



Mémoire présenté devant le jury de l'EURIA en vue de l'obtention du  
Diplôme d'Actuaire EURIA  
et de l'admission à l'Institut des Actuares

Le 19 Septembre 2024

Par : WATRIN Emma

Titre : Valorisation de données satellites pour l'appréhension du risque inondation : création d'un outil accéléré

Confidentialité : Non

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

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

Corinne FUHR-COATEVAL

Yi RONG

Sonia GUELOU

Signature :

**Entreprise :**

Accenture

Signature :

Gildas ROBERT  
Managing Director

**Membres présents du jury de l'EURIA : Directeurs de mémoire en entre-  
prise :**

Franck VERMET

Baptiste ALLAIRE & Victor DEQUATRE

Signature :

**Invité :**

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)*

Signature du responsable entreprise :

Signature du candidat :



# Citation

"Le mal s'insinue dans l'air du temps comme de l'eau sous une porte. D'abord presque rien. Un peu d'humidité. Quand l'inondation survient, il est trop tard."

— Christian Bobin, *La Plus que Vive*

# Résumé

Le changement climatique est sans conteste l'une des préoccupations majeures de l'époque. Les phénomènes météorologiques extrêmes se multiplient à un rythme alarmant, causant des dommages considérables aux biens et aux personnes. Cette situation représente un défi de taille pour les compagnies d'assurances. En effet, l'augmentation de la fréquence et de l'intensité des catastrophes naturelles telles que les inondations devrait se traduire par une hausse substantielle des indemnisations à verser.

Tandis que les méthodes de provisionnement traditionnelles en assurance non-vie reposent sur l'hypothèse que les tendances passées en matière de sinistralité se poursuivront à l'avenir, le dérèglement climatique pourrait rendre le provisionnement beaucoup plus complexe pour les assureurs. Face à ce constat, l'objectif de ce mémoire est de proposer une nouvelle approche visant à mieux prendre en compte la dynamique réelle des catastrophes naturelles.

L'idée centrale est d'exploiter les données satellites de télédétection pour modéliser directement les phénomènes d'inondation dans leur dimension spatiotemporelle, afin de mieux cerner l'ampleur potentielle des sinistres liés aux crues et aux inondations. Cette approche innovante pourrait permettre aux assureurs de constituer des provisions plus réalistes et robustes, en adéquation avec les risques effectivement encourus sur le terrain.

Dans un premier temps, le mémoire détaillera les méthodes de data science employées pour estimer l'empreinte d'inondation, en croisant les données satellitaires avec les modèles numériques de terrain et les hauteurs d'eau mesurées dans les stations limnimétriques<sup>1</sup>. Ensuite, une évaluation des sommes assurées pour le bâti et le contenu dans les zones inondées sera développée, permettant d'estimer la charge brute d'ouverture à provisionner pour un assureur à la suite d'un événement d'inondation majeur.

Une étude de cas concrète sur un tel événement récent illustrera les bénéfices de cette nouvelle méthode de provisionnement intégrant les données de télédétection pour mieux appréhender les risques effectivement encourus sur le terrain.

**Mots clefs:** Changement Climatique, Data Science, Inondation, Satellite, Provisionnement

---

1. Dispositif installé au bord d'un cours d'eau pour mesurer en continu les hauteurs d'eau.

# Abstract

Climate change is undoubtedly one of the major concerns of our time. Extreme weather events are multiplying at an alarming rate, causing considerable damage to property and people. This situation represents a major challenge for insurance companies. The increase in the frequency and intensity of natural disasters such as floods should result in a substantial rise in compensation payments.

While traditional non-life reserving methods are based on the assumption that past claims trends will continue into the future, climate change could make reserving much more complex for insurers. Faced with this observation, the aim of this thesis is to propose a new approach designed to take better account of the real dynamics of natural catastrophes.

The central idea is to use remote sensing satellite data to model flooding phenomena directly in their spatiotemporal dimension, in order to gain a better understanding of the potential scale of flood-related claims. This innovative approach could enable insurers to build up more realistic and robust reserves, in line with the risks actually incurred on the ground.

Firstly, the dissertation will detail the data science methods used to estimate the flood footprint, by cross-referencing satellite data with digital terrain models and water levels measured at gauging stations<sup>2</sup>. Next, an assessment of the sums insured for buildings and contents in flooded areas will be developed, making it possible to estimate the gross liability reserve that an insurer should provision following a major flooding event.

A case study of a recent flooding event will illustrate the benefits of this new reserving method, which uses remote sensing data to provide a better understanding of the risks actually incurred on the ground.

**Keywords:** Climate Change, Data Science, Flood, Satellite, Reserving

---

2. Device installed at the edge of a watercourse to continuously measure water levels.

# Note de synthèse

## Mise en contexte et problématique

Les risques naturels prennent une place de plus en plus significative dans les sociétés contemporaines. La France, en raison de sa topographie et de sa géographie variées, n'est pas épargnée par ces risques et est particulièrement vulnérable au risque d'inondation. Ce péril représente en effet le premier risque naturel dans le pays, tant par l'étendue des zones concernées que par l'importance des dommages qu'il provoque.

Les inondations sont souvent accompagnées de lourdes conséquences et de coûts considérables, représentant ainsi un enjeu majeur pour les compagnies d'assurance. De surcroît, en raison du réchauffement climatique, ces événements se multiplient, tant en fréquence qu'en intensité, rendant leur quantification particulièrement complexe.

Pour les assureurs, il est essentiel de réagir rapidement lorsqu'un événement climatique survient afin de provisionner les sinistres de manière efficace, tout d'abord car ils doivent être capables de réagir rapidement aux événements climatiques. De plus, les exigences réglementaires et les attentes des parties prenantes en matière de transparence ont conduit à une fréquence accrue des reportings. Les assureurs doivent ainsi fournir des informations détaillées sur leur exposition aux risques climatiques et leur capacité à y faire face. Un provisionnement adéquat est également vital pour préserver la stabilité financière des entreprises, en protégeant leurs fonds propres et en évitant un déficit de couverture, ce qui permet de garantir la pérennité de leurs opérations et la confiance des assurés.

Les méthodes traditionnelles de provisionnement présentent certaines limites, car elles n'évaluent pas le risque dans sa dynamique réelle. En effet, ces méthodes s'appuient souvent sur des simulations et sur le fait que l'historique de sinistralité reflète le présent, et ne tiennent donc pas compte de l'évolution rapide et de l'intensification des phénomènes climatiques.

Dans ce contexte, la modélisation et l'appréhension du risque d'inondation sont donc devenues des enjeux majeurs pour le secteur de l'assurance. Ce mémoire s'inscrit dans cette problématique en proposant une méthode d'impulsion novatrice pour mieux comprendre et évaluer le risque d'inondation. L'approche développée repose sur l'utilisation d'images

satellites, et vise à créer un outil accéléré capable d’appréhender le risque d’inondation de manière plus rapide et précise que les méthodes traditionnelles. L’objectif principal est de permettre aux assureurs d’estimer rapidement la charge brute qu’ils pourraient avoir à supporter à la suite d’un événement majeur.

L’étude se concentre sur un cas concret d’inondation, servant de base pour développer une approche qui pourrait être appliquée à l’échelle mondiale. Bien que les travaux aient été menés sur un exemple spécifique, la méthodologie proposée est conçue pour être adaptable à tous les cours d’eau du globe, à condition de disposer des données nécessaires.

## Démarche mise en oeuvre

La démarche mise en oeuvre pour cette étude sur les risques d’inondation par débordement s’articule autour de trois étapes principales, chacune s’appuyant sur des données et méthodes spécifiques.

Dans un premier temps, la modélisation de l’aléa par l’obtention de l’empreinte inondation a été réalisée en utilisant des données en *open data*. Cette étape a permis de représenter spatialement l’étendue potentielle de la zone inondée.

La deuxième étape a consisté à identifier les bâtiments vulnérables au sein de ces zones touchées et à évaluer l’intensité de l’événement pour chaque exposition. Cette phase a nécessité l’utilisation de données sur les infrastructures, obtenues grâce à des données en *open data*.

Enfin, la dernière étape a porté sur l’application des taux de destruction correspondants et le calcul de la charge totale sur la zone d’étude.

## Modélisation de l’empreinte inondation

La modélisation de l’empreinte d’inondation a initialement été abordée par une première méthode basée sur l’analyse de données satellitaires par différence d’images. Cette approche utilise des images disponibles sur la plateforme Copernicus, comparant des clichés pris avant et après l’inondation pour identifier les changements et localiser les zones touchées.

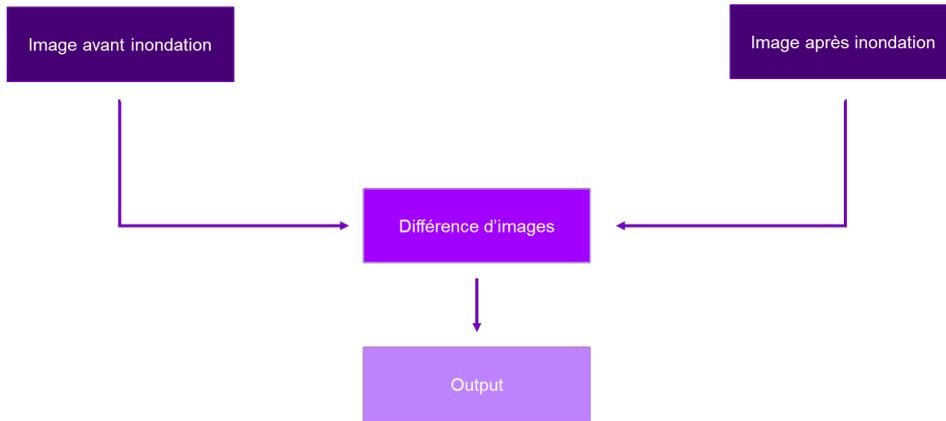


FIGURE 1 – Modélisation de l’empreinte d’inondation : première approche

Bien que prometteuse, cette méthode présentait des limitations significatives. En milieu urbain dense, la résolution insuffisante des images satellitaires ne permettait pas une détection précise dans les rues étroites. De plus, l’analyse par différence d’images était susceptible d’être biaisée par d’autres changements non liés à l’inondation, compromettant ainsi la fiabilité des résultats.

Dans cette optique, il a été décidé de poursuivre le développement de la modélisation afin d’améliorer sa fiabilité et sa précision. Des données satellites traitées avec un filtre permettant d’identifier les zones d’eau ont été privilégiées. En complément, des données sur le profil altimétrique de la zone étudiée ainsi que les hauteurs d’eau mesurées aux stations limnimétriques correspondantes ont été intégrées.

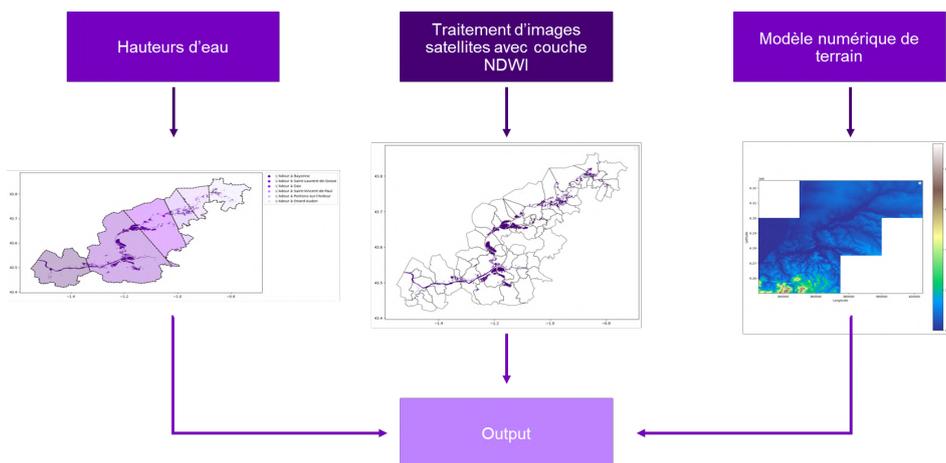


FIGURE 2 – Modélisation de l’empreinte d’inondation : seconde approche

Un cas d'étude a été sélectionné, portant sur les inondations survenues dans les Landes et les Pyrénées Atlantiques le 10 décembre 2021. Cet événement a été choisi en raison de son ampleur, permettant de valider le modèle sur une vaste zone, ainsi que pour la disponibilité des données historiques relatives à cet épisode.

Bien que cette seconde modélisation présente certaines imperfections, elle a réussi à produire une empreinte d'inondation à la fois fiable et précise. Le modèle a notamment permis d'obtenir des résultats satisfaisants même dans des zones où la détection par satellite s'est révélée insuffisante. Par ailleurs, l'empreinte d'inondation obtenue a pu être partiellement validée à l'aide de travaux précédemment menés par la Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement (DREAL).

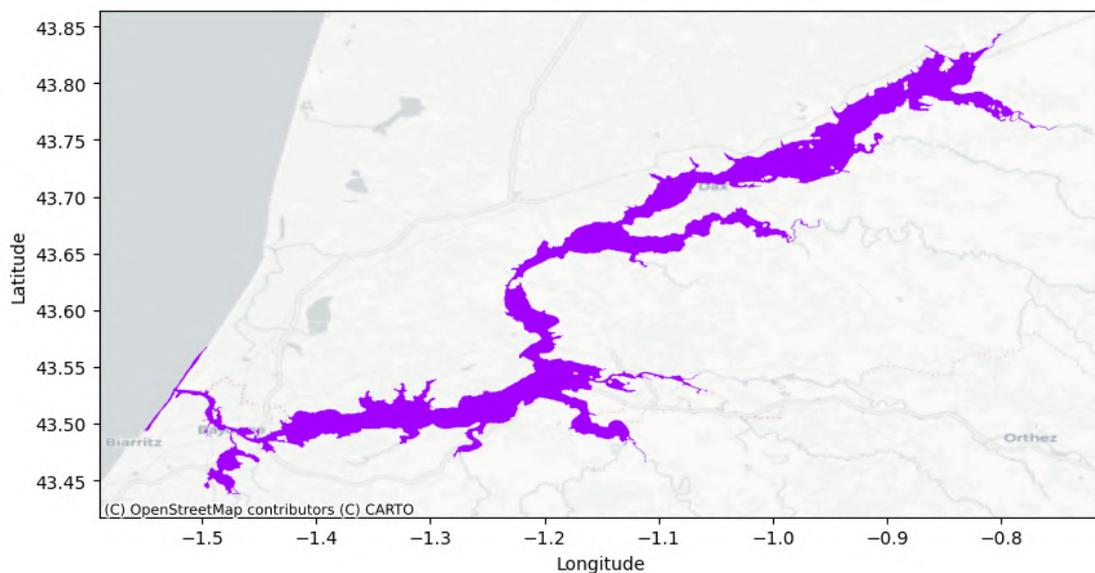


FIGURE 3 – Empreinte d'inondation obtenue pour les événements du 10 décembre 2021 dans les Landes et les Pyrénées-Atlantiques

## Cartographie des expositions

Une fois l'empreinte d'inondation établie, il a été nécessaire d'identifier toutes les expositions affectées par l'événement. En croisant les coordonnées des biens avec l'empreinte d'inondation, il a été possible d'identifier précisément les bâtiments impactés. Grâce à la base de données des Diagnostics de Performance Energétique (DPE), 1669 logements sur les deux départements étudiés ont pu être répertoriés.

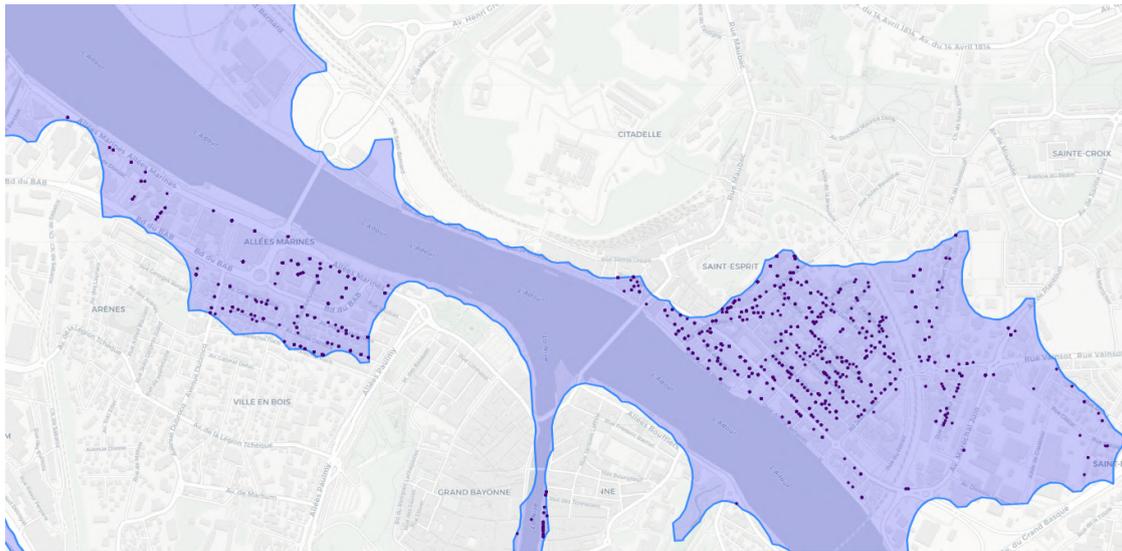


FIGURE 4 – Cartographie des expositions - zoom sur la ville de Bayonne

## Estimation des sommes assurées

En l'absence de données précises, les sommes assurées pour le bâti et le contenu ont été estimées.

