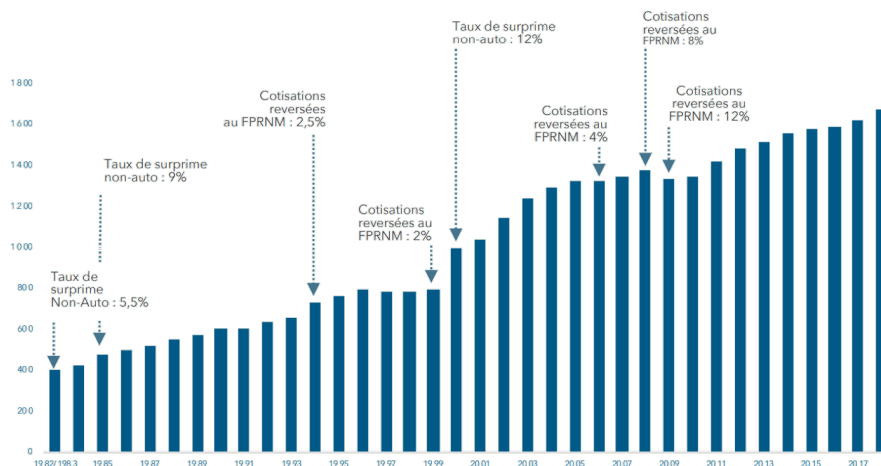


FIGURE 2.1 – Primes Cat Nat en millions d'euros

Source : CCR [15]

Les taux de primes n'ont pas fait l'objet de modification depuis 1999. Depuis l'année 2017, particulièrement coûteuse pour le régime du fait du passage des Ouragans Irma et Maria, le gouvernement a exprimé sa volonté de réformer le régime.

#### 2.1.4 Procédure d'indemnisation

La garantie de catastrophe naturelle ne s'active pas automatiquement et suit une réglementation bien précise.

La déclaration de l'état de catastrophe naturelle suit un schéma strict faisant intervenir plusieurs acteurs locaux (maires et préfets) et nationaux (commission interministérielle). La figure 2.2 illustre le processus d'indemnisation que nous allons maintenant décrire à partir des informations fournies par la CCR [12].

**Le rôle du maire :** Les maires de communes sinistrées initialisent la demande. Ils ont la charge d'établir un document contenant la date, l'heure, la nature du phénomène, les types de biens endommagés, le nombre de reconnaissances de l'état de catastrophe naturelle passées ainsi que les mesures éventuelles de prévention mises en place (comme les plans de prévention des risques naturels qui seront présentés en détail en partie 2.2.4). Ce document est ensuite transmis au préfet.

**Le rôle du préfet :** Le préfet établit un dossier à partir des documents recueillis auprès des maires. Le dossier doit contenir la liste des communes requérantes, un rapport technique sur la nature et l'intensité du phénomène et tout autre document permettant d'évaluer les dommages. Le préfet transmet ensuite ce dossier à une commission interministérielle.

**La commission interministérielle :** Elle est en charge d'examiner les dossiers. A partir de

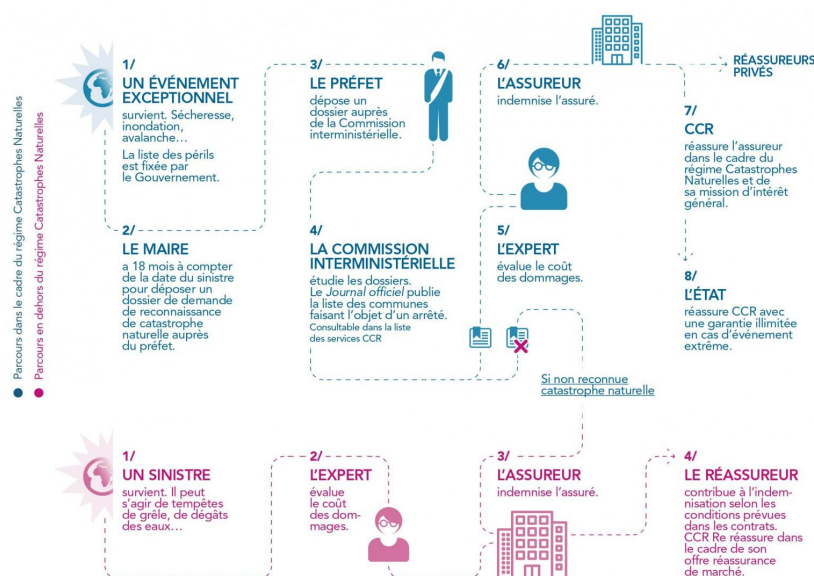


FIGURE 2.2 – Mécanisme d'indemnisation du régime Cat Nat

Source : CCR

plusieurs critères d'appréciation, elle prépare la décision des ministres concernant l'accord de reconnaissance d'état de catastrophe naturelle. Elle se compose de représentants du Ministère de l'Intérieur, du Ministère de l'Économie et des Finances, du Ministère de la Transition Écologique, de la Caisse Centrale de Réassurance (CCR) et du Ministère de l'Outre-mer si la demande concerne l'outre-mer. La décision de la commission paraît ensuite au Journal Officiel. L'arrêté paru au Journal Officiel précise les communes concernées, les dates et les types de phénomène naturel.

Si l'état de catastrophe naturelle est reconnu, l'assureur doit alors indemniser les sinistrés au titre de la garantie Cat Nat dans un délai de trois mois à compter de la date de déclaration du sinistre.

### 2.1.5 Le montant des franchises

Le montant des franchises est fixe et défini par l'État. Les franchises applicables sont données par le tableau 2.1.

Type de bien	Périls autre que sécheresse	Sécheresse
Biens à usage d'habitation et véhicules	380€	1520€
Biens à usage professionnels	10% du sinistre avec un minimum de 1140€	10% du sinistre avec un minimum de 3050€
Pertes d'exploitation	3 jours ouvrés avec un minimum de 1140€	3 jours ouvrés avec un minimum de 3050€

TABLE 2.1 – Franchises applicables

Dès sa création, le régime a encouragé la mise en place de mesures permettant de diminuer les

risques majeurs. Ce sont les Plans de Prévention des Risques Naturels qui visent à mieux évaluer les risques. Ces plans de prévention seront présentés plus en détail en partie 2.2.4. Depuis 2001, pour inciter les communes à mettre en place ce type de dispositif, une modulation de franchise peut être appliquée. Cette majoration de franchise peut concerner les communes dépourvues de PPRN à partir de deux reconnaissances de l'état de catastrophe naturelle de même type au cours des cinq dernières années. Le schéma de majoration est donné par le tableau 2.2.

Nombre de reconnaissance	Majoration
1 à 2 reconnaissances	franchise de base
3 reconnaissances	doublement de la franchise
4 reconnaissances	triplement de la franchise
5 reconnaissances et plus	quadruplement de la franchise

TABLE 2.2 – Modulation de franchise pour les communes dépourvues de PPRN

Créé il y a 40 ans, le régime Cat Nat est une spécificité française permettant à tous de bénéficier d'une couverture automatique et peu onéreuse contre les risques naturels. Ce dispositif couvre les biens assurés en France au titre des dommages contre les périls considérés comme non assurables tels que les inondations ou les mouvements de terrains.

La solidarité est l'un des piliers de ce régime et se traduit par une uniformisation du taux de prime prélevé, quel que soit l'exposition aux risques naturels. Néanmoins, afin de limiter l'exposition dans les zones les plus vulnérables, un système de majoration de franchise conditionnée par la mise en place de mesures de prévention a été instauré.

La procédure d'indemnisation en cas de catastrophe naturelle suit un schéma strict faisant intervenir de nombreux acteurs locaux comme nationaux. L'arrêté interministériel, paru au Journal Officiel et détaillant la liste des communes reconnues en état de catastrophe naturelle, est l'élément central de la procédure d'indemnisation dans le cadre du régime Cat Nat.

Face à l'augmentation de la sinistralité et avec le dérèglement climatique, la viabilité du régime est remise en question. Bien que le seuil d'alerte n'ait pas encore été franchi, le matelas dont dispose la CCR tend à se réduire. Les pistes de réforme portent principalement sur le montant des franchises pour les professionnels et la hausse du taux de prime.

## 2.2 Les inondations

En France, les inondations représentent le premier risque naturel en termes de dommages et d'exposition du territoire. Aujourd'hui, l'ensemble du territoire français est vulnérable.

L'inondation est définie comme *"une submersion, rapide ou lente, d'une zone habituellement hors de l'eau"*.

Dans cette partie nous présenterons les différents types d'inondation, les causes de leur survenance et étudierons l'exposition du territoire et les mesures mises en place pour réduire les risques d'inondation en France.

### 2.2.1 Les types d'inondation

Suivant l'origine du phénomène, il est possible d'établir une typologie des inondations. Dans cette partie nous présentons les principaux types d'inondation auxquels le territoire français est exposé. Notons que ces différents types d'inondation peuvent survenir simultanément et ne sont pas indépendants. Il n'est pas toujours évident de séparer ces différents événements.

**Les inondations par débordement de cours d'eau** résultent d'une crue plus ou moins rapide d'un cours d'eau. Elles découlent de deux phénomènes :

- Les crues lentes de plaines correspondent au débordement lent d'un fleuve ou d'une rivière de son lit mineur. Ces inondations sont relativement longues et peuvent persister jusqu'à plusieurs semaines ;
- Les crues rapides et torrentielles se produisent principalement en montagne à la suite de fortes précipitations ou en période de fonte des neiges. Ces crues sont remarquables par la rapidité de la montée des eaux et par les dégâts causés par les éléments solides transportés par le courant.

**Les inondations par ruissellement** se produisent dans des zones où l'infiltration de l'eau de pluie dans le sol est limitée. Elles résultent de pluies soutenues ou d'orages provoquant un ruissellement important en dehors du réseau hydrographique et du réseau d'évacuation des eaux pluviales. Ce type d'inondation s'observe essentiellement en zone urbaine où l'artificialisation des sols est importante.

**Les inondations par submersion marine** se produisent sur le littoral lorsque des terres habituellement sèches sont inondées d'eau de mer lors de conditions océaniques et météorologiques défavorables. Cette forme d'inondation a généralement lieu lors de tempêtes et grandes marées provoquant une élévation du niveau de la mer favorisant le déversement de l'eau marine sur la terre. Il s'agit d'inondations rapides et de courte durée. Les terres inondées se situent généralement sous le niveau de la mer mais peuvent également être plus en altitude si l'eau franchit des ouvrages de protection.

**Les inondations par remontée de nappe** sont provoquées par la montée du niveau d'une nappe phréatique jusqu'à la surface du sol. Ce type d'inondation se produit généralement à la fin de l'hiver ou au printemps, lorsque les nappes souterraines atteignent leur capacité de

stockage maximum. Les nappes souterraines sont alimentées par l'infiltration des eaux de pluie. Lorsque la nappe n'a plus la capacité de stocker davantage d'eau mais que la recharge perdure, le niveau de la nappe atteint la surface du sol provoquant ainsi une inondation des sous-sols, des caves et des habitations en surface. Ces inondations perdurent durant de longues périodes, pouvant aller jusqu'à plusieurs mois. Elles restent heureusement des événements rares.

### 2.2.2 Facteurs déclenchants et aggravants

Les facteurs de déclenchements d'une inondation varient en fonction du type d'inondation considéré.

En ce qui concerne les phénomènes de crue et de ruissellement, des épisodes pluvieux voir orageux répétés, prolongés et intenses sont souvent à l'origine des inondations.

Les facteurs de déclenchement d'une inondation par remontée de nappe diffèrent de ceux évoqués précédemment du fait de la temporalité longue et de la particularité de ce type d'inondation. Les conditions de déclenchement sont à la fois d'ordre météorologique et géologique : une suite d'années pluvieuses et certaines caractéristiques de l'aquifère contenant la nappe sont des éléments déterminants dans l'apparition de ce type de phénomène.

Les submersions marines sont quant à elles favorisées par des conditions marégraphiques particulières : elles sont déclenchées aux passages d'une tempête et se produisent majoritairement à marée haute lors des grandes marées.

Le risque de survenue d'inondation et les conséquences qui en découlent peuvent être accentués par certaines caractéristiques des territoires. De manière générale, les activités humaines sont responsables d'une augmentation de ce risque. Par exemple, l'artificialisation des sols diminue l'infiltration de l'eau ce qui augmente la part d'eau qui ruisselle et peut accélérer l'écoulement des eaux. Par ailleurs, la notion de risque prend également en compte les enjeux exposés. Ainsi, une augmentation du risque peut aussi provenir d'une augmentation de ces enjeux. Certaines résidences et zones d'activité sont construites dans des zones inondables, ce qui contribue à augmenter le risque. De même, le risque de submersion marine est fortement accru par l'urbanisation du littoral.

### 2.2.3 Exposition du territoire

La notion de risque ne se résume pas qu'à la notion de probabilité d'occurrence d'un événement, mais bien comme la *"concentration d'enjeux dans une zone potentiellement inondable"* dans le cas des inondations.

Aujourd'hui le territoire français est fortement exposé au risque d'inondation. L'implantation historique des agglomérations françaises proches de cours d'eau importants, son importante façade maritime et ses côtes basses rendent le territoire particulièrement vulnérable au risque d'inondation. Selon le site Géorisques [37], plus de 18 millions de Français résident dans des zones vulnérables aux inondations par débordement de cours d'eau et 1,5 millions sont exposés aux submersions marines.

Plusieurs documents cartographient l'exposition du territoire au risque d'inondation. Tous n'ont pas la même portée juridique et leurs objectifs sont variés. Ils peuvent, par exemple, contribuer à l'amélioration de la culture du risque et à l'information des populations ou contribuer à la



prévention des risques. La variété des documents s'explique aussi par la disparité des types d'inondation cartographiés et par la multiplicité des occurrences de ces événements. Dans cette partie, nous présenterons certains de ces documents ainsi que leurs objectifs.

### Les Atlas des Zones Inondables (AZI)

Au début des années 2000, les services de l'État se sont attelés à la réalisation d'une cartographie des zones inondables par débordements de cours d'eau. C'est dans ce contexte qu'ont été produits les atlas des zones inondables. Ils se composent de cartes représentant les zones inondables du cours d'eau étudié et d'un rapport. Ces documents cartographiques constituent une source d'information à destination des collectivités et du public. Ils n'ont pas de valeur réglementaire mais peuvent être utilisés pour justifier une interdiction d'urbanisme. D'après le site Géorisques [37], ces atlas « [...] cartographient généralement au 1/25 000e les phénomènes d'inondation à partir de connaissances historiques, de l'étude du fonctionnement naturel des cours d'eau, de l'analyse de la topographie, et parfois de modélisations. ». Ils ne couvrent néanmoins qu'une partie du territoire et ont été élaborés selon des pratiques locales.

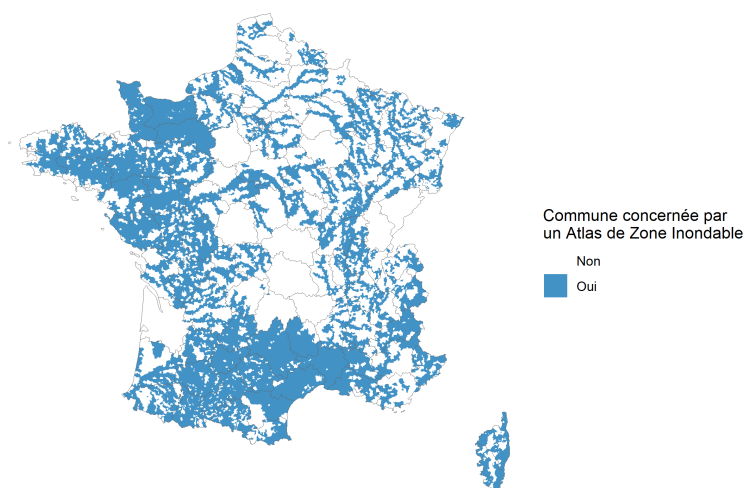


FIGURE 2.3 – Cartographie des communes concernées par un AZI

### De la Directive Inondation à l'identification des Territoires à Risque Important d'Inondation (TRI)

À la suite des nombreuses inondations ayant eu lieu en Europe à la fin du vingtième siècle et au début des années 2000, la commission européenne a adopté la "Directive Inondation" <sup>1</sup> le 23 octobre 2007. En 2010-2011, elle a été transposée dans la loi française <sup>2</sup>. Cette directive a pour objectif principal d'« établir un cadre pour l'évaluation et la gestion des risques d'inondation, qui vise à réduire les conséquences négatives pour la santé humaine, l'environnement, le patrimoine culturel et l'activité économique »(art. 1). L'article 2 précise que tous les types d'inondation

1. Directive 2007/60/CE du parlement européen et du conseil du 23 octobre 2007 relative à l'évaluation et à la gestion des risques d'inondation dite "Directive Inondation"

2. Loi d'engagement national pour l'environnement N°2010-788 du 12 juillet 2010 et Décret n° 2011-227 du 2 mars 2011 relatif à l'évaluation et à la gestion des risques d'inondation

sont concernés par cette directive<sup>1</sup>.

Afin d'atteindre cet objectif, la directive impose qu'une démarche en quatre étapes renouvelable par cycle de six ans soit réalisée sur chaque district hydrographique<sup>2</sup>. Cette partie détaille les trois premières étapes qui portent sur la cartographie du risque et l'exposition du territoire. La dernière porte sur l'élaboration d'un plan de gestion des risques et sera détaillée dans une partie ultérieure.

La première étape devait être réalisée avant fin 2011 pour le premier cycle. Elle consiste en une évaluation préliminaire des risques d'inondation (EPRI) afin d'établir une estimation des personnes et des biens exposés dans chaque district. Une EPRI nationale [36] a été établie sous la direction de l'État à partir des EPRI réalisées pour les quatorze districts afin de mettre en évidence les événements d'incidence nationale.

Dans le cadre de cette évaluation préliminaire, chaque district a notamment procédé à la réalisation d'une cartographie des zones potentiellement soumises à une inondation ; il s'agit des enveloppes approchées des inondations potentielles (EAIP). Elles correspondent au débordement maximum possible et ne tiennent pas compte des barrages et autres ouvrages de protection. Les EAIP ont un but informatif et ne peuvent être utilisées lors de procédures administratives ou réglementaires.

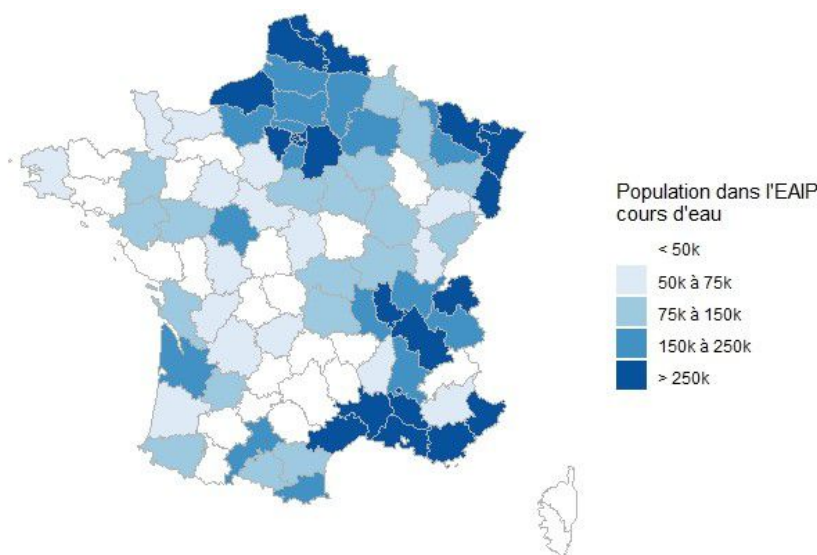


FIGURE 2.4 – Population dans l'EAIP cours d'eau par département

Source : Données ONRN

Cette première évaluation du risque mène à la deuxième étape de la directive qui consiste à identifier les zones où des actions doivent être menées et où la connaissance du risque doit être approfondie. Ces Territoires à Risque Important d'Inondation (TRI) concentrent des enjeux majeurs (population, emplois, bâti, etc.) susceptibles d'être inondés. 122 TRI ont été identifiés lors du premier cycle de la Directive Inondation. Le deuxième cycle a porté le nombre de TRI à 124, répartis sur l'ensemble des régions avec toutefois une forte concentration sur le pourtour méditerranéen.

1. « Cette notion recouvre les inondations dues aux crues des rivières, des torrents de montagne et des cours d'eau intermittents méditerranéens ainsi que les inondations dues à la mer dans les zones côtières. » (art 2)

2. La France compte 14 districts hydrographiques, 9 en métropole et 5 en outre-mer. Voir carte A.1 en annexe.

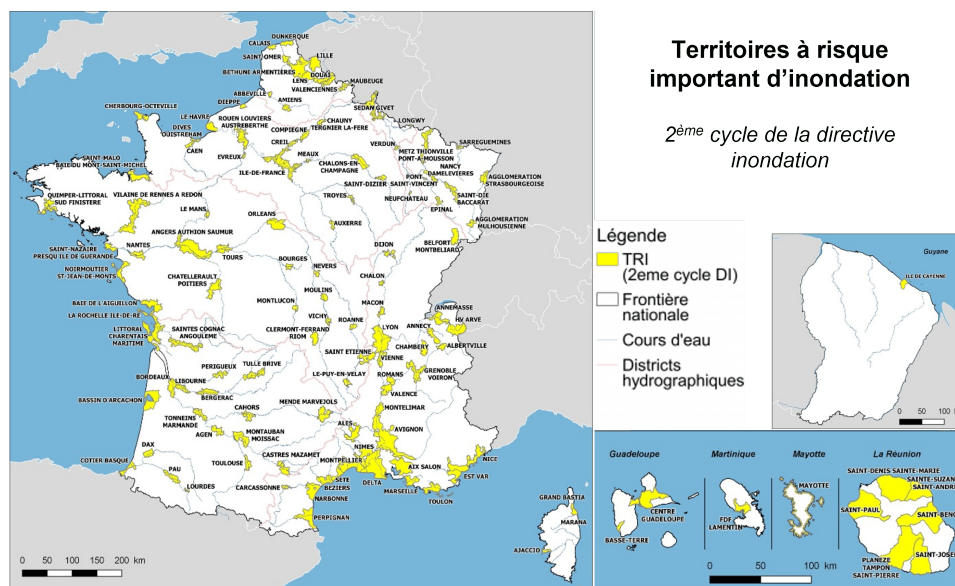


FIGURE 2.5 – Territoires à risque important d'inondation

Sources : DREAL, DGPR, IGN, BD Carthage

La troisième étape porte sur la cartographie des inondations sur ces TRI. L'objectif est d'établir des cartes des zones inondables et des risques d'inondation en mettant en avant les pertes matérielles, humaines et économiques qui pourraient en résulter. Une enveloppe d'impact est réalisée pour chacun des trois scénarios de probabilité étudiés :

- l'évènement fréquent (période de retour de 10 à 30 ans) ;
- l'évènement moyen (au moins centennale) ;
- l'évènement exceptionnel, de l'ordre de la crue millénale.

Contrairement à l'EPRI qui ne permet que de comptabiliser les enjeux situés dans une zone d'inondation potentielle, la cartographie des TRI suivant les trois scénarios mentionnés précédemment informe sur la vulnérabilité des enjeux identifiés et sur la probabilité d'occurrence des dommages.

Ces documents cartographiques soulignent l'hétérogénéité d'exposition des territoires. Les agglomérations, concentrant emploi et patrimoine, apparaissent comme fortement vulnérables. Ainsi, la région parisienne, la côte méditerranéenne et la vallée du Rhône sont fortement exposés. Le département du Nord et la plupart de la façade maritime ressortent également de manière forte.

### 2.2.4 Gestion et prévention du risque inondation

La politique de gestion du risque inondation en France est assez complexe comme en témoigne le panorama 2.6 réalisé par la Direction Générale de la Prévention des Risques (DGPR). Cette politique de gestion se décline de l'échelle nationale à l'échelle locale. Dans cette partie nous présenterons quelques démarches et procédures mises en place dans le cadre de la gestion des inondations en France.

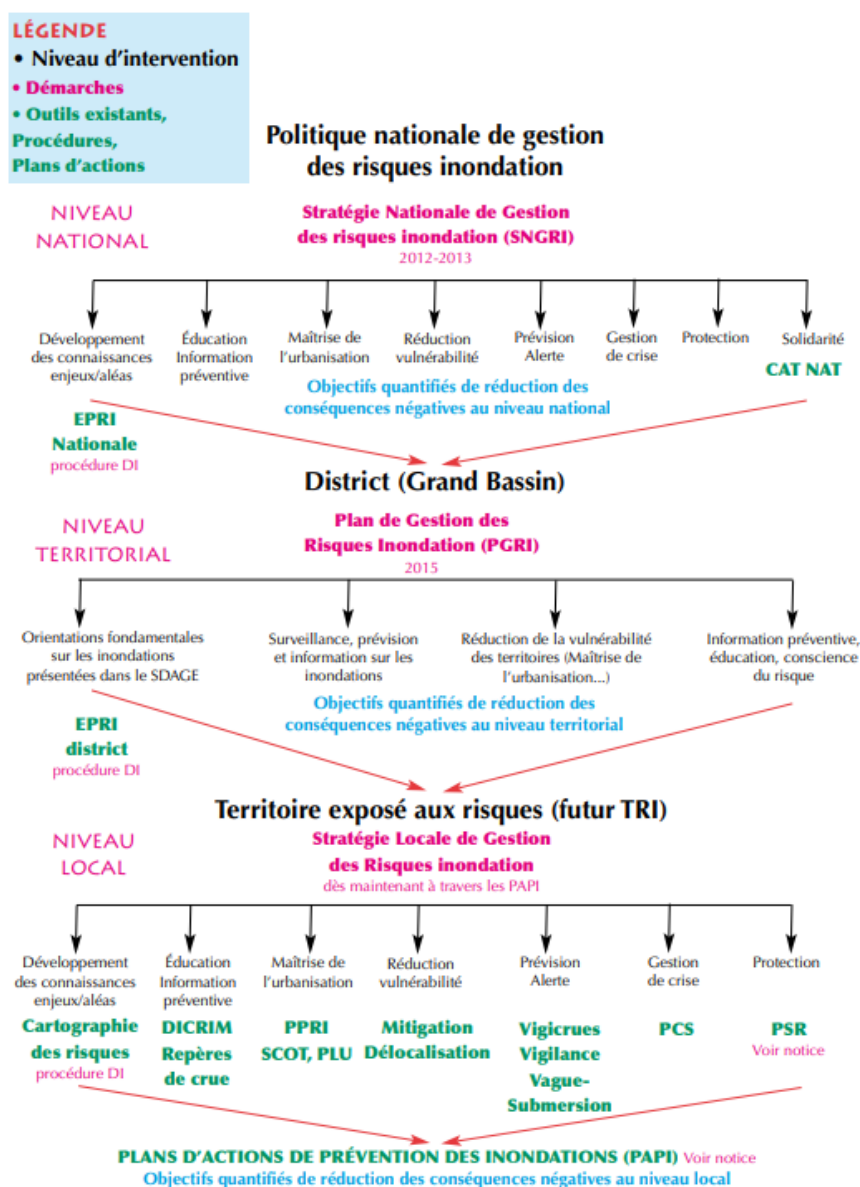


FIGURE 2.6 – Panorama de la politique nationale de gestions des risques inondation  
Source : DGPR [20]

### Stratégie nationale de gestion des risques d’inondation et ses déclinaisons territoriales et locales

A l’échelle nationale, sous l’impulsion de la Directive Inondation, la France s’est dotée d’une stratégie de gestion du risque inondation (SNGRI) par arrêté ministériel le 7 octobre 2014<sup>1</sup>. Les objectifs de cette stratégie sont clairement définis par la DGPR [21] :

- Augmenter la sécurité des populations exposées ;
- Stabiliser à court terme, et réduire à moyen terme, le coût des dommages liés à l’inonda-

1. Arrêté du 7 octobre 2014 relatif à la stratégie nationale de gestion des risques d’inondation <https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000029583047>

tion ;

- Raccourcir fortement le délai de retour à la normale des territoires sinistrés.

Cette stratégie vise également à assurer une certaine cohérence des actions menées en France. Elle encadre notamment les plans de gestion des risques d'inondation (PGRI) qui déclinent sur chaque district hydrographique les objectifs de la stratégie nationale. Quatrième et dernière étape de la Directive Inondation, ils sont un élément central de la mise en oeuvre de cette directive sur le territoire français. Les PGRI se déclinent ensuite en stratégies locales à l'échelle de chaque TRI. Ces stratégies locales intègrent les particularités et besoins du territoire concerné.

### Maîtrise de l'urbanisation : les plans de prévention des risques naturels

L'un des enjeux majeurs dans la prévention des inondations est la maîtrise de l'urbanisation. L'article 5 de la loi du 13 juillet 1982 a institué le plan d'exposition aux risques (PER). Ces PER devaient permettre de déterminer *"notamment les zones exposées et les techniques de prévention à y mettre en oeuvre"*<sup>1</sup>. En 1995, suite à la loi Barnier<sup>2</sup>, les plans de prévention des risques naturels (PPRN) les ont remplacés. L'objectif principal du PPRN est de contrôler la vulnérabilité et l'exposition des biens et des personnes dans les zones à risque. Les PPRN sont une servitude d'utilité publique et sont annexés au plan local d'urbanisme des communes concernées.

Leur mise en place implique à la fois les collectivités locales, les citoyens et les services de l'État. La procédure détaillée ici [22] ne peut pas durer plus de 3 ans :

- **Prescription** : Un arrêté de prescription est pris par le préfet du département. Cet arrêté précise *"le bassin de risque, les risques pris en compte par le PPRN, le service de l'État en charge de son élaboration et les modalités de la concertation"*[22].
- **Élaboration** : Une première étude d'aléa est réalisée. Elle consiste à établir un recensement des principaux phénomènes ayant ou pouvant toucher la zone étudiée. Puis une étude des enjeux exposés, humains et matériels, est conduite conjointement avec les communes concernées. Le croisement des enjeux et des aléas permet d'établir le plan de zonage réglementaire qui est accompagné d'un règlement détaillant les mesures applicables à chaque zone.
- **Concertation et enquête publique** : Le projet complet est ensuite soumis aux collectivités concernées ainsi qu'aux organismes ayant participé à sa création. Cette phase de consultation dure deux mois. Une enquête publique est également réalisée afin de recueillir l'avis de la population.
- **Approbation** : Après d'éventuelles modifications, le PPRN est approuvé par le préfet. Il est alors annexé au plan local d'urbanisme des communes concernées.

Un PPRN est composé de trois documents :

1. Article 5 de la loi du 13 juillet 1982 [https://www.legifrance.gouv.fr/loda/article\\_lc/LEGIARTI000006273976/1982-07-14](https://www.legifrance.gouv.fr/loda/article_lc/LEGIARTI000006273976/1982-07-14)

2. Loi n°95-101 du 2 février 1995 relative au renforcement de la protection de l'environnement, dite loi Barnier <https://www.legifrance.gouv.fr/loda/id/JORFTEXT000000551804>

- un rapport de présentation ;
- le plan de zonage des risques établi par croisement des enjeux et des aléas ;
- et du règlement mentionné auparavant.

Dans le cadre des inondations, on parle alors de Plan de Prévention des Risques d'inondation (PPRi). L'objectif principal du PPRi est de contrôler la construction, l'occupation des sols et la gestion des zones à risque. Pour les inondations, ces zones sont définies sur la base d'une crue de référence. A l'inverse des TRI et des AZI présentés en partie 2.2.3, les PPRi sont des documents à valeur réglementaire instaurant des règles de conductibilité dans les zones inondables. Ces dispositions prévalent sur toute autre considération. Ils n'ont néanmoins pas pour objet d'empêcher toute nouvelle construction sur une commune donnée. Seules certaines zones les plus exposées sont interdites à la construction. Les implantations restent possibles dans les zones constructibles où l'aléa est relativement modéré.

### **Programme d'actions de prévention des inondations**

Le Programme d'Actions de Prévention des Inondations (PAPI) est un appel à projet mis en place par l'État en 2002. Il permet aux collectivités d'être soutenues financièrement pour la mise en place de projets de prévention en vue de réduire les conséquences des inondations. Ces projets doivent répondre à un cahier des charges défini par le gouvernement et ayant fait l'objet d'une mise à jour au début 2020.

Depuis 2011, 221 PAPI ont été labellisés. A fin 2020, selon le ministère de la transition écologique [39], leur financement représentait un montant total de 2,34 Mds € dont près de 1 Mds € d'aide financière de l'État.

### **Prévisions et information de la population**

Afin de réduire au maximum le bilan humain, il est important d'informer la population sur la manière d'agir avant, pendant et après une inondation. A cet effet, plusieurs guides et pages internet ont été réalisés par le gouvernement, ses délégations locales et certains assureurs.

La prévision des inondations est également un outil essentiel pour réduire le bilan humain. Elle repose principalement sur :

- La prévision et l'observation des précipitations par Météo-France ;
- La surveillance des cours d'eau (vigicrues) ;
- Des outils pour anticiper les crues rapides.

Les types d'inondation sont multiples et la France y est particulièrement exposée. Selon les derniers chiffres du gouvernement, plus de 18 millions de Français résident en zone inondable. Afin d'identifier les territoires les plus vulnérables, plusieurs cartographies ont été conduites durant les dernières décennies. Ces cartographies ont permis d'identifier la région parisienne, la côte méditerranéenne et la plupart de la façade maritime ainsi que la vallée du Rhône comme particulièrement exposées aux inondations.

Afin de prévenir l'apparition des inondations et d'en limiter les dommages humains et matériels, la France s'est dotée de plusieurs outils de gestion du risque inondation. Cette stratégie comporte notamment une maîtrise de l'urbanisme via la mise en place par les communes de Plans de Prévention des Risques inondation.

## 2.3 Les sécheresses (phénomène de retrait-gonflement des argiles)

La sécheresse est un évènement climatique exceptionnel qui se caractérise par un déficit en eau sur une période plus ou moins longue. Le type de sécheresse étudié dans ce mémoire est la sécheresse géotechnique qui correspond à une diminution de la teneur en eau dans le sous-sol. Le phénomène de retrait-gonflement qui peut se produire en cas de sécheresse géotechnique dans des sols argileux peut avoir des conséquences plus ou moins sérieuses pour les bâtiments qui s’y trouvent.