Pour les sommes assurées du bâti, le prix au mètre carré par commune a été déterminé à partir de la base des Demandes de Valeurs Foncières DVF+, tandis que les superficies des logements ont été estimées à l'aide de la base de données carroyées de l'INSEE.

Pour les sommes assurées du contenu, un modèle de *Gradient Boosting Classifier* a été calibré en utilisant des données préalablement anonymisées.

## Évaluation des pertes

Une fois la base d'étude établie, incluant les bâtiments exposés et leurs sommes assurées, l'étape suivante a consisté à estimer le niveau d'eau présent dans chaque exposition afin de déterminer l'impact de l'inondation sur chaque bien. Ce calcul s'effectue selon la formule suivante :

$$H = \text{hauteur d'eau en station} + \text{zéro de l'échelle} - \text{altitude de l'exposition}$$

La quantification des hauteurs d'eau a permis d'appliquer les taux de destruction appropriés à chaque habitation. Ces taux, issus d'une étude du *Joint Research Centre (JRC)*, ont été interpolés pour créer une courbe de vulnérabilité.

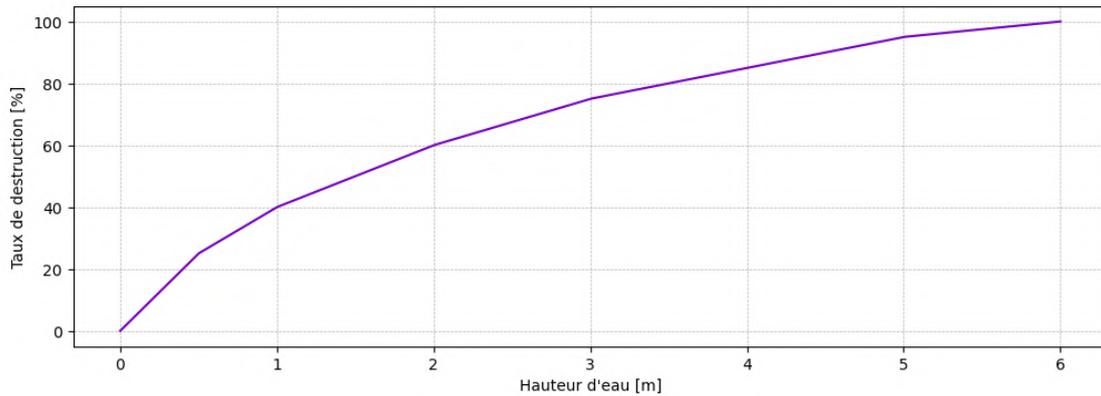


FIGURE 5 – Courbe de vulnérabilité obtenue par interpolation des données JRC

Une fois les taux de destruction appliqués, un coût correspondant est calculé pour chaque bien immobilier. Ce dernier est obtenu selon la formule suivante :

$$\text{Charge brute} = (\text{Somme assurée contenue} + \text{Somme assurée bâtie}) \times \text{Taux de destruction}$$

Enfin, le montant de charge total est obtenu en sommant toutes les charges brutes. Pour  $n$  expositions, la formule est la suivante :

$$\text{Charge totale} = \sum_{i=1}^n (\text{Charge brute}_i)$$

Où  $(\text{Charge brute}_i)$  est la charge correspondant à l'exposition  $i$ .

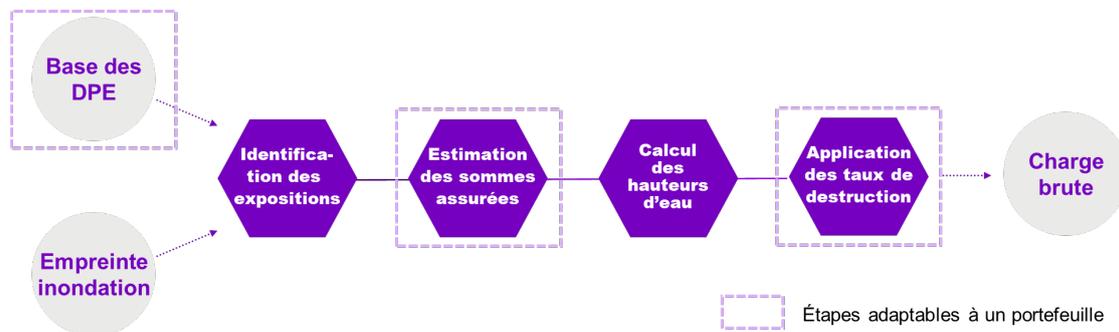


FIGURE 6 – Méthodologie d'estimation du montant de charge brute

## Résultats

Après l'application de la méthodologie, un montant de charge brute a été obtenu, indiquant que les inondations survenues dans les Landes et les Pyrénées-Atlantiques le 10

décembre 2021 ont coûté 96 millions d'euros.

Or, selon un rapport publié par la CCR en juillet 2022, qui dresse le bilan des catastrophes naturelles en France de 1982 à 2021, "le coût des dommages assurés pour cet événement est estimé entre 75 et 85 M€ pour l'ensemble du marché".

Plusieurs facteurs peuvent expliquer cette divergence. Le modèle utilise diverses hypothèses en raison d'un manque de données spécifiques, ce qui peut introduire une incertitude dans les résultats. De plus, cette estimation ne prend pas en compte les franchises et les clauses de limitation, couramment appliquées dans les contrats d'assurance pour réduire les montants indemnisés. L'absence de ces éléments dans le modèle pourrait expliquer une partie de l'écart observé.

Afin de mieux comprendre l'impact de ces hypothèses et des exclusions sur les résultats, une analyse de sensibilités a été menée.

Cette étude a permis d'évaluer la réponse du modèle aux variations des paramètres d'entrée et de déterminer la pertinence ou l'impertinence des hypothèses formulées.

## Perspectives

La méthodologie décrite dans ce mémoire offre de nombreux avantages, notamment une répliquabilité potentielle à l'échelle mondiale, voire à un autre risque climatique tel que l'incendie, et la possibilité d'adaptation à un portefeuille assurantiel.

L'outil développé permet aux assureurs d'estimer rapidement l'impact financier d'une inondation peu de temps après son occurrence.

Cette étude, bien que fournissant des résultats prometteurs, présente plusieurs axes d'amélioration et de développement potentiels. Tout d'abord, les contraintes techniques et de puissance de calcul ont limité certains aspects de l'analyse. Par ailleurs, les méthodes de modélisation des inondations pourraient être perfectionnées en intégrant des paramètres supplémentaires. Enfin, il serait pertinent de valider et d'ajuster les hypothèses prises à l'aide de données historiques de sinistralité.

# Executive summary

## Context and Problem Statement

Natural risks are becoming increasingly significant in contemporary societies. France, due to its varied topography and geography, is not spared from these risks and is particularly vulnerable to the risk of flooding. Flooding is the primary natural risk in the country, both in terms of the extent of affected areas and the severity of the damage it causes.

Floods often have severe consequences and substantial costs, representing a major challenge for insurance companies. Additionally, due to climate change, these events are increasing in frequency and intensity, making their quantification particularly complex.

For insurers, it is essential to respond quickly when a climatic event occurs in order to provision claims effectively, primarily because they must be capable of reacting swiftly to such events. Additionally, regulatory requirements and stakeholder expectations regarding transparency have led to an increased frequency of reporting. Insurers are therefore required to provide detailed information on their exposure to climate risks and their ability to manage them. Adequate provisioning is also crucial for preserving the financial stability of companies by protecting their equity and avoiding coverage deficits, which ensures the sustainability of their operations and maintains the confidence of policyholders.

Traditional methods have certain limitations, as they do not evaluate risk in its real dynamics. These methods often rely on simulations and historical claims data, which may not accurately reflect the present and fail to account for the rapid evolution and intensification of climatic phenomena.

In this context, modeling and understanding flood risk have become major challenges for the insurance sector. This study addresses this issue by proposing an innovative approach to better understand and assess flood risk. The developed approach leverages satellite imagery to create a rapid tool capable of assessing flood risk more quickly and accurately than traditional methods. The main objective is to enable insurers to quickly estimate the gross burden they might have to bear following a major event.

The study focuses on a concrete case of flooding, serving as a basis for developing an

approach that could be applied globally. Although the work was conducted on a specific example, the proposed methodology is designed to be adaptable to all watercourses worldwide, provided the necessary data is available.

## Methodology

The approach implemented for this study on flood risks due to overflow is structured around three main stages, each relying on specific data and methods.

First, the modeling of the hazard through obtaining the flood footprint was conducted using open data. This step allowed for spatial representation of the potential flood zone.

The second step involved identifying vulnerable buildings within these affected areas and assessing the intensity of the event for each exposure. This phase required the use of infrastructure data obtained through open data.

Finally, the last step focused on applying the corresponding destruction rates and calculating the total burden on the study area.

## Modeling the Flood Footprint

The modeling of the flood footprint was initially approached using a method based on satellite image differencing analysis. This approach uses images available on the Copernicus platform, comparing shots taken before and after the flood to identify changes and locate affected areas.

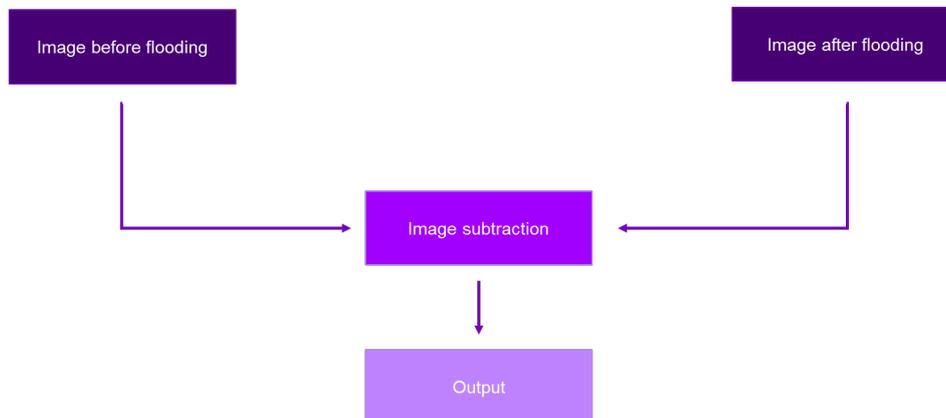


FIGURE 7 – Flood footprint modelling : first approach

Although promising, this method had significant limitations. In dense urban areas, the

insufficient resolution of satellite images did not allow for precise detection in narrow streets. Additionally, image differencing analysis was susceptible to being biased by other changes unrelated to the flood, thus compromising the reliability of the results.

In this context, it was decided to further develop the modeling to improve its reliability and precision. Satellite data processed with a filter to identify water zones were prioritized. Additionally, data on the topographic profile of the studied area and water levels measured at corresponding gauging stations were integrated.

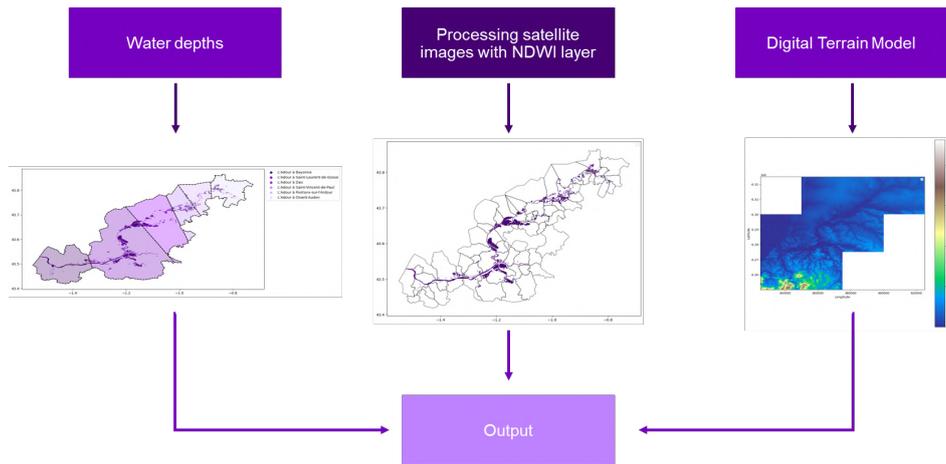


FIGURE 8 – Flood footprint modelling : second approach

A case study was selected, focusing on the floods that occurred in Landes and Pyrénées-Atlantiques on December 10, 2021. This event was chosen due to its scale, allowing for model validation over a large area, and the availability of historical data related to this episode.

Although this second modeling has some imperfections, it succeeded in producing a reliable and accurate flood footprint. The model provided satisfactory results even in areas where satellite detection proved insufficient. Furthermore, the obtained flood footprint was partially validated using previous work conducted by the Regional Directorate for the Environment, Planning, and Housing (DREAL).

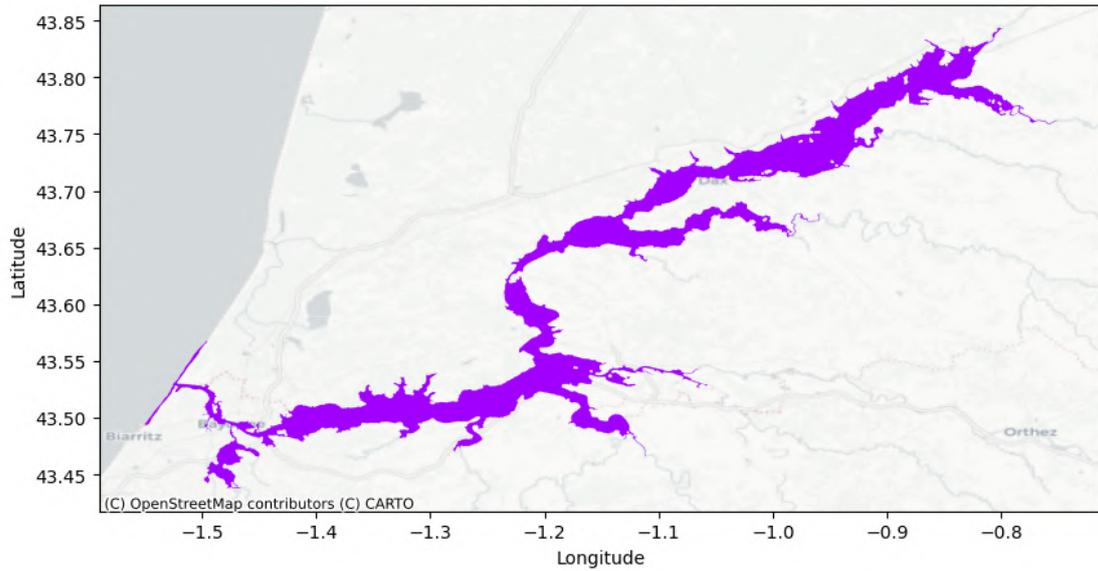


FIGURE 9 – Flood footprint obtained for the events of December 10, 2021, in Landes and Pyrénées-Atlantiques

## Exposure Mapping

Once the flood footprint was established, it was necessary to identify all exposures affected by the event. By cross-referencing the properties' coordinates with the flood footprint, it was possible to precisely identify the impacted buildings. Using the Energy Performance Diagnostics (DPE) database, 1669 dwellings across the two studied departments were listed.

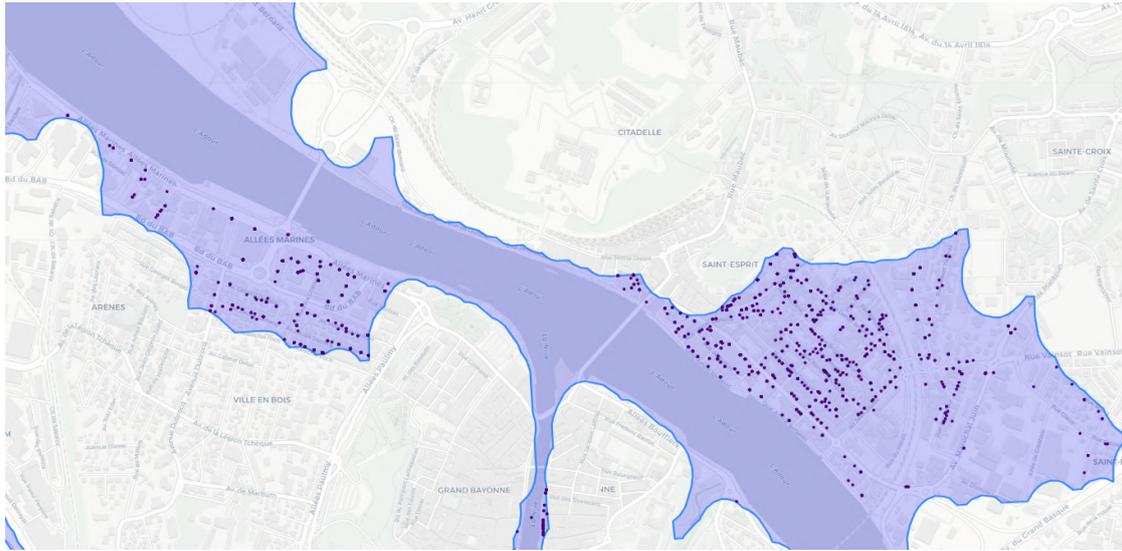


FIGURE 10 – Exposure mapping - zoom on the city of Bayonne

## Estimating Insured Sums

In the absence of precise data, the insured sums for the buildings and contents were estimated.

For building insured sums, the price per square meter by municipality was determined from the DVF+ (Real Estate Value Requests) database, while the housing areas were estimated using the INSEE grid data.

For contents insured sums, a Gradient Boosting Classifier model was calibrated using anonymized data.

## Loss Assessment

Once the study base was established, including exposed buildings and their insured sums, the next step was to estimate the water level present in each exposure to determine the impact of the flood on each property. This calculation is performed according to the following formula :

$$H = \text{water level at station} + \text{zero of the scale} - \text{altitude of the exposure}$$

Quantifying the water levels allowed for the application of appropriate destruction rates to each residence. These rates, derived from a JRC study, were interpolated to create a vulnerability curve.

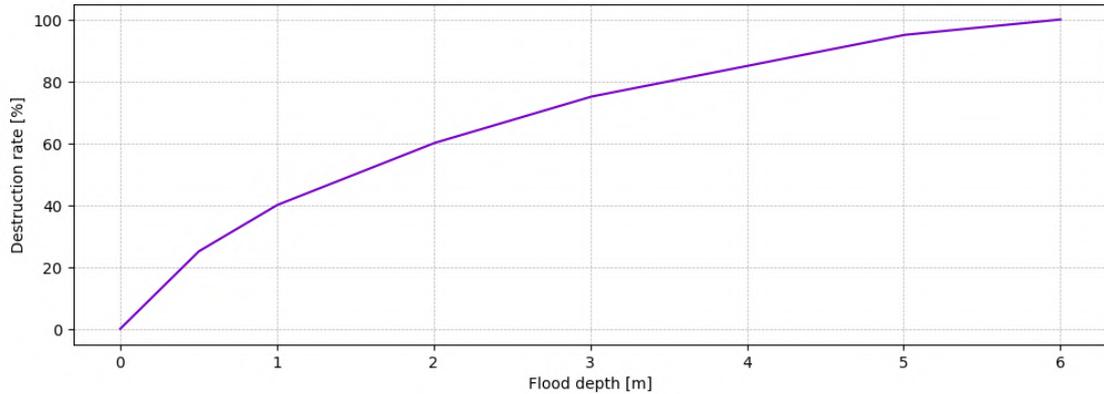


FIGURE 11 – Vulnerability curve obtained by interpolating JRC data

After applying the destruction rates, a corresponding cost was calculated for each property, and obtained using the following formula :

$$\text{Gross burden} = (\text{Insured sum of contents} + \text{Insured sum of building}) \times \text{Destruction rate}$$

Finally, the total burden amount is obtained by summing all the gross burdens. For  $n$  exposures, the formula is as follows :

$$\text{Total burden} = \sum_{i=1}^n (\text{Gross burden}_i)$$

Where  $(\text{Gross burden}_i)$  is the burden corresponding to exposure  $i$ .

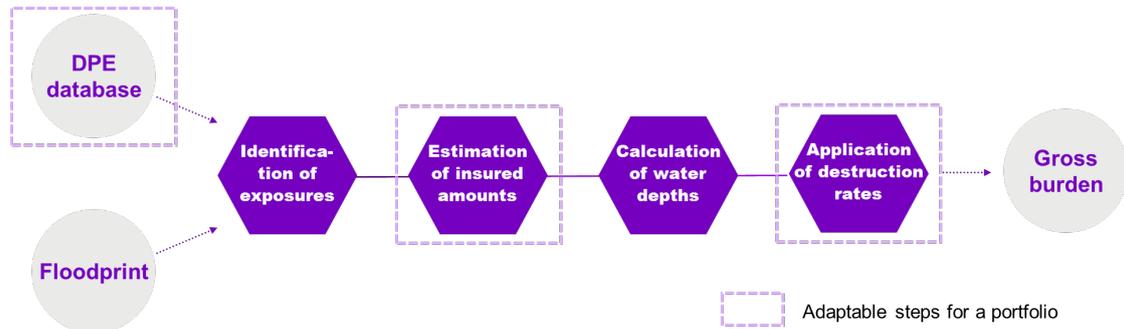


FIGURE 12 – Methodology for estimating the gross burden

## Results

Following the application of the methodology, a gross burden amount was obtained, indicating that the floods that occurred in Landes and Pyrénées-Atlantiques on December

10, 2021, cost 96 million euros.

However, according to a report published by the CCR in July 2022, which reviews natural disasters in France from 1982 to 2021, the cost of insured damages for this event is estimated between 75 and 85 million euros for the entire market.

Several factors can explain this discrepancy. The model uses various assumptions due to a lack of specific data, which can introduce uncertainty into the results. Additionally, this estimate does not account for deductibles and limitation clauses commonly applied in insurance contracts to reduce the indemnified amounts. The absence of these elements in the model could explain part of the observed gap.

To better understand the impact of these assumptions and exclusions on the results, a sensitivity analysis was conducted.

This study allowed for the evaluation of the model's response to variations in input parameters and the determination of the relevance or irrelevance of the formulated assumptions.

## **Perspectives**

The methodology described in this thesis offers numerous advantages, including potential replicability on a global scale, and even for other climate risks such as wildfires, as well as the possibility of adaptation to an insurance portfolio..

The developed tool allows insurers to quickly estimate the financial impact of a flood shortly after its occurrence.

This study, while providing promising results, presents several potential improvement and development areas. First, technical and computational constraints limited certain aspects of the analysis. Additionally, flood modeling methods could be refined by integrating additional parameters. Finally, it would be pertinent to validate and adjust the assumptions using historical claims data.

# Remerciements

Je tiens à remercier toutes les personnes qui ont contribué à la réalisation de ce mémoire.

Tout d'abord, je remercie chaleureusement mes tuteurs d'alternance, Baptiste ALLAIRE et Victor DEQUATRE, pour leur encadrement bienveillant, leur disponibilité, et leurs précieux conseils tout au long de la réalisation de ce mémoire.

Je souhaite également remercier mon tuteur académique, Franck VERMET, pour son accompagnement.

Un grand merci à tous mes collègues pour leur accueil et leur aide au quotidien. En particulier, je tiens à mentionner Guillaume BESSON et Jorge OCHOA, avec qui les échanges ont été d'une grande richesse et ont grandement facilité la réalisation de ce mémoire.

Je remercie également Emmanuel BERTHELE et Yann CUEFF pour leurs précieux conseils et leurs orientations, qui ont été d'une grande aide dans la réalisation de ce travail.

Je saisis cette occasion pour adresser mes profonds remerciements aux responsables et aux professeurs de l'EURIA pour les enseignements qui m'ont été dispensés lors de ces trois années de formation.

Enfin, je remercie du fond du cœur ma famille et mes amis pour leur soutien indéfectible, leur compréhension et leurs encouragements tout au long de mes études.

Je souhaite adresser une mention particulière pour Fabien STEPHAN avec qui j'ai partagé cette année d'alternance.

À tous, je vous exprime ma reconnaissance et ma gratitude pour avoir rendu cette expérience possible et enrichissante.

# Glossaire

<b>ADEME</b>	<i>Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie</i>
<b>AIR</b>	<i>Applied Insurance Research</i>
<b>API</b>	<i>Application Programming Interface</i>
<b>BD ALTI</b>	<i>Base de Données Altimétrique</i>
<b>CAT</b>	<i>Catastrophe</i>
<b>CATNAT</b>	<i>Catastrophes Naturelles</i>
<b>CCR</b>	<i>Caisse Centrale de Réassurance</i>
<b>CEPRI</b>	<i>Centre Européen de Prévention du Risque d'Inondation</i>
<b>CEREMA</b>	<i>Centre d'Études et d'expertise sur les Risques, l'Environnement, la Mobilité et l'Aménagement</i>
<b>DGFIP</b>	<i>Direction Générale des Finances Publiques</i>
<b>DOM-TOM</b>	<i>Départements d'Outre-Mer et Territoires d'Outre-Mer</i>
<b>DPE</b>	<i>Diagnostic de Performance Énergétique</i>
<b>DREAL</b>	<i>Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement</i>
<b>DVF</b>	<i>Demande de Valeurs Foncières</i>
<b>EAIP</b>	<i>Exposition au Risque d'Inondation Potentielle</i>
<b>FiLoSoFi</b>	<i>Fichier Localisé Social et Fiscal</i>
<b>FN</b>	<i>False Negative</i>
<b>FP</b>	<i>False Positive</i>
<b>GIEC</b>	<i>Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat</i>
<b>IBNR</b>	<i>Incurred But Not Reported</i>
<b>IGN</b>	<i>Institut National de l'Information Géographique et Forestière</i>
<b>INSEE</b>	<i>Institut National de la Statistique et des Études Économiques</i>
<b>JRC</b>	<i>Joint Research Centre</i>
<b>JSON</b>	<i>JavaScript Object Notation</i>
<b>MNT</b>	<i>Modèle Numérique de Terrain</i>
<b>MRH</b>	<i>Multirisques Habitation</i>
<b>NDWI</b>	<i>Normalized Difference Water Index</i>
<b>NIR</b>	<i>Near Infrared Reflectance</i>
<b>ONERC</b>	<i>Observatoire National sur les Effets du Réchauffement Climatique</i>
<b>ONG</b>	<i>Organisation Non Gouvernementale</i>

<b>PPRI</b>	<i>Plans de Prévention des Risques d'Inondation</i>
<b>PPRL</b>	<i>Plans de Prévention des Risques Littoraux</i>
<b>PPRN</b>	<i>Plans de Prévention des Risques Naturels</i>
<b>PSAP</b>	<i>Provision pour Sinistre À Payer</i>
<b>RGE</b>	<i>Référentiel à Grande Échelle</i>
<b>RMS</b>	<i>Risk Management Solutions</i>
<b>SCHAPI</b>	<i>Service Central d'Hydrométéorologie et d'Appui à la Prévision des Inondations</i>
<b>SERTIT</b>	<i>Service Régional de Traitement d'Image et de Télédétection</i>
<b>TP</b>	<i>True Positive</i>
<b>WGS 84</b>	<i>World Geodetic System 1984</i>

# Table des matières

<b>Introduction</b>	<b>1</b>
<b>1 Cadre de l'étude</b>	<b>3</b>
1.1 Risques naturels et assurance . . . . .	3
1.1.1 Définitions et contexte . . . . .	3
1.1.2 Les risques naturels en France . . . . .	6
1.1.3 La garantie CATNAT . . . . .	11
1.2 Inondations : premier péril sur le territoire français . . . . .	14
1.2.1 Définitions . . . . .	14
1.2.2 Dynamique du risque inondation . . . . .	17
1.2.3 Impacts du changement climatique . . . . .	21
1.3 Étude de l'état de l'art de la modélisation du risque inondation . . . . .	24
1.3.1 Composantes d'un modèle CAT . . . . .	24
1.3.2 Pratiques et outils de marché existants . . . . .	28
1.3.3 L'imagerie satellite comme méthode d'impulsion . . . . .	29
<b>2 Cartographie du risque inondation</b>	<b>33</b>
2.1 Données utilisées . . . . .	33
2.1.1 Les données satellites . . . . .	33
2.1.2 Les données d'altitude . . . . .	35
2.1.3 Les données limnimétriques . . . . .	38
2.2 Méthodologies pour la modélisation de l'empreinte physique . . . . .	40
2.2.1 Cadre technique . . . . .	40
2.2.2 Traitements de l'Open Data . . . . .	43
2.3 Première approche : Modélisation par détection satellitaire . . . . .	48
2.3.1 Cas d'étude : inondations dans la Vallée de la Roya en Octobre 2020	48
2.3.2 Implémentation du modèle . . . . .	49
2.3.3 Résultats et validation . . . . .	50
2.3.4 Limites de la modélisation . . . . .	52
2.4 Seconde approche : Amélioration de la modélisation . . . . .	53
2.4.1 Cas d'étude : inondations dans les Pyrénées-Atlantiques et les Landes du 10 décembre 2021 . . . . .	53
2.4.2 Détails du modèle . . . . .	54

2.4.3	Résultats et validation . . . . .	55
2.4.4	Avantages et limites . . . . .	57
<b>3</b>	<b>Évaluation des pertes brutes</b>	<b>58</b>
3.1	Données utilisées . . . . .	58
3.1.1	La base des DPE . . . . .	58
3.1.2	La base DVF+ . . . . .	59
3.1.3	Données au carreau de 1km de l'INSEE . . . . .	60
3.2	Création de la base d'étude . . . . .	61
3.2.1	Retraitement des données . . . . .	61
3.2.2	Identification des expositions . . . . .	62
3.2.3	Enrichissement de la base de données . . . . .	66
3.3	Estimation des sommes assurées . . . . .	67
3.3.1	Sommes assurées du bâti . . . . .	67
3.3.2	Sommes assurées du contenu . . . . .	70
3.4	Calibrage des taux de destruction . . . . .	75
3.4.1	Caractérisation des potentiels dommages . . . . .	75
3.4.2	Les données utilisées . . . . .	76
3.4.3	Interpolation . . . . .	78
<b>4</b>	<b>Appréhension du risque inondation : Résultats</b>	<b>80</b>
4.1	Calcul de la perte brute . . . . .	80
4.1.1	Méthodologie . . . . .	80
4.1.2	Résultats . . . . .	83
4.1.3	Validation . . . . .	86
4.2	Sensibilités . . . . .	86
4.2.1	Sensibilités sur la modélisation de l'empreinte d'inondation . . . . .	86
4.2.2	Sensibilités sur l'estimation du coût . . . . .	88
4.3	Forces et limites de la modélisation . . . . .	94
4.3.1	Répliquabilité . . . . .	94
4.3.2	Avantages de la méthode pour un assureur . . . . .	98
4.3.3	Perspectives . . . . .	98
	<b>Conclusion</b>	<b>100</b>
	<b>A Carte des communes disposant d'un PPRN</b>	<b>102</b>
	<b>B Données satellites utilisées</b>	<b>103</b>
B.1	Inondations dans la Vallée de la Roya . . . . .	103
B.2	Inondations dans les Landes et les Pyrénées-Atlantiques . . . . .	105
	<b>C Empreinte inondation par détection satellite</b>	<b>106</b>
	<b>D Dalles de la BD ALTI sélectionnées</b>	<b>107</b>

<b>E</b>	<b>Données au carreau de 1 km : liste et description des variables</b>	<b>108</b>
<b>F</b>	<b>Fichier JSON correspondant au géocodage de l'adresse de l'EURIA</b>	<b>109</b>
	<b>Bibliographie</b>	<b>111</b>