Le phénomène de retrait-gonflement des argiles (RGA) est un évènement lent qui engendre néanmoins chaque année des dégâts importants, indemnisables au titre du régime Cat Nat depuis 1988. Il représente le deuxième poste d’indemnisation des catastrophes naturelles en France après les inondations.

### 2.3.1 Description du phénomène

Les sols argileux ont des propriétés physiques particulières : leur teneur en eau influe sur leur consistance et sur leur volume. Lors des périodes de sécheresse, la teneur en eau des sols argileux diminue ce qui provoque une rétractation des sols (phénomènes de retrait des argiles). A l’inverse, lorsque les sols sont réhydratés par les pluies, la teneur en eau augmente provoquant une augmentation du volume de ces sols (phénomène de gonflement des argiles). Bien que lentes, ces variations de volume peuvent atteindre des amplitudes suffisamment importantes pour fragiliser les fondations et les structures des bâtiments localisés sur ces terrains, favorisant ainsi l’apparition de fissures.

Les phénomènes climatiques exceptionnels sont le facteur principal de déclenchement du phénomène de retrait-gonflement des sols argileux. En effet, dans une région au climat tempéré comme la France métropolitaine, les sols sont régulièrement hydratés par les pluies et donc habituellement proche de la saturation en eau. Ainsi, lorsqu’un épisode de sécheresse survient, les sols se rétractent provoquant des mouvements de terrain plus ou moins importants.

### 2.3.2 Exposition du territoire

D’après l’étude réalisée par le ministère de la transition écologique et de la cohésion des territoires [17] fin juin 2021, plus de 10,4 millions de maisons individuelles sont potentiellement très exposées au phénomène de retrait-gonflement des sols argileux. Aujourd’hui, 48 % du territoire métropolitain est exposé moyennement ou fortement à ce risque. Ces chiffres réévaluent ceux publiés en 2017 [16] qui faisaient déjà état de 4 millions de maisons potentiellement très exposées.

Il existe des facteurs de prédisposition au retrait-gonflement des argiles qui se regroupent en deux catégories :

- La nature du sol qui est le facteur prépondérant dans l’apparition du phénomène puisque les sols renfermant des minéraux argileux sont les seuls concernés par ce phénomène ;
- Le contexte hydrogéologique et notamment la présence de nappe phréatique peut constituer un facteur de prédisposition car favorise les variations de teneur en eau dans les sols argileux.



Ces facteurs de prédisposition et l'analyse de cartes géologiques ont permis aux équipes du Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM), mandaté par le ministère de l'environnement, de réaliser entre 1997 et 2010 une cartographie de la susceptibilité du territoire français au phénomène de retrait-gonflement des argiles. La carte de susceptibilité 2.7a identifie les formations argileuses possiblement sujettes au phénomène de retrait-gonflement. Ces formations argileuses sont hiérarchisées en fonction de leur susceptibilité (faible, moyenne, forte) à partir de critères géologiques.

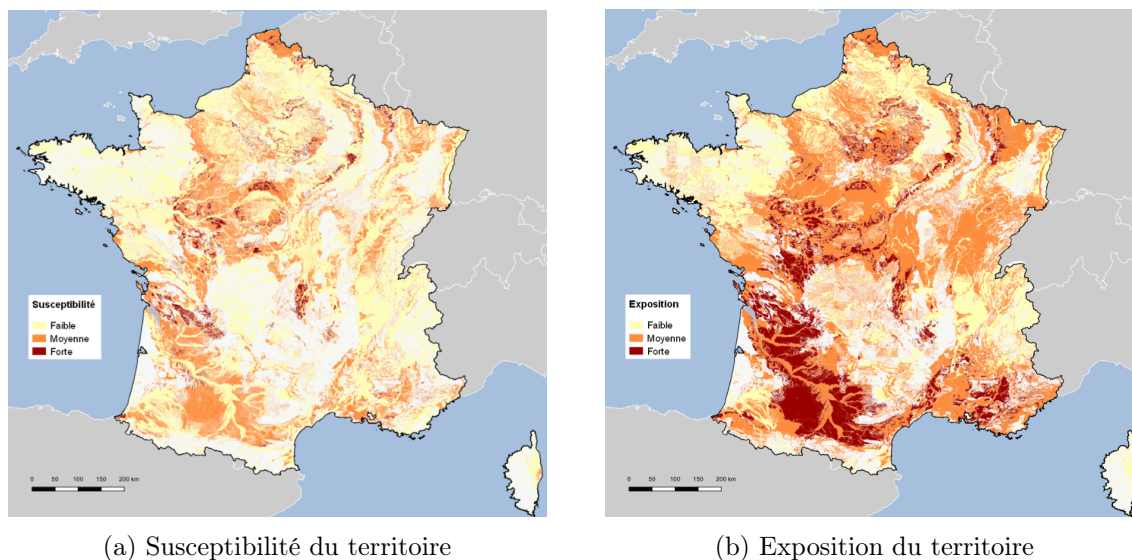


FIGURE 2.7 – Cartographies du phénomène de retrait-gonflement des argiles

Sources : BRGM, Géoriques

La carte d'exposition 2.7b a également été réalisée par le BRGM. Elle est mise à disposition de tous, particuliers comme professionnels, sur le site Géorisques [37]. Elle est issue du croisement entre :

- La carte de susceptibilité des sols ;
- Les données de sinistralité récoltées par la Mission Risques Naturels<sup>1</sup> sur la période 1989-2017.

Cette carte d'exposition renseigne sur la probabilité de survenance du phénomène de retrait-gonflement des argiles. Un degré d'exposition est ainsi associé à chaque zone : faible, moyen ou fort. Les règles de détermination sont définies dans le tableau 2.3.

		Susceptibilité		
		Faible	Moyenne	Forte
Sinistralité	Faible	faible	moyenne	forte
	Moyenne	moyenne	moyenne	forte
	Forte	moyenne	forte	forte

TABLE 2.3 – Définition du degré d'exposition au phénomène RGA

Ce zonage national établit que 48% des sols métropolitains ont une exposition moyenne ou forte au RGA. Selon les derniers chiffres de la Mission Risques Naturels [40], trois-quarts des

1. La Mission Risques Naturels est une association créée en 2000 par les assureurs. Elle a pour mission « la connaissance et la prévention des risques naturels ».

communes ont plus de 50% des maisons exposées. Le Sud-Ouest de la France ressort comme fortement exposé au phénomène de retrait gonflement des argiles.

Cette cartographie permet également d'identifier les zones exposées au phénomène pour concentrer les actions afin de prévenir le risque et d'ainsi diminuer le nombre de sinistres qu'il provoque.

### 2.3.3 Prévention du risque

Le phénomène de retrait-gonflement des argiles affecte plus largement les maisons individuelles dont les fondations sont souvent peu profondes et plus fragiles. Il n'est néanmoins pas impossible de construire sur un terrain argileux et certaines mesures préventives simples peuvent être mises en place pour réduire le risque.

La prise en compte de la sensibilité du sol au phénomène de retrait-gonflement est essentielle pour maîtriser le risque. C'est en ce sens que les PPRN et la loi ELAN réglementent la construction sur les zones exposées aux mouvements de terrain différentiels consécutifs à la sécheresse et à la ré-hydratation des sols.

#### Mesures préventives pour la construction

Certaines mesures préventives doivent être mises en place dès la construction d'une maison sur un terrain argileux afin de réduire les impacts d'un épisode de sécheresse. Ces dispositions sont de la responsabilité du constructeur et répondent généralement des principes mis en avant figure 2.8.

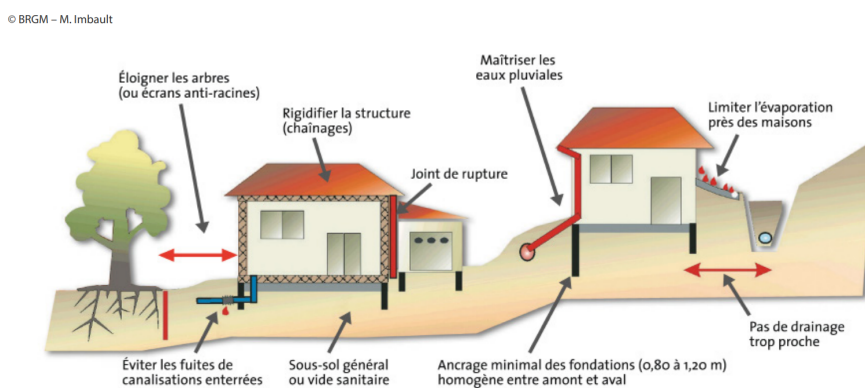


FIGURE 2.8 – Schéma des dispositions constructives visant à réduire les effets du RGA

Source : BRGM

Par ailleurs, trois guides à destination des constructeurs ont été publiés en 2017. Réalisés par l'institut français des sciences et technologies des transports, de l'aménagement et des réseaux (IFSTTAR) sous la tutelle du ministère de la transition écologique, ces guides sont des documents utiles à la prévention du risque de retrait-gonflement des argiles.

## Plan de Prévention des Risques

Comme détaillé en partie 2.2.4, les PPRN font suite aux plans d'exposition aux risques (PER) qui ont été introduits par la loi du 13 juillet 1982. Ces PER devaient permettre de déterminer "*les zones exposées et les techniques de prévention à y mettre en oeuvre*"<sup>1</sup>. Les PPRN ont pris le relais à partir de 1995 et définissent des mesures préventives, fixent des règles de construction et prescrivent, si cela s'avère nécessaire, la réalisation d'aménagements.

Les PPR mouvement de terrain incluent le risque de "tassement par retrait" et donc le phénomène de RGA. Comme tout PPR, ils ont pour objectifs de délimiter les zones exposées et de prévoir des mesures permettant de réduire le risque pour les projets de construction à venir. Ils n'ont néanmoins pas vocation à interdire la construction, même dans une zone exposée aux risques.

## La loi ÉLAN

Avant la mise en place de la loi ÉLAN, aucune étude géotechnique préalable à la construction individuelle n'était obligatoire<sup>2</sup>. Elle était néanmoins obligatoire pour toutes les autres constructions.

Cette étude des sols est pourtant essentielle au bon choix du dimensionnement et du type de fondation nécessaire à la pérennité d'une construction. Elle permet notamment d'établir la nécessité ou non de mettre en place certains dispositifs de construction coûteux mais nécessaires afin de prévenir les dommages liés au RGA. Sans cette étude et dans un cadre de forte concurrence sur le marché de la construction, les constructeurs étaient tentés de choisir l'option la plus économique à court terme. Celle-ci, possiblement non adaptée aux particularités du sol, est donc susceptible d'entraîner des dommages et peut s'avérer bien plus coûteuse à long terme.

Face à ce constat, la loi a été modifiée afin de rendre obligatoire l'étude géotechnique avant la construction de maison individuelle exposée au RGA. La loi ÉLAN promulguée le 23 novembre 2018<sup>3</sup> prévoit dans son article 68<sup>4</sup> de nouvelles règles applicables aux constructeurs afin de réduire les effets du phénomène de retrait-gonflement des argiles.

Un premier projet de loi avait initialement été proposé le 3 avril 2012<sup>5</sup>. Il proposait de corriger les faiblesses du régime Cat Nat et prévoyait d'instaurer une étude géotechnique préalable à toute construction en zone argileuse. L'article 68 reprend en quasi intégralité les dispositions dédiées à la gestion du phénomène de retrait-gonflement des argiles.

En application de cet article, une section spécifiquement consacrée à la prévention des risques de RGA a été ajoutée au code de la construction et de l'habitation<sup>6</sup>. A compter du 1er octobre 2020, elle prévoit que des études de sol soit réalisées dans le cadre de la vente d'un terrain constructible en zone d'exposition au retrait-gonflement des argiles. Celles-ci doivent être commandées :

- Par le vendeur lors de la vente du terrain. Cette étude dite préalable est ensuite annexée à

---

1. Article 5 de la loi du 13 juillet 1982 relative à l'indemnisation des victimes de catastrophes naturelles  
2. Hormis pour les terrains situés en zone sismique ou couverts par un plan de prévention des risques.  
3. Loi du 23 novembre 2018 portant évolution du logement, de l'aménagement et du numérique dite loi ÉLAN  
4. Article 68 de la loi ÉLAN [https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/article\\_jo/JORFARTI000037639571](https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/article_jo/JORFARTI000037639571)  
5. Projet de loi du 3 avril 2012 portant réforme du régime d'indemnisation des catastrophes naturelles.  
6. Décret N°2019-495 du 22 mai 2019 relatif à la prévention des risques de mouvement de terrain différentiel consécutif à la sécheresse et à la réhydratation des sols <https://www.legifrance.gouv.fr/loda/id/JORFTEXT00038496834>

- l'acte de vente et a pour but d'informer les potentiels acquéreurs sur l'existence du risque ;
- Par l'acheteur au moment de la construction. Cette seconde étude de conception à destination du constructeur prescrit des recommandations si les sols s'avèrent exposés au risque de mouvements de terrain différentiels consécutifs au retrait-gonflement des argiles. Cette deuxième étude n'est pas obligatoire, le constructeur peut faire le choix d'appliquer les techniques de construction définies par voie réglementaire<sup>1</sup>.

Les zones qualifiées comme exposées au phénomène et pour lesquelles la loi ÉLAN prévoit des mesures sont celles catégorisées en exposition moyenne ou forte par la carte d'exposition 2.7b.

**Le phénomène de retrait-gonflement des sols est un événement lent, peu dangereux pour les humains mais potentiellement très dommageable pour les bâtiments. Introduit dans le régime Cat Nat en 1988, la sécheresse est le deuxième péril le plus coûteux du régime.**

Selon les derniers chiffres du gouvernement, 48% du territoire est exposé moyennement ou fortement à ce phénomène. Les maisons individuelles sont les plus vulnérables à cause de leurs fondations peu profondes et plus fragiles que celles des constructions collectives. Le gouvernement évalue à plus de 10 millions le nombre de maisons potentiellement très exposées à ce risque de sécheresse. Les régions les plus exposées sont le Sud-Ouest de la France, la région Centre, le bassin parisien et le département du Nord.

Au fil des années, plusieurs dispositifs ont été mis en place afin de prévenir et réduire le risque de sécheresse. La loi ELAN et les plans de prévention des risques naturels sont des exemples de dispositifs introduits et visant à réglementer les constructions dans les zones fortement exposées. L'objectif est d'instaurer une étude des sols préalable à toute construction pour ainsi déterminer les dispositifs de construction à mettre en place afin de réduire et prévenir les dommages induits par une période de sécheresse.

---

1. Arrêté du 22 juillet 2020 relatif aux techniques particulières de construction

## 2.4 Statistiques du régime d'indemnisation des catastrophes naturelles

Dans cette partie, nous dressons un bilan du régime d'indemnisation des catastrophes naturelles depuis 1982. Le régime sera analysé à la fois en termes d'arrêtés interministériels de reconnaissance de l'état de catastrophe naturelle et en termes de montants des dommages. Les résultats seront présentés suivant deux visions : temporelle et géographique. Un paragraphe sera également consacré aux plans de prévention des risques naturels.

### 2.4.1 Étude des arrêtés de reconnaissance de l'état de catastrophe naturelle

Cette partie est consacrée à l'étude des arrêtés interministériels de reconnaissance de l'état de catastrophe naturelle. Les chiffres et graphiques présentés dans cette partie ont été obtenus à partir de la base de données des arrêtés Cat Nat. Cette base est issue du jeu de données correspondant aux procédures administratives relatives aux risques (BD GASPAR) mise à disposition sur le site Géorisques. Elle recense les arrêtés sur la période 1982-2021. Cette base de données sera présentée en détail dans la partie 3.1.1.

Nous procédons à un regroupement des différents libellés de risques apparus au Journal Officiel depuis 1982 selon la règle décrite dans le tableau 2.4.

Famille de risque	Types d'événement
Inondation	Submersions marines, Remontées de nappe ...
Sécheresse	Sécheresse
Mouvement de terrain	Mouvements, glissements, effondrements, affaissements de terrain et éboulements, glissements ou chutes de blocs
TGN	Tempête, grêle, neige
Autre	Séismes, avalanches, éruptions volcaniques, vents cycloniques

TABLE 2.4 – Regroupement des événements de catastrophe naturelle

### Première étude agrégée

Depuis la création du régime jusqu'à fin 2021, plus de 230000 arrêtés de Cat Nat ont été pris dont 1238 en Outre-Mer.

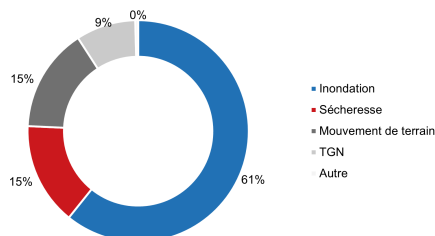


FIGURE 2.9 – Répartition des arrêtés de catastrophe naturelle par famille de risque  
Source : A partir des données Gaspar [37]

La répartition entre les différentes familles de risques est donnée par le graphique 2.9. Les inondations sont à l'origine de plus de la moitié des arrêtés, suivies par la sécheresse et les mouvements de terrain. Les risques tempête, grêle et neige ne sont plus couverts par le régime Cat Nat depuis 1992 (cf partie 2.1.2).

### Évolution temporelle

Ce premier graphique 2.10 représente l'évolution du nombre de communes reconnues en état de catastrophe naturelle depuis 1982. Ici nous adoptons une vision tous périls confondus. Ainsi, par exercice, une commune n'est comptabilisée qu'une seule fois même si elle a subi plusieurs catastrophes naturelles sur l'année.

En moyenne, 4464 communes<sup>1</sup> sont reconnues au moins une fois en état de Cat Nat par an. Les années 1982 et 1999 se démarquent fortement de cette moyenne. Une fois exclues, le nombre moyen de communes reconnues tombe à 3519.

L'année 1999 a été marquée par les tempêtes Lothar et Martin qui frappèrent la quasi-totalité du territoire français entraînant de nombreuses inondations et coulées de boue. Cette année constitue un record avec 27994 communes faisant l'objet d'au moins un arrêté de catastrophe naturelle. Ce nombre élevé peut s'expliquer en partie par les arrêtés au niveau départemental qui ont été pris suite aux importantes intempéries.

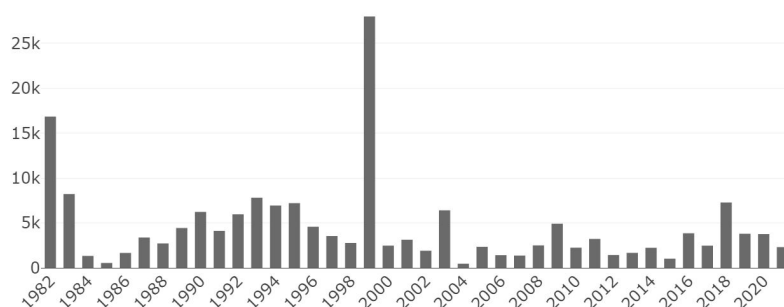


FIGURE 2.10 – Nombre de communes reconnues Cat Nat par exercice

Source : A partir des données Gaspar [37]

Le deuxième graphique 2.11a porte exclusivement sur les inondations. Il permet de confirmer le constat établi précédemment pour l'année 1999. En moyenne, 3014 communes sont reconnues en état de catastrophe naturelle au titre des inondations par an.

Le graphique 2.11b représente le nombre de communes reconnues en état de Cat Nat au titre de la sécheresse par an. Il permet d'établir plusieurs constats. Tout d'abord, nous remarquons que les premiers événements sécheresse apparaissent en 1988-1989, années à partir desquelles le péril a été inclus dans le régime Cat Nat. Par ailleurs, le nombre de communes reconnues au titre de la sécheresse est en moyenne de 1621 ce qui est très inférieur à celui observé pour les inondations. Enfin, la période 1989-1998 semble se détacher avec une moyenne de 2912 communes reconnues par an.

1. Sur 35228 communes en métropole

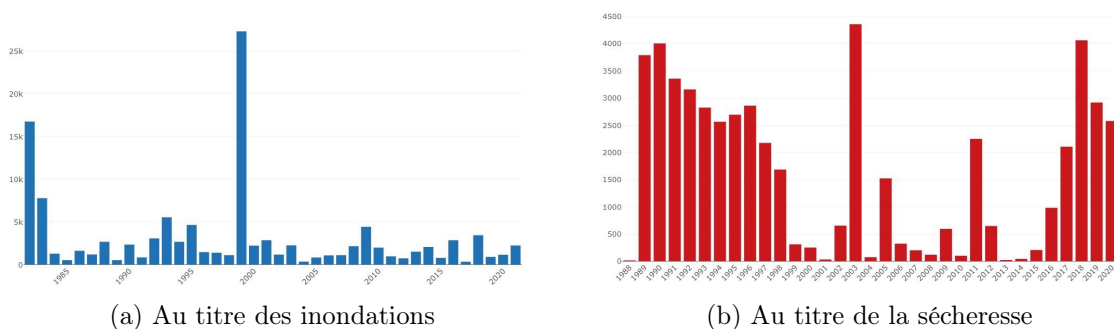


FIGURE 2.11 – Nombre de communes reconnues Cat Nat par exercice par type de péril  
Source : A partir des données Gaspar [37]

En effet, le traitement de la sécheresse a connu plusieurs évolutions depuis la création du régime Cat Nat. Entre la fin des années 80 et l'année 2000, le caractère exceptionnel permettant de faire jouer la garantie de catastrophe naturelle était assez largement reconnu. Durant cette période, seule la présence d'argiles gonflantes sur la commune était considérée pour établir l'éligibilité d'une commune à la reconnaissance de l'état de Cat Nat. A partir de la fin de l'année 2000, l'état de sécheresse était décrété à partir d'une analyse plus fine de la variation de la teneur en eau dans les sols. Durant l'année 2003, la France a été touchée par d'importantes vagues de chaleur estivales qui ont causé d'importants dégâts. Cette année a marqué un tournant et a conduit à l'implantation de nouveaux critères d'évaluation du caractère d'intensité anormale d'une période de sécheresse. En effet, le critère établi en 2000 aurait conduit à refuser l'état de Cat Nat à la quasi-totalité des communes qui en faisaient la demande. Météo-France a donc été mandaté pour concevoir un nouvel indicateur adapté aux sécheresses dites estivales.

### Répartition géographique

Cette partie est consacrée à l'étude de la répartition géographique des arrêtés de catastrophe naturelle depuis la mise en place du régime.

Depuis 1982, la quasi-totalité des communes métropolitaines ont été reconnues au moins une fois en état de catastrophe naturelle. Il apparaît sur la carte 2.12 que certaines régions sont plus touchées, comme le Sud-Ouest, la côte méditerranéenne, les bassins du Rhône et de la Loire ainsi que la région Île-de-France.

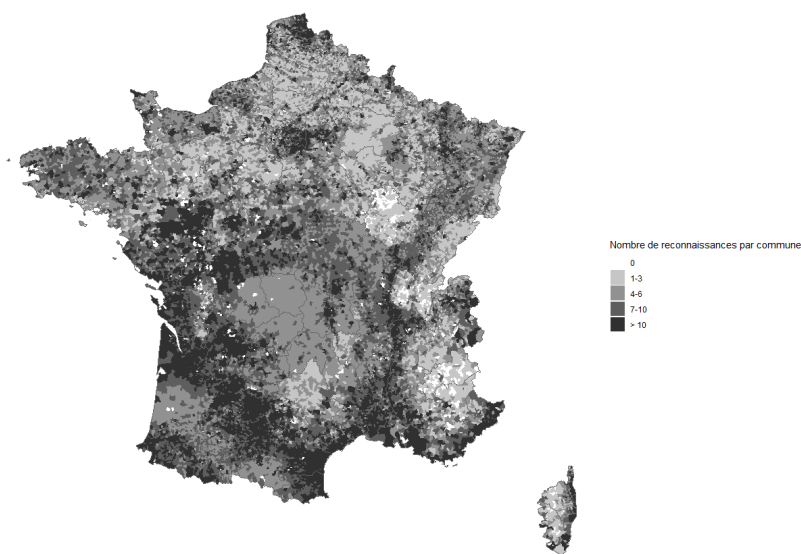


FIGURE 2.12 – Nombre de reconnaissances par commune tous périls confondus (1982-2021)  
Source : A partir des données Gaspar [37]

Nous nous focalisons maintenant sur les inondations et la sécheresse qui sont les périls responsables du plus grand nombre d'arrêtés de catastrophe naturelle. Les cartes 2.13 et 2.14 représentent respectivement le nombre de reconnaissances au titre des inondations et au titre de la sécheresse.

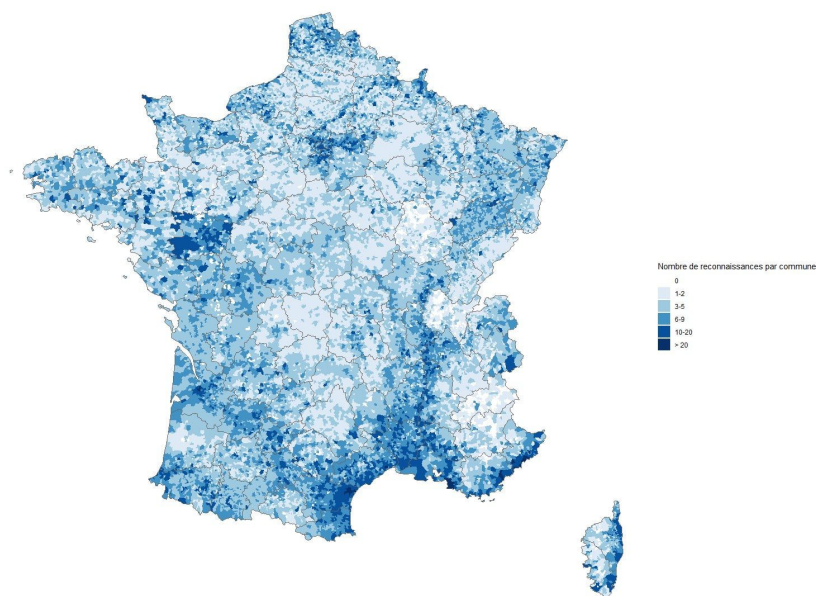


FIGURE 2.13 – Nombre de reconnaissances au titre des inondations par commune (1982-2021)  
Source : A partir des données Gaspar [37]



Il ressort de ce graphique que presque toutes les communes de métropole ont déjà été déclarées en état de catastrophe naturelle à cause des inondations. Les régions proches de cours d'eau importants (Loire, Rhône, Seine, Garonne) ou du littoral (côtes méditerranéenne et atlantique) sont les plus fortement touchées.

La sécheresse est plus localisée sur le territoire français avec une forte concentration autour du Sud-Ouest, de la région Centre, du bassin parisien et du département du Nord.

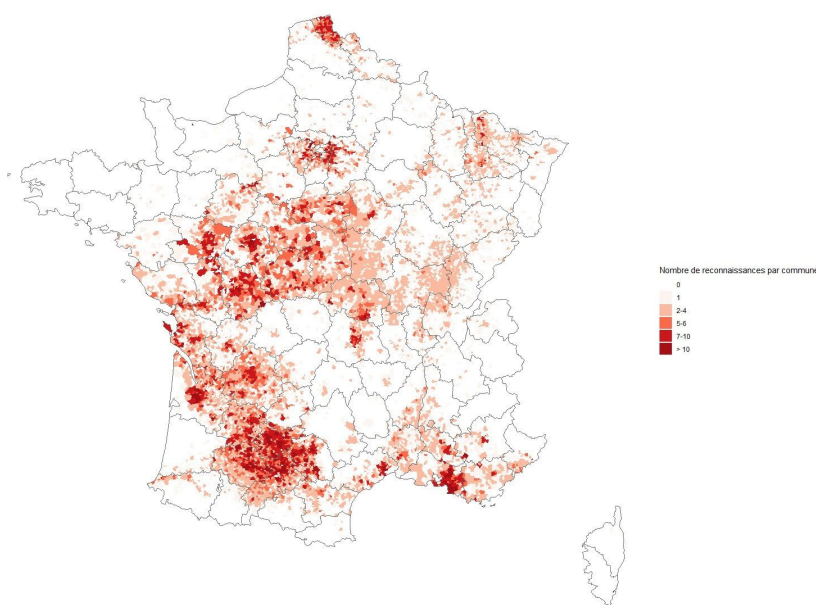


FIGURE 2.14 – Nombre de reconnaissances au titre de la sécheresse par commune (1982-2021)  
Source : A partir des données Gaspar [37]

### 2.4.2 Étude de la sinistralité Catastrophe Naturelle

Cette seconde partie traitera de la sinistralité des catastrophes naturelles. Les montants de sinistres présentés sont issus du site internet Géorisques, de rapports de la CCR et de l'observatoire national des risques naturels. Comme dans la partie précédente, après une première étude agrégée, deux visions seront utilisées : une vision temporelle et une vision géographique.

#### Répartition cumulée par péril

Pour la période 1982-2020, 40,7Mds € de sinistres ont été comptabilisés au titre de la garantie Cat Nat hors-auto, d'après le site internet Géorisques [38]. Cela représente une sinistralité moyenne annuelle de plus de 1Mds d'euros.

Avec un montant cumulé de sinistralité évalué à 21,6 Mds € (53% du total), les inondations représentent le premier péril en terme de dommages. La sécheresse se place à la deuxième marche avec 15,2 Mds € (37%). Le reste se répartit principalement entre les vents cycloniques en outre-mer et les mouvements de terrain.

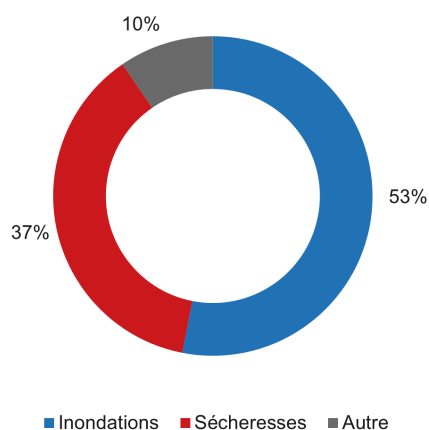


FIGURE 2.15 – Répartition de la sinistralité par péril  
 Source : D’après Géorisques [38]

### Évolution temporelle des coûts

Cette partie est consacrée à l’étude de l’évolution annuelle des montants de sinistralité au titre de régime Cat Nat hors-auto. Les montants dus aux inondations et à la sécheresse, périls les plus importants en France, sont mis en évidence.

Les chiffres de sinistralité présentés ici sont issus du bilan du régime Cat Nat établi par la CCR en 2019 [15]. Ces chiffres portent sur la sinistralité catastrophe naturelle hors-auto pour la période 1982-2018.

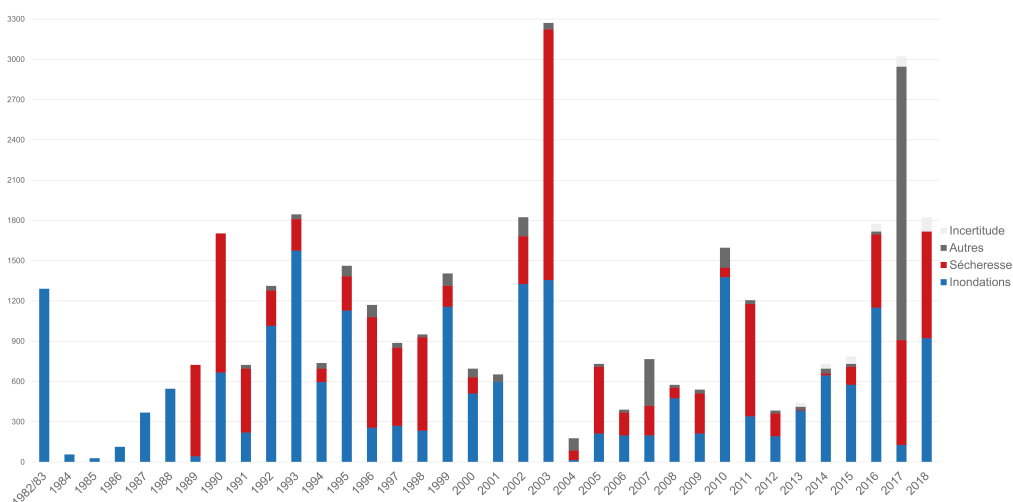


FIGURE 2.16 – Évolution de la sinistralité Cat Nat non auto (en M€)  
 Source : D’après le bilan réalisé par la CCR [15]

La charge totale de sinistre fluctue fortement d’une année sur l’autre. Certaines années sont particulièrement exceptionnelles :

- L'année 2003 enregistre la plus forte sinistralité jamais connue pour le régime Cat Nat (plus de 3,2 Mds d'€). Plus de la moitié est due à la sécheresse. Il s'agit de la plus forte sécheresse depuis la création du régime.
- L'année 2010 a été marquée par la tempête Xynthia qui impacta fortement la côte atlantique.
- L'année 2017 est la deuxième plus sinistrée. Elle a été marquée par le passage des ouragans Irma, à Saint-Barthélemy et Saint-Martin, et Maria, en Guadeloupe et Martinique et d'une sécheresse importante durant la période estivale. L'ouragan Irma est l'évènement naturel responsable de la sinistralité la plus élevée pour un évènement Cat Nat depuis la création du régime.

Il est intéressant de remarquer que, bien que le nombre de reconnaissances par commune pour l'année 2017 soit en dessous de la moyenne (voir figure 2.10), le montant des dommages est quant à lui très au-dessus de la moyenne.

### Répartition géographique des coûts

Les cartes ci-dessous représentent les coûts cumulés de sinistre par commune pour la période 1995-2018 actualisé en euros 2018. Les montants de dommages au titre de la sécheresse et aux titres des inondations sont représentés ici.

Les données à l'origine de ces cartes proviennent de l'observatoire national des risques naturels (ONRN). Il a été fondé en 2012 à la suite de la tempête Xynthia et associe l'Etat (Ministère de la transition écologique et DGPR), la CCR et la MRN. Cet observatoire a pour objectif principal de permettre à tous d'accéder aux données relatives aux risques naturels en France.

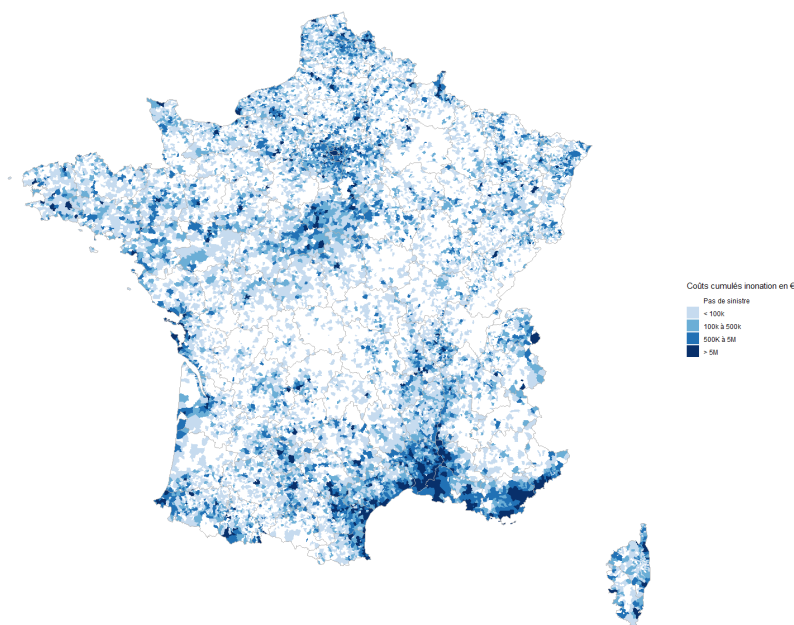


FIGURE 2.17 – Coûts cumulés au titre des inondations de 1995 à 2018

Source : A partir des données ONRN

La carte 2.17 soutient ce qui a été vu précédemment en partie 2.4.1 à savoir que les communes ne sont pas égales face au risque d'inondation. Nous remarquons ici que certaines communes dépassent les 10M d'euros de dommages au titre des inondations quand d'autres n'ont jamais fait l'objet d'indemnisation pour ce péril. Les chiffres de l'ONRN indiquent que plus de 50% des communes n'ont aucun sinistre répertorié. A l'inverse, certaines communes dépassent les 50M € de dommages dont Paris, le Havre, Quimper, Nice, Antibes ou encore la Faute-sur-Mer fortement touchée au passage de la tempête Xynthia. Les données font même état de 9 communes dépassant le seuil des 100M € de dommages, majoritairement localisées sur la côte méditerranéenne (Arles, Cannes, Fréjus, Marseille, Nîmes).

En ce qui concerne les mouvements de terrain consécutifs au retrait-gonflement des argiles, la carte 2.18 permet de dresser le même constat que celui établi lors de l'analyse des arrêtés de catastrophe naturelle : les dommages dus à ce péril se concentrent principalement dans le Sud-Ouest de la France, dans la région Centre, dans le Nord et en région Parisienne. Le territoire français ressort comme moins exposé à ce risque qu'au risque inondation. Les chiffres de l'ONRN indiquent que 72% des communes ne répertorient aucun sinistre lié à la sécheresse.

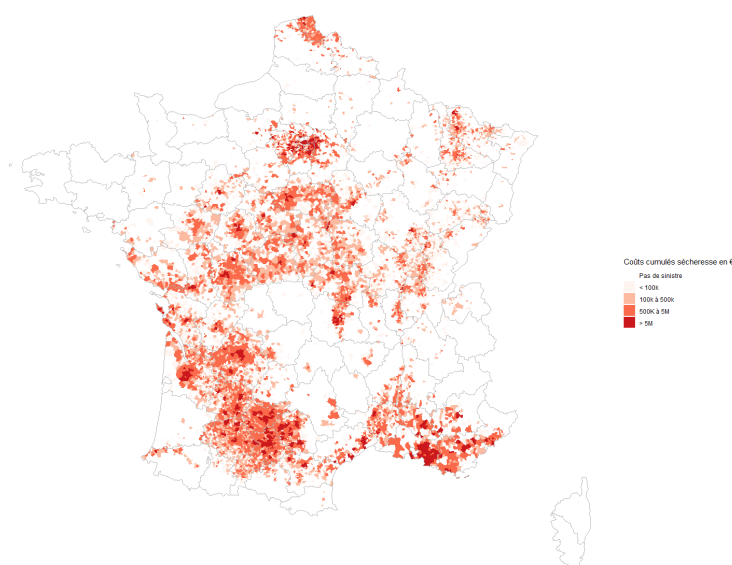


FIGURE 2.18 – Coûts cumulés au titre de la sécheresse de 1995 à 2018  
Source : A partir des données ONRN

### 2.4.3 Couverture du territoire par les plans de prévention des risques

Les plans de prévention des risques font partie intégrante du régime Cat Nat. A fin 2021, 14215 communes sont couvertes par un PPRN.

La carte 2.19 représente les communes ayant un PPR inondation prescrit ou approuvé<sup>1</sup>. Nous retrouvons une corrélation entre cette carte et les cartes 2.17 et 2.13 relatives respectivement aux coûts cumulés et au nombre de reconnaissances Cat Nat au titre des inondations.

1. La notion de PPRN prescrit ou approuvé est détaillée dans la partie 2.2.4

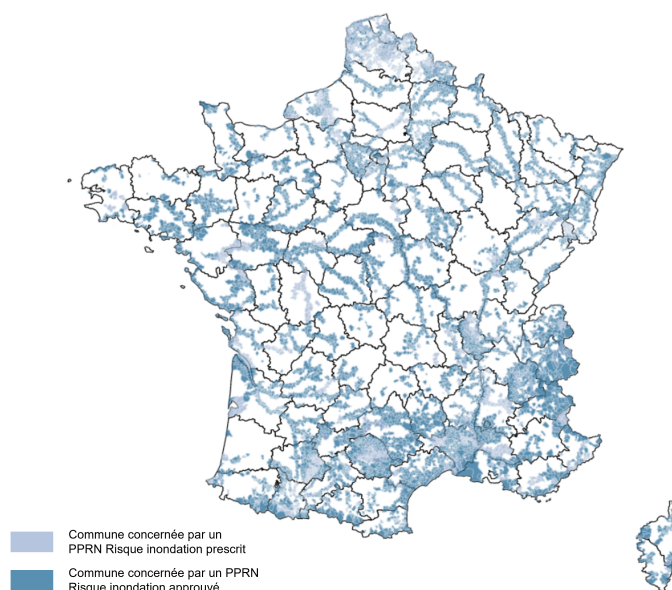


FIGURE 2.19 – Carte des communes ayant un PPR inondation

Source : Géorisques [37]

La carte 2.19 concerne les PPR relatifs aux tassements différentiels consécutifs au retrait-gonflement des argiles. Ce type de PPR est beaucoup moins répandu que celui concernant les inondations. Trois régions concentrent 84 % des PPR « tassements différentiels » : l'Occitanie, la Nouvelle Aquitaine et le Centre-Val de Loire [38].

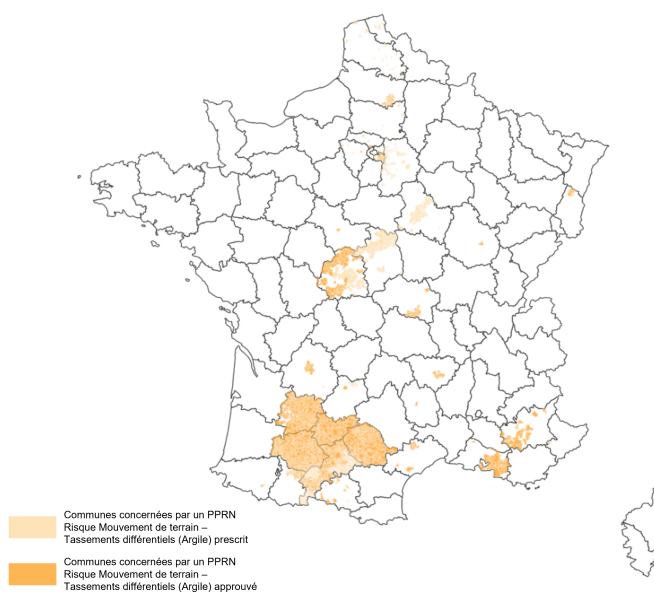


FIGURE 2.20 – Carte des communes ayant un PPR sécheresse

Source : Géorisques [37]

En conclusion, cette partie a permis de dresser un bilan du régime d'indemnisation des catastrophes naturelles en France depuis 1982. L'analyse des arrêtés de Cat Nat et des montants des dommages a mis en évidence la prédominance de certains périls, comme les inondations, principale cause de reconnaissance de l'état de catastrophe naturelle, suivies par la sécheresse et les mouvements de terrain.

Il est important de noter que cette analyse montre également des inégalités territoriales en termes de risques de catastrophe naturelle, avec certaines régions plus exposées que d'autres aux différents types de péril. Il est donc nécessaire de poursuivre les efforts en matière de prévention des risques naturels pour limiter les impacts sur les populations et les territoires les plus vulnérables.

## Chapitre 3

# Les données de modélisation et de projection

Cette partie est consacrée à la présentation des données disponibles et utilisées dans le cadre de ce mémoire. Dans un premier temps l'objectif est de modéliser, pour une certaine maille spatio-temporelle, les catastrophes naturelles à partir de variables explicatives. Dans un deuxième temps, ces variables explicatives sont projetées à un horizon 2050 afin de réaliser une projection des catastrophes naturelles pour ce même horizon.

Compte tenu de la disponibilité des données et des temps de calculs nécessaires à leur exploitation, la maille temporelle retenue est annuelle. En ce qui concerne la maille géographique, l'un des objectifs principaux de ce mémoire est d'affiner les modèles et résultats présentés dans les rapports disponibles (ACPR, CCR...) en proposant une approche à la maille communale. C'est donc cette dernière qui est retenue.

A la lecture de rapports et publications sur le sujet, certaines variables apparaissent comme pertinentes dans la prédiction des inondations et des sécheresses. Le mémoire de Jorge OCHOA MAGANA [43] et le rapport de France Assureurs [25] ont notamment permis d'identifier un jeu de variables particulièrement intéressantes pour cette étude. L'objectif a donc été de trouver des données disponibles en *Open Data*, de les collecter puis de les retraiter afin d'uniformiser les mailles géographiques et temporelles. Il est également important de garder à l'esprit que l'objectif du mémoire étant de réaliser une projection des Cat Nat pour un horizon 2050, tout indicateur utilisé dans une modélisation doit être disponible pour ce même horizon.

Les bases de modélisation, une pour chaque péril considéré, sont constituées des informations qui permettraient d'expliquer et prévoir le nombre d'arrêtés de reconnaissance de l'état de catastrophe naturelle par commune et par année. Ainsi, chaque base de modélisation se compose :

- De données de sinistralité de type arrêtés de catastrophe naturelle obtenues à partir de l'agrégation annuelle des données de la base GASPARD Cat Nat ;
- De facteurs liés à la présence d'un aléa (historique de reconnaissance sur les trois années précédentes) ;
- De variables caractéristiques de l'exposition et des moyens de prévention (existence d'un PPRI, part de la surface communale exposée au phénomène de RGA...)
- De variables climatiques (températures, pluviométrie, indicateurs de sécheresse des sols)

### 3.1 Les données de sinistralité

Les premières données nécessaires sont des données de type sinistralité. Certains assureurs ou ré-assureurs disposent de base de données recensant le nombre de sinistres ainsi que les montants associés. Malheureusement, ces données ne sont pas disponibles en *Open Data* à une maille convenable. En effet les seules données chiffrées concernant les montants des sinistres sont celles mises à dispositions par l'ONRN et ne sont disponibles que de manière agrégée.

La seule base de données fiable et disponible en *Open Data* est la base des procédures de type "Reconnaissance de l'état de catastrophes naturelles" faisant partie de l'ensemble de données GASPAR.

#### 3.1.1 La base de données GASPAR

Le portail Géorisques [37] met à disposition de tous un jeu de données des procédures administratives relatives aux risques, connu sous le nom de BD GASPAR (Gestion ASsistée des Procédures Administratives relatives aux Risques naturels et technologiques). Les données sont régulièrement mises à jour par les services instructeurs départementaux avec un délai d'environ un mois concernant les arrêtés Cat Nat au Journal Officiel.

Ce jeu de données réunit des informations sur les documents d'information préventive ou à portée réglementaire :

- Les procédures de type "Reconnaissance de l'état de catastrophes naturelles" ;
- Les Plans de Prévention des Risques Naturels, Technologiques ou Miniers et assimilés ;
- Les documents d'information préventive :
  - Dossier de Transmission d'Information au Maire (TIM) ;
  - Document d'Information Communal des populations sur les Risques Majeurs (DI-CRIM) ;
  - Plan Communal de Sauvegarde (PCS) ;
  - et Atlas des Zones Inondables (AZI), objet de la partie 2.2.3.

#### 3.1.2 Les données de type "Reconnaissance de l'état de catastrophes naturelles"

Cette base de données recense l'ensemble des arrêtés interministériels de reconnaissance de l'état de catastrophe naturelle depuis la création du régime Cat Nat en 1982. Un arrêté précise le type de phénomène naturel, les communes concernées ainsi que les dates de début et de fin de la période de reconnaissance.

La base de données GASPAR Cat Nat est construite de telle sorte qu'une ligne corresponde à une reconnaissance pour une commune, un évènement (date de début et fin) et un phénomène donné.

Les données disponibles sont présentées dans le tableau 3.1.



Variable	Description
cod_nat_catnat	Code unique identifiant une reconnaissance (Généré par Gaspar)
cod_commune	Code INSEE de la commune concernée
lib_commune	Nom de la commune concernée
num_risque_jo	Numéro du risque mentionné
lib_risque_jo	Libellé du risque mentionné dans le journal officiel
dat_deb	Date de début de l'événement
dat_fin	Date de fin de l'événement
dat_pub_arrete	Date de l'arrêté
dat_pub_jo	Date de publication au Journal Officiel
dat_map	Date de mise à jour de la fiche GASPAP

TABLE 3.1 – Listes des variables disponibles dans la base GASPAP Cat Nat

La table des procédures de type "reconnaissance de l'état de catastrophes naturelles" issues de la base BD Gaspar, recense l'ensemble des arrêtés interministériels à ce sujet depuis 1982.

Après retraitement, ces données permettront de comptabiliser pour chaque commune de métropole le nombre de catastrophes naturelles de chaque type survenues annuellement depuis la création du régime Cat Nat. Malheureusement, les données concernant les montants des sinistres associées ne sont pas disponibles en *Open Data*. Ainsi les modèles et études réalisés dans ce mémoire se focalisent uniquement sur l'étude de la fréquence des inondations et des sécheresses.

## 3.2 Les données climatiques

Cette partie est consacrée à la présentation des données climatiques utilisées dans le cadre de ce mémoire. Les informations présentées ici sont en partie issues du très utile espace d'accompagnement mis en place sur le portail DRIAS [35] et de l'article publié sur Météo-France "Projections climatiques : passer du global au local" [34].

Afin de modéliser la fréquence des catastrophes naturelles retenues à un horizon 2050, les données utilisées dans les modèles de prédictions doivent être disponibles ou projetables pour ce même horizon. En ce sens, les modèles climatiques développés par des scientifiques et météorologues sont très utiles car ils se proposent de modéliser le climat dans les décennies à venir à partir de scénarios d'évolution des émissions de gaz à effet de serre définis par le GIEC.

### 3.2.1 Les modèles climatiques

Les scénarios d'émission de gaz à effet de serre présentés en partie 1.1.2 sont utilisés comme *input* des modèles climatiques globaux<sup>1</sup>, dont l'objectif est de simuler l'évolution du climat à l'échelle mondiale. Pour un scénario d'émissions donné, le climat simulé varie d'un modèle à l'autre, ce qui reflète notre compréhension incomplète du système climatique. Afin de prendre en compte les incertitudes des modèles et de mieux représenter l'éventail des futurs possibles, il est donc nécessaire de considérer un grand nombre de projections climatiques.

La résolution des modèles climatiques globaux (environ 150-200 km) est insuffisante pour représenter et étudier correctement les phénomènes météorologiques locaux et certains événements extrêmes. Les modèles climatiques régionaux<sup>2</sup> permettent d'améliorer les prédictions des modèles climatiques globaux pour les régions d'intérêt, qui sont souvent nécessaires pour décrire les effets du changement climatique. Les méthodes de régionalisation permettent d'obtenir des échelles plus fines de l'ordre de 50 à 10km. Notons que ces méthodes sont une augmentation artificielle de la résolution. Les deux approches existantes de descente d'échelle sont :

- L'approche dynamique qui consiste à résoudre les équations de physique et de dynamique du système régional. Il s'agit d'une méthode coûteuse en calculs.
- L'approche statistique basée sur la recherche de relations statistiques entre les variables locales et les prédicteurs du modèle.

Ces deux approches peuvent être utilisées seules ou combinées (méthodes statistico-dynamiques).

En général, les prévisions climatiques ne peuvent pas être directement utilisées dans les études d'impact à l'échelle locale car elles comportent des biais associés aux observations. Il faut garder à l'esprit que les résultats des modèles climatiques sont des simulations numériques et non des observations. Afin de pouvoir comparer les prédictions avec les climats actuels ou passés et de pouvoir calculer un grand nombre d'indicateurs climatiques, il est crucial de mettre en place des méthodes statistiques de correction des simulations climatiques. Il existe différentes techniques de correction de biais, dont la méthode Quantile-Quantile introduite par Michel Déqué en 2000 et la méthode ADAMONT [51] qui est une consolidation de cette méthode.

La figure 3.1 suivante illustre les étapes de la descente d'échelle jusqu'au débiaisage des données brutes.

---

1. *Global Climate Model*, GCM  
2. *Regional Climate Model*, RCM

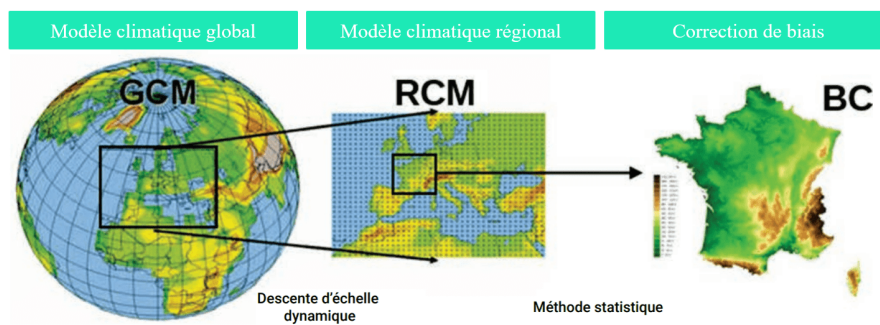


FIGURE 3.1 – Les étapes de descente d'échelle depuis la modélisation globale à régionale jusqu'à la correction de biais  
 Source : Rapport DRIAS [23]

### 3.2.2 Les projets Euro-Cordex et DRIAS

Le programme CORDEX, parrainé par le Programme mondial de recherches sur le climat (PMRC), est une initiative internationale visant à créer un cadre uniforme pour les modélisations climatiques globales et régionales. Les résultats de ces modèles sont notamment utilisés par le GIEC dans ses rapports d'évaluation. Euro-CORDEX est la branche européenne de CORDEX et met à disposition un ensemble de couples GCM/RCM. Le projet DRIAS (Donner accès aux scénarios climatiques Régionalisés français pour l'Impact et l'Adaptation de nos Sociétés et environnement) a pour vocation de simplifier l'accès aux modélisations climatiques pour le territoire français. C'est le rôle du portail DRIAS qui permet à tous : d'accéder à de la documentation concernant les modèles climatiques, de visualiser les projections climatiques et de télécharger les données issues des modèles climatiques.

### 3.2.3 Les modèles mis à disposition et choix

Le jeu de modèles DRIAS-2020 a été sélectionné selon les étapes décrites en figure 3.2. Il s'appuie sur l'ensemble produit dans le cadre de l'exercice international CMIP5<sup>1</sup>. A partir des 34 GCM définis par le CMIP5, 6 GCM pertinents pour l'Europe ont été retenus pour forcer les simulations régionales Euro-Cordex. Euro-Cordex propose un ensemble de 34 couples GCM/RCM.

Parmi ces couples, 12 sont sélectionnés pour former le jeu DRIAS-2020. Ces modélisations ont été sélectionnées selon huit critères présentés dans le rapport DRIAS [23]. Finalement, 30 simulations ont été retenues (12 pour le scénario RCP8.5, 10 pour le RCP4.5 et 8 pour le RCP2.6). Une correction de biais par la méthode statistique ADAMONT est ensuite appliquée sur cette sélection de simulations. Les données climatiques simulées sont ensuite projetées sur la grille SAFRAN (2016) à 8 km de résolution<sup>2</sup>. La localisation des points de la grille SAFRAN est donnée dans le graphique B.1 en annexe. Ces données ne sont disponibles que pour la France métropolitaine.

1. Projet d'intercomparaison des modèles couplés dont l'objectif est de fixer un cadre pour les modèles climatiques. Le CMIP5 correspond à la 5ème phase du projet et inclut les simulations qui ont été utilisées pour le 5ème rapport d'évaluation du GIEC.

2. La grille Safran est un ensemble de 143 · 134 points d'une résolution de 8km. Seuls les 8981 points terrestres sur la France métropolitaine sont utilisés dans le cadre du projet DRIAS.

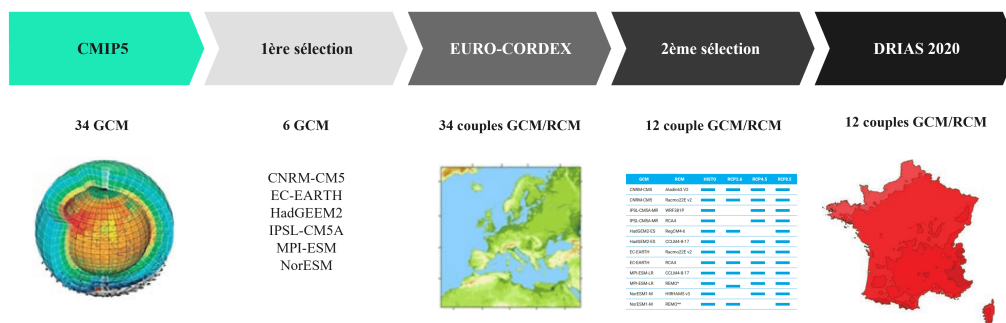


FIGURE 3.2 – Synthèses des étapes de sélection des simulations pour le projet DRIAS  
Source : Rapport DRIAS [23]

Les 30 simulations retenues pour le jeu DRIAS-2020 sont présentées dans le tableau 3.2 suivant :

Nom de la simulation	Institution	GCM	RCM	Scénarios			Périodes disponibles		Variables
				RCP8.5	RCP4.5	RCP2.6	Historique	Projection	
CNRM-CERFACS-CNRM-CM5_CNRM-ALADIN63	CNRM	CNRM-CM5	<b>ALADIN63</b>	x	x	x	1951-2005	2006-2100	9
CNRM-CERFACS-CNRM-CM5_KNMI-RACMO22E	KNMI	CNRM-CM5	<b>RACMO22E</b>	x	x	x	1950-2005	2006-2100	9
ICHEC-EC-EARTH_KNMI-RACMO22E	KNMI	EC-EARTH	<b>RACMO22E</b>	x	x	x	1950-2005	2006-2100	9
ICHEC-EC-EARTH_SMHI-RCA4	SMHI	EC-EARTH	<b>RCA4</b>	x	x	x	1970-2005	2006-2100	7
IPSL-IPSL-CM5A-MR_IPSL-WRF381P	IPSL	IPSL-CM5A	<b>WRF381P</b>	x	x	—	1951-2005	2006-2100	7
IPSL-IPSL-CM5A-MR_SMHI-RCA4	SMHI	IPSL-CM5A	<b>RCA4</b>	x	x	—	1970-2005	2006-2100	7
MOHC-HadGEM2-ES_ICTP-RegCM4-6	ICTP	HadGEM2	<b>RegCM4-6</b>	x	—	x	1970-2005	2006-2099	7
MOHC-HadGEM2-ES_CLMcom-CCLM4-8-17	CLMcom	HadGEM2	<b>CCLM4-8-17</b>	x	x	—	1950-2005	2006-2099	7
MPI-M-MPI-ESM-LR_CLMcom-CCLM4-8-17	CLMcom	MPI-ESM	<b>CCLM4-8-17</b>	x	x	x	1950-2005	2006-2100	7
MPI-M-MPI-ESM-LR_MPI-CSC-REMO2009	CSC	MPI-ESM	<b>REMO2009</b>	x	x	x	1970-2005	2006-2100	7
NCC-NorESM1-M_GERICS-REMO2015	GERICS	Nor-ESM1	<b>REMO2015</b>	x	—	x	1950-2005	2006-2100	7
NCC-NorESM1-M_DMI-HIRHAM5	DMI	Nor-ESM1	<b>HIRHAM5 v3</b>	x	x	—	1951-2005	2006-2100	7

TABLE 3.2 – Ensemble des simulations disponibles de l’expérience DRIAS 2020  
Sources : Drias, données Météo-France, CERFACS, IPSL

Les deux graphiques suivants permettent de comparer les différentes simulations du jeu DRIAS-2020 en fonction de l’évolution des températures et de précipitation prévues pour un horizon long (2070-2100) pour le scénario RCP8.5 pour les périodes estivale et automnale<sup>1</sup>.

Bien que basés sur le même scénario d’émission RCP8.5, ces modèles projettent une variation de température et de pluviométrie différente. Certains modèles sont plus pessimistes, comme le modèle HadGEM2/CCLM4-8-17 qui prévoit une augmentation des températures de plus de 6°C en été.

1. Seuls deux graphiques sont présentés ici, mais ils ont également été réalisés pour toutes les saisons et pour les trois scénarios du GIEC utilisés dans le jeu DRIAS-2020.

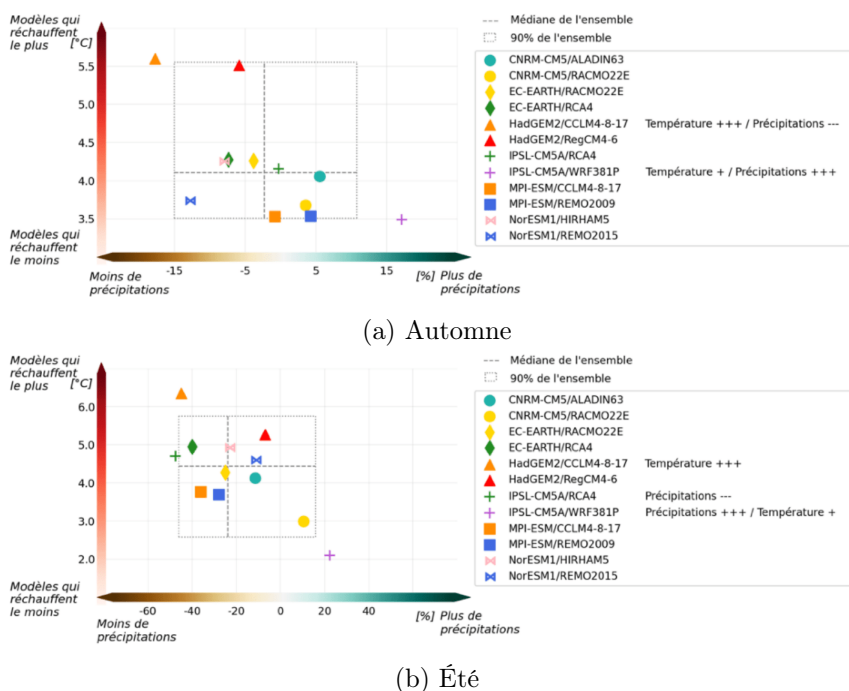


FIGURE 3.3 – Écarts pour un horizon long (2070-2100) avec le scénario RCP8.5 par rapport à la période de référence

Source : Rapport DRIAS [23]

Dans le cadre de cette étude, une des simulations climatiques issues du jeu DRIAS-2020 a été retenue. Parmi les 12 couples GCM/RCM du jeu DRIAS-2020, c'est le modèle CNRM/Aladin63 qui sera choisi pour les études conduites dans le cadre de ce mémoire car il répond à la liste de contraintes suivante :

- Il doit proposer une simulation pour les trois scénarios RCP (8.5, 4.5 et 2.6) ;
- Il doit se situer plutôt dans la moyenne des modèles, que ce soit en termes de précipitation ou de température ;
- Si possible, favoriser les modèles issus de centres français.

### 3.2.4 Les indicateurs DRIAS

Trois types de données sont disponibles pour le jeu DRIAS-2020 :

- Les données brutes issues des modèles climatiques ;
- Les données corrigées obtenues après un débiaisage (Quantile-Quantile, ADAMONT, ...) des données brutes ;
- Les indicateurs qui sont calculés à partir des données quotidiennes corrigées pour des périodes annuelles, saisonnières ou mensuelles.

Les indicateurs sont définis de telle sorte qu'ils soient représentatifs d'une caractéristique du climat. Ils peuvent être représentatifs de comportements extrêmes ou du climat moyen. Les indicateurs mis à disposition sur le portail DRIAS sont présentés dans le tableau 3.3. Ces indicateurs se focalisent sur les températures et la pluviométrie. Ils existent en version mensuelle, saisonnière et annuelle. Ils sont calculés pour tous les modèles mentionnés dans le tableau 3.2.

Catégorie de variable	Description	Nom de la variable	Méthode de calcul	Unité
Température minimale	Température minimale	TNAV	moyenne Tmin	°C
	Extrême froid de la température minimale quotidienne	TNQ10	10e centile des Tmin quotidien	°C
	Extrême chaud de la température minimale quotidienne	TNQ90	90e centile des Tmin quotidien	°C
	Nombre de jours anormalement froids	TNND	où Tmin < 5 °C de la normale	Nbr jours
	Nombre de jours d'une vague de froid	TNCWD	où Tmin < 5 °C de la normale dans une séquence > 5 j. consécutifs	Nbr jours
	Nombre de jours de gel	TNFD	où Tmin ≤ 0 °C	Nbr jours
Température maximale	Température maximale	TXAV	moyenne Tmax	°C
	Extrême chaud de la température maximale quotidienne	TXQ90	90e centile des Tmax quotidien	°C
	Extrême froid de la température maximale quotidienne	TXQ10	10e centile des Tmax quotidien	°C
	Nombre de jours anormalement chauds	TXND	où Tmax > 5 °C de la normale	Nbr jours
	Nombre de jours de vague de chaleur	TXHWD	Tmax > 5 °C de la normale dans une séquence > 5 jours consécutifs en été	Nbr jours
	Nombre de journées estivales	SD	où Tmax > 25 °C	Nbr jours
	Nombre de jours de forte chaleur	TX35	où Tmax > 35 °C	Nbr jours
	Nombre de nuits anormalement chaudes	TNHT	où Tmin > 5 °C de la normale	Nbr jours
	Nombre de nuits tropicales	TR	où Tmin > 20 °C	Nbr jours
	Température moyenne	Température moyenne	TAV	moyenne Tmean
Amplitude thermique		TRAV	moyenne des Tmax-Tmin quotidien	°C
Précipitations	Cumul des précipitations	RR	somme des Pr	mm
	Précipitations quotidiennes moyennes	PAV	moyenne Pr	mm
	Nombre de jours de précipitations	RR1MM	où Pr ≥ 1 mm	Nbr jours
	Précipitations moyennes des jours pluvieux	PINT	où Pr ≥ 1 mm	mm
	Nombre de jours de fortes précipitations	PN20MM	où Pr ≥ 20 mm	Nbr jours
	Fraction des précipitations quotidiennes intenses	PFL90	où Pr ≥ 90e centile des précipitations annuelles	%
	Période de sécheresse	PXCDD	Max [nombre de jours consécutifs avec Pr < 1 mm]	Nbr jours
	Maximum du nombre de jours pluvieux consécutifs	PXCWD	Max [nombre de jours consécutifs avec Pr ≥ 1 mm]	Nbr jours
	Précipitations quotidiennes intenses	PQ90	90e centile des précipitations annuelles	mm
	Précipitations quotidiennes extrêmes	PQ99	99e centile des précipitations annuelles	mm
Nombre de jour de précipitations extrêmes	RRQ99	où Pr ≥ 99e centile des précipitations annuelles	Nbr jours	

TABLE 3.3 – Définition des indicateurs DRIAS 2020  
Sources : Drias, données Météo-France, CERFACS, IPSL

Le portail DRIAS met à disposition des données issues de modèles climatiques régionaux pour la France métropolitaine. Dans le cadre du projet DRIAS, une correction de biais par rapport aux observations a été réalisée. Les données climatiques retenues pour cette étude sont issues du modèle climatique Aladin63 développé par le CNRM.

Les données à disposition sont des indicateurs de température, de pluviométrie et de sécheresse. Ils sont disponibles pour des pas de temps mensuels, saisonniers et annuels à la fois pour une période historique et pour une période de projection. Les indicateurs climatiques sont projetés sur la maille SAFRAN, constituée de 8981 points en France métropolitaine et d'une résolution de 8km.

Les projections sont réalisées à partir des scénarios d'émissions de gaz à effet de serre. Pour les projections du modèle Aladin63, ce sont les scénarios RCP du GIEC qui ont été retenus.

### 3.3 Un indicateur d'humidité des sols : le SSWI

Le SSWI (*Standardized Soil Wetness Index*) est un indicateur d'humidité des sols dont la construction est inspirée de celle du SPI (*Standardized Precipitation Index*), indice largement utilisé dans l'étude des sécheresses météorologiques.

Cet indicateur d'humidité des sols est aujourd'hui utilisé par la commission interministérielle dans la décision de déclarer ou non l'état de catastrophe naturelle due à la sécheresse. Ainsi, il semble tout particulièrement intéressant de disposer de cette variable pour nos modélisations.

Rappelons que l'objectif du mémoire étant de réaliser une projection des Cat Nat pour un horizon 2050, tout indicateur utilisé dans une modélisation doit être disponible pour ce même horizon.

#### 3.3.1 Le projet CLIMSEC

En plus du jeu DRIAS-2020, le portail DRIAS permet d'accéder à des données d'expériences d'impact. Ces expériences utilisent les données de modèles climatiques et peuvent nécessiter la mise en place de modèles d'impact. Sur le portail DRIAS, il est possible d'accéder aux résultats de l'expérience sur la sécheresse du projet CLIMSEC [50].