# Table des figures

1	Modélisation de l’empreinte d’inondation : première approche . . . . .	vi
2	Modélisation de l’empreinte d’inondation : seconde approche . . . . .	vi
3	Empreinte d’inondation obtenue pour les événements du 10 décembre 2021 dans les Landes et les Pyrénées-Atlantiques . . . . .	vii
4	Cartographie des expositions - zoom sur la ville de Bayonne . . . . .	viii
5	Courbe de vulnérabilité obtenue par interpolation des données JRC . . . . .	ix
6	Méthodologie d’estimation du montant de charge brute . . . . .	ix
7	Flood footprint modelling : first approach . . . . .	xii
8	Flood footprint modelling : second approach . . . . .	xiii
9	Flood footprint obtained for the events of December 10, 2021, in Landes and Pyrénées-Atlantiques . . . . .	xiv
10	Exposure mapping - zoom on the city of Bayonne . . . . .	xv
11	Vulnerability curve obtained by interpolating JRC data . . . . .	xvi
12	Methodology for estimating the gross burden . . . . .	xvi
1.1	Répartition des catastrophes naturelles dans le monde en 2023 ( <i>Observatoire Permanent des Catastrophes Naturelles</i> [28]) . . . . .	4
1.2	Répartition et coûts des catastrophes naturelles en France en 2023 ( <i>Observatoire Permanent des Catastrophes Naturelles</i> [28]) . . . . .	9
1.3	Fonctionnement du régime CATNAT . . . . .	12
1.4	Inondation par remontée de nappe ( <i>Eau France</i> [16]) . . . . .	15
1.5	Inondation par ruissellement ( <i>Eau France</i> [16]) . . . . .	16
1.6	Inondation par submersion marine ( <i>Eau France</i> [16]) . . . . .	16
1.7	Inondation par débordement d’un cours d’eau ( <i>Eau France</i> [16]) . . . . .	17
1.8	Risques climatiques en France ( <i>Ministère de la Transition Écologique et de la Cohésion des Territoires</i> [25]) . . . . .	19
1.9	Évolution du nombre d’inondations dommageables en France ( <i>Vie Publique</i> [31]) . . . . .	20
1.10	Composantes d’un modèle CAT . . . . .	24
1.11	Exemple de courbe de vulnérabilité ( <i>CDEMA</i> [9]) . . . . .	27
2.1	Image satellite de l’inondation à Bayonne, NDWI ( <i>Portail Copernicus</i> [11])	35
2.2	Exemple d’une dalle ( <i>BD ALTI</i> [22]) . . . . .	37
2.3	Échelle limnimétrique . . . . .	39

2.4	Relief de la région d'étude, ( <i>BD ALTI</i> [22]) . . . . .	45
2.5	Relief de la ville de Bayonne ( <i>BD ALTI</i> [22]) . . . . .	46
2.6	Stations limnimétriques considérées . . . . .	47
2.7	Données de hauteur d'eau ( <i>Hydroportail</i> [15]) . . . . .	47
2.8	Zones de Voronoï . . . . .	48
2.9	Premier modèle . . . . .	50
2.10	Breil-sur-Roya . . . . .	51
2.11	Roquebillière . . . . .	51
2.12	Saint-Martin-Vésubie . . . . .	51
2.13	Second modèle . . . . .	55
2.14	Empreinte d'inondation pour la crue de l'Adour . . . . .	56
2.15	Modélisation . . . . .	56
2.16	Travaux de la DREAL ( <i>Data Gouv</i> [19]) . . . . .	56
3.1	Schéma récapitulatif des données utilisées . . . . .	61
3.2	Cartographie des expositions . . . . .	63
3.3	Répartitions des expositions par villes . . . . .	64
3.4	Répartition des expositions sur les départements d'étude . . . . .	65
3.5	Cartographie des expositions, zoom sur la ville de Bayonne . . . . .	65
3.6	Part d'appartements et de maisons dans les expositions . . . . .	66
3.7	Total et moyenne des sommes assurées du bâti . . . . .	69
3.8	Matrice de confusion du modèle Gradient Boosting . . . . .	73
3.9	Total et moyenne des sommes assurées du contenu . . . . .	74
3.10	Courbe de vulnérabilité obtenue par interpolation des données JRC [21] . . . . .	79
4.1	Aperçu des valeurs aberrantes . . . . .	81
4.2	Hauteurs d'eau des expositions . . . . .	82
4.3	Méthodologie d'estimation du montant de charge brute . . . . .	83
4.4	Sensibilités sur les taux de destruction : courbe de vulnérabilité après l'application d'un choc de -5% . . . . .	89
4.5	Sensibilités sur les taux de destruction : courbe de vulnérabilité après l'application d'un choc de +5% . . . . .	90
4.6	Sensibilités sur le reclassement des hauteurs d'eau en bordure de fleuve : hauteurs d'eau des expositions après reclassement au maximum observé . . . . .	92
4.7	Sensibilités sur le reclassement des hauteurs d'eau en bordure de fleuve : hauteurs d'eau des expositions après reclassement à la moyenne . . . . .	93
4.8	Adresse de l'EURIA géocodée . . . . .	96
A.1	Carte des communes disposant d'un PPRN ( <i>GéoRisques</i> [20]) . . . . .	102
B.1	Images satellites avant et après l'inondation, Breil-sur-Roya ( <i>Copernicus</i> [11]) . . . . .	103
B.2	Images satellites avant et après l'inondation, Roquebillière ( <i>Copernicus</i> [11]) . . . . .	104

B.3	Images satellites avant et après l'inondation, Saint-Martin-Vésubie ( <i>Copernicus</i> [11]) . . . . .	104
B.4	Images satellites avec indice NDWI ( <i>Copernicus</i> [11]) . . . . .	105
C.1	Empreinte inondation par détection satellite dans les Landes et Pyrénées-Atlantiques . . . . .	106
D.1	Dalles intersectant la zone . . . . .	107

# Liste des tableaux

1.1	Types de risques naturels . . . . .	3
1.2	Synthèse des risques naturels en France . . . . .	8
1.3	Le mécanisme de franchises ( <i>CCR</i> [5]) . . . . .	13
2.1	Synthèse des données utilisées . . . . .	40
2.2	Types de données vectorielles . . . . .	41
2.3	Types de données matricielles . . . . .	41
2.4	Résultats des métriques de performance par ville pour le premier modèle .	51
2.5	Résultats des métriques de performance pour le second modèle . . . . .	57
3.1	Présentation des variables . . . . .	62
3.2	Prix au mètre carré des appartements et maisons obtenus dans la zone d'étude . . . . .	68
3.3	Variables utilisées pour le modèle . . . . .	71
3.4	Résultats des métriques de performance par catégorie pour le modèle . . .	71
3.5	Résumé des sommes assurées et des coûts moyens . . . . .	75
3.6	Dommages par paliers de hauteurs d'eau ( <i>CEPRI</i> , [10]) . . . . .	75
3.7	Taux de destruction en fonction de la hauteur d'eau ( <i>JRC</i> [21]) . . . . .	77
4.1	Tableau récapitulatif des coûts par commune (1ère partie, Landes) . . . .	84
4.2	Tableau récapitulatif des coûts par commune (2ème partie, Pyrénées-Atlantiques)	85
4.3	Tableau récapitulatif des coûts par type de bâtiment . . . . .	85
4.4	Sensibilités sur les hauteurs d'eau : tableau récapitulatif des coûts par type de bâtiment . . . . .	87
4.5	Sensibilités sur les hauteurs d'eau : écarts en pourcentage par rapport au scénario de référence . . . . .	88
4.6	Sensibilités sur les taux de destruction : tableau récapitulatif des coûts par type de bâtiment et écarts en pourcentage par rapport au scénario de référence . . . . .	90
4.7	Sensibilités sur les superficies : tableau récapitulatif des coûts par type de bâtiment et écarts en pourcentage par rapport au scénario de référence . .	91
4.8	Sensibilités sur le reclassement des hauteurs d'eau en bordure de fleuve : tableau récapitulatif des coûts par type de bâtiment et écarts en pourcen- tage par rapport au scénario de référence . . . . .	94

4.9	Fonctionnement des sommes assurées . . . . .	97
E.1	Liste et description des variables ( <i>INSEE</i> , [24]) . . . . .	108

# Introduction

Tandis que le changement climatique représente l'un des plus grands défis auxquels l'humanité est confrontée à l'heure actuelle, les risques qu'il engendre s'avèrent difficiles à appréhender pour les assureurs. Le nombre d'événements climatiques ne cesse de croître, avec des conséquences dévastatrices sur les populations et les économies. En France, par exemple, le nombre d'arrêtés de catastrophes naturelles a atteint 239 389 en 2023. La Caisse Centrale de Réassurance (CCR) estime que la sinistralité pourrait augmenter de 27% à 62% d'ici 2050 en raison du changement climatique.

Récemment publié, le dernier rapport du Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat (GIEC) affirme sans équivoque que le réchauffement de la planète est en cours et que certains de ses impacts, comme l'élévation du niveau des mers, sont déjà perceptibles. Les phénomènes météorologiques extrêmes, tels que les vagues de chaleur, les sécheresses, les inondations et les tempêtes, devraient s'intensifier et devenir plus fréquents dans les années à venir.

Indéniablement, parmi ces risques climatiques, les inondations figurent parmi les catastrophes naturelles les plus dévastatrices et coûteuses pour les assureurs. Avec l'accroissement de l'urbanisation dans les zones côtières et les plaines inondables, ainsi que l'augmentation prévue des précipitations extrêmes dans de nombreuses régions du globe, la gestion du risque inondation devient un enjeu majeur du secteur assurantiel.

Toutefois, aujourd'hui, lorsqu'une inondation survient, les informations relatives à l'étendue des dommages et aux sinistres subis tardent souvent à remonter aux assureurs. Ces délais dans la collecte et la transmission des données posent un défi majeur pour les compagnies d'assurance. En effet, sans une vision claire et en temps réel de l'ampleur de la catastrophe, il devient extrêmement difficile d'estimer les provisions nécessaires pour couvrir les indemnités à venir.

Occasionnées les 9 et 10 décembre 2021, les inondations dans les Landes et les Pyrénées-Atlantiques en sont un exemple récent et frappant. Face à l'ampleur des dégâts matériels et au nombre important de sinistrés à la suite des crues exceptionnelles des Gaves, de la Bidouze, de la Nive et de l'Adour, les provisions initialement constituées par les compagnies d'assurance se sont révélées largement inférieures au coût réel des sinistres.

Ne pas disposer de provisions adéquates peut avoir des conséquences financières considérables pour les assureurs, menaçant leur solidité et leur capacité à honorer les engagements pris envers les assurés. C'est pourquoi il est primordial de mettre en place un système efficace de remontée d'informations en cas d'inondation, afin de permettre un provisionnement rapide et adapté, garantissant ainsi la résilience des compagnies d'assurance face à ce risque climatique majeur.

S'appuyant sur une approche novatrice, ce mémoire vise à proposer une méthode permettant d'estimer rapidement et précisément les sinistres en cas d'inondation, afin de garantir un provisionnement adéquat pour les assureurs. Pour y parvenir, il s'agira d'exploiter le potentiel des données satellites, combinées avec des techniques de data science. En effet, les images satellites offrent une vision globale et détaillée de l'étendue des zones inondées. Coupler ces données avec des informations telles que la hauteur d'eau et le profil altimétrique de la région permettrait d'obtenir une évaluation rapide des dommages, bien avant les constats sur le terrain. Cela permettrait aux assureurs de provisionner de façon plus juste et réactive, préservant ainsi leur solidité financière face à un risque climatique majeur comme les inondations. Une telle méthode contribuerait à renforcer la résilience du secteur assurantiel, en s'appuyant sur les innovations technologiques pour mieux anticiper et couvrir les conséquences des catastrophes naturelles.

Ce mémoire s'articulera autour de quatre parties principales. Le premier chapitre s'attachera d'abord à présenter le contexte des risques naturels et de leur modélisation. Ensuite, le deuxième chapitre portera sur la cartographie du risque inondation, présentant les méthodologies et approches de modélisation mises en oeuvre. La troisième partie sera consacrée à l'évaluation des pertes brutes, détaillant le processus d'estimation. Enfin, les résultats de cette modélisation du risque inondation seront présentés et discutés.

# Chapitre 1

## Cadre de l'étude

### 1.1 Risques naturels et assurance

Les risques naturels constituent une préoccupation majeure pour les sociétés contemporaines, et les assureurs y sont fortement exposés.

#### 1.1.1 Définitions et contexte

Selon l'Institut National de la Statistique et des Études Économiques (INSEE) [23], une catastrophe naturelle "est caractérisée par l'intensité anormale d'un agent naturel". Une catastrophe naturelle se définit donc comme la réalisation d'un risque, donc d'un aléa, sur des expositions, du fait de l'intensité anormale d'un agent naturel.

Ces événements, bien qu'heureusement rares, se distinguent par leur capacité à engendrer d'importants dégâts, tant sur le plan humain que matériel.

#### Les catastrophes naturelles

Il existe plusieurs types de catastrophes naturelles, d'origines et de fréquences d'apparition différentes, affectant différemment l'environnement et les populations. Les risques suivants sont particulièrement identifiés :

Risque	Exemples
Biologiques	Épidémies
Climatiques	Feux de forêt, sécheresse
Géologiques	Séismes, éruptions volcaniques, mouvements de terrain
Hydrologiques	Inondations, tsunamis
Météorologiques	Tempêtes, ouragans, cyclones

TABLE 1.1 – Types de risques naturels

Par ailleurs, tous les pays ne sont pas égaux face aux catastrophes naturelles. En effet, si les phénomènes de grande ampleur demeurent rares dans de nombreuses régions, certains

pays y sont particulièrement exposés.

Cette disparité découle de divers facteurs, tels que l'emplacement géographique, le climat et la géologie. Les disparités économiques et sociales, ainsi que la capacité des gouvernements à anticiper et à gérer ces événements, influent également sur la manière dont les populations et les infrastructures sont affectées.

De surcroît, ces événements naturels ne se produisent pas avec la même fréquence. Parmi eux, les inondations se distinguent en tant que péril le plus fréquemment enregistré à travers le monde. En 2023, par exemple, l'Observatoire Permanent des Catastrophes Naturelles a recensé pas moins de 215 inondations sur un total de 974 catastrophes naturelles enregistrées. À l'inverse, certains événements sont extrêmement rares, à l'instar des tsunamis, avec un seul cas dans le monde en 2023.

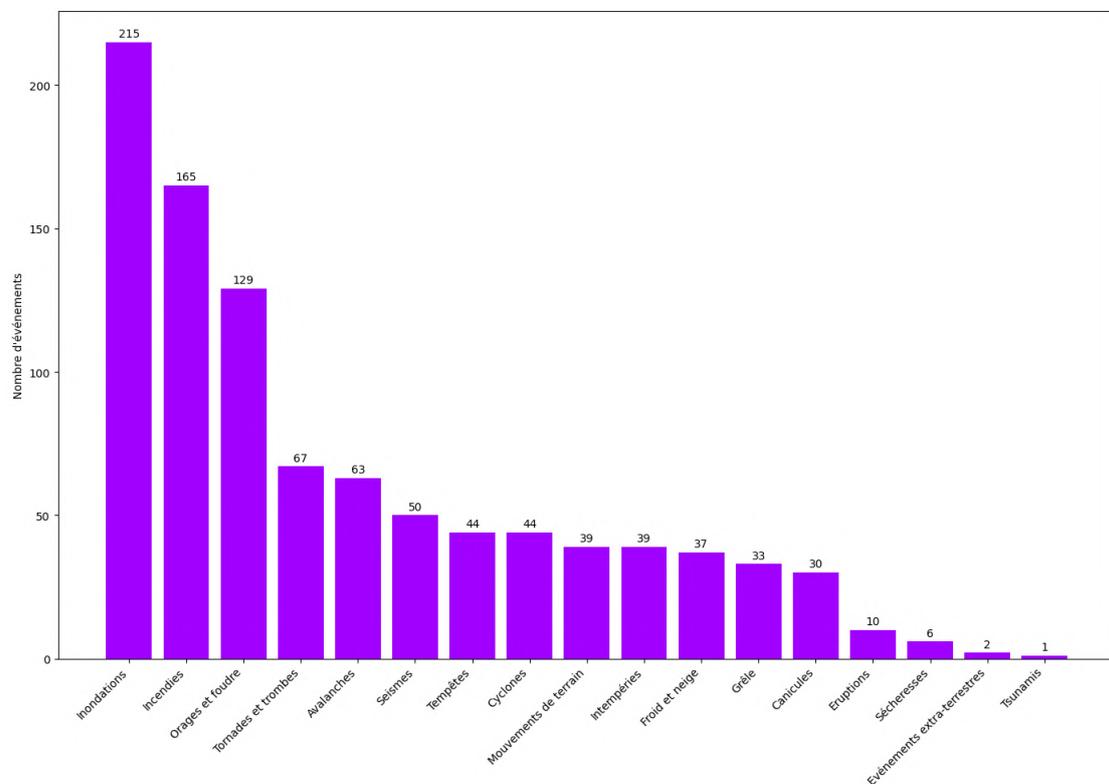


FIGURE 1.1 – Répartition des catastrophes naturelles dans le monde en 2023 (*Observatoire Permanent des Catastrophes Naturelles* [28])

## Assurance

Le bilan d'une catastrophe naturelle est souvent marqué par des conséquences graves et dévastatrices. Ces événements peuvent engendrer un lourd tribut, à la fois en termes de

vies humaines et de dommages matériels.