Le projet CLIMSEC a été initié par la Direction de la Climatologie de Météo-France en 2008<sup>1</sup>. Il vise à exploiter pleinement les systèmes existants, y compris les modèles numériques et les simulations qui ont été réalisées, pour se concentrer sur la définition d'indicateurs de sécheresse et sur l'étude de leur évolution récente et future. L'étude en climat actuel est basée sur une modélisation rétrospective sur 50 ans de l'humidité des sols à partir de la chaîne de modélisation hydrométéorologique Safran-Isba-Modcou (SIM). Ce projet permet notamment de diagnostiquer l'évolution des indices sous climat future à partir des différentes projections climatiques régionalisées pour la métropole et issues des travaux du 4ème rapport d'évaluation du GIEC.

#### Les indicateurs de sécheresse

A partir des données de précipitation et des données d'humidité des sols, deux types d'indice ont été calculés pour la maille SAFRAN et pour des périodes mensuelles, saisonnières et annuelles :

- Le SPI (*Standardized Precipitation Index*)
- Le SSWI (*Standardized Soil Wetness Index*)

Le SPI a été développé en 1993 par Mc Kee et Al [33] et met en évidence les écarts à la normale des précipitations. Il caractérise les sécheresses météorologiques. Un indice négatif témoigne d'une période de déficit par rapport à la normale et un indice positif révèle un excédent de précipitation. Plus la valeur absolue est grande, plus l'écart à la normale est important. Le tableau 3.4 suivant indique le niveau de sévérité des sécheresses correspondant aux différentes valeurs de l'indice.

Le SSWI est calculé à partir du niveau d'humidité des sols issu de la chaîne de modélisation SIM. Le SSWI caractérise les sécheresses agricoles. Un SSWI positif met en évidence une période

---

1. A cette date les scénarios RCP n'avaient pas encore été introduits, les scénarios d'émissions utilisés pour ce projet sont donc les scénarios SRES présentés en partie 1.1.2.

Valeurs des durées de retour	SPI	Catégorie
≥ 25 ans	≥ 1,75	Extrêmement humide
10 à 25 ans	1,28 à 1,75	Très humide
5 à 10 ans (exclu)	0,84 à 1,28	Modérément humide
0 à 5 ans (exclu)	-0,84 à 0,84	Autour de la normale
5 à 10 ans (exclu)	-1,28 à -0,84	Modérément sec
10 à 25 ans	-1,75 à -1,28	Très sec
≥ 25 ans	≤ -1,75	Extrêmement sec

TABLE 3.4 – Correspondance indice SPI et niveau de sécheresse

Sources : Drias, données Météo-France, CERFACS, IPSL

plus humide que la normale et, à l'inverse, un SSWI inférieur à zéro témoigne d'une période de sécheresse.

### Les expériences réalisées

Le tableau suivant 3.5 synthétise les différents modèles, scénarios et variables disponibles sur le portail DRIAS pour le projet CLIMSEC.

Institution	GCM	Scénarios			Variables	Granularité temporelle		
		A1B	A2	B1		Mensuelle	Saisonniers	Annuelle
Météo-France	Arpège Climat V4.6	X	X	X	SPI & SSWI	x	x	x
CCCma	CCCM3	X	X	X	SPI & SSWI	—	x	x
MPI-M	ECHAM5	X	X	X	SPI & SSWI	—	x	x

TABLE 3.5 – Ensemble des simulations disponibles pour le projet CLIMSEC

Sources : Drias, données Météo-France, CERFACS, IPSL

Pour les travaux réalisés dans le cadre de ce mémoire, nous utiliserons les indices projetés à partir du modèle de Météo France qui repose sur le GCM Arpège afin de garder une certaine cohérence avec les autres indicateurs climatiques<sup>1</sup>.

### Limite à l'utilisation des données du projet CLIMSEC

Comme pour les GCM présentés précédemment, l'ensemble des années couvertes sont découpées en une période dite historique et une dite de projection. En ce qui concerne le projet CLIMSEC, la partie dite historique s'étend de 1960 à 1999 et les projections s'étendent de 2000 à 2100.

Le schéma suivant synthétise les informations précisées précédemment et les met en comparaison avec celles concernant le régime Cat Nat pour les sécheresses.

1. Le modèle numérique Arpège Climat est utilisé pour la modélisation de l'atmosphère dans le modèle CNRM-CM5 qui est le GCM que nous retenons pour les autres indicateurs climatiques.



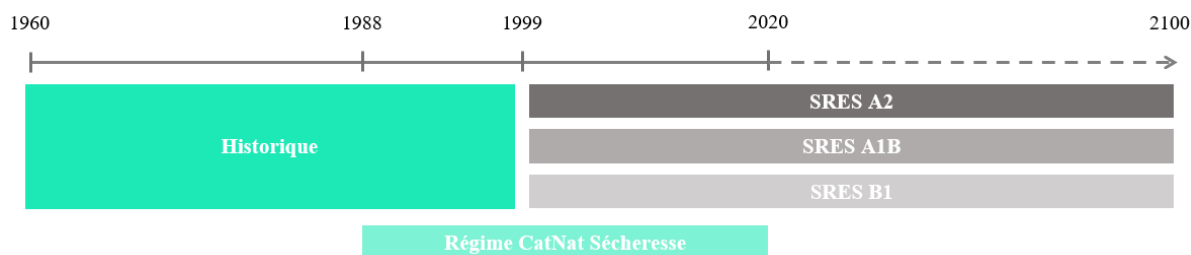


FIGURE 3.4 – Disponibilité des données du projet CLIMSEC et du régime Cat Nat

Ainsi les données de la période historique ne concordent avec les données Cat Nat que pour la période 1988-1999. Il a donc été nécessaire de trouver une autre source de données afin de disposer de la variable SSWI sur la période d'historique du régime Cat Nat disponible.

### 3.3.2 L'indicateur SWI mis à disposition par Météo France

Sur son site internet, Météo France met à disposition une base de données répertoriant un SWI (*Soil Wetness Index*) "uniforme" mensuel. Les données sont disponibles depuis janvier 1969 et téléchargeables sur le site de Météo France<sup>1</sup>. Les informations disponibles dans cette base de données sont les suivantes :

- numéro de maille ;
- coordonnée géographique x (Lambert II étendu) ;
- coordonnée géographique y (Lambert II étendu) ;
- date (mois et années) ;
- valeur du SWI.

Les éléments présentés ici sont issus de la documentation "Descriptif du produit" disponible sur la page de téléchargement des données.

#### Qu'est ce que le SWI ?

Selon Météo France le SWI "représente, sur une profondeur d'environ deux mètres, l'état de la réserve en eau du sol par rapport à la réserve utile". Un SWI nul témoigne d'une forte sécheresse des sols. A l'inverse, si le SWI est égal à un, les sols sont saturés en eau.

L'article de JP Vidal & al. [52] décrit la procédure permettant d'obtenir la variable SSWI du projet CLIMSEC à partir du SWI de la chaîne Safran-Isba-Modcou. Elle est basée sur celle du SPI, détaillé dans la littérature. Cette procédure sera explicitée plus tard dans ce mémoire.

#### Méthode de calcul du SWI

Comme le précise Météo France, il est théoriquement possible de mesurer l'humidité des sols. Néanmoins, il est inenvisageable de réaliser cela de manière mensuelle et uniforme à une maille fine sur l'ensemble du territoire métropolitain. Seules quelques stations mesurent en temps réel

1. [https://donneespubliques.meteofrance.fr/?fond=produit&id\\_produit=301](https://donneespubliques.meteofrance.fr/?fond=produit&id_produit=301)

l'humidité des sols en métropole. C'est pourquoi le SWI mis à disposition par Météo France est estimé par modélisation numérique. Comme pour le projet CLIMSEC, la chaîne de modélisation utilisée est la chaîne Safran-Isba-Modcou, qui utilise les données météorologiques recueillies par les stations météorologiques Météo France réparties sur l'ensemble du territoire.

**Le SSWI est un indicateur d'humidité des sols aujourd'hui utilisé par la commission interministérielle dans le cadre de la reconnaissance des Cat Nat sécheresse. Cet indicateur est une version standardisée du SWI, dont la procédure est documentée dans la littérature.**

L'expérience d'impact CLIMSEC, dont les résultats sont mis à disposition sur le portail DRIAS, vise à exploiter les systèmes et modèles climatiques existants pour se concentrer sur l'étude et la définition d'indicateurs de sécheresse. Ce projet met à disposition des indicateurs de sécheresse pour une résolution de 8km sur la maille SAFRAN à un pas de temps annuel, saisonnier ou mensuel. Les données sont disponibles pour une période d'historique et une période de projection. Les projections sont basées sur les scénarios SRES définis et utilisés par le GIEC lors du quatrième rapport d'évaluation.

Néanmoins, la période dite d'historique étant limitée à 1999, une autre source de données est nécessaire pour la période d'apprentissage des modèles réalisés dans le cadre de ce mémoire. La base de données de SWI "uniforme" mise à disposition par Météo France a donc été utilisée. Une étape de standardisation doit être réalisée afin de faire correspondre les données d'apprentissage et celles de projection.

## 3.4 Les données d'exposition aux risques

Les informations concernant l'exposition du territoire français aux risques naturels sont multiples et ont des objectifs variés, comme cela a été vu dans le chapitre 2.

En ce qui concerne les inondations, il existe de très nombreuses cartographies de l'exposition des communes aux différents types d'inondation. Nous pouvons notamment citer les PPRI, l'EAIP ou encore les AZI. Pour la sécheresse, le BRGM a réalisé une cartographie de l'exposition du territoire au phénomène de retrait-gonflement des argiles. Des PPRN existent également pour le risque de sécheresse mais sont moins utilisés que les PPRI.

Malheureusement toutes ces cartographies ne sont pas disponibles ou facilement exploitables à la maille communale. Nous présentons ici les données d'exposition aux risques qui ont été retenues dans le cadre de ce mémoire.

### 3.4.1 Exposition aux inondations

#### Les données de PPRI

Les données de PPRN et de PPRI sont issues du jeu de données Gaspar présenté au début de ce chapitre. La base de données considérée ici regroupe l'ensemble des Plans de prévention des risques naturels (ou démarches équivalentes) qu'ils soient en vigueur, en cours de procédure, abrogés, annulés ou déprescrits. La base est construite de telle sorte qu'une ligne corresponde à une procédure par commune et par risque traité.

Les variables disponibles peuvent être regroupées de la manière suivante :

Famille de variables	Liste des variables
Caractérisation du risque	Code et libellé du risque
Localisation	Libellé du bassin de risque, code INSEE et libellé de la commune concernée
Identification du PPRN	Code d'identification unique du PPRN, libellé du PPRN, type de procédure (PPRN, PER ...)
Date	Dates de début/fin de l'élaboration, de la prescription, de la concertation, de la consultation, de l'enquête publique, de l'arrêté portant approbation, de modification ou d'annulation le cas échéant

### 3.4.2 Exposition au retrait-gonflement des argiles

Le portail Géorisques met à disposition les données d'exposition au retrait-gonflement des argiles au format SIG Shapefile (shp)<sup>1</sup> qui permettent d'obtenir la carte d'exposition 2.7b présentée en partie 2.3.2. Néanmoins cette base n'a pas pu être exploitée compte tenu de sa taille conséquente.

Une autre base de données<sup>2</sup> mise à disposition par le Ministère de la transition écologique et de

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

2. Liens des données d'exposition au RGA sur le site du ministère de la transition écologique

la cohésion des territoires a donc été utilisée. Cette base a été construite en 2021 par le SDES<sup>1</sup> et informe de l'exposition des maisons au RGA. Elle donne une vision agrégée par commune et par département de la base disponible sur Géorisques ce qui la rend beaucoup plus simple à manipuler.

Les informations disponibles sont de deux types : en brute (nombre de logement, surface...) et en relatif (part des logements, part de la surface...). L'exposition est donnée selon deux catégories : moyenne/forte ou faible.

Le tableau 3.6 donne la liste des variables disponibles pour la vision communale. Les deux variables qui nous intéressent le plus sont la part de la surface de la commune / du département en exposition faible au RGA et la part de la commune / du département en exposition moyenne ou forte au RGA.

Catégorie de variable	Nom des variables RGA_2019_commune	Description
	insee_com	Numéro Insee de la commune
Construction après 1975	nb_logement_alea_moyen_fort_apres_1975	Nombre de logements en exposition moyenne ou forte construits après 1976
	part_logement_alea_moyen_fort_apres_1975	Part de logements en exposition moyenne ou forte construits après 1976
	nb_logement_alea_faible_apres_1975	Nombre de logements en exposition faible construits après 1976
	part_logement_alea_faible_apres_1975	Part de logements en exposition faible construits après 1976
Construction avant 1920	nb_logement_alea_moyen_fort_avant_1920	Nombre de logements en exposition moyenne ou forte construits avant 1921
	part_logement_alea_moyen_fort_avant_1920	Part de logements en exposition moyenne ou forte construits avant 1921
	nb_logement_alea_faible_avant_1920	Nombre de logements en exposition faible construits avant 1921
	part_logement_alea_faible_avant_1920	Part de logements en exposition faible construits avant 1921
Construction entre 1920 et 1945	nb_logement_alea_moyen_fort_1920_1945	Nombre de logements en exposition moyenne ou forte construits entre 1921 et 1945
	part_logement_alea_moyen_fort_1920_1945	Part de logements en exposition moyenne ou forte construits entre 1921 et 1945
	nb_logement_alea_faible_1920_1945	Nombre de logements en exposition faible construits entre 1921 et 1945
	part_logement_alea_faible_1920_1945	Part de logements en exposition faible construits entre 1921 et 1945
Construction entre 1945 et 1975	nb_logement_alea_moyen_fort_1945_1975	Nombre de logements en exposition moyenne ou forte construits entre 1946 et 1975
	part_logement_alea_moyen_fort_1945_1975	Part de logements en exposition moyenne ou forte construits entre 1946 et 1975
	nb_logement_alea_faible_1945_1975	Nombre de logements en exposition faible construits entre 1946 et 1975
	part_logement_alea_faible_1945_1975	Part de logements en exposition faible construits entre 1946 et 1975
Toutes années de construction	nb_logement	Nombre total de logements dans la commune
	nb_logement_alea_moyen_fort	Nombre de logements en exposition moyenne ou forte dans la commune
	nb_logement_alea_faible	Nombre de logements en exposition faible dans la commune
	nb_logement_sans_alea	Nombre de logements en zone a priori non argileuse dans la commune
Surface	surface_commune	Surface de la commune (en m <sup>2</sup> )
	surface_alea_faible_commune	Surface de la commune en exposition faible (en m <sup>2</sup> )
	part_alea_faible_commune	Part de la commune en exposition faible (en %)
	surface_alea_moyen_fort_commune	Surface de la commune en exposition moyenne ou forte (en m <sup>2</sup> )
	part_alea_moyen_fort_commune	Part de la commune en exposition moyenne ou forte (en %)

TABLE 3.6 – Variables disponibles dans la base d'exposition au RGA pour la vision communale

Les deux cartes 3.5b et 3.5a représentent respectivement, après retraitement des données<sup>2</sup>, la part de la surface exposée au risque RGA et la part de la surface exposée moyennement ou fortement pour chaque commune.

1. Service des données et études statistiques

2. Les retraitements faits sur cette base de données seront présentés dans la partie 3.5.4.

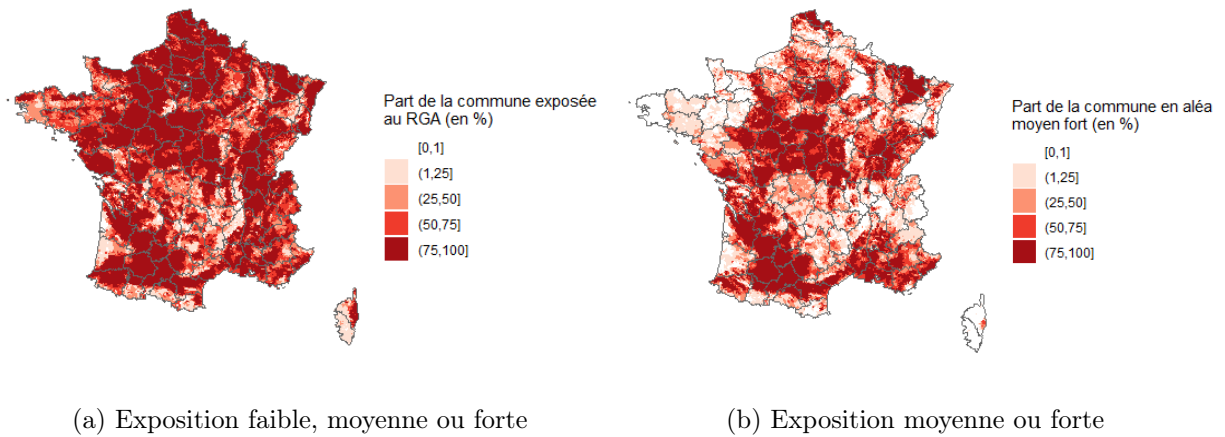


FIGURE 3.5 – Part des communes exposée au RGA

Ainsi, pour les inondations se sont les informations des PPRI mises à disposition dans la base de données GASPARG qui sont retenues. Pour les sécheresses, les données retenues sont issues de la base de données de la SDES qui renseigne sur l'exposition de chaque commune au phénomène de retrait-gonflement des argiles.

### 3.5 Retraitements et consolidation des données

Cette section présente les retraitements effectués sur les données et la construction de la base de données de modélisation. Cette base comprend pour chaque commune de France métropolitaine entre 1982 et 2020/2021 à la fois les données de sinistralité issues de la base Gaspar, les données climatiques provenant du modèle Aladin63 et des données topographiques et d'exposition (indicatrice de l'existence d'un PPRI pour la commune et exposition au RGA).

Le choix de la maille temporelle annuelle est apparu comme le plus judicieux compte tenu des données disponibles, des temps de calcul et du sujet de l'étude.

#### 3.5.1 Déduplication et agrégation des données GASPAR Cat Nat

Le retraitement des données d'arrêtés Cat Nat issues du jeu Gaspar s'est déroulé en deux étapes : une déduplication puis une agrégation annuelle des données.

##### Déduplication des arrêtés de Cat Nat

Chaque ligne de la base de données représente une reconnaissance pour une commune et un phénomène donné. Certains événements semblent avoir fait l'objet de plusieurs arrêtés de catastrophe naturelle résultant en un dédoublement de certaines lignes.

La première étape de retraitement des données a donc consisté à ne garder en cas de doublon (même commune, même phénomène et dates de début et/ou fin identiques) la ligne correspondant à la parution au journal officiel la plus récente.

##### Agrégation annuelle

Une fois cette première étape réalisée, une agrégation annuelle est effectuée.

L'objectif est ainsi d'obtenir pour chaque commune le nombre de reconnaissances de l'état de catastrophe naturelle au titre des inondations d'une part et au titre de la sécheresse d'autre part pour chaque année d'historique. Pour les inondations, cette période d'historique s'étend de 1982, année de création du régime Cat Nat, à 2021. Pour la sécheresse, la période retenue est 1988-2020 puisque ce péril ne fut intégré qu'en 1988 au régime d'indemnisation des Cat Nat et que les arrêtés pour 2021 n'ont pas encore été publiés.

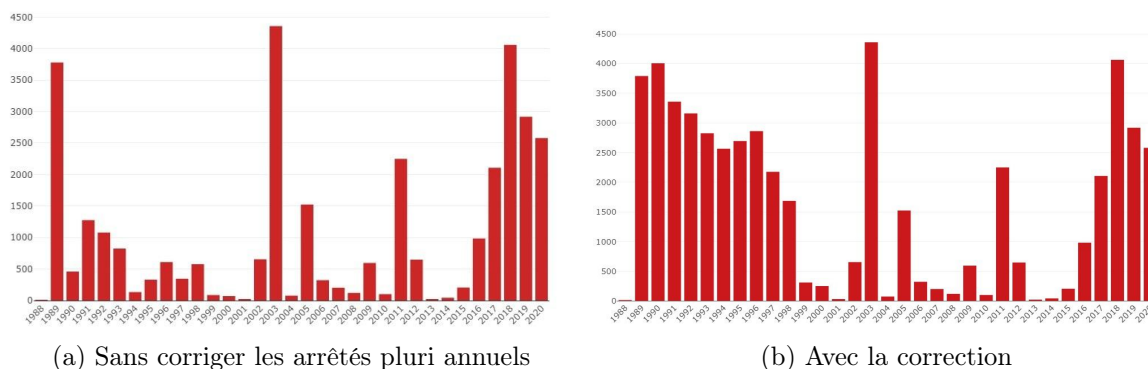
Chaque reconnaissance est caractérisée par une date de début et une date de fin. Ainsi, plusieurs possibilités peuvent être considérées pour l'agrégation annuelle :

- Considérer l'année de début comme représentative de la survenance de l'évènement ;
- Considérer l'année de fin comme représentative de la survenance de l'évènement ;
- Créer de "faux" arrêtés de Cat Nat pour chaque année entre l'année de début et l'année de fin de l'évènement.

C'est cette dernière option qui a été retenue pour la sécheresse. En effet, comme mentionné dans le chapitre 2, les sécheresses sont des phénomènes lents et qui peuvent donc avoir des

conséquences durant plusieurs années. Ainsi, ne considérer que l'année de début ou que l'année de fin comme représentative de l'évènement ne permettra pas de considérer la durée complète de l'évènement. Parmi près de 35 000 arrêtés Cat Nat au titre de la sécheresse, plus de 8 000 ont une durée de plus d'un an.

Les graphiques suivants représentent le nombre d'arrêtés Cat Nat par an si l'on considère cette dernière méthode par rapport à si l'on choisit uniquement l'année de début.



Après retraitements, chaque ligne de la base de données indique le nombre de reconnaissances pour les inondations et pour la sécheresse pour une commune et une année donnée.

Une ultime étape est réalisée pour cette base de données. Elle consiste à calculer de manière glissante le nombre de reconnaissances de l'état de catastrophe naturelle pour le péril considéré sur les trois années précédentes. La construction de cette variable introduit un effet de bord sur les premières années de mise en place du régime qu'il faudra prendre en compte lors de la phase de modélisation.

### 3.5.2 Retraitement de l'indicateur d'humidité des sols

#### Standardisation du SWI

L'article [52] détaille la procédure utilisée dans le cadre du projet CLIMSEC afin de dériver le SSWI à partir de l'indicateur d'humidité des sols. Les éléments principaux de la procédure sont décrits ici :

L'approche utilisée est inspirée du calcul de l'indice de précipitation standardisé détaillée dans l'article McKee et al [33]. La procédure de calcul du SPI à partir d'une série chronologique de précipitations donnée nécessite l'ajustement des précipitations cumulées sur  $n$  mois à une distribution statistique donnée. Cet ajustement est effectué séparément pour chaque mois afin de tenir compte des différences saisonnières dans les distributions. Les fonctions de répartition ajustées sont ensuite transformées de manière équiprobable en une distribution normale centrée réduite. Cette correspondance est finalement utilisée pour transformer les séries temporelles de précipitations cumulées en séries temporelles SPI.

L'indice SSWI a donc été calculé pour l'ensemble des points de la grille SAFRAN couvrant la France entière à partir de séries temporelles de SWI moyenné. Les auteurs précisent que, du fait des grandes dimensions du problème, une distribution théorique la plus approprié ne peut être trouvée. C'est pourquoi ils ont recours à une approche non paramétrique flexible. Les

distributions empiriques ont donc été ajustées avec des estimations de densité de noyau avec un noyau gaussien. Cette approche permet de générer des distributions continues proches des distributions empiriques, qui sont raisonnablement bien définies grâce à un échantillon de 50 ans.

### Indicateurs annuels

Une fois cette standardisation réalisée, nous disposons du SSWI pour tous les points de la maille SAFRAN de manière mensuelle pour l'ensemble de la période considérée. En effet, les données Météo France englobent la phase historique et les données issues du projet CLIMSEC permettront les projections à horizon 2050 selon les scénarios du GIEC.

Le second retraitement consiste à procéder à une agrégation annuelle. En effet, les données fournies par Météo France sont mensuelles une agrégation est donc nécessaire afin d'uniformiser la maille temporelle avec celle des autres variables retenues dans notre étude.

Ainsi, à partir des SSWI mensuels, trois indicateurs annuels sont créés :

Description	Nom de la variable	Méthode de calcul
Moyenne des SSWI mensuels	sswi_moy	moyenne(sswi)
Maximum des SSWI mensuels	sswi_max	max(sswi)
Minimum des SSWI mensuels	sswi_min	min(sswi)

TABLE 3.7 – Indicateurs SSWI annuels

### Reprojection

Enfin, la dernière étape consiste à reprojeter les coordonnées des mailles SAFRAN, actuellement en Lambert II, en longitude x latitude. Cette étape se fait facilement sur R à l'aide du package *sf* (Simple Features).

#### 3.5.3 Lissage des données climatiques

Les données climatiques du modèle Aladin63 et l'indicateur d'humidité des sols, issu des données Météo France et du projet CLIMSEC, sont disponibles pour les 8981 points en France métropolitaine de la grille SAFRAN. Il est donc essentiel de procéder à un lissage des indicateurs afin de disposer d'une valeur par commune pour chaque année et chaque indicateur. Le lissage retenu ici est basé sur la distance en retenant le centre géographique de chaque commune comme représentatif de la commune dans son ensemble.

En notant  $r_i$  la valeur de l'indicateur pour la commune  $i$ , on a :

$$r_i = \frac{\sum_j v_j e^{-d_{ij}P}}{\sum_j e^{-d_{ij}P}} \quad (3.1)$$

Avec :

- $j \in \llbracket 1; 8981 \rrbracket$  un point de la maille SAFRAN ;



- $d_{ij}$  la distance euclidienne entre le centre de la commune  $i$  et le point  $j$  ;
- $v_j$  la valeur de l'indicateur considéré pour le point  $j$  ;
- et  $P$  le coefficient de propagation.

Le coefficient  $P$  est un coefficient de lissage. Plus il est grand, plus la spécificité de chaque localité est gardée, i.e. moins le lissage est fort. Les trois graphiques suivants mettent en avant l'effet du paramètre  $P$  sur le lissage. L'indicateur représenté ici est la température moyenne.

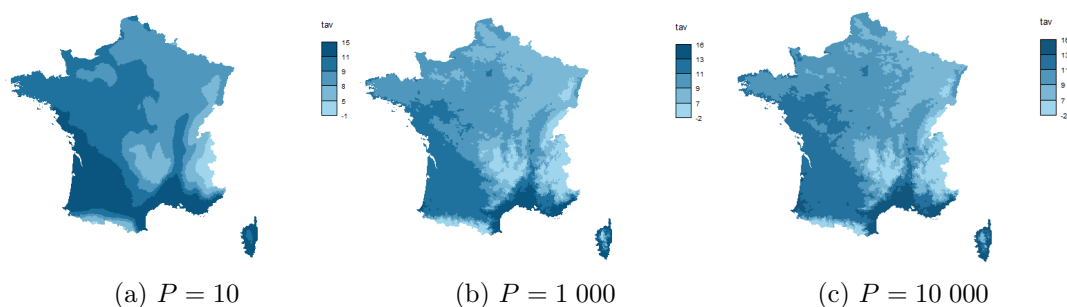


FIGURE 3.7 – Influence du paramètre  $P$  sur le lissage

Pour le lissage des indicateurs climatiques, le paramètre retenu est  $P = 1e4$ . Une valeur élevée du coefficient de lissage permet de garder au maximum les spécificités locales de chaque commune. Ce paramètre a été déterminé à partir d'une visualisation graphique des résultats obtenus après lissage.

### 3.5.4 Correction des RGA

La base d'exposition au phénomène de retrait-gonflement des argiles présentée précédemment comporte quelques incohérences pour certaines communes. En effet, pour les neuf communes citées dans le tableau 3.8, la somme de la surface en aléa faible et de la surface en aléa moyen/fort est supérieure à la surface totale. Un signalement a été fait auprès du Ministère de la Transition Écologique et du SDES en charge de cette base de données. Béatrice Michalland, sous-directrice de l'information environnementale, a précisé que cette erreur serait sûrement due à une différence de référentiel utilisé pour la surface totale des communes et pour les surfaces exposées au RGA <sup>1</sup>.

Afin de corriger ces erreurs pour les neuf communes concernées, la surface totale des communes a été recalculée à partir des surfaces en aléa faible et en aléa moyen/fort. Les parts de la commune en aléa faible et moyen/fort sont ensuite recalculées à partir de cette nouvelle surface totale. Un exemple de retraitement est donné dans la table 3.9. Les retraitements pour les neuf communes concernées sont disponibles en annexe.

1. Réponse de Béatrice Michalland : " Nous n'avons pas encore expertisé la cause de ce problème mais une hypothèse qui reste à confirmer est la suivante : le référentiel (cartographique) utilisé pour caractériser la surface totale de la commune n'est pas exactement le même que celui utilisé pour calculer les surfaces en aléa. Si cela se confirme, nous précisons ce point sur le site internet au niveau du téléchargement du fichier de données. "

Code insee	Part de la surface en aléa
13084	100,72%
41232	100,03%
60219	100,14%
62284	100,09%
62697	119,21%
67009	108,17%
77290	100,08%
80340	100,71%
87204	101,12%

TABLE 3.8 – Liste des communes présentant des incohérences dans la base d’exposition au RGA

	surface (en $km^2$ )	surface aléa faible (en $km^2$ )	surface aléa moyen fort (en $km^2$ )	part aléa faible	part aléa moyen fort	part aléa fort moyen faible
Avant retraitement	3,376	2,831	1,194	84%	35%	119%
Après retraitement	4,025	2,831	1,194	70%	30%	100%

TABLE 3.9 – Exemple de retraitement des données de RGA pour le code INSEE 62697

La recherche et le traitement de sources de données fiables, en *Open Data*, avec un historique long et des granularités temporelles et géographiques suffisantes a représenté une part importante de ce mémoire.

Des pré-traitements ont été réalisés sur les différentes bases de données collectées pour plusieurs raisons. Tout d’abord, certaines de ces données présentaient des anomalies qui ont nécessité quelques corrections, comme ce fut le cas de la base d’exposition aux RGA. Deuxièmement, pour l’indicateur d’humidité des sols, un alignement entre les données d’historique et de projection a dû être réalisé. Enfin, une uniformisation des mailles géographiques et temporelles a été nécessaire afin d’obtenir une base de données consolidée cohérente. Ces uniformisations ont ainsi permis d’obtenir une base consolidée à la maille commune x année.

Le schéma suivant synthétise les données utilisées et les traitements effectués afin de construire les bases de modélisation des inondations et des sécheresses.

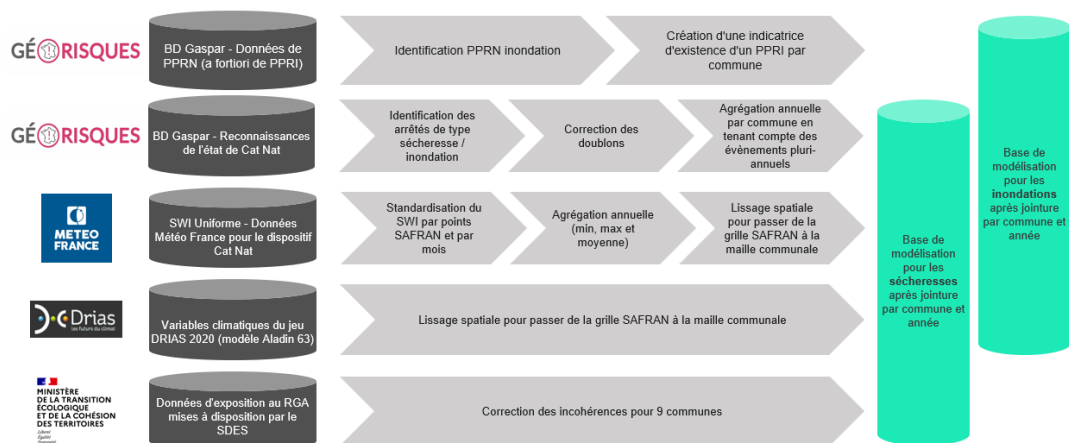


FIGURE 3.8 – Schéma récapitulatif de la construction des bases de modélisation pour les inondations et les sécheresses

## 3.6 Statistiques descriptives de la base de modélisation

### 3.6.1 Quelques caractéristiques de la base de données

La base de modélisation pour les inondations s'étend de 1985 à 2021. Les trois premières années (1982, 1983 et 1984) ont été enlevées à cause de la création de la variable d'historique des arrêtés de catastrophe naturelle sur les trois années précédentes. La base comporte 1 303 436 lignes, ce qui correspond aux 37 années de 1985 à 2021 pour les 35228 communes de métropole.

La base de modélisation pour la sécheresse s'étend de 1991 à 2020. Comme pour les inondations, les trois premières années sont exclues par manque d'historique pour la construction de la variable d'antécédent de reconnaissance de l'état de sécheresse. L'année 2021 est également exclue car le phénomène de RGA est lent et les conséquences peuvent n'être observées que plusieurs mois après un épisode de sécheresse. Ainsi, les chiffres disponibles actuellement ne représentent qu'une estimation minimum du nombre d'arrêtés total pour l'année 2021. Cette base comporte 1 056 840 lignes, correspondant aux 31 années de 1991 à 2020 pour les 35228 communes de métropole.

	Nombre d'observations	Période couverte	Nombre Cat Nat	Nombre Cat Nat moyen	Fréquence annuelle
<b>Inondations</b>	1 303 436	1985-2021	102173	2761	0.078
<b>Sécheresse</b>	1 056 840	1991-2020	47991	1600	0.045

TABLE 3.10 – Synthèse des caractéristiques de la base de modélisation

Comme mentionné dans la partie 2.4, la plupart des communes de métropole ont déjà fait l'objet d'un arrêté de Cat Nat au titre des inondations. Sur la période 1985-2021, 95% des communes métropolitaines ont fait l'objet d'au moins un arrêté de Cat Nat au titre des inondations. Cette statistique est beaucoup plus faible en ce qui concerne la sécheresse. En effet, les communes concernées par des reconnaissances de sécheresse se concentrent sur certaines zones de métropole (croissant argileux du Var au Val de Loire en passant par la région toulousaine, la région parisienne...). Seules 35% des communes de Métropole ont été déclarées en état de catastrophe naturelle à cause de la sécheresse sur la période 1991-2020.

### 3.6.2 Corrélation de variables

Le nombre de variables explicatives étant conséquent, une première étude des corrélations entre les différentes variables a été réalisée. Les deux graphiques suivants représentent les corrélations entre les variables de modélisation pour les inondations à gauche et pour la sécheresse à droite.