De plus, ces événements ont des conséquences économiques et environnementales profondes. Les dommages directs aux infrastructures et aux biens peuvent être accompagnés d'effets indirects sur la croissance économique et le développement régional. Les écosystèmes peuvent également être perturbés, avec des conséquences court et long terme sur la biodiversité.

Les enjeux liés aux risques climatiques sont multiples et revêtent une importance capitale tant pour les populations affectées que pour les acteurs économiques, et en particulier pour les compagnies d'assurance. En effet, les assureurs doivent faire face à un afflux massif de demandes d'indemnisation après une catastrophe naturelle. Cela engendre des coûts importants en termes de règlements de sinistres, qui peuvent se chiffrer en milliards d'euros selon l'ampleur de l'événement.

Pour les assureurs, la gestion de ces sinistres représente un défi majeur, nécessitant une évaluation précise des risques pour établir des provisions adéquates et garantir leur solvabilité.

La réassurance joue également un rôle pour la solvabilité des assureurs face aux catastrophes naturelles de grande ampleur. Sans ce mécanisme de mutualisation des risques, les assureurs seraient dans l'incapacité d'honorer leurs engagements en cas d'événement extrême.

Les assureurs investissent également dans la modélisation des risques naturels afin d'évaluer leur exposition et de tarifier leurs polices en conséquence. Ils utilisent des modèles complexes intégrant des données historiques, météorologiques et géographiques pour estimer les dommages potentiels. Néanmoins, le peu de données historiques sur ces risques de pointe très volatiles rend leur évaluation encore peu précise.

Malgré ces efforts, les catastrophes naturelles restent un défi majeur pour la solvabilité des assureurs, en particulier dans un contexte de changement climatique où ces événements risquent de devenir plus fréquents et plus intenses.

### **Une prise de conscience croissante**

Aujourd'hui, une tendance haussière de la fréquence et de la sévérité de ces événements a déjà été observée au cours des dernières décennies. Depuis presque un siècle, ces catastrophes naturelles ne cessent de se multiplier, infligeant des coûts de plus en plus élevés, tant sur le plan économique que sur les pertes en vies humaines.

Pour preuve, un rapport des Nations Unies intitulé "Climat : le nombre de catastrophes a été multiplié par cinq en 50 ans, causant plus de dégâts, mais moins de décès (ONU)"

[29] a récemment été publié.

Face à cela, une prise de conscience croissante de la part des autorités et des organismes de réglementation est observée. Cette prise de conscience se traduit notamment par une multiplication des publications et des recommandations visant à mieux appréhender et gérer ces risques.

À titre d'exemple, le site de l'Observatoire des Territoires fournit des données ouvertes sur le nombre d'arrêtés de catastrophes naturelles publiés au Journal Officiel depuis 1982, permettant de suivre l'évolution de ces événements par commune et département. Ces informations sont disponibles sur la plateforme Observatoire des Territoires [27].

En outre, la Caisse Centrale de Réassurance (CCR) publie régulièrement des rapports détaillés sur la prévention des catastrophes naturelles, comme la série "La prévention des catastrophes naturelles par le Fonds de prévention des risques naturels majeurs" avec des éditions nationales et régionales pour l'année 2023 [6]. Ces rapports visent à rendre compte des efforts de prévention entrepris et à orienter les politiques publiques.

### **1.1.2 Les risques naturels en France**

La France n'est pas épargnée par les enjeux liés aux catastrophes naturelles (CATNAT). En effet, avec un total de 97 événements climatiques recensés en 2023 sur son territoire, la France se positionne comme l'un des pays européens les plus exposés au risque CATNAT.

#### **Présentation des risques**

La France, de par sa topographie variée et de ses caractéristiques géographiques, se trouve naturellement exposée à un large éventail de risques naturels.

Les mouvements de terrain, tels que les glissements, éboulements et chutes de blocs, touchent de nombreuses communes, notamment dans les Alpes, les Pyrénées et le Massif Central, surtout lors d'épisodes pluvieux intenses.

Le pays, avec un tiers de son territoire couvert de forêts, est également vulnérable aux feux de forêt, particulièrement dans les régions méditerranéennes au climat estival chaud et sec.

Le risque de sécheresse, particulièrement marqué dans les régions du sud, entraîne des conséquences graves sur les ressources en eau, l'agriculture et la biodiversité, tout en exacerbant le risque d'incendies de forêt.

Les séismes, bien que modérés en magnitude, se produisent régulièrement en métropole, principalement dans les régions montagneuses, tandis que les départements d'Outre-mer comme la Guadeloupe et la Martinique, situés dans des zones de subduction, connaissent

un risque sismique élevé.

Les avalanches représentent une menace hivernale pour les zones montagneuses habitées et touristiques.

Par ailleurs, les départements d'Outre-mer abritant des volcans actifs, tels que la Guadeloupe, la Martinique et la Réunion, sont soumis au risque d'éruptions volcaniques.

La France est aussi exposée aux tempêtes et cyclones, particulièrement dans les régions côtières et les départements d'Outre-mer des Antilles et de l'Océan Indien.

Enfin, le risque d'inondation, touchant environ 17 000 communes, est le plus important. Il peut être causé par les ruissellements urbains, les remontées de nappes phréatiques, les submersions marines ou encore les crues de rivières.

Ces événements sont exacerbés par les effets combinés de l'activité humaine et du changement climatique.

D'une part, les impacts directs de l'activité humaine jouent un rôle significatif. L'urbanisation croissante entraîne l'imperméabilisation des sols, réduisant la capacité des terres à absorber l'eau et augmentant le risque et la sévérité des inondations. La déforestation et la mauvaise gestion des terres, souvent motivées par des besoins agricoles ou de développement, affaiblissent la stabilité des sols, accentuant les risques de glissements de terrain et d'érosion.

D'autre part, les impacts indirects de l'activité humaine, et en particulier le réchauffement climatique, aggravent ces phénomènes. Les vagues de chaleur se font plus fréquentes et plus intenses, et augmentent le risque de feu de forêt. Le réchauffement global influence également la stabilité des pentes en montagne, accentuant le risque d'avalanches et de glissements de terrain. En outre, l'élévation du niveau de la mer accentue le risque de submersion marine sur les zones côtières, tandis que l'augmentation de la fréquence et de la sévérité des précipitations extrêmes conduit à des inondations par crues de plus en plus sévères.

Risque	Zones affectées	Causes
Mouvements de terrain	Alpes, Pyrénées, Massif Central	Épisodes pluvieux intenses
Feux de forêt	Régions méditerranéennes	Climat estival chaud et sec
Sécheresse	Provence-Alpes-Côte d'Azur, Occitanie	Manque de pluie
Séismes	Alpes, Pyrénées, Massif Central, Guadeloupe, Martinique	Activité tectonique
Avalanches	Zones montagneuses habitées et touristiques	Chutes de neige importantes
Éruptions volcaniques	Guadeloupe, Martinique, La Réunion, Mayotte	Activité volcanique
Tempêtes et cyclones	Régions côtières, Antilles, Océan Indien	Phénomènes météorologiques extrêmes
Inondations	Environ 17 000 communes	Ruissellements urbains, remontées de nappes phréatiques, submersions marines, crues de rivières

TABLE 1.2 – Synthèse des risques naturels en France

### Conséquences économiques

Les catastrophes naturelles ont un impact économique considérable en France. Selon les chiffres clés des risques naturels publiés par le gouvernement français [4], il y a eu 240 000 reconnaissances de l'état de catastrophe naturelle au niveau communal sur la période 1982-2023, principalement dues aux inondations (56%), aux mouvements de terrain (35%) et aux phénomènes atmosphériques (8%).

Les indemnisations versées par les assureurs au titre de la garantie catastrophes naturelles s'élèvent à 49,9 milliards d'euros sur cette même période. Les dommages causés par les tempêtes, la grêle et la neige ont entraîné 45 milliards d'euros d'indemnisations de 1984 à 2021, représentant plus des trois quarts du nombre total de sinistres et des coûts pour les assureurs. D'après les données fournies par Géorisques [20], les tempêtes Lothar et Martin en décembre 1999 ont engendré à elles seules des coûts estimés à 12 milliards d'euros pour le marché de l'assurance.

Toutefois, tous les sinistres n'entraînent pas le même coût économique et social. En effet, parmi ces risques, certains sont particulièrement importants sur le territoire français, comme les orages et les inondations qui génèrent souvent des coûts élevés en termes de réparation et de compensation, en raison de leur impact sur des zones densément peuplées et économiquement actives.

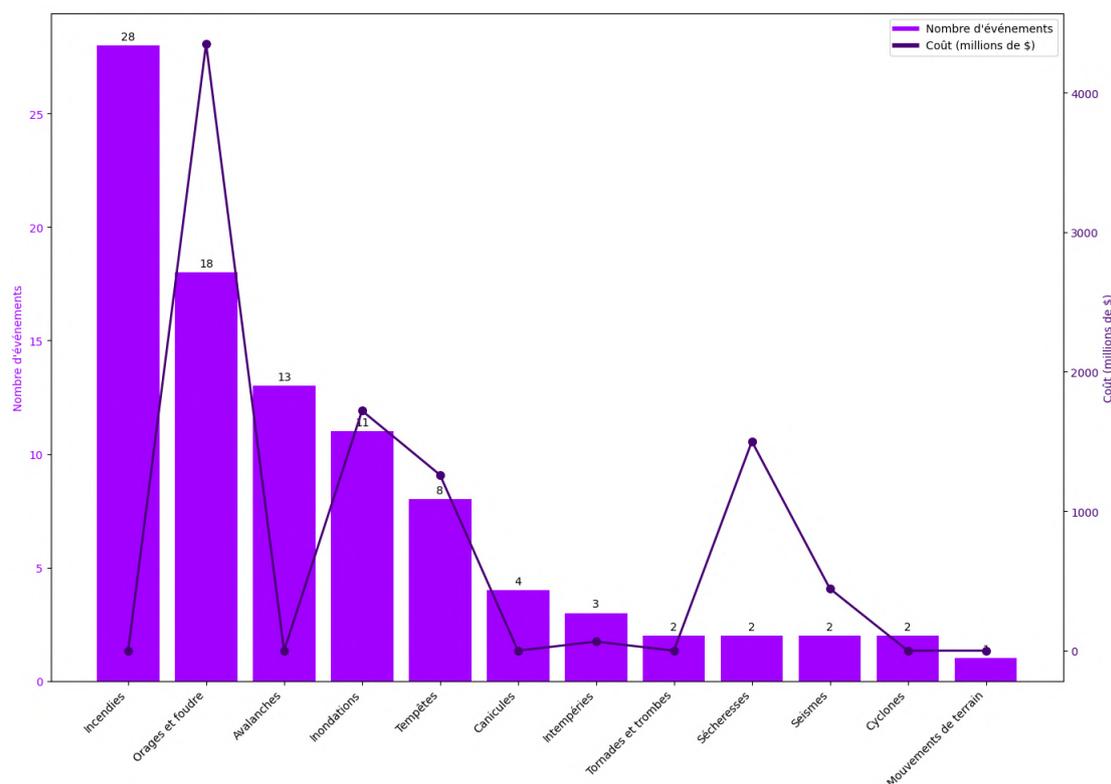


FIGURE 1.2 – Répartition et coûts des catastrophes naturelles en France en 2023 (*Observatoire Permanent des Catastrophes Naturelles* [28])

Au-delà des coûts directs, les catastrophes naturelles perturbent l'activité économique, entraînant des pertes de production, de revenus et d'emplois. Selon une étude de l'ADEME (Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie) publiée en 2023 [2], dans un scénario de réchauffement climatique de 3,5°C, les dommages pourraient représenter plus de 10 points du PIB annuel d'ici la fin du siècle. Ces dommages seraient principalement dus aux catastrophes à l'étranger affectant les exportations françaises, à la baisse des rendements agricoles et aux coûts directs en France.

Face à ces risques, la France a mis en place des mesures de prévention et d'adaptation, comme les Plans de Prévention des Risques Naturels (PPRN)<sup>1</sup>. Créé par la loi du 2 février 1995, c'est un instrument essentiel de l'action de l'État en terme de prévention des risques. Il s'agit d'un document d'utilité publique élaboré sous la responsabilité du Préfet, et qui prend en compte les risques naturels afin de réglementer l'utilisation des sols sur les communes vulnérables, et de déterminer les conditions pour la construction. Ce document peut porter sur un ou plusieurs types de risques naturels, et concerner une ou plusieurs communes.

1. La carte des communes disposant d'un PPRN se trouve à l'annexe A.

## Contrats et garanties sollicitées en assurance

En cas d'événement climatique, les assureurs proposent différentes garanties dans les contrats d'assurance pour couvrir les dommages subis, selon le type d'assurance souscrite.

**Assurance Automobile** Les contrats d'assurance auto comprennent généralement une garantie "tous risques" qui couvre les dommages causés au véhicule par les intempéries. Cette couverture permet d'indemniser les réparations ou le remplacement du véhicule en cas de dégâts matériels importants consécutifs à ces événements climatiques. Par exemple, si un véhicule subit des impacts de grêle sur sa carrosserie, entraînant des bosses et rayures, l'assurance prendra en charge les frais de réparation chez un garagiste agréé. De même, si une inondation submerge le moteur, provoquant son arrêt et des dommages internes, l'assurance pourra rembourser le coût du remplacement du moteur. Les bris de glace, comme la fissuration ou la cassure d'un pare-brise suite à un impact de grêle, sont également pris en charge. Enfin, les contrats couvrent les dommages causés par la chute d'arbres ou de branches arrachés par des vents violents lors d'une tempête.

**Assurance Multirisque Habitation (MRH)** Les contrats d'assurance multirisque habitation prévoient une couverture des dommages causés au bâtiment et au contenu par les événements naturels. Ils indemnisent les réparations ou la reconstruction du logement endommagé. En cas d'inondation par débordement de cours d'eau ou remontée de nappe phréatique, l'assurance prendra en charge les frais de pompage, de nettoyage et de remise en état des pièces inondées. Si une tempête arrache une partie de la toiture, l'assurance couvrira les travaux de réfection. Les impacts de grêle sur les tuiles, les ardoises ou les fenêtres seront également réparés ou remplacés. Le poids de la neige peut aussi provoquer l'effondrement d'une toiture, nécessitant une reconstruction totale ou partielle, prise en charge par l'assurance.

**Assurance Perte d'Exploitation** Pour les entreprises, l'assurance perte d'exploitation indemnise la baisse ou l'absence de chiffre d'affaires résultant d'un sinistre couvert. Par exemple, si une inondation endommage gravement les locaux d'une entreprise, obligeant à une fermeture temporaire pour travaux de remise en état, l'assurance compensera la perte de marge brute pendant cette période d'interruption. Elle remboursera également les frais supplémentaires engagés pour maintenir l'activité, comme la location de locaux de remplacement, l'achat de matériel provisoire ou le recours à des heures supplémentaires. Si des pénalités de retard sont dues à des clients en raison de cette interruption, l'assurance les prendra en charge. Enfin, en cas d'arrêt définitif de l'entreprise suite au sinistre, l'assurance indemnifiera la perte de valeur vénale du fonds de commerce. Cependant, la mise en jeu de cette garantie est subordonnée à l'existence d'une assurance couvrant les dommages matériels directs causés par les événements garantis (incendie, dégâts des eaux, catastrophes naturelles, etc.).

**Garantie Catastrophes Naturelles** La garantie catastrophe naturelle est une couverture obligatoire en assurance auto et dans les contrats MRH. Pour les véhicules, elle couvre les dommages matériels causés par des événements naturels majeurs comme les inondations et les tremblements de terre, mais seulement si une assurance au tiers élargie ou tous risques a été souscrite. En MRH, elle est automatiquement incluse et protège l'habitation et ses biens contre ces mêmes catastrophes naturelles. Cette garantie sera étudiée plus en détail dans le paragraphe 1.1.3.

### 1.1.3 La garantie CATNAT

En réponse aux risques naturels sur son territoire, la France a instauré un système d'indemnisation pour les catastrophes naturelles, connu sous l'appellation "CATNAT". Ce mécanisme basé sur la solidarité nationale permet ainsi de pallier une carence de couverture des risques naturels qui n'étaient que peu assurés auparavant.

#### Histoire et présentation générale

Institué par la loi du 13 juillet 1982, suite aux inondations dévastatrices de l'hiver 1981 qui frappèrent les vallées de la Saône, du Rhône et de la Garonne, ce dispositif couvre spécifiquement les événements tels que :

- les inondations (incluant les inondations et coulées de boue, les inondations par remontée de nappe et la submersion marine) ;
- la sécheresse ;
- les mouvements de terrain ;
- les cyclones et les ouragans ;
- les séismes ;
- les avalanches ;
- les éruptions volcaniques ;
- les tsunamis.

Toutefois, il exclut les dommages causés par des incendies de forêt ou par des vents violents lorsque la vitesse du vent est inférieure à 145 km/h en moyenne sur 10 minutes ou à 215 km/h en rafales, *i.e.* les tempêtes. De même, il ne couvre pas les dommages dus à la grêle ou au poids de la neige.

Les territoires couverts par le régime CATNAT incluent la métropole ainsi que les départements d'outre-mer et territoires d'outre-mer (DOM-TOM). Sont exclus de ce dispositif Monaco, l'Andorre, la Polynésie française, la Nouvelle-Calédonie, les Terres australes et antarctiques françaises ainsi que Clipperton.

## Processus de reconnaissance CATNAT

Le processus d'indemnisation s'initie par une démarche proactive du maire de la commune affectée. Ce dernier a pour obligation de constituer un dossier dans un délai de deux ans suivant la date de l'événement climatique, dans le but de solliciter la reconnaissance de l'état CATNAT pour sa commune. Le dossier à soumettre au préfet doit contenir des informations précises sur l'événement, notamment sa date, son heure, le type de biens endommagés, le nombre de reconnaissances CATNAT antérieures de la commune, ainsi que les mesures de prévention éventuellement mises en œuvre.

Le préfet, de son côté, est chargé d'étoffer ce dossier avec un rapport circonstancié, les contributions des maires concernés, une cartographie des communes requérantes, un rapport technique détaillant la nature et l'intensité du phénomène climatique, ainsi que tout document pouvant faciliter l'analyse de la situation.

Ce dossier consolidé est ensuite examiné par la Commission Interministérielle, sous l'égide du ministère de l'Intérieur, qui évalue le caractère exceptionnel de l'événement sur la base de critères spécifiques liés au type de catastrophe (inondations, mouvements de terrain, sécheresse, avalanches, séismes).

La décision de la Commission peut aboutir à un refus pour divers motifs, notamment si l'intensité anormale de l'événement n'est pas démontrée ou si le dossier préfectoral s'avère incomplet. Un dossier refusé ou ajourné peut être réexaminé si des informations supplémentaires sont fournies.

L'acceptation du dossier conduit à la publication au Journal Officiel de la liste des communes reconnues en état de CATNAT, ouvrant ainsi un délai de 30 jours pour que les sinistrés déclarent leurs sinistres. L'indemnisation par l'assureur suit, dans un délai de trois mois. La CCR joue ensuite un rôle de réassureur pour les compagnies d'assurance concernées, avec le soutien illimité de l'État agissant en dernier recours en cas de sinistralité exceptionnelle.

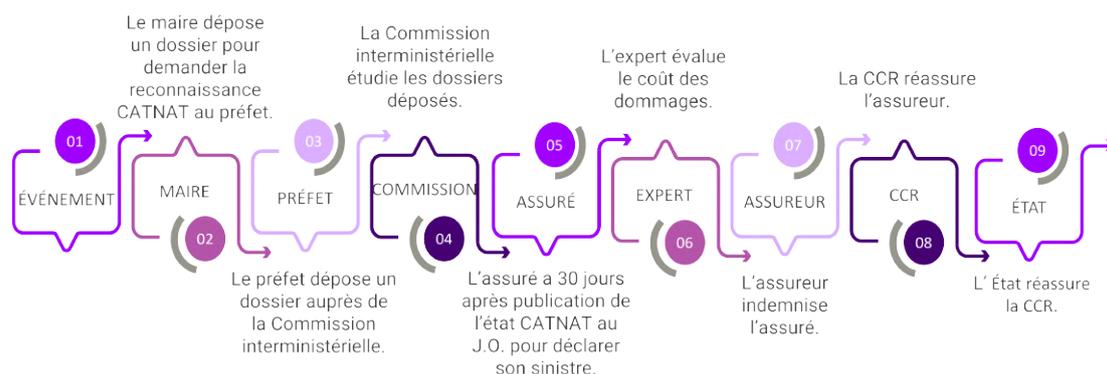


FIGURE 1.3 – Fonctionnement du régime CATNAT

## La garantie CATNAT

La garantie CATNAT se limite exclusivement à la couverture des dommages matériels directs occasionnés aux biens assurés inclus dans le contrat d'assurance. Les préjudices corporels ainsi que les dommages indirects demeurent hors champ de cette garantie.

Elle implique une franchise systématique pour les sinistrés, représentant la part des dommages qui reste à la charge de l'assuré. Elle joue ainsi un rôle de modérateur en impliquant l'assuré dans la prévention des risques et dans la gestion des conséquences des catastrophes. Cette franchise, décrétée par l'État, est invariable et ne peut être rachetée. Selon le site de la CCR [5], depuis le début de l'année 2001, la structure de ces franchises est la suivante, avec une franchise générale et une franchise spécifique aux mouvements de terrain consécutifs à la sécheresse ou à la réhydratation des sols :

	Franchise générale	Franchise spécifique
Biens à usage d'habitation et véhicules automobiles	380 €	1520 €
Biens à usage professionnel	10 % des dommages Minimum 1140€	10 % des dommages Minimum 3050€
Pertes d'exploitation	3 jours ouvrés Minimum 1140€	

TABLE 1.3 – Le mécanisme de franchises (CCR [5])

L'assurance catastrophe naturelle représente une extension obligatoire pour tous les contrats d'assurance de dommages, qu'il s'agisse de multirisques habitation, de tous risques automobiles ou de locaux professionnels, à l'exception des contrats d'assurance maritime.

Cette extension engendre le versement d'une surprime uniforme à l'échelle nationale, dont le taux est déterminé par les autorités étatiques. Cette surprime s'élève à 12% de la prime liée aux garanties dommages du contrat de base pour les biens autres que les véhicules à moteur, et à 6% des primes vol et incendie (ou 0,50% de la prime dommage en l'absence de ces dernières) pour les véhicules terrestres à moteur.

Alors que ce taux n'avait pas évolué depuis 2001, à partir du 1er janvier 2025, une augmentation significative de la surprime des assurances en France sera mise en place pour financer le régime des catastrophes naturelles, déficitaire depuis 2015. Cette hausse, officialisée par un arrêté ministériel, fera passer la surprime de 12% à 20% pour les contrats d'assurance habitation et professionnelle, et de 6% à 9% pour les contrats vol et incendie. Cela représente en moyenne une augmentation de 26 à 42 euros de la surprime par an et par foyer.

Cette décision des autorités étatiques vise à générer environ 2 milliards d'euros supplémentaires par an, afin de rééquilibrer le régime face à la recrudescence des catastrophes naturelles liées au changement climatique. Les fonds supplémentaires collectés permettront de consolider les réserves de la CCR et d'assurer une meilleure prise en charge des

sinistres futurs.

Bien que cette augmentation soit jugée nécessaire par les professionnels du secteur pour assurer la pérennité du régime, elle suscite des réactions mitigées en raison du contexte d'inflation actuel.

## **1.2 Inondations : premier péril sur le territoire français**

La France est exposée à divers risques naturels en raison de sa topographie et de ses caractéristiques géographiques. Selon Eau France, "les inondations et les submersions marines sont les risques naturels qui concernent le plus grand nombre de personnes en France" [16]. En particulier, elles touchent environ 17 000 communes et représentent le risque le plus fréquent et le plus coûteux, exacerbées par le changement climatique. C'est pourquoi elles nécessitent une attention particulière.

### **1.2.1 Définitions**

Géorisques définit l'inondation comme "une submersion, rapide ou lente, d'une zone habituellement hors de l'eau" [20]. Cette définition englobe une variété de scénarios où l'eau excède ses limites naturelles ou artificielles habituelles, engendrant une couverture partielle ou totale des terres. Plusieurs types d'inondations sont ainsi distinguées.

#### **Les inondations par remontée de nappe**

Les inondations par remontée de nappe se produisent lorsque le niveau de la nappe phréatique s'élève jusqu'à atteindre la surface du sol. Ce phénomène est principalement causé par des épisodes pluvieux intenses, augmentant significativement le volume d'eau dans les nappes. Lorsque ces conditions se produisent, toute précipitation supplémentaire sur une zone déjà saturée ne peut plus être absorbée, entraînant la stagnation ou le déplacement de l'eau vers les vallées les plus proches. Cela peut provoquer des inondations même dans des zones éloignées des cours d'eau principaux, rendant le phénomène particulièrement insidieux car il peut survenir dans des régions où les inondations ne sont pas habituellement anticipées.

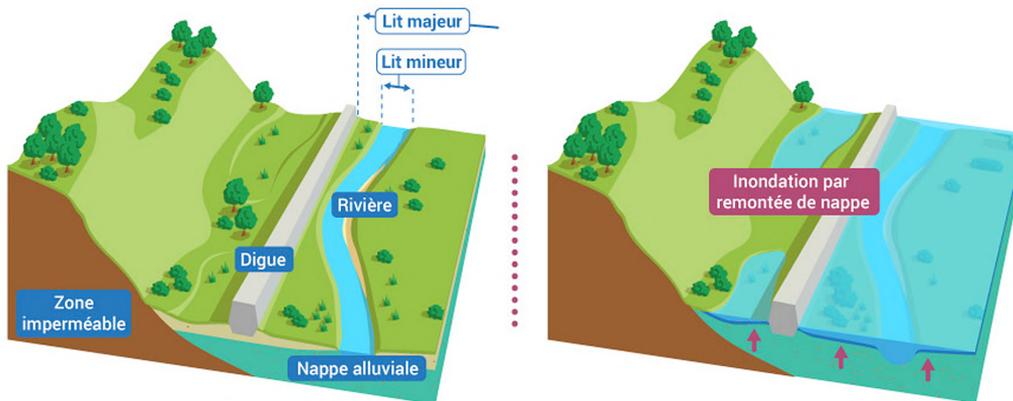


FIGURE 1.4 – Inondation par remontée de nappe (*Eau France* [16])

C'est ce qui s'est produit en janvier 2024, lorsque le Pas-de-Calais a été touché par des inondations suite à des pluies abondantes. Les nappes souterraines étaient déjà à des niveaux très élevés, ce qui a entraîné une remontée des eaux jusqu'à la surface dans certaines zones basses, inondant maisons, caves et sous-sols. Ce type d'inondation peut persister pendant plusieurs semaines après les précipitations en raison du temps nécessaire pour que les nappes se vident.

### Les inondations par ruissellement

Les inondations par ruissellement, également appelées inondations pluviales, se produisent lorsque les précipitations excèdent la capacité d'absorption du sol, entraînant un flux d'eau sur la surface. Ce type d'inondation est caractérisé par sa survenue rapide, souvent en réaction à des averses intenses ou à un cumul significatif de précipitations sur une période courte. Ces événements sont particulièrement communs dans les zones urbaines où la perméabilité naturelle du sol est réduite à cause de l'urbanisation. L'eau s'accumule rapidement, pouvant submerger les systèmes de drainage et causer des inondations soudaines.

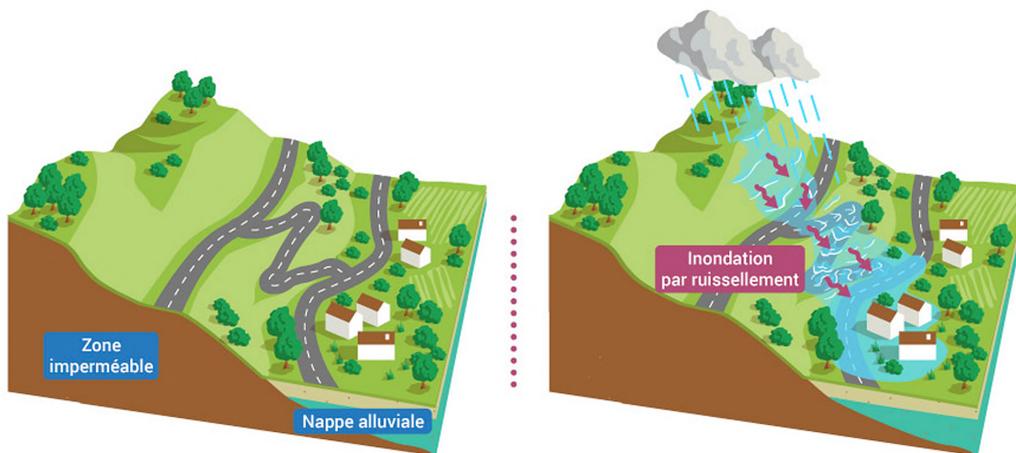


FIGURE 1.5 – Inondation par ruissellement (*Eau France* [16])

Ce fût le cas en septembre 2022 dans la ville de Béziers dans l’Hérault, touchée par des inondations causées par un épisode orageux de forte intensité. En seulement quelques heures, jusqu’à 200 mm de pluies se sont abattus sur la ville, provoquant d’importants ruissellements dans les rues et quartiers.

### Les inondations par submersion marine

Les inondations par submersion marine se définissent par l’envahissement des zones côtières par la mer, résultant de conditions météorologiques et océaniques extrêmes telles que les tempêtes et les marées hautes. Ces événements sont exacerbés par le phénomène de surélévation du niveau de la mer, conséquence directe du changement climatique. Les zones littorales, particulièrement vulnérables, font face à des risques accrus d’érosion, de salinisation des sols et d’habitat, ainsi qu’à des impacts significatifs sur les infrastructures côtières.

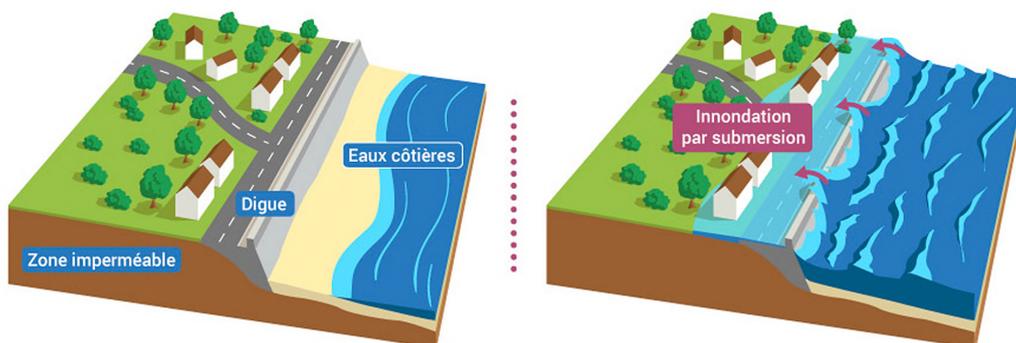


FIGURE 1.6 – Inondation par submersion marine (*Eau France* [16])

C'est ce qu'il s'est produit lors de la tempête Xynthia en février 2010, quand plusieurs départements côtiers de l'ouest de la France ont été touchés par des submersions marines dévastatrices.

### Les inondations par débordement d'un cours d'eau

Enfin, les inondations par débordement de cours d'eau, ou inondations de plaine, surviennent lorsque l'eau dépasse les berges des rivières et des fleuves, inondant les zones environnantes. Ces phénomènes sont souvent la conséquence de précipitations prolongées ou intenses sur le bassin versant, combinées parfois à la fonte des neiges. Affectant principalement les vallées et les plaines, ces inondations ont la particularité de survenir rapidement, et peuvent persister plusieurs jours, voire semaines.