Cette étude des corrélations doit permettre de réaliser une sélection des variables afin d'éviter d'introduire des variables interdépendantes dans les modèles.

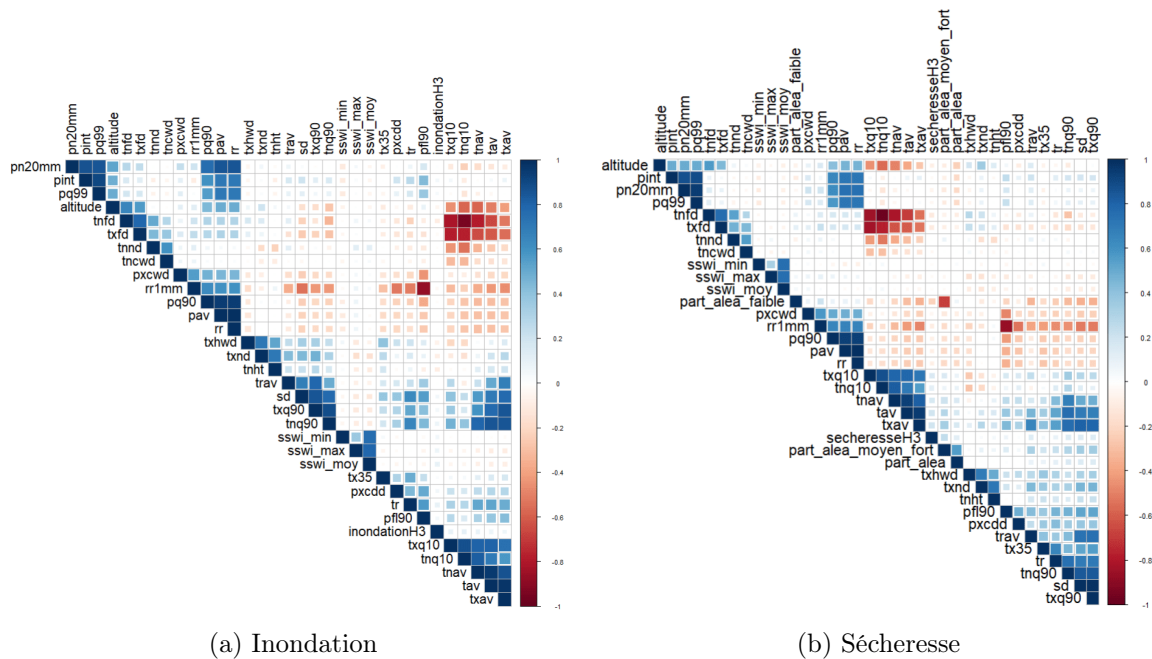


FIGURE 3.9 – Corrélation de Pearson entre les variables explicatives

Pour rappel, les descriptifs et les méthodes de calculs des indicateurs climatiques sont donnés par le tableau 3.3.

De nombreux indicateurs climatiques sont fortement corrélés entre eux. C'est notamment le cas des variables `pfl90` et `rr1mm` qui représentent respectivement la part des précipitations quotidiennes intenses et le nombre de jours pluvieux.

Les tableaux suivants recensent les plus fortes corrélations, positives comme négatives, entre les différentes variables disponibles.

Variables	Corrélation	Variables	Corrélation
<code>pav</code> ; <code>rr</code>	1.000	<code>tnfd</code> ; <code>tnq10</code>	-0.978
<code>sd</code> ; <code>txq90</code>	0.980	<code>pfl90</code> ; <code>rr1mm</code>	-0.861
<code>tav</code> ; <code>txav</code>	0.960	<code>tnfd</code> ; <code>txq10</code>	-0.847
<code>pn20mm</code> ; <code>pq99</code>	0.948	<code>txfd</code> ; <code>txq10</code>	-0.830
<code>tav</code> ; <code>tnav</code>	0.939	<code>tnav</code> ; <code>tnfd</code>	-0.812
<code>pav</code> ; <code>pq90</code>	0.931		
<code>pq90</code> ; <code>rr</code>	0.931		
<code>pint</code> ; <code>pq99</code>	0.882		
<code>tnq10</code> ; <code>txq10</code>	0.877		
<code>pint</code> ; <code>pn20mm</code>	0.876		
<code>tnq90</code> ; <code>txq90</code>	0.849		
<code>sd</code> ; <code>tnq90</code>	0.846		
<code>tnav</code> ; <code>tnq10</code>	0.825		

TABLE 3.11 – Corrélations remarquables

Il n'est pas étonnant de trouver de fortes corrélations entre les indicateurs climatiques. En effet, leur construction repose sur un nombre limité de variables climatiques induisant une corrélation évidente entre ces indicateurs.

Pour la suite, il sera pertinent de ne garder qu'un sous-ensemble des variables explicatives afin de limiter les interactions entre les variables. Ainsi, pour les couples de variables identifiés

précédemment, seule une variable de chaque paire ne peut être utilisée à la fois dans un modèle.

### 3.6.3 Évolution des reconnaissances de l'état de catastrophe naturelle

De nombreuses statistiques concernant les arrêtés de catastrophe naturelle ont été présentées dans la partie 2.4. Le graphique suivant représente l'évolution du nombre de reconnaissances au titre des inondations et de la sécheresse depuis la création du régime.

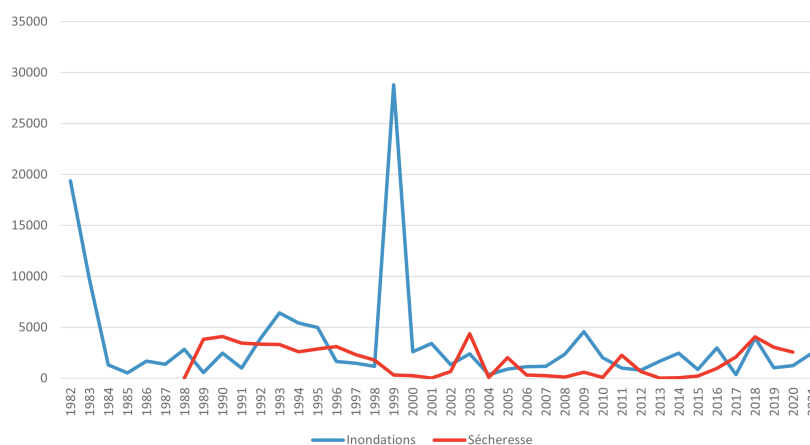


FIGURE 3.10 – Évolution des reconnaissances d'inondation et sécheresse en France métropolitaine

L'année 1999 est très singulière en ce qui concerne les inondations. En effet, à la suite des intempéries causées par les tempêtes Lothar et Martin, de nombreux arrêtés ont été pris à l'échelle des départements. Il pourra être judicieux de l'exclure de la base de modélisation.

En ce qui concerne la sécheresse, l'année 2003 ressort tout particulièrement puisqu'il s'agit de l'année la plus sinistrée. En effet, l'été 2003 a été marquée par une canicule à l'échelle européenne et a fait suite à un printemps déjà chaud et sec. Cette canicule a eu des conséquences à la fois sur la population et sur les bâtiments.

Par ailleurs, le critère de reconnaissance de l'état de sécheresse a beaucoup évolué depuis son introduction dans le régime. De 1988 à 1998 la garantie de catastrophe naturelle était assez largement activée sous la seule contrainte de la présence d'argile dans les sols. La réglementation a ensuite été durcie, rendant la reconnaissance de l'état de sécheresse plus compliquée. Il semble donc intéressant de créer une indicatrice permettant de prendre en compte ce changement réglementaire.

### 3.6.4 Étude des indicateurs climatiques et météorologiques

Nous représentons ici quelques indicateurs climatiques qui peuvent sembler pertinents dans la prévision des arrêtés de Cat Nat. La représentation des indicateurs se fait à la maille commune après une agrégation par moyenne des indicateurs sur l'ensemble de la période 1982-2021.

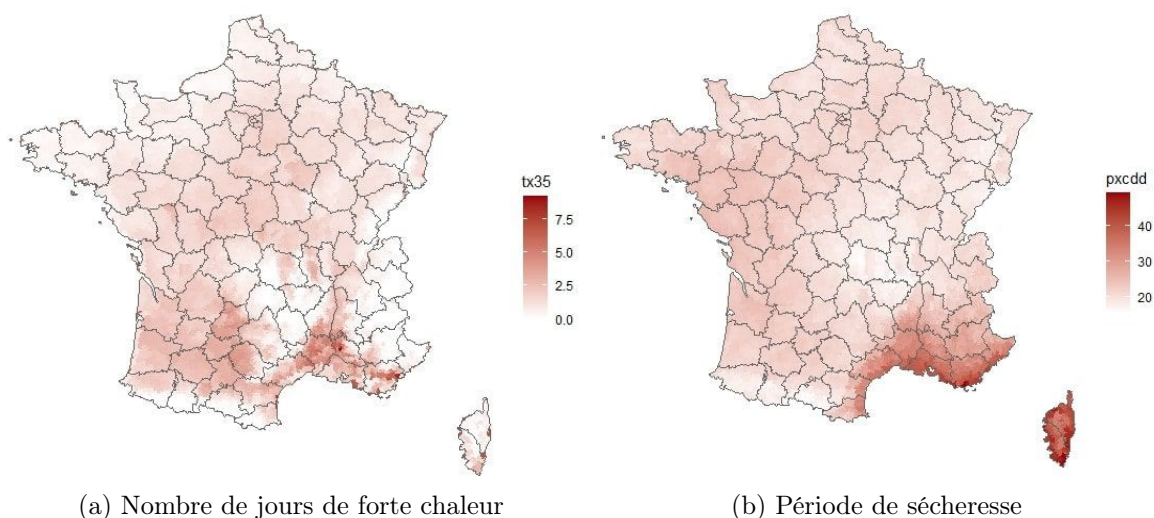


FIGURE 3.11 – Cartes des indicateurs climatiques liés à la chaleurs moyennés sur la période 1982-2021

Ces cartes soulignent l'inégalité du territoire par rapport aux sécheresses et aux fortes chaleurs. Sans trop de surprise, le Sud de la France est plus sujet à des périodes de sécheresse que le reste de la France métropolitaine.

Intéressons-nous maintenant au SSWI, indicateur d'humidité des sols, et à sa répartition suivant les années. Pour rappel, une valeur négative témoigne d'une sécheresse des sols. D'après le graphique 3.6a, l'année 2003 a été particulièrement sèche et il s'agit de l'année ayant fait l'objet du plus grand nombre de reconnaissances de Cat Nat au titre de la sécheresse depuis la création du régime. A l'inverse, l'année 2001 est particulièrement peu sinistrée en sécheresse. Les trois jeux de cartes suivants représentent, par commune, la valeur du SSWI minimum, moyen et maximum annuel pour les années 2001 et 2003.

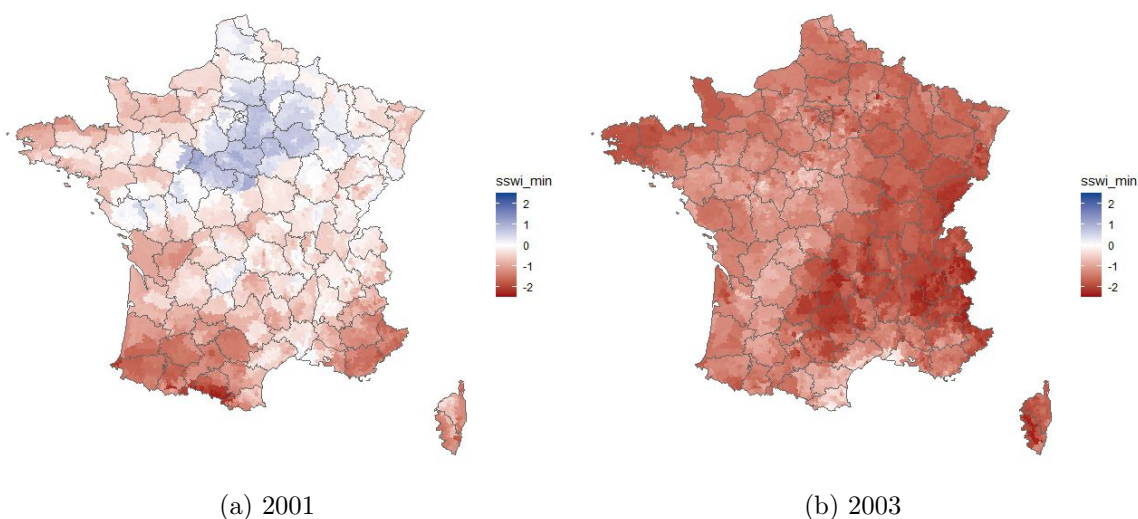


FIGURE 3.12 – Comparaison du minimum des sswi mensuels pour deux années remarquables

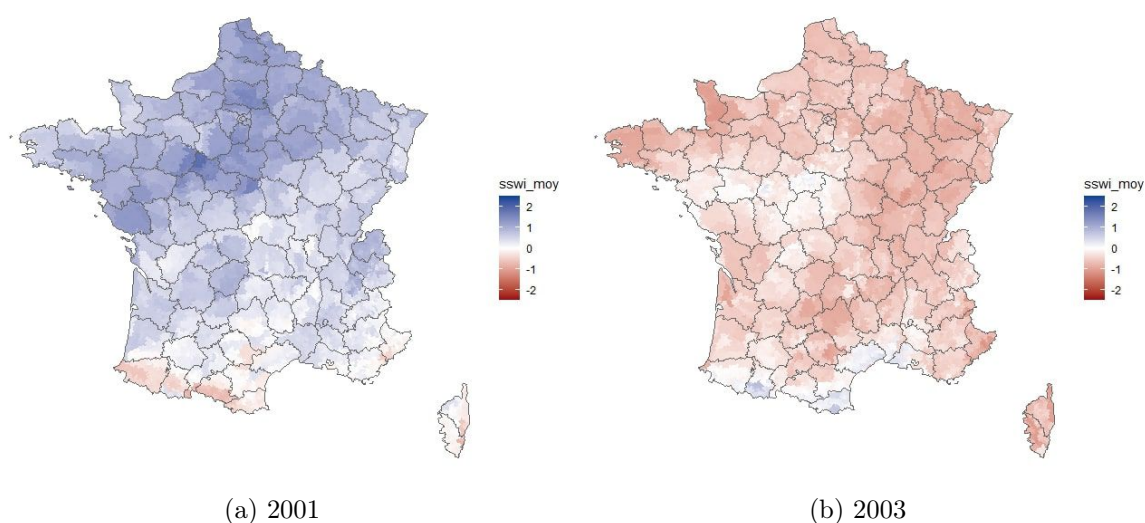


FIGURE 3.13 – Comparaison de la moyenne des sswi mensuels pour deux années remarquables

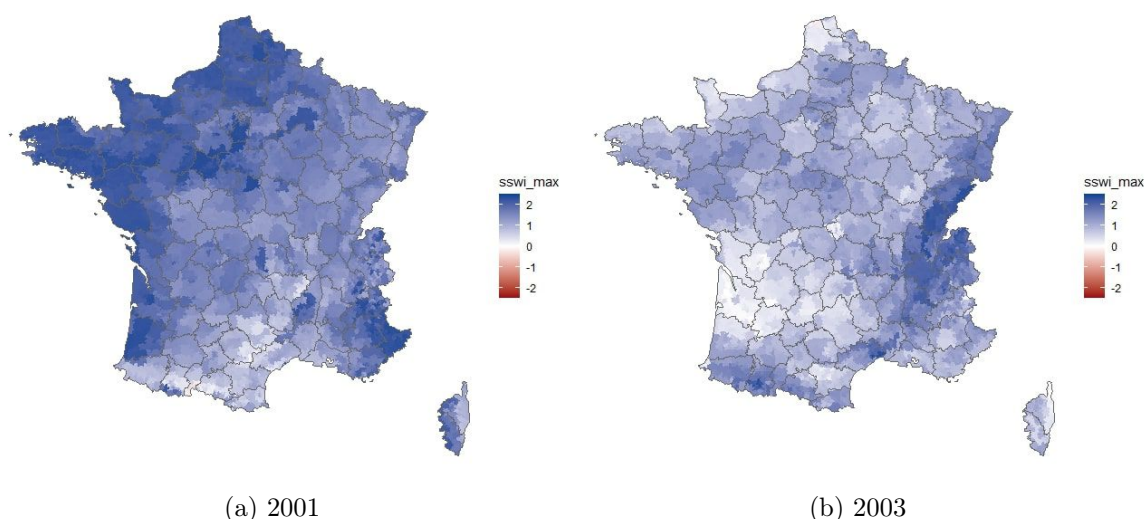


FIGURE 3.14 – Comparaison du maximum des sswi mensuels pour deux années remarquables

Une teinte bleue indique une valeur négative du SSWI témoignant d'une humidité des sols. A l'inverse, une teinte rouge est un témoin de la sécheresse des sols. La différence entre ces deux années singulières est nette. Pour l'année 2001, les SSWI mensuels ont été particulièrement positifs. A l'inverse, l'année 2003 est marquée par des valeurs très négatives du SSWI sur l'ensemble du pays témoignant d'un véritable déficit en eau dans les sols et de longues périodes de sécheresse. Ce manque d'humidité a eu des impacts conséquents sur les bâtiments, conduisant à un nombre d'arrêtés de Cat Nat particulièrement élevé pour cette année.

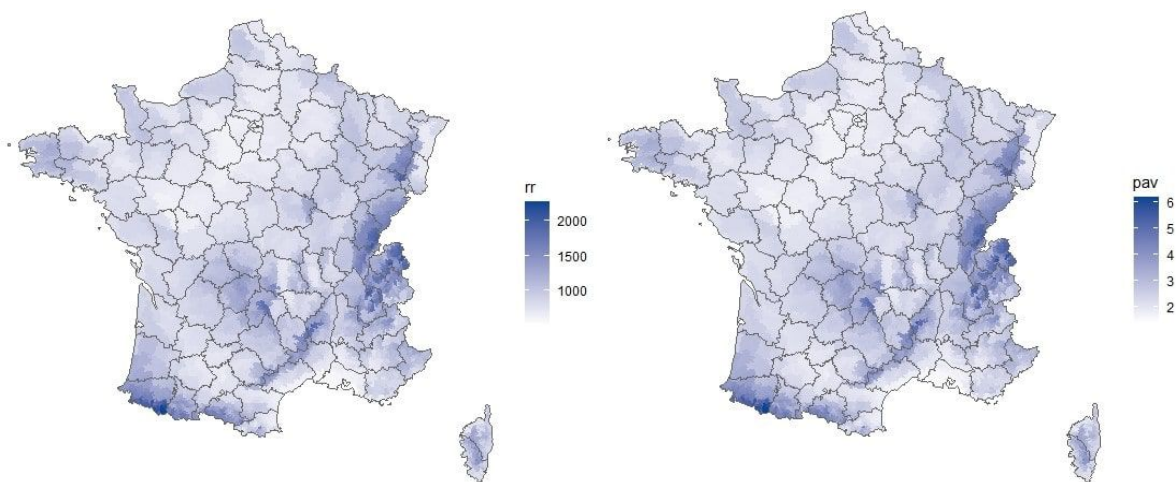
Le minimum et la moyenne des SSWI semblent être les plus intéressants dans le cadre de la modélisation des sécheresses. Le maximum est tout de même conservé car il peut apporter des informations supplémentaires sur l'humidité des sols sur l'ensemble de l'année considérée.

En annexe C.1, les cartes des SSWI maximum, moyen et minimum pour deux autres années



remarquables (2013 et 2018) semblent confirmer les observations faites pour 2001 et 2003.

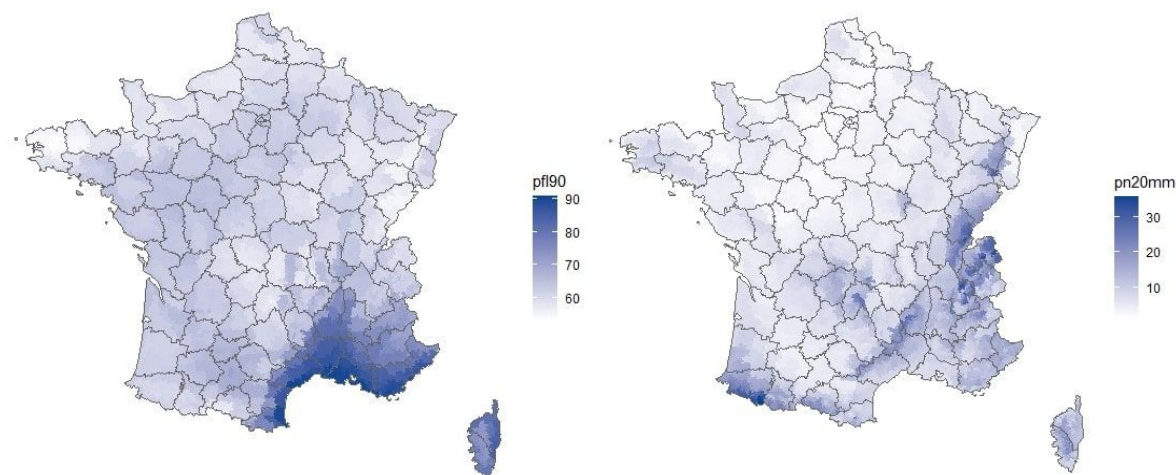
Regardons maintenant quelques indicateurs de pluviométrie.



(a) Cumul de précipitation

(b) Précipitations quotidiennes moyennes

FIGURE 3.15 – Cartes des indicateurs climatiques liés à la pluviométrie moyennés sur la période 1982-2021



(c) Fraction des précipitations intenses

(d) Nombre de jours de fortes précipitations

FIGURE 3.15 – Cartes des indicateurs climatiques liés à la pluviométrie moyennés sur la période 1982-2021

Le bassin méditerranéen et le couloir rhodanien apparaissent très sujet aux fortes pluies. C'est également le cas des territoire montagneux, comme le Jura, les Pyrénées ou les Vosges. Ces fortes précipitations peuvent être à l'origine d'inondations éclairées et torrentielles.



## Chapitre 4

# Modélisation et résultats

Ce chapitre est consacré à la présentation des résultats obtenus à partir de différents types de modèle de prédiction. En effet, afin de réaliser une projection des aléas sécheresse et inondation pour 2050, nous tentons de modéliser les reconnaissances de Cat Nat par commune de manière annuelle pour ces deux périls à partir des informations collectées. Des modèles statistiques et de *Machine Learning* seront utilisés et une comparaison des différents résultats sera effectuée.

Ces modèles ont été développés et entraînés sur des données historiques d'arrêtés de catastrophe naturelle et ont été testés sur des données récentes pour évaluer leur capacité à prédire les arrêtés à venir. Cette partie décrit les différentes méthodes utilisées pour construire les modèles ainsi que les différentes métriques utilisées pour évaluer leur performance. Enfin, nous discuterons des limites et des perspectives pour l'amélioration future de ces modèles.

### 4.1 Modélisation

L'objectif est de construire un modèle capable de prédire les arrêtés de catastrophe naturelle pour le type de péril considéré (inondation ou sécheresse). La variable modélisée est le nombre d'arrêtés de catastrophe naturelle survenues pour une commune et une année donnée. Les aspects spatio-temporels sont quant à eux pris en compte via les variables explicatives qui ont été présentées dans le chapitre précédent. Cette partie présente très brièvement les modèles statistiques et de *Machine Learning* utilisés par la suite.

#### 4.1.1 GLM

Les modèles linéaires généralisés (GLM) sont des modèles statistiques consistant à étudier la liaison entre une variable réponse,  $Y$ , et des variables explicatives, notées  $X_1, X_2, \dots, X_p$ . L'utilisation des GLM est courante en assurance non-vie, particulièrement sur des sujets de tarification.

Dans le cadre des modèles linéaires classiques, la variable réponse est supposée dépendre de manière linéaire des variables explicatives. Les GLMs définissent l'espérance de  $Y$  comme une fonction linéaire des variables explicatives. Cette relation peut s'écrire de la manière suivante :

$$g(\mathbb{E}[Y]) = \beta_0 + \sum_{i=1}^p \beta_i \cdot X_i$$

où  $g$  est appelée fonction de lien.

Un modèle GLM est caractérisé par trois hypothèses :

1. Une loi de probabilité caractérisant  $Y$
2. Des variables explicatives  $X_i$  déterministes
3. Une fonction de lien  $g$ .

L'objectif est donc de déterminer, à partir de  $n$  observations, l'espérance de la variable réponse  $Y$ .

Certaines lois de probabilités régulièrement utilisées et leur lien canonique sont rappelés dans le tableau suivant. Les lois de Bernoulli et de Poisson semblent particulièrement adaptées dans notre cas.

Loi	Lien canonique
Normal $N(\mu, \sigma^2)$	identité
Bernoulli $\mathcal{B}(\mu)$	logit
Poisson $\mathcal{P}(\mu)$	log
Gamma $\mathcal{G}(\alpha, \beta)$	inverse
Inverse Gauss. $\mathcal{IG}(\mu, \lambda)$	inverse carré

TABLE 4.1 – Famille de loi de probabilité et fonction de lien canonique

### 4.1.2 Random Forest

Les forêts aléatoires ont été introduites en 2001 et sont un cas particulier du *bagging* dont le principe repose sur la création de plusieurs modèles indépendants. Dans le cadre des *Random Forest*, les modèles utilisés sont des arbres de décisions.

Sous R, le package *ranger* met en œuvre l'algorithme pour former une *Random Forest*.

#### Les arbres de décision

L'algorithme CART (*Classification and Regression Tree*) s'attelle à obtenir un arbre de décision.

Cet algorithme fonctionne en divisant l'ensemble d'apprentissage en deux sous-ensembles à l'aide d'une seule caractéristique  $k$  et d'un seuil  $t_k$ . La division est effectuée dans ce que nous appelons un nœud. Pour construire l'arbre final, plusieurs divisions peuvent être effectuées pendant la phase d'entraînement. Pour choisir  $k$  et  $t_k$ , nous recherchons le couple qui donne les sous-ensembles les plus purs (au sens de Gini) pondérés par leur taille. L'équation ci-dessous donne la fonction de coût que l'algorithme tente de minimiser :

$$J(k, t_k) = \frac{n_{droite}}{n} * G_{gauche} + \frac{n_{gauche}}{n} * G_{droite}$$

où  $G_{gauche/droite}$  est l'impureté dans un sous-ensemble et  $n_{gauche/droite}$  le nombre d'observations dans les deux sous-ensembles.

Un arbre de décision peut donc estimer la probabilité qu'une observation appartienne à une classe particulière  $k$ . Il parcourt d'abord l'arbre pour trouver le nœud feuille (nœud final) pour cette observation, puis il renvoie le rapport des observations d'apprentissage pour toutes les classes dans ce nœud. Il peut alors sortir la classe avec la probabilité la plus élevée et attribuer à l'observation la prédiction de cette classe.

## Bagging et RandomForest

La *Random Forest* repose sur une technique du *bagging* dont le principe repose sur la réalisation de plusieurs algorithmes et de prendre la moyenne de leurs résultats. Cette technique permet de réduire la variance.

Les arbres de classification sont des candidats idéaux pour le *bagging*, car ils peuvent capturer des structures d'interaction complexes dans les données et, s'ils sont suffisamment profonds, ont un biais relativement faible<sup>1</sup>.

Dans cet algorithme, chaque arbre de décision est construit uniquement sur une sous-partie de notre échantillon et n'utilise qu'une partie des caractéristiques. Grâce au *bagging* au niveau des observations et au niveau des caractéristiques, nous créons plusieurs arbres avec de légères variations. Ainsi, chaque arbre de notre forêt est différent. Dans le cas d'un problème de régression, la prédiction correspond à la moyenne des prédictions de tous les arbres. Pour un problème de classification, la prédiction correspond à la classe majoritaire sur l'ensemble des arbres.

---

### Algorithme 1 : *Random Forest* pour la classification

---

**Input:**  $B$  le nombre de *bootstraps*

**Output:** Un estimateur

1) **Pour**  $b$  dans  $\llbracket 1, B \rrbracket$

Tirer un échantillon de *bootstraps*  $\mathbf{Z}$  de taille  $N_b$  à partir des données d'apprentissage

Établir l'arbre de décision  $T_b$  sur les données de *bootstraps* en appliquant récursivement les étapes suivantes sur chaque nœud terminal de l'arbre jusqu'à ce que la taille minimum d'un nœud  $n_{min}$  soit atteinte :

i) Sélectionnez  $m$  variables au hasard parmi les  $p$  variables.

ii) Choisir la meilleure variable/le meilleur point de séparation parmi les  $m$ .

iii) Diviser le nœud en deux nœuds fils.

**end for**

2) Produire l'ensemble d'arbres  $\{T\}_b^B$

Pour obtenir la prédiction d'une nouvelle observation  $x$  :

CLASSIFICATION : Soit  $\hat{C}_b(x)$  la classe prédite par le  $b$ -ième arbre de décision

Alors  $\hat{C}_{rf}^B(x) = \text{vote majoritaire}\{\hat{C}_b(x)\}^B$

RÉGRESSION : Soit  $\hat{C}_b(x)$  la valeur prédite par le  $b$ -ième arbre de décision

Alors  $\hat{C}_{rf}^B(x) = \text{mean}\{\hat{C}_b(x)\}^B$

---

1. Voir [cours de Archer Yi Yang, professeur de statistiques à l'université McGill au Canada](#).

### 4.1.3 Critères d'évaluation des modèles

Plusieurs critères seront utilisés afin d'évaluer la pertinence et la qualité des modèles.

Le premier critère utilisé est l'AIC (critère d'information d'Akaike) qui est défini de la manière suivante :  $AIC = 2p - 2 \ln(L)$  avec  $L$  la vraisemblance du modèle et  $p$  le nombre de paramètres du modèle. L'AIC permet de comparer et de mesurer la qualité de plusieurs modèles statistiques candidats. Le modèle retenu est celui minimisant l'AIC. Ce critère permet de sélectionner un modèle équilibré entre complexité et qualité d'ajustement.

Le deuxième critère généralement utilisé est le BIC (critère d'information bayésienne). Il est défini de la manière suivante :  $BIC = p \log(n) - 2 \ln(L)$  avec  $n$  le nombre d'observations,  $L$  la vraisemblance du modèle et  $p$  le nombre de paramètres du modèle. Tout comme pour l'AIC, le modèle minimisant le BIC est le meilleur modèle, compromis entre qualité d'ajustement et complexité. Le BIC sélectionne des modèles plus parcimonieux que l'AIC.

Le dernier critère que nous utiliserons est la RMSE (Root Mean Squared Error). Il s'agit d'une mesure régulièrement utilisée pour comparer les valeurs prédites par un modèle et les observations. La RMSE permet d'évaluer la précision d'un modèle prédictif. En notant  $n$  le nombre d'observations,  $y_i$  les observations et  $\hat{y}_i$  les valeurs prédites, la RMSE est défini de la manière suivante :

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

La RMSE est donc toujours positive et un modèle ayant une RMSE de 0 serait un modèle parfaitement calibré par rapport aux données.

La RMSE peut être calculée sur une base d'apprentissage afin d'évaluer les performances du modèle sur les données d'entraînement. Elle peut également être calculée sur une base de test afin de vérifier la capacité de généralisation du modèle.

## 4.2 Modèles et résultats pour les inondations

Cette partie expose les résultats obtenus pour les inondations.

### 4.2.1 Étude des corrélations

Avant toute modélisation, il convient de réaliser quelques statistiques afin de sélectionner les variables les plus pertinentes pour modéliser les arrêtés de Cat Nat. Une première approche est l'étude des corrélations entre les variables explicatives et la variable réponse. Le graphique 4.1 représente la corrélation de Spearman pour les variables explicatives continues.

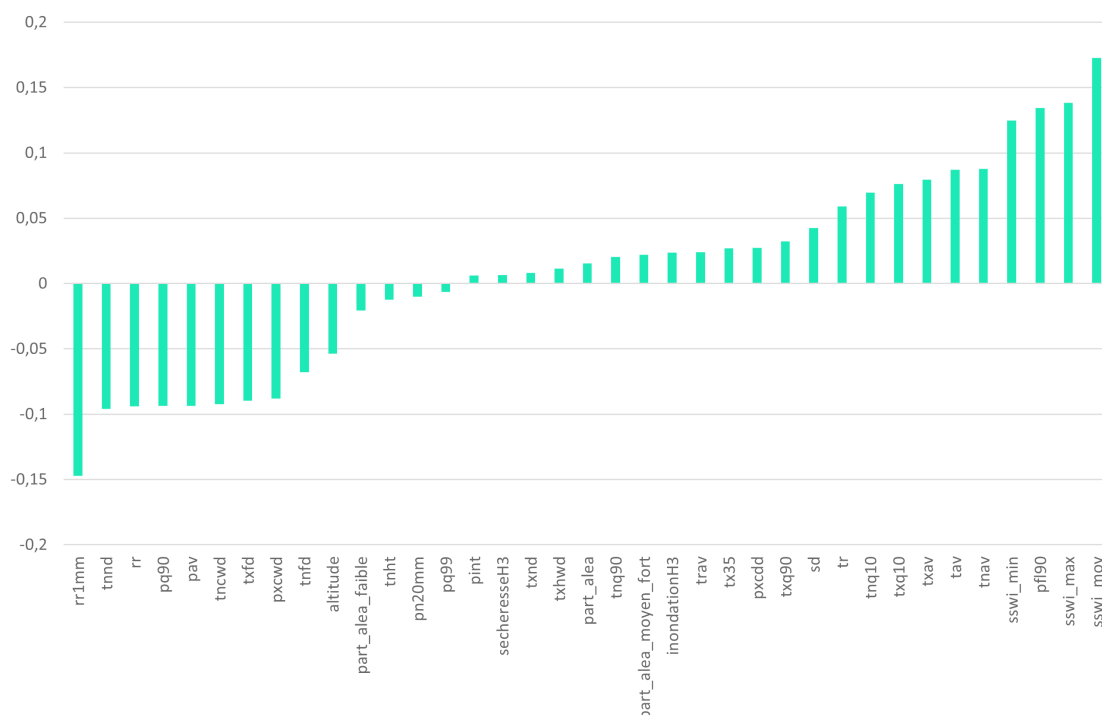


FIGURE 4.1 – Corrélation avec la variable réponse pour les inondations

Les variables les plus fortement corrélées sont le nombre de jours de pluie (rr1mm) et la part des précipitations quotidiennes intenses (pfl90), ainsi que l'indicateur d'humidité des sols.

### 4.2.2 Résultats et comparaison des modèles

Nous présentons ici les résultats de quelques modèles de GLM et de Random Forest conduits pour les inondations. Afin d'évaluer les performances de généralisation des modèles, la base de modélisations est découpée en une base d'apprentissage (*train*) et une base de test. La base d'apprentissage est constituée des données des années 1985 à 2016 hormis 1999 qui a été exclue et la base de test est composée des données de 2017 à 2021.

### Résultats des GLM Poisson

Les premiers modèles réalisés sont des GLM poisson avec le lien canonique *log*. Les différents modèles sont comparés à partir de l'AIC, du BIC et de la RMSE sur la base d'apprentissage et sur la base de test.

Plusieurs essais de modèles ont été réalisés en supprimant successivement certaines variables ou en les catégorisant afin de minimiser l'un des critères (AIC, BIC ou RMSE de test). Un soin a également été porté à la sélection des variables dans le but de ne pas insérer deux variables qui seraient trop fortement corrélées afin de limiter les interactions.

Malgré de nombreux essais et plusieurs retraitements des variables à disposition, les résultats de prédiction restent plutôt décevants. Nous présentons tout de même les résultats obtenus pour le meilleur GLM dans le tableau 4.2.

	Estimate	Std. Error	z value	Pr(> z )	
(Intercept)	-1.824	0.053	-34.516	< 2e-16	***
txav	0.135	0.006	21.912	< 2e-16	***
tr	0.012	0.000	26.351	< 2e-16	***
txq90	-0.110	0.004	-29.152	< 2e-16	***
inondationH3	0.193	0.006	34.802	< 2e-16	***
rr1mm	-0.008	0.000	-27.209	< 2e-16	***
rr_cat(Q1,Med]	0.068	0.012	5.836	5.34e-9	***
rr_cat(Med,Q3]	0.157	0.013	12.410	< 2e-16	***
rr_cat(Q3;Max]	0.139	0.016	8.910	< 2e-16	***
tncwd	0.006	0.001	8.228	< 2e-16	***
pxcwd	0.014	0.002	7.881	3.25e-15	***
txfd	-0.011	0.001	-15.634	< 2e-16	***
tnfd	0.002	0.000	5.913	3.36e-9	***
ppri=TRUE	0.723	0.008	88.280	< 2e-16	***

TABLE 4.2 – Coefficients du meilleur GLM pour les inondations

Les variables relevant de l'exposition aux inondations (historique du nombre de reconnaissances sur les trois dernières années (inondationH3), indicatrice de l'existence d'un PPRI pour la commune) ont des coefficients significatifs et positifs. Ainsi plus une commune est exposée au risque inondation et a été sinistrée dans le passé, plus elle a de risques de l'être à nouveau dans le futur. Concernant le cumul des précipitations (rr), la variable a été catégorisée en quatre classes en se basant sur les quartiles. Il en ressort que jusqu'à un certain seuil, plus l'année a été pluvieuse, plus le risque d'inondation augmente. En effet, les coefficients correspondants à la variable de cumul des précipitations catégorisée à partir des quartiles sont croissants hormis pour la dernière catégorie entre le 3ème quartile et le max.

D'autres coefficients semblent contre intuitifs. Par exemple, il apparaît que plus le nombre de jours pluvieux augmente (rr1mm), moins le risque d'inondation est grand.

Intéressons-nous maintenant à la qualité de prédiction du modèle. En effet, l'objectif de ce mémoire est de projeter une fréquence de catastrophes naturelles à un horizon de moyen terme donc il est important que le modèle retenu soit capable de modéliser cette fréquence sur l'historique à notre disposition. Un premier indicateur pouvant être utilisé pour évaluer les qualités de prédictions est la RMSE. Elle pourra notamment être comparé entre les différents modèles afin de choisir le meilleur modèle prédictif.

Il semble difficile d'évaluer les qualités prédictives du modèle pour chaque point de données (toutes les années d'entraînement pour l'ensemble des 35228 communes de métropole). C'est



pourquoi nous adoptons ici une vision agrégée par année et comparons la somme des arrêtés réellement pris sur une année avec la somme des fréquences prédites pour chaque commune sur cette même année. Les résultats sont donnés par les deux graphiques suivants. Le premier graphique représente les données d'apprentissage et le deuxième les données de test.

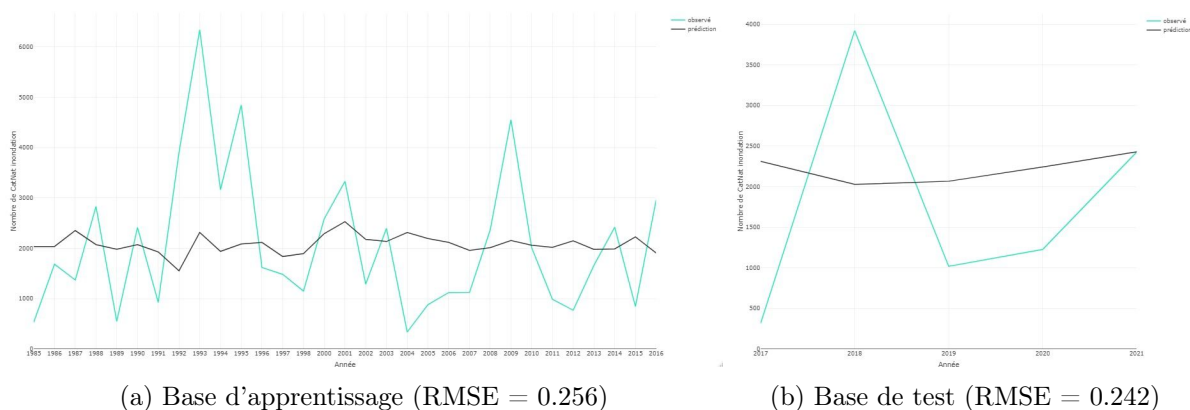


FIGURE 4.2 – Comparaison entre observations et prédictions du GLM pour les inondations

Ces graphiques mettent en évidence la qualité de prédiction moyenne de ce modèle. En effet, il semblerait que le modèle calibré ne soit pas capable de prédire les pics de sinistralité comme on peut le voir sur l'année 1993. Seule une tendance semble être captée par ce modèle.

Ainsi, les résultats obtenus avec le GLM pour les inondations sont à considérer en gardant à l'esprit ces limites.

### Résultats obtenus avec les Random Forest

Une deuxième approche a été mise en place afin de tenter d'améliorer les résultats de prédiction obtenus pour les inondations. Le choix s'est alors porté sur un modèle de Random Forest.

Une optimisation des paramètres tels que le nombre d'arbres considérés et leur profondeur, a permis de déterminer le meilleur modèle permettant de minimiser la RMSE sur la base de test.

Le graphique suivant permet de visualiser l'importance des variables explicatives dans les prédictions du modèle.

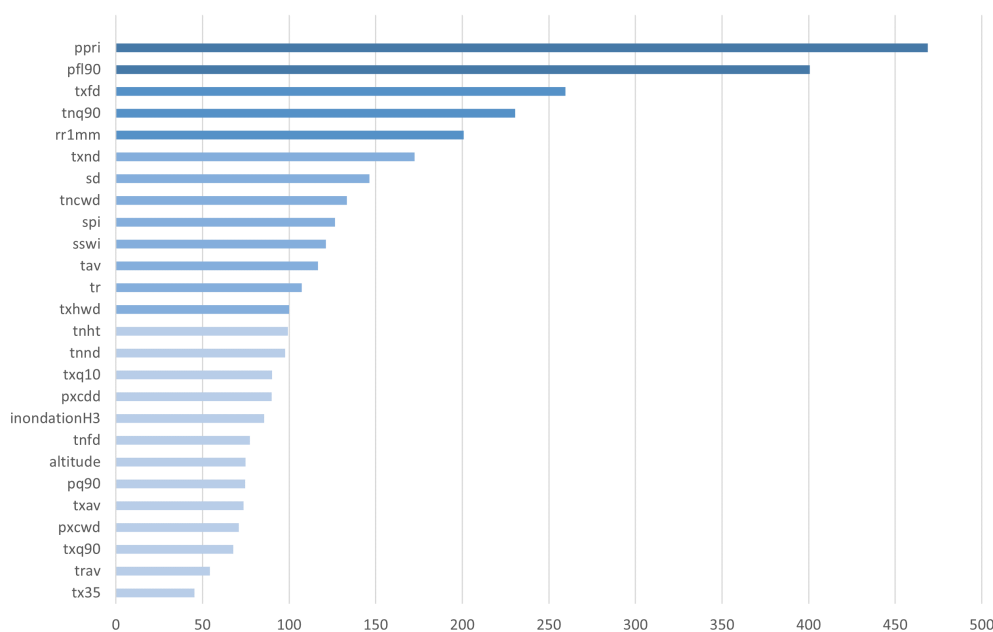
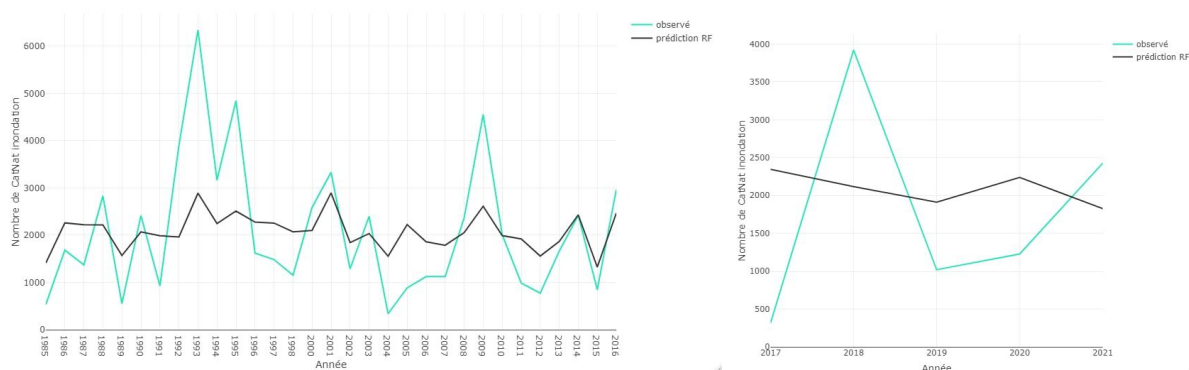


FIGURE 4.3 – Importance des variables retenues par le Random Forest dans la prédiction de Cat Nat inondation

Le facteur le plus important dans la prédiction des arrêtés de Cat Nat est l’indicatrice sur l’existence d’un plan de prévention des risques inondation pour la commune. D’autres variables en rapport avec la pluviométrie apparaissent également importantes dans les prédictions. C’est notamment le cas de la part des précipitations quotidiennes intenses (pfl90), du cumul des précipitations (rr) ou encore du nombre de jours de pluie (rr1mm).

Toutefois l’importance relative de certaines variables est assez surprenante. En effet, les variables concernant les jours de gel (txfd) et les vagues de froid (tncwd) n’apparaissent pas, au premier abord, comme pertinentes pour prédire les inondations.



(a) Base d’apprentissage (RMSE = 0.250)

(b) Base de test (RMSE = 0.239)

FIGURE 4.4 – Comparaison entre observations et prédictions de la Random Forest pour les inondations

Ainsi, en comparant les RMSE de train et de test, la Random Forest semble obtenir de légèrement meilleurs résultats que le GLM Poisson. Les performances restent cependant relativement

peu convaincantes.

### 4.2.3 Évolution des variables climatiques à horizon 2050

Il est intéressant de regarder l'évolution des indicateurs climatiques pour un horizon 2050. Les graphiques suivants représentent l'évolution, par rapport à la période historique, de certains indicateurs pertinents. Deux scénarios du GIEC sont représentés afin de rendre compte des différences entre le scénario le plus optimiste et le plus pessimiste.

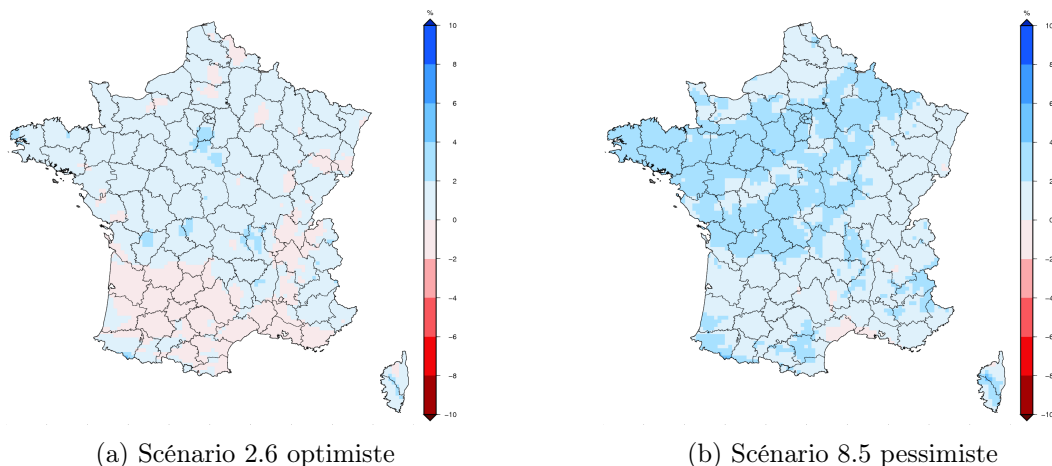


FIGURE 4.5 – Évolution de la part des précipitations quotidiennes intenses à moyen terme (2040-2070) par rapport à la période de référence

La part des précipitations quotidiennes intenses ne semble pas évoluer très fortement ni à la hausse ni à la baisse quel que soit le scénario considéré. Le scénario RCP8.5 prévoit une légère hausse par rapport à la période de référence mais cela reste au global très similaire au climat actuel.

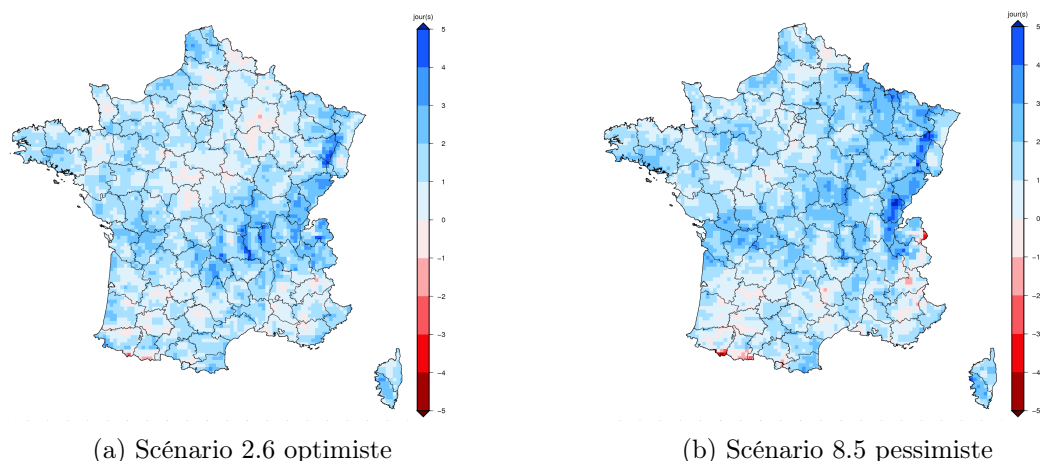


FIGURE 4.6 – Évolution du nombre de jours de forte pluie à moyen terme (2040-2070) par rapport à la période de référence

Source : DRIAS

Ces deux cartes indiquent qu'à horizon 2050 environ, le nombre de jours de fortes pluies devrait augmenter assez significativement dans certaines zones de métropole. Les territoires concernés sont principalement localisés dans des régions montagneuses comme les Vosges et le Jura.

#### 4.2.4 Projection de la fréquence à horizon 2050 avec les 3 scénarios du GIEC

A partir de la *Random Forest* qui est le modèle avec la meilleure RMSE de test, une projection à horizon 2050 est réalisée.

Pour cela, les données climatiques (température, précipitation...) sont projetées suivant les trois scénarios du GIEC considérés (RCP2.6, 4.5 et 8.5). Les variables topographiques et d'exposition sont supposées fixes. Ainsi, si une commune a mis en place un PPRI en vigueur aujourd'hui, la commune est considérée comme disposant d'un PPRI en 2050. Enfin, concernant la variable d'historique des arrêtés sur les trois années précédentes, il faudrait la projeter pas à pas, d'année en année, à partir des prédictions obtenues. Cette projection en cascade n'a pas été réalisée ici, et la valeur pour 2021 a été conservée pour obtenir les prédictions à horizon 2050.

Les trois cartes suivantes présentent une projection de la fréquence de Cat Nat inondation à horizon 2050 par commune pour chacun des scénarios du GIEC considéré.



FIGURE 4.7 – Projections à horizon 2050 par commune de l'aléa inondation - Scénario optimiste RCP2.6

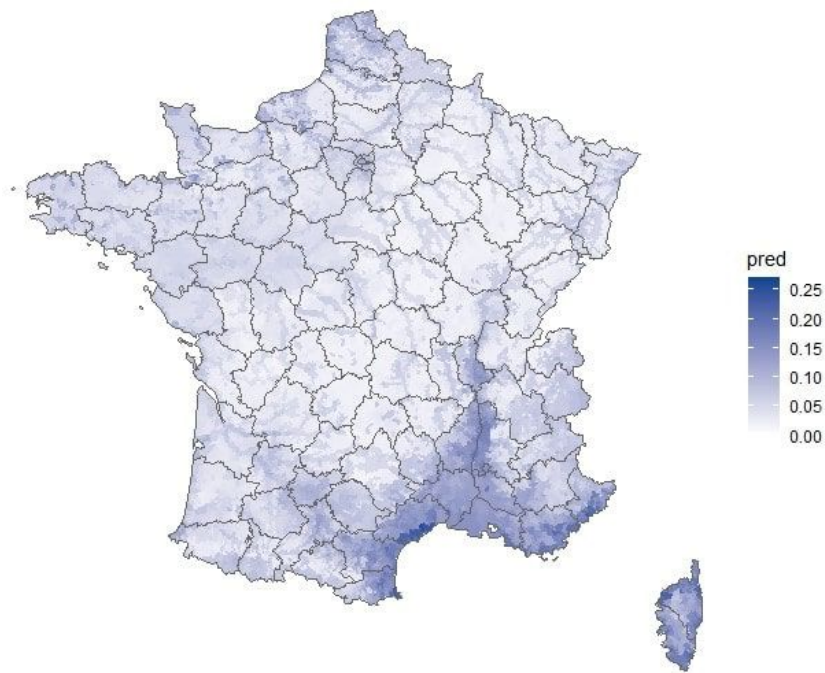


FIGURE 4.8 – Projections à horizon 2050 par commune de l'aléa inondation - Scénario intermédiaire RCP4.5

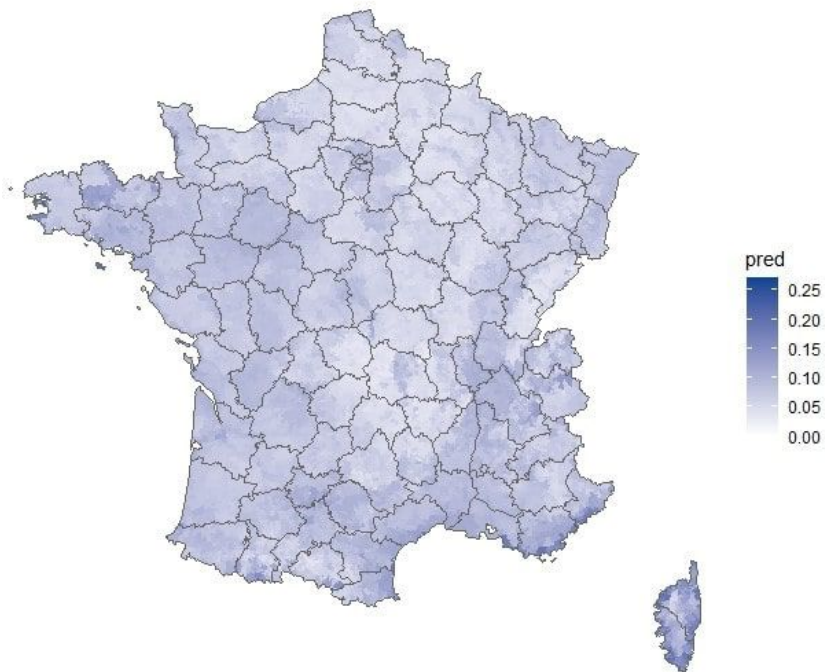


FIGURE 4.9 – Projections à horizon 2050 par commune de l'aléa inondation - Scénario pessimiste RCP8.5

Alors que pour le scénario 2.6 certaines régions de France se démarquent tout particulièrement

comme le pourtour méditerranéen et le couloir rhodanien, les projections obtenues avec le scénario le plus pessimiste apparaissent plus lissées sur l'ensemble du territoire. L'influence du PPRI sur les projections est remarquable pour le scénario optimiste et le scénario intermédiaire sur lesquels une projection de fréquence plus élevée autour des cours d'eau peut être observée. Cet effet est moins visible pour le scénario le plus pessimiste.

En conclusion, la modélisation des inondations est une tâche particulièrement complexe. Des modèles sophistiqués sont nécessaires afin de transformer l'impact d'une goutte de pluie sur le risque de survenance d'une inondation, et ce, pour chaque type d'inondation (ruissellement, crue par débordement, crue éclair...). Ils nécessitent la mise en place d'une chaîne de modélisation complexe élaborée par des experts en climatologie et météorologie. Ce type de modèle a pu être développé par certaines entreprises comme le réassureur public CCR.

Compte tenu des seules données disponibles en *Open Data* et des ressources à disposition concernant la modélisation des catastrophes naturelles, le choix s'est porté sur des modèles plus simples à mettre en place tels que les GLM ou les *Random Forest*. Les résultats obtenus et la qualité de prédiction des modèles sont cependant plutôt décevants. Ces résultats justifient l'utilisation par les experts du secteur de chaînes de modélisation particulièrement sophistiquées.

La vision globale adoptée ici peut être un point faible de cette modélisation. En effet, des données spécifiques aux cours d'eau et concernant l'aménagement du territoire contre le risque d'inondation (bassins de retenue, barrage...) auraient pu apporter de précieuses informations pour réaliser les prédictions. Néanmoins compte tenue du champ géographique retenu, il n'était pas envisageable d'extraire de manière homogène toutes ces données pour l'ensemble des cours d'eau de France.

Afin de modéliser plus finement les inondations et la reconnaissance de l'état de catastrophe naturelle, il pourrait être pertinent de se focaliser sur un fleuve ou un territoire en particulier comme cela a pu être réalisé par le passé pour le risque de crue de la Seine [9]. Par ailleurs, une approche saisonnière plutôt qu'annuelle pourrait également être une piste d'amélioration.

## 4.3 Modèles et résultats pour la sécheresse

### 4.3.1 Étude des corrélations

Comme pour les inondations, nous commençons par regarder les corrélations entre les variables explicatives et la variable réponse. Le graphique 4.10 représente la corrélation de Spearman avec la variable réponse pour les variables continues.

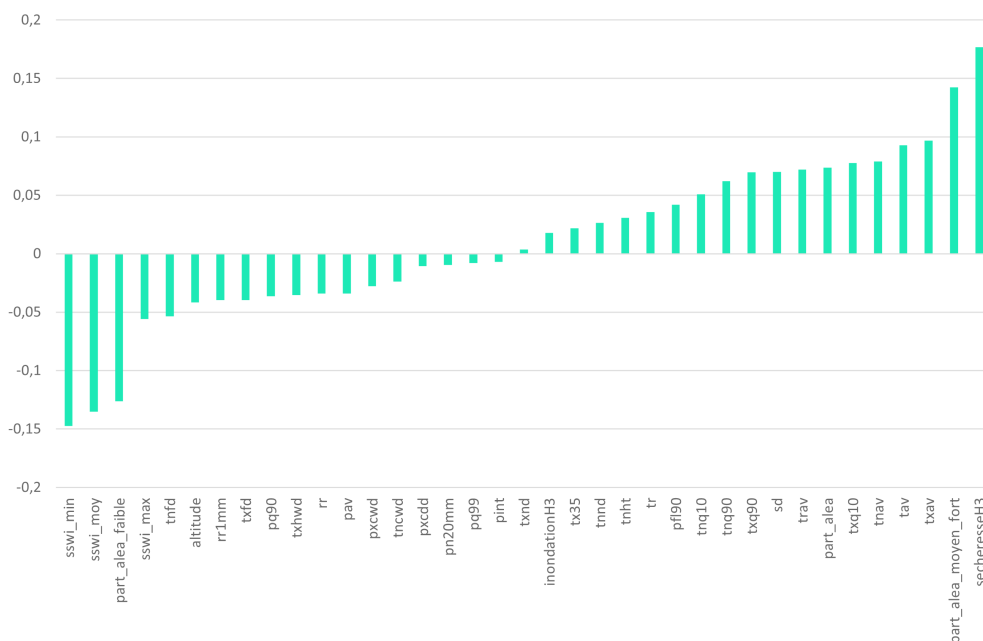


FIGURE 4.10 – Corrélation avec la variable réponse pour les sécheresses

Les variables caractéristiques de l'exposition de la commune à l'aléa font partie des plus fortement corrélées avec la variable réponse. En effet, la corrélation est significativement positive pour la variable d'historique de reconnaissance sur les trois années précédentes (secheresseH3) ce qui indique qu'une commune ayant déjà subi des sécheresses dans le passé est plus susceptible dans subir de nouvelles dans le futur.

Concernant les variables représentatives de la surface de la commune en aléa, la corrélation est positive pour l'aléa moyen/fort et négative pour l'aléa faible. Cela peut paraître contradictoire de prime abord, mais en regardant en détail les cartes 3.5 présentées dans le chapitre précédent, il apparaît qu'une part élevée de la surface en aléa faible est souvent synonyme d'une relativement faible surface en aléa moyen ou fort. Les corrélations indiquent l'existence d'une relation positive entre la part de la commune exposée moyennement ou fortement au RGA (selon le zonage établie par le BRGM 2.7b) et le risque de survenance d'une sécheresse.

Enfin, notons que les corrélations sont particulièrement négatives pour la moyenne et le minimum des SSWI mensuels. Cette corrélation est cohérente car un SSWI négatif témoigne d'un déficit en eau dans les sols. Les études descriptives réalisées dans le chapitre 3 soulignaient déjà l'utilité de ces deux variables pour la modélisation des sécheresses.

### 4.3.2 Résultats et comparaison des modèles

Comme pour les inondations, l'objectif est de construire un modèle de prédiction des Cat Nat sécheresse unique pour l'ensemble des communes de métropole. L'idée est de s'inspirer des modèles habituellement réalisés en assurance non-vie, notamment en tarification auto, pour modéliser la fréquence des sinistres.

Néanmoins, afin de prendre en compte la spécificité de chaque commune, il semble important d'inclure, en plus de variables climatiques et météorologiques, des variables spécifiques à la commune et à son exposition aux sécheresses.

Deux types de modèles ont été considéré dans cette étude : les GLM et les *Random Forest*.

Afin d'évaluer les performances de généralisation des modèles, la base de modélisation est découpée en une base d'apprentissage et une base de test. La base d'apprentissage comporte les années 1991 à 2015 et la base de test celles de 2016 à 2020.

Comme souligné dans le chapitre précédent, une modification réglementaire a été opérée à la fin des années 90. Cette modification a entraîné un durcissement des exigences nécessaires à la reconnaissance de l'état de catastrophe naturelle au titre de la sécheresse. Ainsi, une indicatrice a été créée pour tenir compte de ce changement de réglementation.

#### Résultats des GLM Poisson

Les premiers résultats présentés ici sont ceux obtenus avec un GLM Poisson. Le lien considéré ici est le lien canonique *log*.

Après une sélection de variables pertinentes grâce à l'étude des corrélations, plusieurs essais de modèles ont été réalisés. Le modèle retenu est celui minimisant les critères d'évaluation présentés en début de chapitre. Le tableau suivant détaille les coefficients de régression et leurs statistiques pour les variables retenues dans le modèle. La description et les méthodes de calcul des variables retenues ici sont rappelées dans le tableau 4.4.

	Estimate	Std. Error	z value	Pr(> z )	
(Intercept)	-9.2186919	0.1126839	-81.81	< 2e-16	***
tr	-0.0210955	0.0009111	-23.154	< 2e-16	***
txav	0.2028221	0.0079167	25.62	< 2e-16	***
txhwd	-0.0116812	0.0007263	-16.084	< 2e-16	***
txq10	0.1984235	0.0053471	37.109	< 2e-16	***
pav	-0.4835785	0.0368202	-13.134	< 2e-16	***
pint	-0.3191994	0.0074254	-42.987	< 2e-16	***
pq90	0.098943	0.0094611	10.458	< 2e-16	***
part_alea_moyen_fort	0.0501437	0.0007395	67.804	< 2e-16	***
sswi_min :part_alea_moyen_fort	0.0047128	0.000398	11.842	< 2e-16	***
old_regulation = TRUE	3.6475436	0.036762	99.221	< 2e-16	***
sswi_min :old_regulation = TRUE	1.5536784	0.0253891	61.195	< 2e-16	***
sswi_min	-1.4015452	0.0447266	-31.336	< 2e-16	***
sswi_moy	-1.4480161	0.0417745	-34.663	< 2e-16	***
sswi_min :sswi_moy	-0.0718306	0.0155246	-4.627	3.71e-6	***
sswi_max	0.514239	0.0178279	28.845	< 2e-16	***

TABLE 4.3 – Coefficients du meilleur GLM pour la sécheresse

Notons tout d'abord que tous les coefficients sont très significatifs. Regardons maintenant de plus près la valeur de certains coefficients de régression :



Description	Nom de la variable	Méthode de calcul
Nombre de nuits tropicales	TR	où Tmin > 20 °C
Température maximale	TXAV	moyenne Tmax
Nombre de jours de vague de chaleur	TXHWD	Tmax > 5 °C de la normale dans une séquence > 5 jours consécutifs en été
Extrême froid de la température maximale quotidienne	TXQ10	10e centile des Tmax quotidien
Précipitations quotidiennes moyennes	PAV	moyenne Pr
Précipitations moyennes des jours pluvieux	PINT	où Pr >= 1 mm
Précipitations quotidiennes intenses	PQ90	90e centile des précipitations annuelles
Part de la commune exposée moyennement ou fortement au RGA	part_alea_moyen_fort	Surface exposée moyennement ou fortement au RGA/Surface totale
Indicatrice ancienne régulation	old_regulation	annee < 1999
Minimum des SSWI mensuels	sswi_min	Min(SSWI)
Maximum des SSWI mensuels	sswi_max	Max(SSWI)
Moyenne des SSWI mensuels	sswi_moy	Moy(SSWI)

TABLE 4.4 – Description des variables utilisées dans le GLM pour les sécheresses

Métrique	Valeur
RMSE train	0.1933
RMSE test	0.2616
AIC	209611
BIC	209810

TABLE 4.5 – Métriques d'évaluation pour le GLM pour les sécheresses

Comme attendu, l'indicatrice sur le changement de réglementation a un coefficient très significatif et positif : pour les observations se déroulant lors de l'ancienne régulation, le nombre de reconnaissances de sécheresse est plus important.

Le coefficient associé au minimum annuel de l'indicateur d'humidité des sols (sswi\_min) est négatif. Ce résultat est tout à fait en adéquation avec ce qui est attendu. En effet, plus cet indicateur est négatif, plus cela témoigne d'une sécheresse des sols.

La part de la surface de la commune exposée moyennement ou fortement au risque de retrait-gonflement des argiles est elle aussi significative. Son coefficient positif correspond au sens qui était attendu : plus la commune est exposée au risque, plus le nombre de reconnaissances de sécheresse est grand.

Les autres indicateurs retenus sont des variables de pluviométrie (pluviométrie moyenne, pluviométrie moyenne les jours de pluie, précipitations quotidiennes intenses) et des variables informatives des températures anormalement élevées (nombre de nuits tropicales, température maximale, nombre de jours de vague de chaleur...). Ces variables semblent pertinentes pour la modélisation des sécheresses. Certains coefficients vont dans le sens attendu, notamment ceux associés aux variables pluviométriques qui sont négatifs ou encore celui associé à la variable de température maximale. D'autres, sans qu'une explication simple ne puisse être donnée, sont du signe opposé à celui attendu. C'est notamment le cas pour la variable correspondant au nombre de jours de vague de chaleur.

Intéressons-nous maintenant à la qualité de prédiction du modèle. L'objectif de ce mémoire étant de tenter de projeter une fréquence de catastrophes naturelles à un horizon de moyen terme, il est important que le modèle retenu soit capable de modéliser cette fréquence sur l'historique à notre disposition. Le premier indicateur permettant d'évaluer cela est la RMSE. Cette valeur pourra notamment être comparée à celle obtenue avec le modèle *Random Forest* décrit par la suite.

Puisqu'il est difficile d'évaluer les qualités prédictives du modèle pour chaque point de données (toutes les années d'entraînement pour l'ensemble des 35228 communes de métropole), nous adoptons ici une vision agrégée par année. Ainsi, la somme des arrêtés réellement pris sur une année est comparée à la somme des fréquences prédites pour chaque commune sur cette

même année. Les résultats sont donnés par les deux graphiques suivants. Le graphique 4.11a se concentre sur la base d'apprentissage et le second graphique 4.11b se concentre sur les données de test.