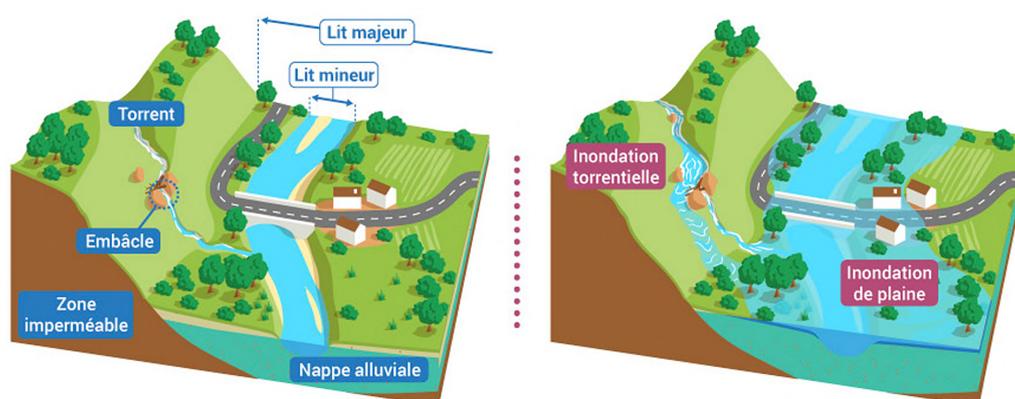


FIGURE 1.7 – Inondation par débordement d'un cours d'eau (*Eau France* [16])

Le risque d'inondation par débordement de cours d'eau, ou inondation de plaine, sera l'objet central de cette étude. C'est ce type d'événement qui s'est produit dans les Pyrénées-Atlantiques et les Landes en décembre 2021, lorsque les crues de la Nive et de l'Adour ont submergé de vastes zones urbaines et périurbaines pendant plusieurs jours. Cet épisode dramatique, résultant de fortes précipitations sur les bassins versants combinées à une fonte nivale, illustre parfaitement les caractéristiques de ce phénomène : montée rapide des eaux, débordements importants au-delà des berges, et inondations persistantes sur un laps de temps conséquent. Cet exemple servira donc de cas d'étude dans ce mémoire.

### 1.2.2 Dynamique du risque inondation

Le changement climatique redessine la carte des risques d'inondation en France, modifiant profondément le profil de ce danger, l'exposition des territoires et la géographie des zones vulnérables.

## Profil de risque de l'inondation

Le profil de risque des inondations est défini grâce à trois critères : l'intensité, la durée et la période de retour.

L'intensité d'une inondation se mesure souvent par le débit de l'eau ou par la hauteur d'eau atteinte, fournissant une estimation quantitative de la force de l'événement. Cette mesure permet d'évaluer la pression que l'inondation peut exercer sur les infrastructures et les zones résidentielles.

La durée de l'inondation, quant à elle, renseigne sur le temps pendant lequel une zone reste submergée. Une durée prolongée peut aggraver les dommages aux biens et aux infrastructures, augmenter les risques sanitaires, impacter les frais de relogement, et compliquer les opérations de secours et de rétablissement. En conséquence, cela peut générer des coûts accrus pour les assureurs et le régime CATNAT.

Enfin, la période de retour est une notion probabiliste qui décrit la fréquence à laquelle un événement d'une certaine intensité est susceptible de se reproduire. Exprimée en années, elle aide à quantifier le risque associé à différents scénarios d'inondation. Par exemple une crue dont la période de retour est de 100 ans a chaque année 1 chance sur 100 de se produire : la crue est alors qualifiée de centennale.

La période de retour  $T$  de la variable  $X$  s'exprime comme :

$$T = \frac{1}{P(x)}$$

où  $P(x)$  est la probabilité de dépassement de la hauteur d'eau  $x$  sur une année.

## Exposition du territoire français

En considérant l'importance des enjeux associés aux risques naturels, il est primordial de souligner que les inondations représentent en France le risque naturel le plus important. D'après les données fournies par le Ministère de la Transition Écologique et de la Cohésion des Territoires [4], il est estimé que près de 18 millions de personnes résident dans des zones susceptibles d'être affectées par des débordements fluviaux, et 1,5 millions sont potentiellement exposées aux dangers liés aux submersions marines. Ainsi, le nombre total d'individus vivant dans des secteurs à risque d'inondation s'élève à environ 18,5 millions, soit environ 27,3% de la population française. D'après les données de l'INSEE, la taille moyenne des ménages en France était de 2,16 personnes en 2019. Cela représente donc environ 8,6 millions de ménages.

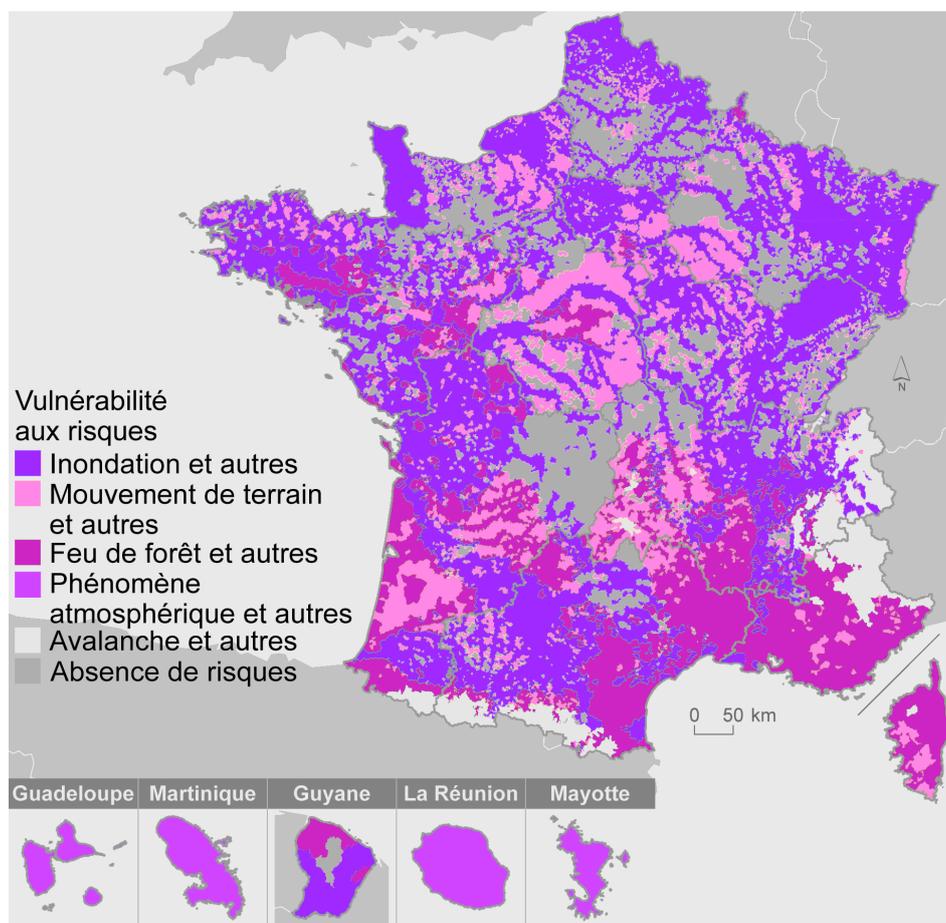


FIGURE 1.8 – Risques climatiques en France (*Ministère de la Transition Écologique et de la Cohésion des Territoires* [25])

L'augmentation du risque inondation en France est exacerbée par des facteurs tels que le changement climatique, qui intensifie la fréquence et l'ampleur des précipitations, contribuant ainsi aux débordements fluviaux et aux submersions marines. Une multiplication des épisodes de crues soudaines est observée. Ces dernières sont caractérisées par leur brièveté mais également par leur extrême intensité, et sont susceptibles de provoquer des inondations dévastatrices. En effet, selon le dernier rapport du GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat) [3], un scénario à  $+1,5^{\circ}\text{C}$  pourrait multiplier par 1,5 la fréquence de précipitations, ce qui augmenterait la survenance d'événements de grande ampleur. Plus généralement, le changement climatique a donc tendance à faire diminuer les périodes de retour.

De surcroît, l'expansion urbaine, en réduisant la perméabilité des sols, aggrave le phénomène de ruissellement, mettant en lumière la vulnérabilité accrue des zones construites à proximité des cours d'eau ou dans des bassins inondables.

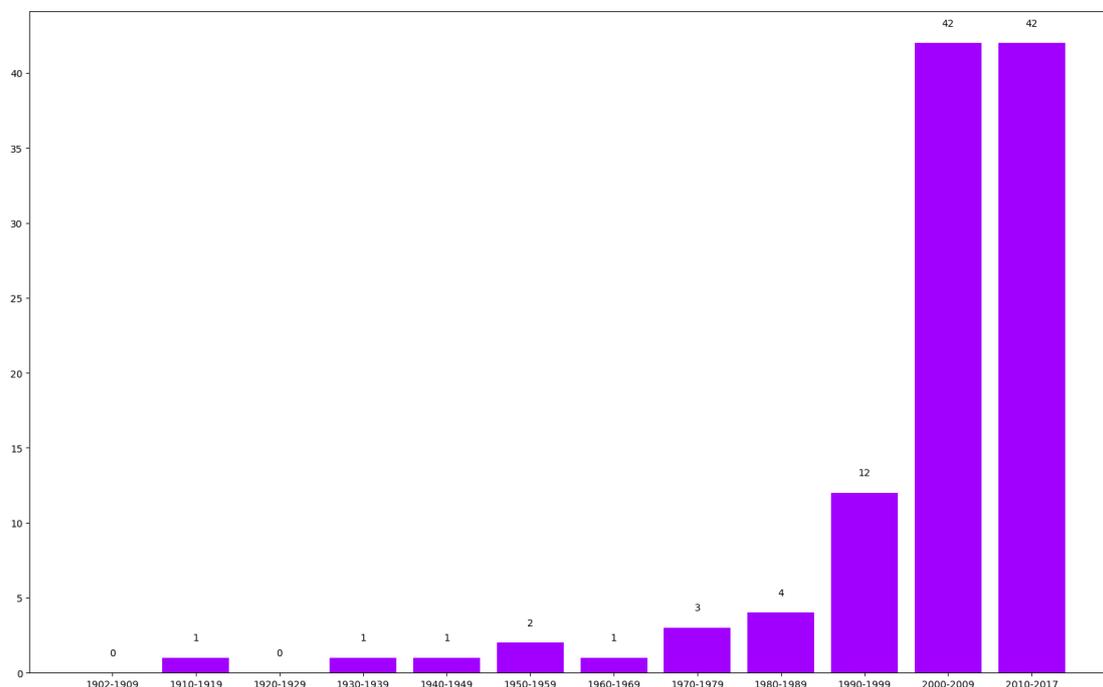


FIGURE 1.9 – Évolution du nombre d'inondations dommageables en France (*Vie Publique* [31])

### Cartographie des zones inondables : un outil législatif suffisant ?

La cartographie des zones inondables en France constitue donc un outil essentiel, permettant une meilleure anticipation et préparation face à ces événements potentiellement dévastateurs. Cette démarche s'inscrit dans le cadre de la Directive Inondation, adoptée par l'Union Européenne, qui vise à évaluer et gérer les risques d'inondations dans les États membres. En France, l'établissement des Plans de Prévention des Risques d'Inondation (PPRI) ainsi que la réalisation d'atlas des zones inondables facilitent l'identification des zones les plus vulnérables. Ces cartes, accessibles au public via des plateformes gouvernementales comme Géoportail, offrent une vision précise des territoires exposés aux risques fluviaux et maritimes.

En intégrant la variabilité des risques d'inondation sur l'ensemble du territoire français, il apparaît que tous les espaces ne sont pas égaux face à cette menace. La diversité géographique et climatique de la France engendre des vulnérabilités spécifiques selon les régions. Par exemple, les zones côtières sont particulièrement exposées aux submersions marines, tandis que les bassins fluviaux peuvent subir des débordements importants lors de fortes pluies ou de la fonte des neiges.

Cette approche différenciée permet aux autorités locales et nationales d'adapter leurs stratégies de prévention et de gestion des crises. Les mesures d'aménagement du territoire, les normes de construction, et les plans d'évacuation sont ainsi spécifiquement conçus en fonction du niveau de risque établi pour chaque zone. En outre, cette connaissance fine des risques facilite la sensibilisation et la préparation des populations résidentes dans les zones à risque, renforçant ainsi la résilience des communautés face aux inondations.

Dans les zones identifiées comme fortement exposées, les assureurs, quant à eux, peuvent exiger des mesures de prévention supplémentaires de la part des propriétaires, telles que la surélévation des bâtiments ou l'installation de systèmes de protection contre les inondations. Ils peuvent également refuser d'assurer certaines propriétés jugées trop à risque ou appliquer des franchises élevées. Cette approche incite les propriétaires à prendre des mesures de mitigation et encourage un aménagement du territoire plus résilient.

Face à cette réalité, en 2023, un constat se dégage : moins d'un tiers des communes françaises, touchées totalement ou partiellement par une Exposition au Risque d'Inondation Potentielle (EAIP), sont équipées d'un PPRI ou d'un plan multirisques incluant l'inondation, et seulement un quart des communes affectées par l'EAIP liée à la submersion marine disposent d'un Plan de Prévention des Risques Littoraux (PPRL) ou d'un plan multirisques englobant cette spécificité.

Bien que la cartographie des zones inondables soit un outil précieux, il est naturel de se demander si elle est suffisante pour faire face à l'ampleur et à la complexité du risque d'inondation. En effet, ces cartes statiques ne prennent pas en compte la dynamique des crues ni l'évolution de l'urbanisation. De nouvelles approches de cartographie dynamique, intégrant des modèles hydrauliques et des données en temps réel, pourraient permettre une meilleure appréhension du risque et une réponse plus adaptée en cas d'événement.

### **1.2.3 Impacts du changement climatique**

À mesure que le thermomètre planétaire s'affole, les impacts du changement climatique sur le risque d'inondation dessinent une réalité en constante évolution.

#### **Vision historique**

Depuis les années 1980, la France fait face à une recrudescence significative des événements pluvieux intenses et des inondations, en lien direct avec l'évolution du climat sous l'effet des activités humaines.

Les épisodes cévenols meurtriers dans le sud-est, les crues dévastatrices de la Seine et de la Loire, les inondations côtières lors des tempêtes hivernales sont autant de phénomènes qui se sont amplifiés en fréquence et en intensité.

Par exemple, la crue centennale de la Seine en 1910, qui avait atteint 8,62 m à Paris, était considérée comme un événement exceptionnel. Or, son niveau a atteint en 2016, une hauteur de 6,10 m, soit le record depuis 1982. [14]

Les inondations de juin 2016 dans le Loiret et l'Essonne, consécutives à des pluies diluviennes, ont causé pour 1,4 milliard d'euros de dommages aux biens et aux infrastructures.

En décembre 2010, la tempête Xynthia a engendré une submersion marine dévastatrice sur la côte atlantique, faisant 47 victimes et détruisant de nombreuses habitations.

Ces événements récents sont révélateurs d'une tendance lourde : le risque inondation s'aggrave sous l'effet du changement climatique.

Les causes sont multiples : hausse du niveau moyen des océans de 20 cm depuis 1900, recrudescence des pluies intenses liée au réchauffement, fonte accélérée des glaciers et des calottes glaciaires continentales, artificialisation croissante des sols qui réduit l'infiltration des eaux pluviales.

Le constat est sans appel, les zones inondables s'étendent, touchant de plus en plus de biens et de personnes.

### **Vision prospective**

D'autre part, les projections climatiques pour les prochaines décennies sont particulièrement inquiétantes selon les différents scénarios du GIEC. Le niveau des océans pourrait continuer de s'élever de 0,3 à 1 mètre d'ici 2100, selon le scénario SSP5-8,5, menaçant directement les zones côtières basses et les estuaires. Le GIEC insiste sur le fait que les impacts sur les sociétés ne seront pas les mêmes en fonction des niveaux de réchauffement.

Les épisodes de pluies intenses devraient s'intensifier, avec des conséquences dramatiques sur les crues soudaines des fleuves et rivières. Météo-France prévoit une augmentation de la fréquence et de l'intensité des tempêtes hivernales, source de submersions marines dévastatrices. L'Observatoire National sur les Effets du Réchauffement Climatique (ONERC) souligne que les zones inondables vont continuer de s'étendre de manière inexorable, notamment dans les grandes agglomérations où l'imperméabilisation des sols est forte.

Tandis que les assureurs font déjà face à une hausse des indemnités liées aux inondations, menaçant l'équilibre du système assurantiel, les dommages économiques risqueraient donc de s'envoler, avec des coûts de reconstruction et de réparation toujours plus élevés.

## Les impacts en assurance

L'aggravation du risque inondation en France sous l'effet du changement climatique a des conséquences majeures pour le secteur de l'assurance.