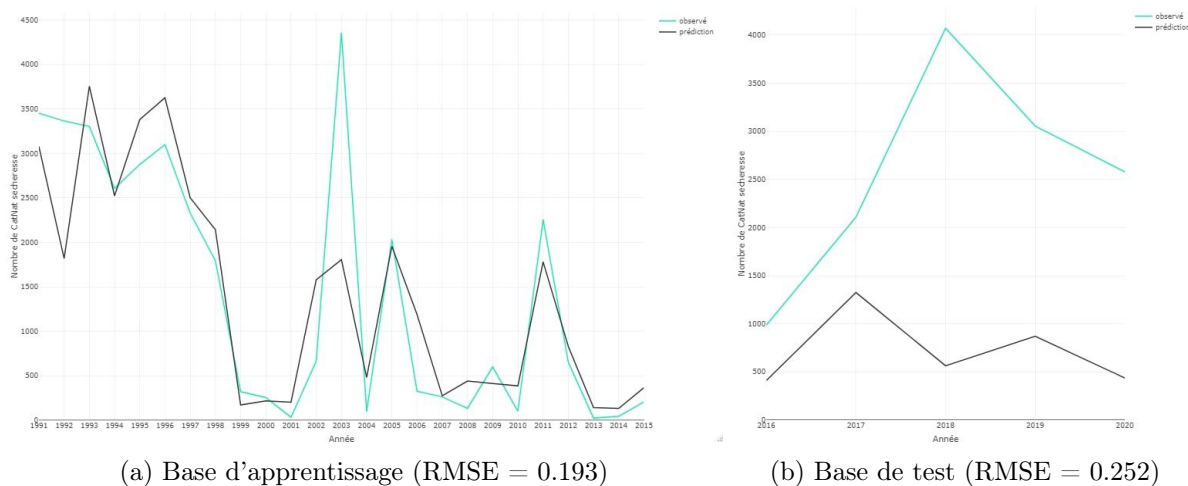


FIGURE 4.11 – Comparaison entre observations et prédictions pour le GLM Poisson pour la sécheresse

Au global, le modèle semble être capable de capter les pics de reconnaissances comme ceux de 2005 et 2011. Malheureusement, des pics plus prononcés, comme en 2003, semblent sous-estimés par le modèle. Le changement de régulation opéré à la fin des années 90 paraît bien pris en compte.

### Résultats obtenus avec les Random Forest

Dans un deuxième temps, un modèle de type Random Forest a été mis en place pour tenter de modéliser les arrêts de Cat Nat sécheresse.

Une optimisation des paramètres a été réalisée afin d'obtenir le meilleur modèle de prédiction compte tenue des variables à disposition. Le graphique suivant représente l'importance de chaque variable dans les prédictions du modèle.

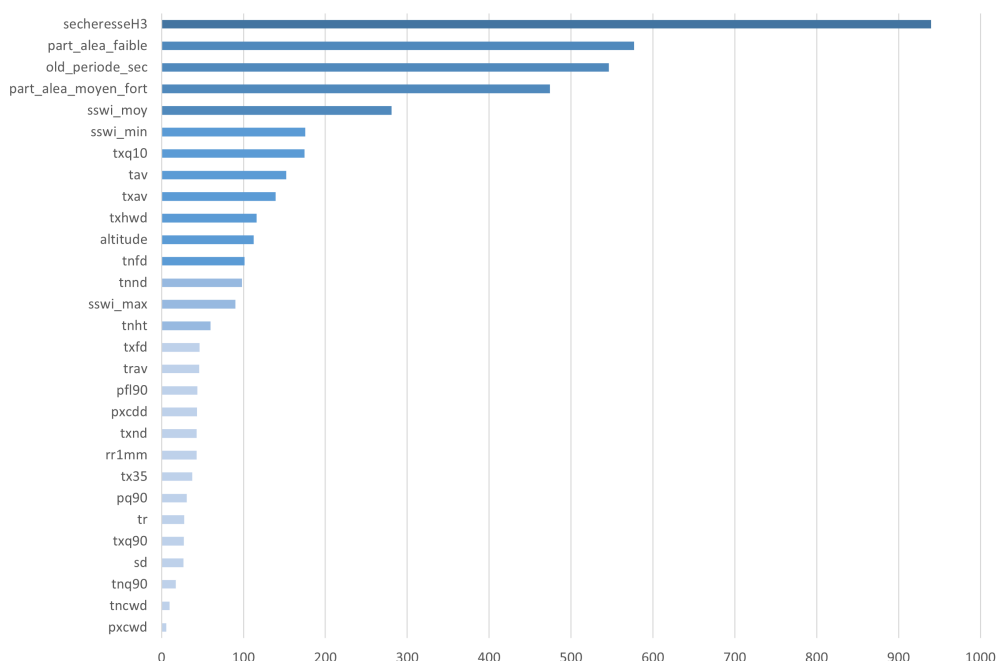


FIGURE 4.12 – Importance des variables retenues par le Random Forest dans la prédiction de Cat Nat sécheresse

La variable d'historique de sécheresse sur la commune sur les trois années précédentes (secheresseH3) est la variable la plus importante dans la prédiction des arrêtées de Cat Nat. Cette variable n'avait pourtant pas été retenue dans les modèles GLM Poisson car elle avait tendance à détériorer la qualité prédictive des modèles.

Les autres variables particulièrement importantes sont similaires à celles observées dans le modèle GLM. En effet, les variables suivantes sont les indicateurs d'humidité des sols (sawi\_min, sawi\_max, sawi\_moy) ainsi que les variables liées à l'exposition de la commune au RGA. L'exposition de la commune au RGA (part aléa faible et moyen fort) apparaît en deuxième et quatrième position ce qui souligne une fois encore l'importance de l'exposition de la commune. L'importance relative de ces variables par rapport aux autres variables climatiques semble assez logique : la présence d'argile et le SSWI sont deux informations aujourd'hui utilisées dans la prise de décision de déclaration de l'état de catastrophe naturelle sécheresse.

Les graphiques suivants tentent d'évaluer les qualités prédictives de manière globale en adoptant une vision agrégée annuellement. Ainsi la ligne verte représente par année le nombre de reconnaissance de Cat Nat sécheresse en métropole et la ligne noire correspond à la somme par année des fréquences prédites pour chaque commune.

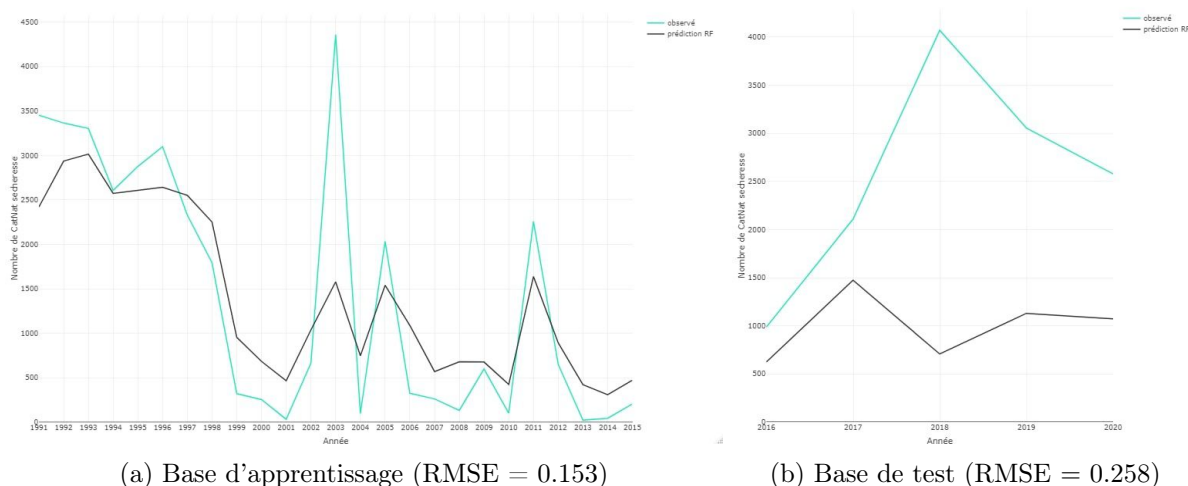


FIGURE 4.13 – Comparaison entre observations et prédictions pour la *Random Forest* pour la sécheresse

Comme pour le modèle GLM, la *Random Forest* semble bien capter le changement de réglementation qui s'est opéré à la fin des années 90. Les pics de 2005 et 2013 semble plutôt bien prédits au global.

Ce modèle est meilleur que le GLM sur les données d'apprentissage comme le souligne la nette baisse de la RMSE de *train*. La RMSE de test n'a néanmoins que peu baissé par rapport au modèle GLM.

Tentons maintenant d'analyser plus en détail les qualités de prédiction du modèle en adoptant cette fois-ci une vision géographique. Pour ce faire, les fréquences prédites sur l'ensemble de la période considérée (1991-2015 pour les données d'entraînement, 2016-2020 pour les données de test) sont agrégées par région et comparées au nombre réel de catastrophes naturelles déclarées sur la même période. L'écart relatif entre ces deux mesures est ensuite représenté sur les cartes 4.14.

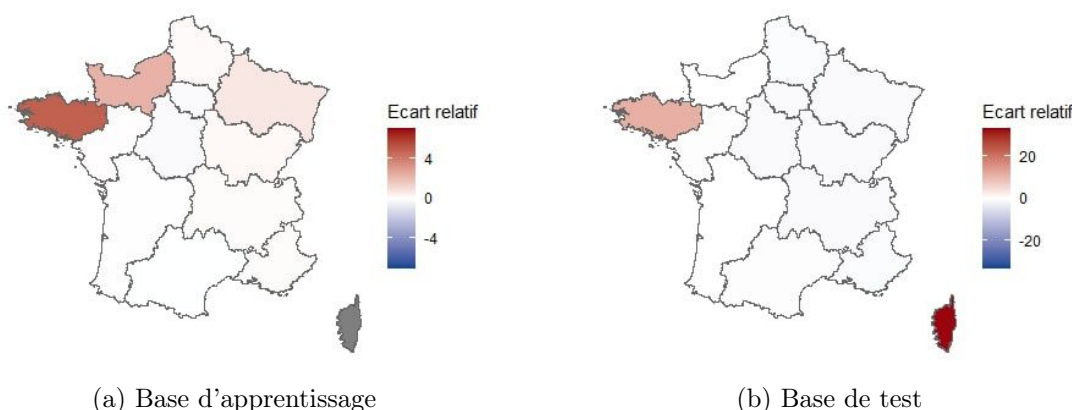


FIGURE 4.14 – Comparaison entre observations et prédictions par région

Une teinte rouge indique une surévaluation de la fréquence des sécheresses par rapport aux observations. A l'inverse, une teinte bleue indique que le modèle prédit une fréquence plus

faible que celle réellement observée.

Pour certaines régions comme la Bretagne et la Normandie, le modèle a tendance à sur évaluer la fréquence des épisodes de sécheresse. Pour les autres régions, en ce qui concerne les résultats sur les données d'apprentissage, le modèle estime avec plus ou moins de justesse la fréquence des Cat Nat sécheresse.

La Corse ressort particulièrement sur les deux cartes. En effet, sur la période d'apprentissage, aucune commune corse n'a fait l'objet d'un arrêté de Cat Nat et sur la période de test seule une reconnaissance a été enregistrée.

### 4.3.3 Évolution des variables climatiques à horizon 2050

Nous représentons ici l'évolution pour l'horizon 2050 de l'indicateur d'humidité des sols pour deux scénarios du GIEC (scénario pessimiste A2 et optimiste B1). Cet indicateur est un élément essentiel dans la décision de reconnaissance de l'état de catastrophe naturelle pour la sécheresse comme le rappelle le rapport de la cour des comptes publié en 2022 concernant les sécheresses [18].

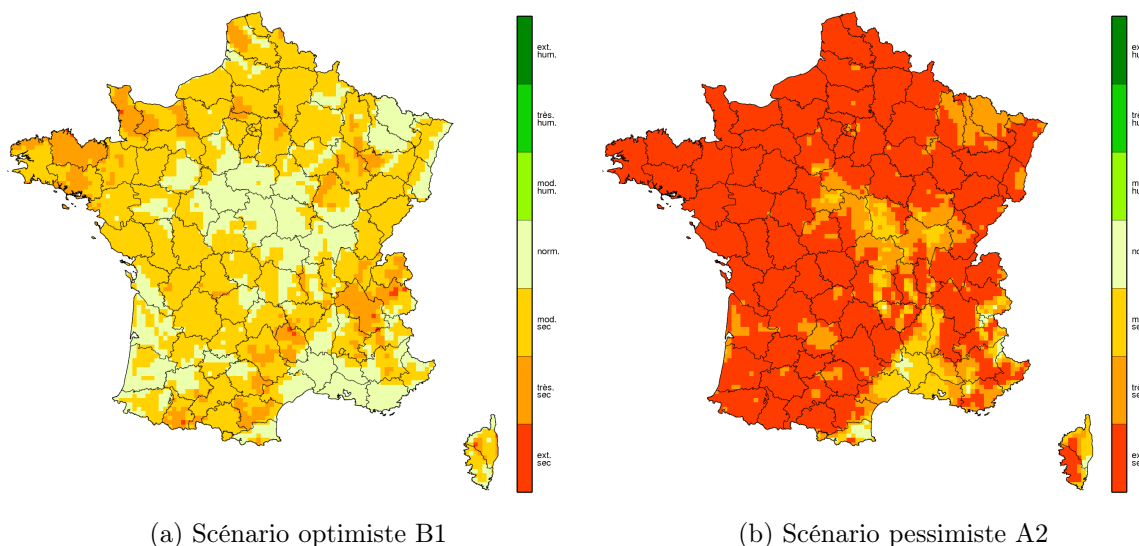


FIGURE 4.15 – Évolution du SSWI à horizon 2050 par rapport au climat actuel

Pour les deux scénarios, les modèles prévoient une augmentation de la sécheresse des sols à horizon 2050. L'augmentation de la sécheresse est néanmoins nettement plus marquée pour le scénario le plus pessimiste. La quasi-totalité du territoire subira les conséquences du réchauffement climatique.

### 4.3.4 Projection de la fréquence à horizon 2050 avec les 3 scénarios du GIEC

A partir de la *Random Forest* qui est le modèle pour les sécheresses avec la meilleure RMSE de test, une projection à horizon 2050 est réalisée.

Comme pour les inondations, les données climatiques sont projetées suivant trois scénarios du GIEC. Les variables d'exposition au RGA sont supposées constantes sur la période 2020 - 2050

puisque la composition des sols ne devrait pas changer durant les décennies à venir.

Concernant la variable d'historique des arrêtés sur les trois années précédentes, il faudrait la projeter pas à pas, d'année en année, à partir des prédictions obtenues. Cette projection en cascade n'a pas été réalisée ici, et la valeur pour 2020 (qui prend donc en compte les observations de 2017, 2018 et 2019) a été conservée pour obtenir les prédictions à horizon 2050.

Les cartes suivantes représentent pour chaque scénario considéré, une projection à horizon 2050 de la fréquence de reconnaissance de l'état de sécheresse par commune en métropole ainsi que le delta de fréquence par rapport à la période actuelle.

Le delta de fréquence est calculée de la manière suivante :

$$\text{delta fréquence} = \text{fréquence à horizon 2050} - \text{fréquence historique}$$

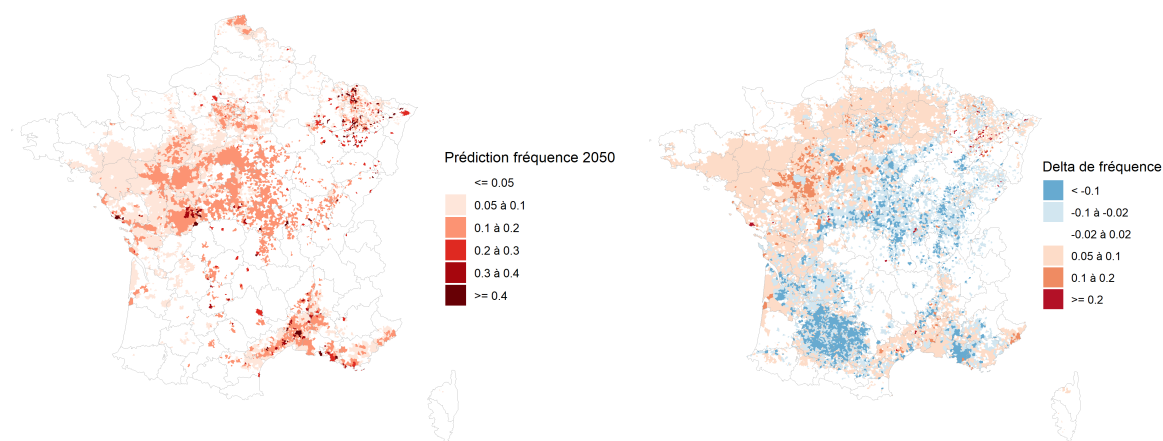


FIGURE 4.16 – Projections à horizon 2050 par commune de l'aléa sécheresse - Scénario optimiste RCP2.6

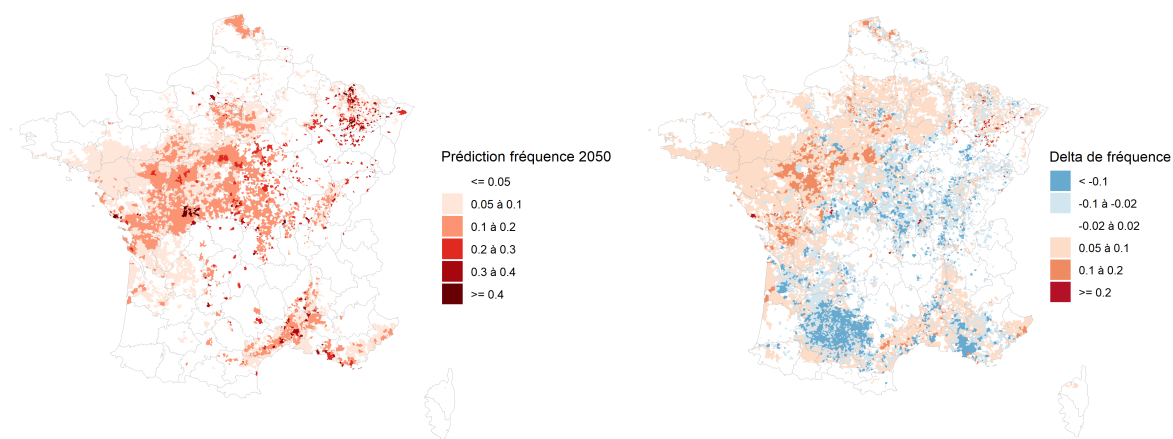


FIGURE 4.17 – Projections à horizon 2050 par commune de l'aléa sécheresse - Scénario intermédiaire RCP4.5

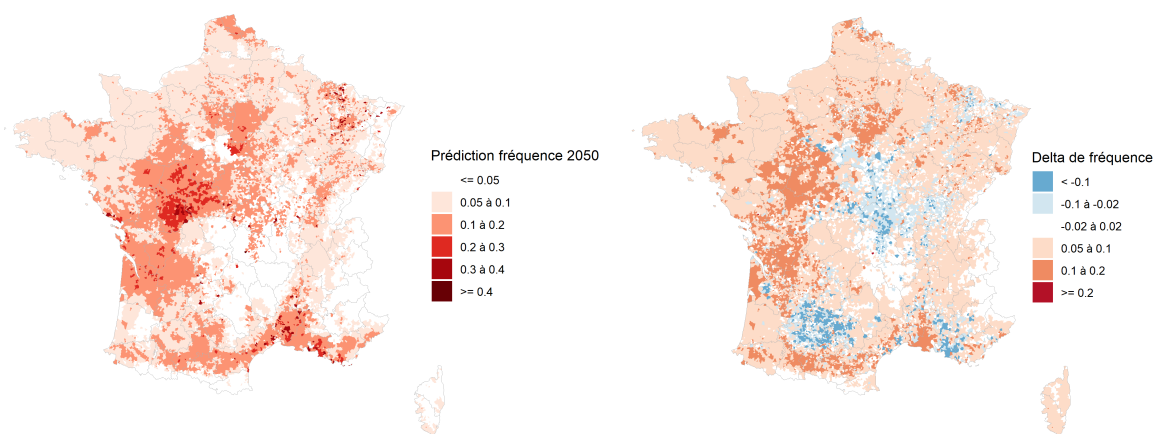


FIGURE 4.18 – Projections à horizon 2050 par commune de l'aléa sécheresse - Scénario pessimiste RCP8.5

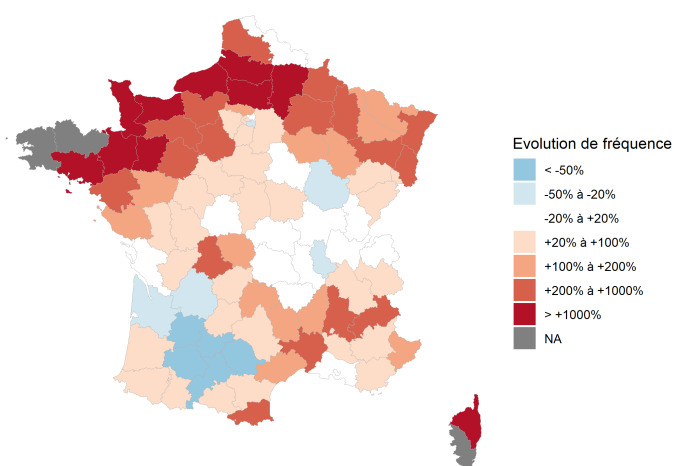
Il ressort de ces cartes que les zones les plus sinistrées dans le futur sont celles déjà exposées aujourd'hui comme le croissant argileux, la région parisienne et le département du Nord. Le scénario RCP8.5 fait ressortir une certaine augmentation de la fréquence sur des territoires aujourd'hui peu exposés comme la Bretagne et la Normandie. Ainsi dans un monde où les températures augmenteraient de près de 5°C en 2100, l'ensemble du territoire pourrait être vulnérable aux sécheresses. Il faut néanmoins garder à l'esprit les conclusions dressées dans la partie précédente concernant la surévaluation prédite par le modèle sur ces régions.

Pour les graphiques en delta de fréquence, une teinte orangée témoigne d'une augmentation de la fréquence et une teinte bleutée d'une diminution. Dans le scénario le plus pessimiste, la quasi-totalité des communes subirait une augmentation de la fréquence des sécheresses, y compris des régions aujourd'hui épargnées.

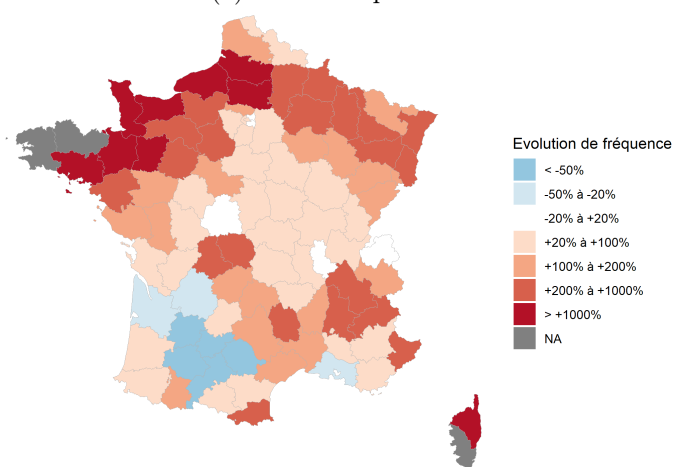
A partir de la fréquence observée aujourd'hui, il est possible de représenter l'évolution de la fréquence pour l'horizon 2050. Cette évolution n'est cependant calculable que pour les communes ayant déjà fait l'objet d'un arrêté de Cat Nat dans l'historique. Or, comme précisée en début de partie 3.6, seuls 35% des communes ont un historique de reconnaissance de l'état de catastrophe naturelle au titre de la sécheresse.

Afin de comparer les résultats obtenus à ceux disponibles dans la littérature et présentés dans la partie 1.4.2, l'évolution de la fréquence à horizon 2050 est calculée par département. Pour certains départements, les Côtes d'Armor, le Finistère et la Corse du Sud, il n'est pas possible de calculer une évolution de fréquence car aucune commune de ces départements n'a fait l'objet d'une reconnaissance de Cat Nat sécheresse depuis la mise en place du régime.

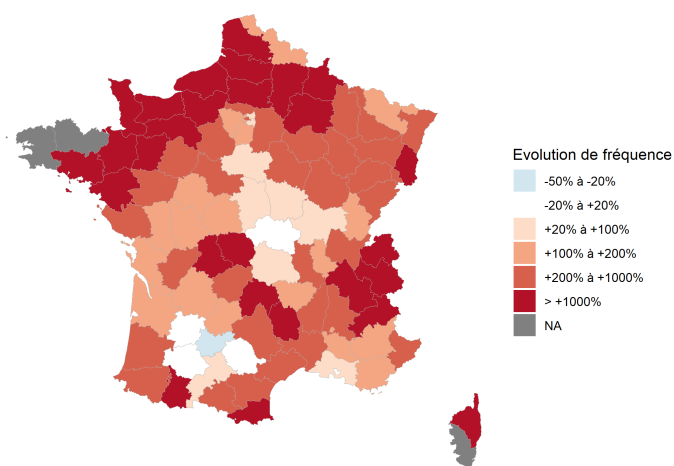
Les trois cartes suivantes permettent d'apprécier l'évolution de fréquence des Cat Nat sécheresse à horizon 2050 par département selon les différents scénarios du GIEC.



(a) Scénario optimiste



(b) Scénario intermédiaire



(c) Scénario pessimiste

FIGURE 4.19 – Évolution de la fréquence des Cat Nat sécheresse à horizon 2050

D'après les cartes ci-dessus, l'augmentation des fréquences concerne la majeure partie des départements métropolitains. Certaines zones sont cependant plus marquées comme les côtes bre-



tonnes, normandes et du Nord. Les résultats obtenus ici apparaissent comme plus pessimistes que ceux disponibles dans la littérature, notamment pour ces zones. A l'inverse, le bassin rhodanien, souvent mentionné comme susceptible de subir de fortes augmentations de fréquence dans le futur, ne semble pas se détacher des autres régions de métropole.

#### 4.3.5 Limites et pistes d'amélioration

Une limite principale à ces modèles est la non prise en compte de la proximité entre deux communes. Or deux communes voisines ont de forte chance de subir un contexte météorologique et climatique similaire.

Rappelons que la littérature souligne l'importance de l'évolution démographique et de la répartition des richesses sur le territoire dans l'augmentation des dommages. Néanmoins, ces évolutions ne sont pas modélisées ni prises en compte dans le cadre de ce mémoire. Seule l'évolution du climat est utilisée afin d'étudier l'impact du réchauffement climatique sur la fréquence des catastrophes naturelles.

Par ailleurs, une piste d'amélioration pourrait être envisagée concernant l'exposition des communes au retrait-gonflement des argiles. En effet, l'exposition de la commune au RGA est particulièrement importante dans les prédictions. De plus, les maisons étant les plus exposées au risque de RGA et la demande de reconnaissance de l'état de catastrophe naturelle étant faites par les maires en cas de dommages constatés, il serait intéressant d'inclure une variable représentative du nombre de maisons exposées au retrait-gonflement des argiles dans les modèles.

**La réglementation et les critères de reconnaissance de l'état de sécheresse ont subi des modifications depuis l'intégration de ce péril dans le régime Cat Nat en 1988. Ces modifications rendent compliqué la prédiction des arrêtés de Cat Nat sécheresse.**

**A partir des informations disponibles en *Open Data*, les modèles construits ont permis d'établir des prédictions de la fréquence des sécheresse pour un horizon 2050 à la maille communale. Dans un scénario pessimiste, la quasi-totalité du territoire subirait une hausse de fréquence des sécheresses par rapport à la période actuelle. Certains départements pourraient être épargnés si des actions rapides sont prises afin de réduire l'augmentation des températures.**



# Conclusion

Le changement climatique et ses conséquences sont déjà perceptibles. L'évolution de la concentration de gaz à effet de serre depuis la période pré-industrielle semble conduire à une augmentation des températures qui pourrait atteindre  $+5^{\circ}\text{C}$  en 2100 selon le GIEC. Le GIEC souligne également que le changement climatique aura probablement des conséquences sur la fréquence et la sévérité des catastrophes naturelles dans le futur.

Les effets du changement climatique sur l'économie et les assurances en particulier est le sujet de plusieurs rapports et études conduites dans les dernières années. En 2020-2021, l'ACPR conduisait son premier exercice de stress test climatique afin de sensibiliser les banques et les assurances et d'estimer les effets du risque climatique. Cet exercice conclut à une hausse de la sinistralité liée aux risques physiques. Cette augmentation est en partie due à l'augmentation de la fréquence et de la sévérité des catastrophes naturelles dans un horizon de moyen terme.

Les inondations et les sécheresses sont les périls auxquels la France métropolitaine et la plus vulnérable. C'est pour cette raison que ce mémoire se concentre sur une projection de ces deux périls en particulier. Seule l'étude de la projection de l'aléa est étudiée dans ce mémoire. L'évolution des enjeux induite notamment par une évolution démographique sur le territoire Français n'a pas été prise en compte ici. Les études conduites par la CCR, France Assureurs ou Covéa font néanmoins état d'un rôle important de l'évolution de l'enjeu dans l'accroissement des dommages à horizon 2050.

A partir de données disponibles en *Open Data*, des modèles de prédiction des arrêtés de Cat Nat ont été réalisés. Les modèles obtenus ont ensuite permis de réaliser une projection pour chaque commune de la fréquence de reconnaissance de l'état de catastrophe naturelle pour différents scénarios proposés par le GIEC.

La qualité prédictive des modèles pour les inondations n'est pas satisfaisante et ne permet pas d'évaluer avec certitude une évolution de la fréquence des inondations pour un horizon 2050.

Pour les sécheresses, les modèles sont d'une qualité suffisante et permettent une étude plus approfondie de l'évolution de la fréquence sous un climat futur. Quel que soit le scénario considéré, la fréquence des sécheresses devrait accroître pour une majorité des communes métropolitaines d'ici 2050. Cette hausse est d'autant plus marquée que le scénario considéré est pessimiste. Les résultats obtenus avec le scénario RCP8.5 pour la sécheresse semblent plus pessimistes que ceux disponibles dans la littérature.



# Bibliographie

- [1] ACPR. « Les assureurs français face au risque de changement climatique ». In : *Analyses et synthèses* 102 (2019).
- [2] ACPR. *Scénarios et hypothèses principales de l'exercice pilote climatique*. Juill. 2020.
- [3] ACPR. « Une première évaluation des risques financiers dus au changement climatique - Les principaux résultats de l'exercice pilote climatique 2020 ». In : *Analyses et synthèses* 122 (mai 2021).
- [4] N ARNELL et al. *A framework for a new generation of socioeconomic scenarios for climate change impact, adaptation, vulnerability and mitigation research. Working Paper*. Rapp. tech. Mai 2014.
- [5] Stefano BATTISTON et al. « A climate stress-test of the financial system ». In : *Nature Climate Change* 7.4 (2017), p. 283-288.
- [6] Patrick BIDAN et Thierry COHIGNACK. « Le régime des catastrophes naturelles Français : Historique du régime ». In : *Variances* (nov. 2017). URL : <https://variances.eu/?p=2705>.
- [7] BOE. *Results of the 2021 Climate Biennial Exploratory Scenario (CBES)*. Mai 2022.
- [8] C BOYEAU. « Évaluation de l'impact du changement climatique sur le risque inondation en France métropolitaine ».
- [9] F BREHIN. « Risque de crue de la Seine sur le bassin parisien ».
- [10] Mark CARNEY. *Breaking the tragedy of the horizon - climate change and financial stability*. Sept. 2015.
- [11] Fanny CARTELLIER. « Climate Stress Testing, an Answer to the Challenge of Assessing Climate- Related Risks to the Financial System? » In : *SSRN Electronic Journal* (jan. 2022). DOI : [10.2139/ssrn.4179311](https://doi.org/10.2139/ssrn.4179311).
- [12] CCR. *L'indemnisation des catastrophes naturelles - Principe et fonctionnement*. Mars 2015.
- [13] CCR. *Modélisation de l'impact du changement climatique sur les dommages assurés dans le cadre du régime Catastrophes Naturelles*. Déc. 2015.
- [14] CCR. *Conséquences du changement climatique sur le coût des catastrophes naturelles en France à horizon 2050*. Sept. 2018.
- [15] CCR. *Les catastrophes naturelles en France - Bilan 1982-2018*. Juin 2019.
- [16] CGDD. *Retrait-gonflement des argiles : plus de 4 millions de maisons potentiellement très exposées*. Oct. 2017.
- [17] CGDD. *Cartographie de l'exposition des maisons individuelles au retrait-gonflement des argiles*. Juin 2021.

- [18] COURS DES COMPTES. *SOLS ARGILEUX ET CATASTROPHES NATURELLES : Des dommages en forte progression, un régime de prévention et d'indemnisation inadapté*. Fév. 2022.
- [19] COVÉA. *Changement climatique & Assurance : Quelles conséquences sur la sinistralité à horizon 2050 ?* Jan. 2022.
- [20] DGPR. *La politique nationale de gestion des risques inondation : ce qui change aujourd'hui*. Nov. 2011.
- [21] DGPR. *Stratégie nationale de gestion des risques d'inondation*. Oct. 2014.
- [22] DIRECTION RÉGIONALE DE L'ENVIRONNEMENT, DE L'AMÉNAGEMENT ET DU LOGEMENT (DREAL) DE NORMANDIE. *Le PPRN : un outil pour une stratégie globale de prévention des risques naturels*. Mars 2022.
- [23] DRIAS. *Les nouvelles projections climatiques de référence DRIAS 2020 pour la métropole*. 2020.
- [24] FÉDÉRATION FRANÇAISE DE L'ASSURANCE. *Impact du changement climatique sur l'assurance à l'horizon 2040*. 2015.
- [25] FRANCE ASSUREURS. *Impact du changement climatique sur l'assurance à l'horizon 2040*. Oct. 2021.
- [26] FRANCE ASSUREURS. *Les placements de l'assurance en 2020*. Nov. 2021.
- [27] FRANCE ASSUREURS. *Cartographie prospective 2022 de l'assurance*. 2022.
- [28] S GALLET et al. « Une part croissante d'OPC dans les placements financiers des assureurs établis en France en 2017 ». In : *Bulletin de la Banque de France* (nov. 2021).
- [29] IPCC. *Special Report on Emissions Scenarios*. 2000.
- [30] IPCC. *Changements climatiques 2014 : Rapport de synthèse. Contribution des Groupes de travail I, II et III au cinquième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat [Sous la direction de l'équipe de rédaction principale, R.K. Pachauri et L.A. Meyer]*. 2014.
- [31] IPCC. « Summary for Policymakers ». In : *Climate Change 2021 : The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]* (2021).
- [32] Violaine LEPOUSEZ et Maxime ABOUKRAT. *Les scénarios SSP*. URL : <https://www.carbone4.com/publication-scenarios-ssp-adaptation>. (accessed : 25/10/2022).
- [33] Thomas B. MCKEE, Nolan J. DOESKEN et John R. KLEIST. « The relationship of drought frequency and duration to time scales ». In : 1993.
- [34] MÉTÉO-FRANCE. « Projections climatiques : passer du global au local ». In : (2020).
- [35] MÉTÉO-FRANCE, CERFACS et IPSL. *Portail DRIAS les futures du climat*. URL : <http://www.drias-climat.fr/>. (accessed : 03/11/2022).
- [36] MINISTÈRE DE L'ÉCOLOGIE, DU DÉVELOPPEMENT DURABLE ET DE L'ÉNERGIE. *Pre-mière évaluation nationale des risques d'inondation. Principaux résultats - EPRI 2011*. Juill. 2012.
- [37] MINISTÈRE DE LA TRANSITION ÉCOLOGIQUE. *Georisques*. URL : <https://www.georisques.gouv.fr/>. (accessed : 08/07/2022).

- [38] MINISTÈRE DE LA TRANSITION ÉCOLOGIQUE. *Les risques naturels sur le territoire français : chiffres clés*. URL : <https://www.georisques.gouv.fr/minformer-sur-la-prevention-des-risques/les-risques-naturels-en-france-chiffres-cles>. (accessed : 18/10/2022).
- [39] MINISTÈRE DE LA TRANSITION ÉCOLOGIQUE ET DE LA COHÉSION DES TERRITOIRES et MINISTÈRE DE LA TRANSITION ÉNERGÉTIQUE. *Prévention des inondations*. Juill. 2022.
- [40] MISSION RISQUES NATURELS. *Référentiel de résilience du bâti aux aléas naturels*. Juill. 2022.
- [41] Sylvain MONDON et Maurice IMBARD. *Découvrir les nouveaux scénarios RCP et SSP utilisés par le GIEC*. DGEC, SCEE et Onerc, sept. 2013.
- [42] De Nederlandsche Bank N.V. *An energy transition risk stress test for the financial system of the Netherlands*. 2018.
- [43] J OCHOA MAGANA. « Analyse de la reconnaissance de l'état de catastrophe naturelle à l'aide de la Data Science et de l'Open Data ».
- [44] OMS. *Quantitative Risk Assessment of the Effects of Climate Change on Selected Causes of Death, 2030s and 2050s*. 2014.
- [45] A POTHON. « Le risque d'inondation en France métropolitaine ». 2013.
- [46] PRUDENTIAL REGULATION AUTHORITY. *The impact of climate change on the UK insurance sector*. Sept. 2015.
- [47] PRUDENTIAL REGULATION AUTHORITY. *Transition in thinking : The impact of climate change on the UK banking sector*. Sept. 2018.
- [48] SEABIRD. *Risque climatique : Comment modéliser la sinistralité à horizon 2050 ?* Mai 2021.
- [49] SEABIRD. « Changement climatique : à quel point les assureurs vont-ils devoir réviser leurs modèles ? » In : déc. 2021.
- [50] J.-M. SOUBEYROUX et al. *Projet ClimSec - Impact du changement climatique en France sur la sécheresse et l'eau du sol*. Direction de la Climatologie de Météo-France, mai 2011.
- [51] D VERFAILLIE et al. « The method Adamont v1.0 for statistical adjustment of climate projections applicable to energy balance land surface models ». In : *Geosci. Model Dev.* (2017). DOI : <https://doi.org/10.5194/gmd-10-4257-2017>.
- [52] J.-P. VIDAL et al. « Multilevel and multiscale drought reanalysis over France with the Safran-Isba-Modcou hydrometeorological suite ». In : *Hydrology and Earth System Sciences* 14.3 (2010), p. 459-478. DOI : [10.5194/hess-14-459-2010](https://doi.org/10.5194/hess-14-459-2010).
- [53] Z ZHAO. « Impact du changement climatique sur le risque de grêle pour un portefeuille d'assurance français à horizon 2050 ». 2021.





# Glossaire

**ACPR** Autorité de contrôle prudentiel et de résolution.

**AZI** Atlas des Zones Inondables.

**BRGM** Bureau de Recherches Géologiques et Minières.

**CCR** Caisse Centrale de Réassurance.

**CGDD** Commissariat général au développement durable.

**DGEC** Direction Générale de l’Energie et du Climat.

**DGPR** Direction Générale de la Prévention des Risques.

**DRIAS** Donner accès aux scénarios climatiques Régionalisés français pour l’Impact et l’Adaptation de nos Sociétés et environnement.

**EIOPA** Autorité européenne des assurances et des pensions professionnelles.

**FFA** Fédération française de l’assurance, aujourd’hui France Assureurs.

**GASPAR** Gestion ASsistée des Procédures Administratives relatives aux Risques naturels et technologiques.

**GCM** Global Climate Model.

**GES** Gaz à effet de serre.

**GIEC** Groupe d’Experts Intergouvernemental sur l’Évolution du Climat.

**IFSTTAR** Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l’Aménagement et des Réseaux.

**MRN** Mission Risques Naturels.

**ONERC** Observatoire national sur les effets du réchauffement climatique.

**PAPI** programme d’action pour la prévention des inondations.

**PER** Plan d’exposition aux risques.

**PPRi** Plan de prévention des risques inondation.

**PPRN** Plan de Prévention des Risques Naturels.

**PRA** Prudential Regulation Authority.

**RCM** Regional Climate Model.

**RCP** Representative Concentration Pathway.

**RG** Retrait-Gonflement des Agiles.

**SCEE** Service climat et efficacité énergétique.

**SDES** Service des données et études statistiques.

**SIM** Safran-Isba-Modcou.

**SLGRI** Stratégie Locale de Gestion du Risque d’Inondation.

**SNGRI** Stratégie Nationale de Gestion des Risques d’Inondation.

**SRES** Special Report on Emissions Scenarios.

**SSP** Shared Socioeconomic Pathways.

**TRI** Territoire à Risque d’Inondation.

# Table des figures

1	Nombre de reconnaissances par commune pour les deux périls considérés depuis leur intégration au régime . . . . .	iv
2	Schéma récapitulatif de la construction des bases de modélisation pour les inondations et les sécheresses . . . . .	vi
3	Projections à horizon 2050 par commune de l'aléa inondation . . . . .	vii
4	Projections à horizon 2050 par commune de l'aléa sécheresse . . . . .	viii
5	Delta de fréquence par rapport à la période historique pour les différents scénarios retenus . . . . .	ix
6	Évolution de la fréquence des Cat Nat sécheresse à horizon 2050 . . . . .	ix
7	Number of natural catastrophe per town for the two perils considered since their integration into the Natural Disaster Compensation Scheme . . . . .	xii
8	Summary diagram of the construction of the modelling bases for floods and droughts	xiv
9	Projections for 2050 by municipality of the flood hazard . . . . .	xv
10	Projections to 2050 by commune of the drought hazard . . . . .	xvi
11	Frequency delta compared to the historical period for the different scenarios . .	xvi
12	Evolution of the frequency of Cat Nat droughts by 2050 . . . . .	xvii
1.1	Synthèse de l'évaluation des changements observés . . . . .	6
1.2	Scénarios RCP . . . . .	8
1.3	Comparaison des scénarios SRES et RCP . . . . .	8
1.4	Représentation des cinq scénarios SSP . . . . .	9
1.5	Transmission des risques physiques aux risques financiers classiques . . . . .	12
1.6	Transmission des risques de transition aux risques financiers classiques . . . . .	12
1.7	Répartition des placements des organismes d'assurance selon leur activité par zone d'émission à fin 2017 . . . . .	14
1.8	Répartition des placements des assureurs par secteur à fin 2017 . . . . .	15
1.9	Représentation des scénarios utilisés dans l'exercice pilote de l'ACPR . . . . .	18

1.10	Évolution de la sinistralité tous périls 2019-2050 . . . . .	19
1.11	Évolution de la sinistralité 2019-2050 . . . . .	20
1.12	Évolution des dommages annuels moyens (RCP8.5) . . . . .	25
1.13	Évolution des dommages annuels moyens dus aux inondations à horizon 2050 selon le scénario RCP8.5 . . . . .	27
1.14	Évolution des dommages annuels moyens dus à la sécheresse à horizon 2050 selon le scénario RCP8.5 . . . . .	27
2.1	Primes Cat Nat en millions d'euros . . . . .	34
2.2	Mécanisme d'indemnisation du régime Cat Nat . . . . .	35
2.3	Cartographie des communes concernées par un AZI . . . . .	39
2.4	Population dans l'EAIP cours d'eau par département . . . . .	40
2.5	Territoires à risque important d'inondation . . . . .	41
2.6	Panorama de la politique nationale de gestions des risques inondation . . . . .	42
2.7	Cartographies du phénomènes de retrait-gonflement des argiles . . . . .	47
2.8	Schéma des dispositions constructives visant à réduire les effets du RGA . . . . .	48
2.9	Répartition des arrêtés de catastrophe naturelle par famille de risque . . . . .	51
2.10	Nombre de communes reconnues Cat Nat par exercice . . . . .	52
2.11	Nombre de communes reconnues Cat Nat par exercice par type de péril . . . . .	53
2.12	Nombre de reconnaissances par commune tous périls confondus (1982-2021) . . . . .	54
2.13	Nombre de reconnaissances au titre des inondations par commune (1982-2021) . . . . .	54
2.14	Nombre de reconnaissances au titre de la sécheresse par commune (1982-2021) . . . . .	55
2.15	Répartition de la sinistralité par péril . . . . .	56
2.16	Évolution de la sinistralité Cat Nat non auto (en M€) . . . . .	56
2.17	Coûts cumulés au titre des inondations de 1995 à 2018 . . . . .	57
2.18	Coûts cumulés au titre de la sécheresse de 1995 à 2018 . . . . .	58
2.19	Carte des communes ayant un PPR inondation . . . . .	59
2.20	Carte des communes ayant un PPR sécheresse . . . . .	59
3.1	Les étapes de descente d'échelle depuis la modélisation globale à régionale jusqu'à la correction de biais . . . . .	65
3.2	Synthèses des étapes de sélection des simulations pour le projet DRIAS . . . . .	66
3.3	Écarts pour un horizon long (2070-2100) avec le scénario RCP8.5 par rapport à la période de référence . . . . .	67

3.4	Disponibilité des données du projet CLIMSEC et du régime Cat Nat . . . . .	71
3.5	Part des communes exposée au RGA . . . . .	75
3.7	Influence du paramètre P sur le lissage . . . . .	79
3.8	Schéma récapitulatif de la construction des bases de modélisation pour les inondations et les sécheresses . . . . .	81
3.9	Corrélation de Pearson entre les variables explicatives . . . . .	83
3.10	Évolution des reconnaissances d'inondation et sécheresse en France métropolitaine	84
3.11	Cartes des indicateurs climatiques liés à la chaleurs moyennés sur la période 1982-2021 . . . . .	85
3.12	Comparaison du minimum des sswi mensuels pour deux années remarquables .	85
3.13	Comparaison de la moyenne des sswi mensuels pour deux années remarquables	86
3.14	Comparaison du maximum des sswi mensuels pour deux années remarquables .	86
3.15	Cartes des indicateurs climatiques liés à la pluviométrie moyennés sur la période 1982-2021 . . . . .	87
3.15	Cartes des indicateurs climatiques liés à la pluviométrie moyennés sur la période 1982-2021 . . . . .	87
4.1	Corrélation avec la variable réponse pour les inondations . . . . .	93
4.2	Comparaison entre observations et prédictions du GLM pour les inondations . .	95
4.3	Importance des variables retenues par le Random Forest dans la prédiction de Cat Nat inondation . . . . .	96
4.4	Comparaison entre observations et prédictions de la Random Forest pour les inondations . . . . .	96
4.5	Évolution de la part des précipitations quotidiennes intenses à moyen terme (2040-2070) par rapport à la période de référence . . . . .	97
4.6	Évolution du nombre de jours de forte pluie à moyen terme (2040-2070) par rapport à la période de référence . . . . .	97
4.7	Projections à horizon 2050 par commune de l'aléa inondation - Scénario optimiste RCP2.6 . . . . .	98
4.8	Projections à horizon 2050 par commune de l'aléa inondation - Scénario intermédiaire RCP4.5 . . . . .	99
4.9	Projections à horizon 2050 par commune de l'aléa inondation - Scénario pessimiste RCP8.5 . . . . .	99
4.10	Corrélation avec la variable réponse pour les sécheresses . . . . .	101
4.11	Comparaison entre observations et prédictions pour le GLM Poisson pour la sécheresse . . . . .	104

---

4.12	Importance des variables retenues par le Random Forest dans la prédiction de Cat Nat sécheresse . . . . .	105
4.13	Comparaison entre observations et prédictions pour la <i>Random Forest</i> pour la sécheresse . . . . .	106
4.14	Comparaison entre observations et prédictions par région . . . . .	106
4.15	Évolution du SSWI à horizon 2050 par rapport au climat actuel . . . . .	107
4.16	Projections à horizon 2050 par commune de l'aléa sécheresse - Scénario optimiste RCP2.6 . . . . .	108
4.17	Projections à horizon 2050 par commune de l'aléa sécheresse - Scénario intermédiaire RCP4.5 . . . . .	108
4.18	Projections à horizon 2050 par commune de l'aléa sécheresse - Scénario pessimiste RCP8.5 . . . . .	109
4.19	Évolution de la fréquence des Cat Nat sécheresse à horizon 2050 . . . . .	110
A.1	Cartes des 14 districts hydrographiques français . . . . .	127
B.1	Répartition des 8981 points terrestres de la grille SAFRAN . . . . .	130
B.2	Influence du paramètre P pour la commune d'Orsay . . . . .	131
C.1	Comparaison des variables de sswi pour deux années remarquables . . . . .	134

# Liste des tableaux

1.1	Variables retenues par France Assureurs pour réaliser ses projections à horizon 2050 . . . . .	26
1.2	Comparaison des résultats des études existantes pour les inondations et la sécheresse	28
2.1	Franchises applicables . . . . .	35
2.2	Modulation de franchise pour les communes dépourvues de PPRN . . . . .	36
2.3	Définition du degré d'exposition au phénomène RGA . . . . .	47
2.4	Regroupement des événements de catastrophe naturelle . . . . .	51
3.1	Listes des variables disponibles dans la base GASPAR Cat Nat . . . . .	63
3.2	Ensemble des simulations disponibles de l'expérience DRIAS 2020 . . . . .	66
3.3	Définition des indicateurs DRIAS 2020 . . . . .	68
3.4	Correspondance indice SPI et niveau de sécheresse . . . . .	70
3.5	Ensemble des simulations disponibles pour le projet CLIMSEC . . . . .	70
3.6	Variables disponibles dans la base d'exposition au RGA pour la vision communale	74
3.7	Indicateurs SSWI annuels . . . . .	78
3.8	Liste des communes présentant des incohérences dans la base d'exposition au RGA	80
3.9	Exemple de retraitement des données de RGA pour le code INSEE 62697 . . .	80
3.10	Synthèse des caractéristiques de la base de modélisation . . . . .	82
3.11	Corrélations remarquables . . . . .	83
4.1	Famille de loi de probabilité et fonction de lien canonique . . . . .	90
4.2	Coefficients du meilleur GLM pour les inondations . . . . .	94
4.3	Coefficients du meilleur GLM pour la sécheresse . . . . .	102
4.4	Description des variables utilisées dans le GLM pour les sécheresses . . . . .	103
4.5	Métriques d'évaluation pour le GLM pour les sécheresses . . . . .	103

---

B.1	Corrections pour les neufs communes présentant des anomalies dans la base d'exposition au RGA . . . . .	129
B.2	Influence du paramètre P pour la commune d'Orsay . . . . .	130



# Annexe A

## Districts hydrographiques

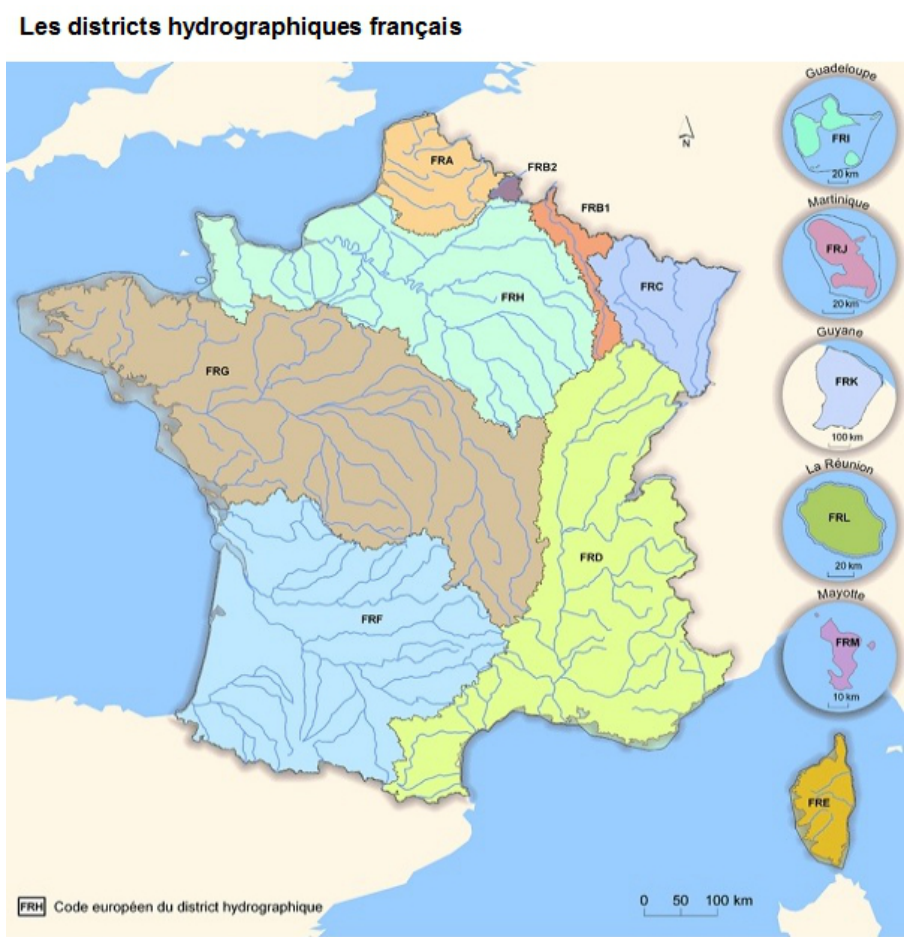


FIGURE A.1 – Cartes des 14 districts hydrographiques français



## Annexe B

# Correction et retraitement des données

### Retraitement des RGA

Dans la base mise à disposition par le SDES, neuf communes présentent une anomalie. Pour ces neuf communes, la somme de la surface en aléa faible et de la surface en aléa moyen/fort est supérieure à la surface totale. Le retraitement fait est présenté dans le tableau suivant.

Code insee	Avant retraitement						Après retraitement			
	Surface totale	Surface aléa faible	Surface aléa moyen fort	Part aléa faible	Part aléa moyen fort	Part aléa fort moyen faible	Surface totale	Part aléa faible	Part aléa moyen fort	Part aléa fort moyen faible
62697	3,376	2,831	1,194	83,9%	35,4%	119,2%	4,03	70%	30%	100%
67009	16,434	6,840	10,938	41,6%	66,6%	108,2%	17,78	38%	62%	100%
87204	16,338	11,229	5,293	68,7%	32,4%	101,1%	16,52	68%	32%	100%
13084	25,407	0	25,590	0,0%	100,7%	100,7%	25,59	0%	100%	100%
80340	4,579	1,338	3,274	29,2%	71,5%	100,7%	4,61	29%	71%	100%
60219	3,366	470	2,900	14,0%	86,2%	100,1%	3,37	14%	86%	100%
62284	9,490	8,121	1,378	85,6%	14,5%	100,1%	9,50	85%	15%	100%
77290	5,744	0	5,749	0,0%	100,1%	100,1%	5,75	0%	100%	100%
41232	106,406	62,192	44,246	58,4%	41,6%	100,0%	106,44	58%	42%	100%

TABLE B.1 – Corrections pour les neuf communes présentant des anomalies dans la base d'exposition au RGA

### Les points de la grille SAFRAN

Le graphique suivant représente l'ensemble de 8981 points de la grille SAFRAN sur le territoire métropolitain. Ces points sont répartis de manière uniforme sur l'ensemble du territoire avec une résolution de 8km. Les îles de tailles variées sont également couvertes, notamment la Corse, Belle-Île-en-mer, l'île d'Yeu, l'île de Groix, l'île Molène, les îles d'Hyères et du levant...

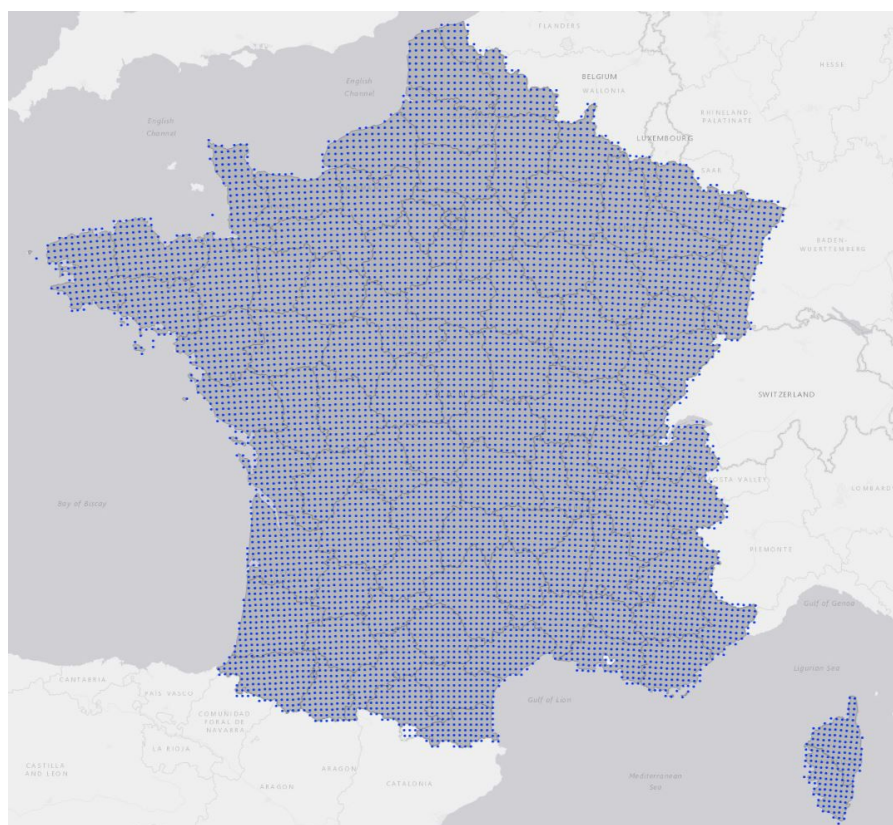


FIGURE B.1 – Répartition des 8981 points terrestres de la grille SAFRAN

## Influence du paramètre de lissage

Ce paragraphe d'annexe est consacré à l'étude du paramètre de lissage  $P$  et à sa sélection. Nous utiliserons la commune d'Orsay (code INSEE 91471) pour exemple et visualisation.

Plus  $P$  est grand, plus la spécificité de la localité est conservée. A l'inverse, un paramètre petit aura tendance à plus lisser les données. Le tableau suivant indique le nombre de points de la grille SAFRAN retenu afin de calculer un indicateur pour la commune d'Orsay en fonction de la valeur de  $P$ .

Nombre de points retenus	
$P = 10\ 000$	2
$P = 1\ 000$	224
$P = 100$	8813

TABLE B.2 – Influence du paramètre  $P$  pour la commune d'Orsay

Les graphiques suivants représentent les points de la grille Safran retenus pour la commune d'Orsay (en gris foncé) en fonction du paramètre  $P$ . Ils mettent également en avant le poids relatif de chaque point de la grille Safran.

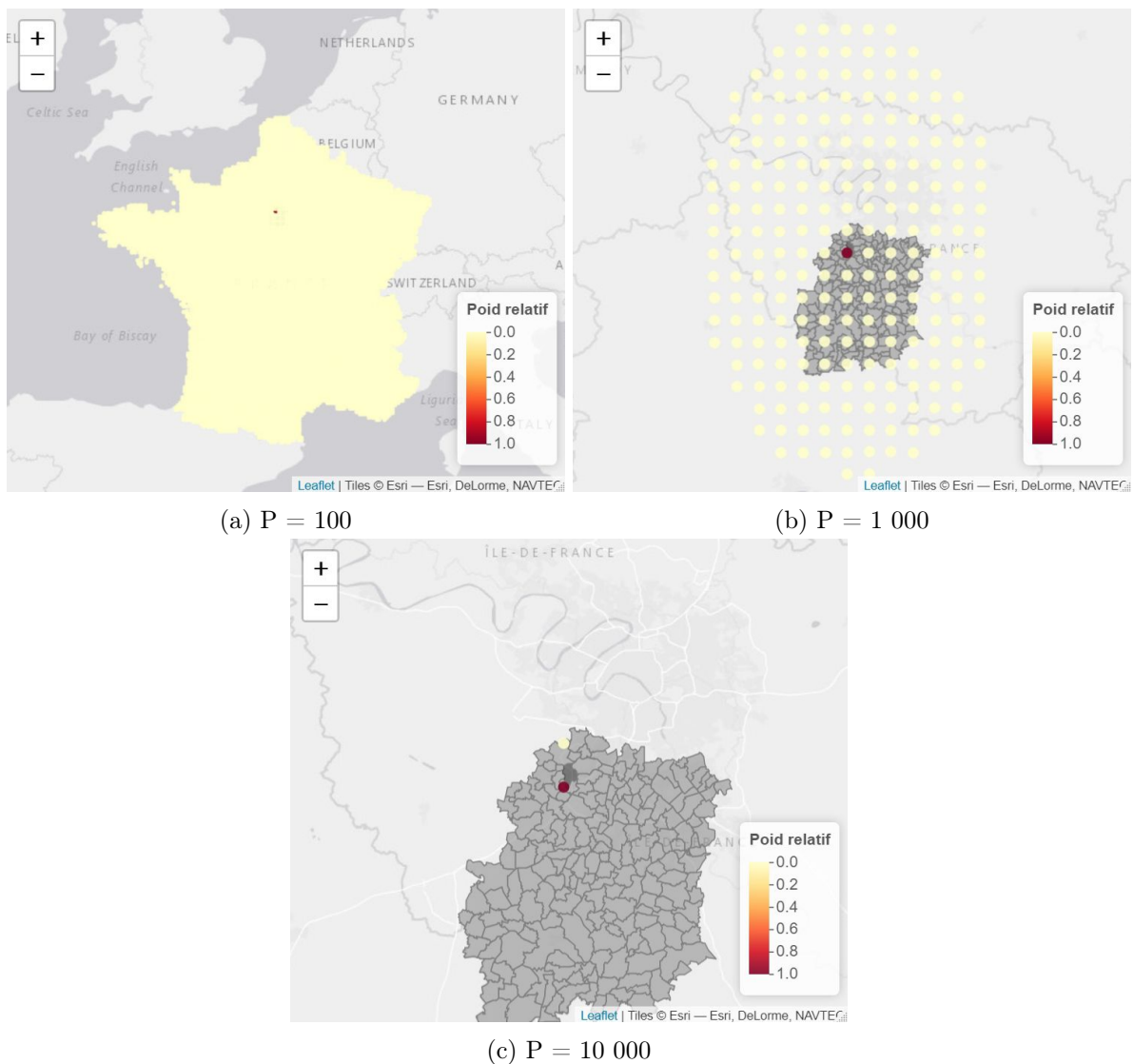


FIGURE B.2 – Influence du paramètre  $P$  pour la commune d'Orsay

Le choix d'un paramètre trop faible comme  $P=100$  semble aberrant. Certains points très éloignés de la commune d'intérêt sont tout de même pris en compte bien qu'avec un poids faible. Il semble plus judicieux de choisir un paramètre  $P$  plus élevé afin de sélectionner un nombre limité de points, les plus proches de la commune étudiée. Le choix du paramètre retenu est  $P = 10000$ .

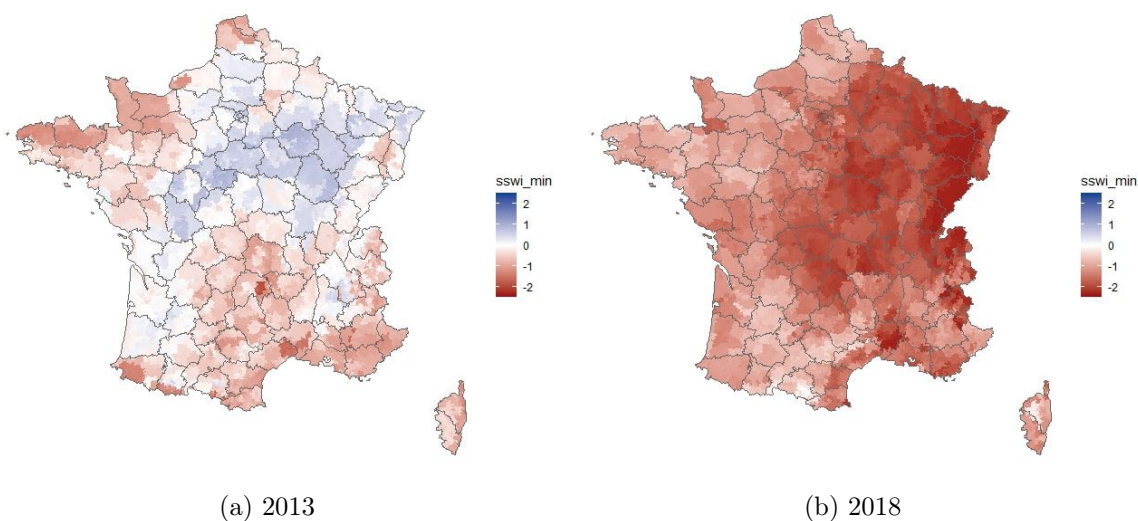


## Annexe C

# Graphiques et études descriptives des données

### C.1 Le SSWI

Les cartes suivantes représentent le sswi moyen, maximum et minimum par commune pour les années 2013 et 2018. Il s'agit de deux années particulièrement remarquables : l'année 2013 a été peu sinistrée en ce qui concerne les sécheresses et à l'inverse, l'année 2018 a été marquée par de fortes chaleurs et de longues vagues de sécheresse résultant en de nombreux arrêtés de Cat Nat.



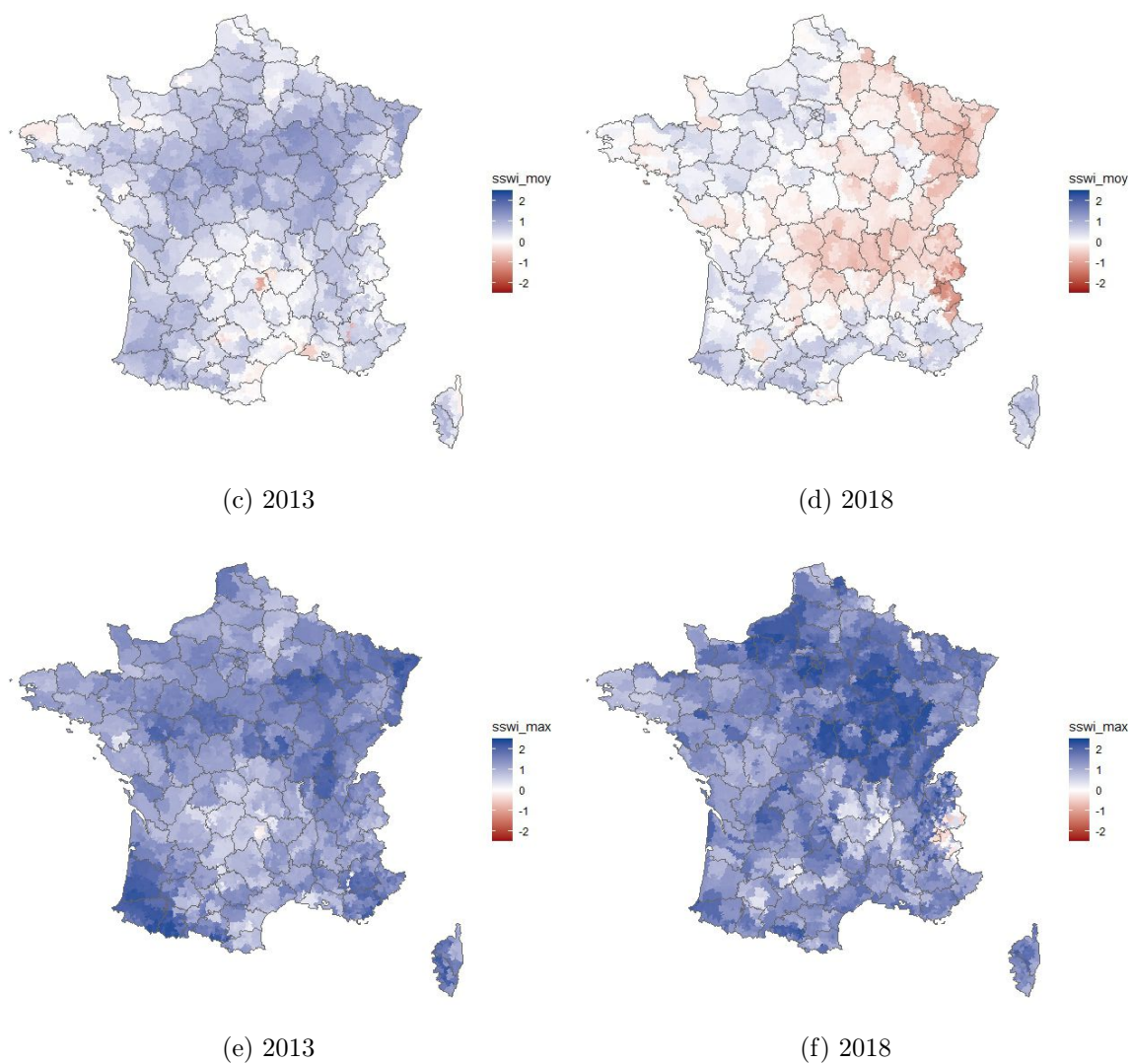


FIGURE C.1 – Comparaison des variables de sswi pour deux années remarquables