Premièrement, les indemnisations versées par les assureurs suite aux inondations ne cessent d'augmenter, menaçant l'équilibre du système assurantiel. Selon la CCR, le coût des inondations en France a été multiplié par 4 entre les périodes 1989-1998 et 2009-2018.

La CCR, qui garantit la couverture des risques de catastrophes naturelles, a vu son exposition sensiblement augmenter. Ce modèle inspire d'ailleurs d'autres pays, comme l'Allemagne, qui envisagent de le reproduire. Dans un contexte de changement climatique entraînant une augmentation de la fréquence et de l'intensité des événements naturels extrêmes, les coûts associés à ces sinistres pourraient croître encore plus. Dans ce contexte, il est légitime de s'interroger sur les adaptations qui pourraient être nécessaires pour que ce régime demeure efficace et pérenne.

D'autre part, confrontés à une hausse des coûts liés aux catastrophes naturelles, certains assureurs commencent déjà à se désengager de certains risques, comme pour les habitations situées en zone inondable. Par exemple, en 2023, les catastrophes naturelles ont coûté 6,5 milliards d'euros aux assureurs français. Face à cette situation, le président de l'Organisation Non Gouvernementale (ONG) Les ateliers du futur, Thierry Langreny, qui a également dirigé un rapport sur l'avenir de l'assurance face aux risques climatiques, souligne que les assureurs "sont de plus en plus exposés" [17].

Plutôt qu'un désengagement total, la majorité des assureurs semble pour l'instant privilégier des approches plus ciblées, telles que la mise en place de zoniers géographiques de risques et l'ajustement des tarifs en fonction de l'exposition aux risques. Le choix de sur-tarifé les primes pour tenir compte de l'aggravation du risque pourrait en revanche rendre l'assurance inabordable pour de nombreux ménages, et potentiellement créer des "déserts assurantiel" dans les zones à risque.

Enfin, les réassureurs privés autres que la CCR, qui couvrent les assureurs en cas de catastrophe, pourraient se montrer plus frileux face à la multiplication des événements extrêmes. Cela obligerait les assureurs à garder une part plus importante des risques, menaçant leur solvabilité.

Cela résonne comme écho au discours que tenait Henri de Castries, ancien PDG d'Axa, à l'occasion de la COP21 en 2015, lorsqu'il affirmait : "un monde à +2°C pourrait encore être assurable, mais un monde à +4°C ne le serait certainement plus" [30]. Alors qu'à l'époque, sa déclaration avait suscité l'étonnement, elle se trouve aujourd'hui confirmée.

## 1.3 Étude de l'état de l'art de la modélisation du risque inondation

Le modèle CAT (Catastrophe) est un outil de modélisation probabiliste utilisé pour évaluer les risques et les pertes potentielles liées aux catastrophes naturelles telles que les tremblements de terre, les ouragans, les inondations, etc.

### 1.3.1 Composantes d'un modèle CAT

Un modèle CAT se compose généralement de plusieurs modules, et en particulier des modules aléa, exposition, vulnérabilité et financier. Ces modules sont représentés sur la figure 1.10 et seront détaillés par la suite.

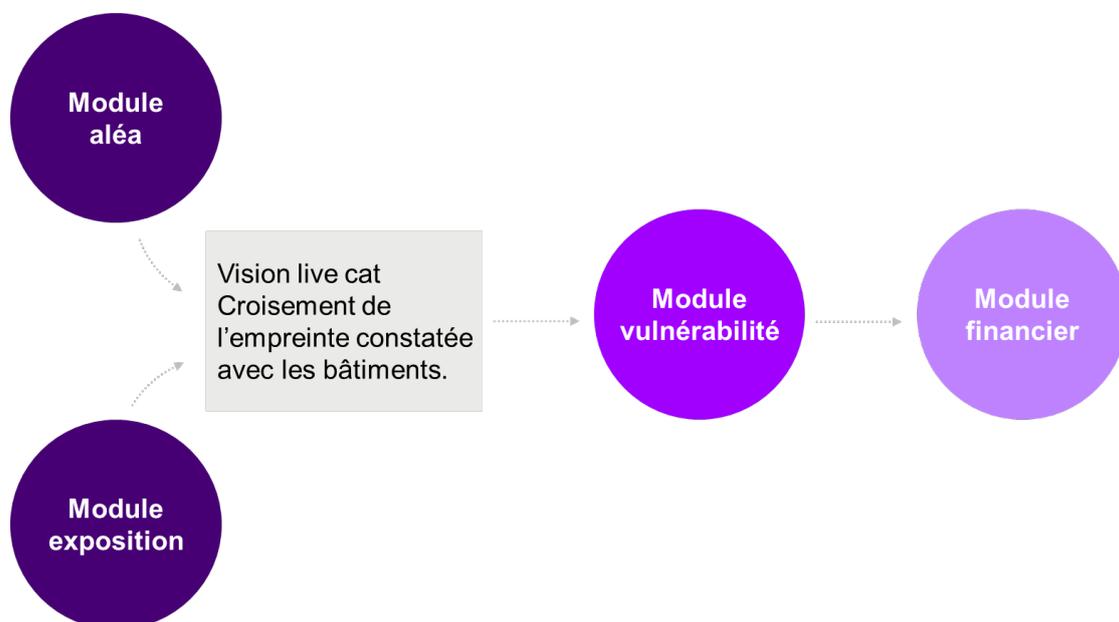


FIGURE 1.10 – Composantes d'un modèle CAT

#### Module Aléa

Le module d'aléa est un composant essentiel des modèles CAT, car il permet de simuler l'occurrence et l'intensité des phénomènes naturels potentiellement catastrophiques. Ce module repose généralement sur des modèles probabilistes sophistiqués, alimentés par des données historiques et scientifiques.

Dans le cadre des inondations, il vise en particulier à simuler l'occurrence et l'intensité des événements de crue et d'inondation. Il repose généralement sur des modèles hydrologiques et hydrauliques, alimentés par des données historiques sur les précipitations, les

débits de rivière, les niveaux d'eau, etc.

La modélisation hydrologique simule la transformation des précipitations en écoulement de surface et en infiltration dans le sol. Elle tient compte de facteurs tels que :

- les caractéristiques du bassin versant (topographie, type de sol, couverture végétale) ;
- l'intensité, la durée et la répartition spatiale des précipitations ;
- les conditions initiales d'humidité du sol.

Les modèles hydrologiques produisent des estimations des débits de pointe et des volumes d'écoulement pour différents scénarios de précipitations. Cela permet de connaître les niveaux d'eau à la suite d'un probable événement.

Pour estimer l'incertitude inhérente aux événements d'inondation, le module d'aléa effectue généralement un grand nombre de simulations stochastiques en échantillonnant les distributions de probabilité des précipitations, des débits et des autres variables hydrologiques et hydrauliques. Cela permet de générer une gamme de scénarios d'inondation potentiels avec leurs probabilités d'occurrence associées.

Ces scénarios d'inondation simulés servent ensuite d'entrées pour les modules d'exposition et de vulnérabilité afin d'estimer les dommages potentiels aux biens exposés et les pertes financières résultantes. La précision du module d'aléa est importante pour une évaluation fiable du risque d'inondation dans les modèles CAT.

Dans le cadre de cette étude, un modèle *live* CAT sera étudié. La particularité est que le module aléa considérera le phénomène dans sa dimension réelle, sans passer par des simulations.

### **Module Exposition**

Le module exposition dans un modèle CAT est responsable de la localisation des biens assurés, ainsi que de la collecte d'informations, tant sur leur nature que sur leur valeur.

Cette étape clé consiste à caractériser le risque pour chaque bien assuré. En effet, les biens ne sont pas tous égaux face au risque d'inondation. Il faut ainsi tout d'abord trouver les sites présents à l'intérieur de l'empreinte d'inondation. De surcroît, la gestion du risque inondation nécessite une précision accrue, puisqu'une maison à seulement quelques mètres d'une autre inondée peut très bien avoir été épargnée.

Ce module passe ainsi tout d'abord par l'estimation des localisations géographiques précises des risques assurés (coordonnées, code postal, ville, etc.) pour permettre leur prise en compte par le module d'aléa. Pour cela, l'utilisation du géocodage est primordiale, afin de croiser les données du portefeuille avec les données cadastrales. Cela se concrétise

par une conversion des adresses en coordonnées géographiques.

Une fois cela estimé, il faut également prendre en compte les caractéristiques détaillées des biens assurés, et notamment l'étage du bien assuré, puisqu'il est raisonnable de considérer qu'un appartement situé à un étage élevé n'est pas impacté par les inondations.

En outre, le module intègre les informations détaillées sur les risques assurés telles que les couvertures (bâtimens, contenus, pertes d'exploitation), le type de construction, l'activité, et les sommes assurées. Ces dernières représentent la valeur économique du bien et sont indiquées dans le contrat d'assurance. La valeur du bien se compose de trois garanties, à savoir la garantie bâtiment couvrant les dégâts liés à la structure du bien, la garantie contenu portée sur les coûts liés aux objets assurés, et la garantie couvrant les pertes liées à une interruption d'activité en cas de catastrophe.

Ces informations permettent au module de vulnérabilité d'évaluer correctement l'impact potentiel d'un événement sur chaque risque. L'assureur peut jouer de façon importante sur ce module via sa politique de souscription ou de renouvellement, notamment sur les zones géographiques avec des risques plus importants.

### **Module vulnérabilité**

Le module vulnérabilité est utilisé pour évaluer l'impact des événements catastrophiques sur les biens assurés. Il tient compte de l'aléa modélisé (fréquence et intensité des événements) ainsi que de l'exposition des biens (localisation, type de construction, etc.).

L'indicateur le plus souvent utilisé est le taux de destruction, qui se définit comme le rapport entre la charge du sinistre (perte financière) et la somme assurée (valeur du bien). Cependant, la charge du sinistre peut différer selon la violence de la catastrophe et les caractéristiques du bien.

En général, pour tenir compte de ces facteurs, des courbes de vulnérabilité sont d'abord tracées afin d'estimer le pourcentage de destruction d'un bien en fonction de l'intensité de l'événement, souvent en fonction de la hauteur d'eau. Ces courbes ont une forme caractéristique, très pentue pour les premiers centimètres d'eau et plus linéaire ensuite.

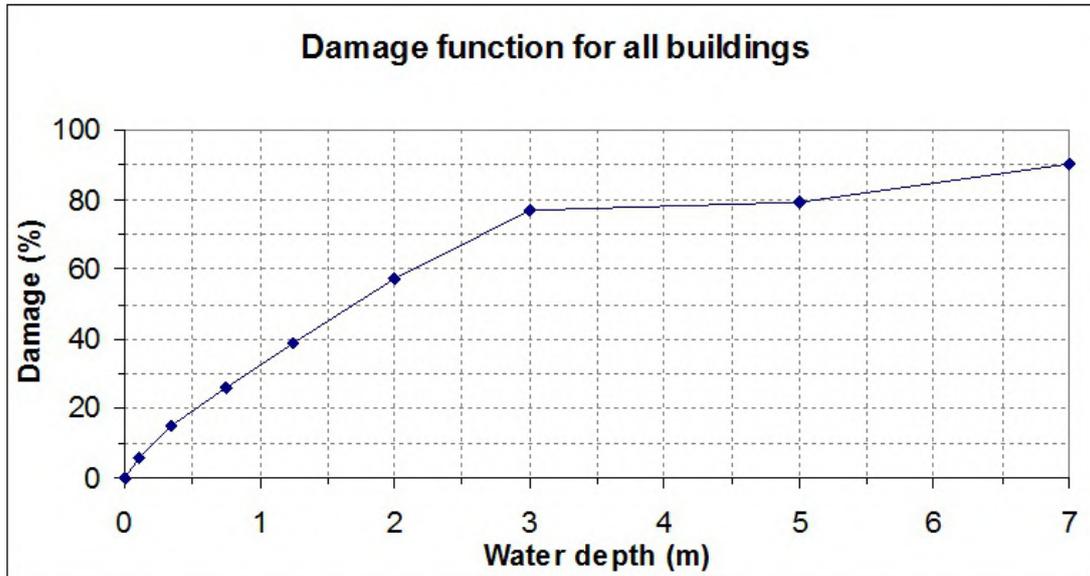


FIGURE 1.11 – Exemple de courbe de vulnérabilité (*CDEMA* [9])

Les courbes de vulnérabilité peuvent être ensuite affinées pour mieux correspondre aux différents types de biens (résidentiels, commerciaux, industriels) et prendre en compte des facteurs comme le type de construction (maison individuelle, immeuble), l'âge, les matériaux utilisés, et l'occupation (rez-de-chaussée, étages supérieurs). Cela reflète le fait que par exemple, un appartement au rez-de-chaussée ne sera pas impacté de la même manière qu'un appartement à un étage supérieur.

Ces taux de destructions sont difficiles à chiffrer de manière robuste, faute d'historique suffisant, et constituent souvent une estimation par avis d'experts, ou se basent sur les sinistres historiques avec pour hypothèse que le passé reflète le présent. Des ajustements sont parfois appliqués, comme une inflation du taux de destruction pour les bâtiments plus anciens.

Le module vulnérabilité est essentiel car il traduit les événements catastrophiques simulés en pertes financières pour les biens assurés. Son calibrage précis permet d'obtenir des estimations fiables des pertes potentielles. Un mauvais calibrage peut conduire à une sous ou sur-estimation significative des pertes.

L'objectif principal de cette classification est de regrouper les biens assurés en différentes catégories homogènes en termes de risque, afin de pouvoir leur attribuer des courbes de vulnérabilité appropriées. Cela permet d'affiner les estimations de pertes financières pour chaque classe de risque.

## Module Financier

Le module financier est l'étape finale de la modélisation des risques CAT dans l'assurance. Son rôle est de traduire les pertes physiques estimées par le module de vulnérabilité en pertes financières nettes réelles pour l'assureur, en tenant compte de toutes les conditions contractuelles complexes des polices d'assurance et des traités de réassurance.

En effet, c'est sur ce module que l'assureur possède un fort levier afin de limiter son exposition, et il peut avoir fait le choix de partager son risque avec un réassureur ou un coassureur. Des franchises et plafonds sont également appliqués. Au final, les pertes nettes peuvent s'avérer nettement inférieures aux pertes brutes.

Le module financier applique donc les franchises, limites de garantie, sous-limites, coassurances, réassurances et autres clauses spécifiques à chaque site, police, compte, assureur et réassureur concerné.

Le module financier permet ainsi d'obtenir une vision précise des pertes selon différentes perspectives, que ce soit pour l'assureur, le réassureur ou le rétrocessionnaire.

### 1.3.2 Pratiques et outils de marché existants

Les assureurs et réassureurs utilisent plusieurs outils de modélisation des catastrophes naturelles pour évaluer leur exposition aux risques d'inondation.

#### Outils existants

Les principaux modèles sont RMS, AIR et Impact Forecasting.

**RMS (Risk Management Solutions)** RMS est un fournisseur de modèles de catastrophes naturelles utilisés par les assureurs pour quantifier leur exposition aux risques. Pour le risque inondation, RMS propose des modèles qui simulent les inondations fluviales et côtières à l'échelle locale et régionale. Ils prennent en compte des facteurs comme la topographie, les données historiques d'inondations et les prévisions météorologiques pour estimer la probabilité et l'intensité d'événements futurs. Cela aide les assureurs à tarifier plus précisément leurs contrats et à mieux provisionner leurs réserves.

**AIR (Applied Insurance Research)** AIR développe également des modèles de catastrophes naturelles utilisés par les assureurs. Pour le risque inondation, leurs modèles combinent des données sur les précipitations, les débits des cours d'eau et les caractéristiques des bassins versants pour simuler des scénarios d'inondations fluviales. Cela permet aux assureurs d'évaluer leur exposition et de mieux sélectionner les risques à assurer.

**Impact Forecasting** Impact Forecasting est une filiale de courtage d'Aon spécialisée dans la modélisation des risques. Leur modèle d'inondation utilise des données de télédétection et des simulations hydrauliques pour cartographier les zones inondables et estimer les dommages potentiels. Cela permet aux assureurs de mieux comprendre leur exposition et d'optimiser leur couverture de réassurance.

### **Limites**

Les assureurs et réassureurs utilisent donc plusieurs outils de modélisation des catastrophes naturelles pour évaluer leur exposition aux risques d'inondation. Bien que ces modèles apportent des avancées significatives, aucun d'entre eux ne permet de considérer une inondation dans sa dynamique réelle, car ils se basent sur des simulations.

Les modèles RMS et AIR simulent des scénarios d'inondations fluviales et côtières à partir de données historiques, de prévisions météorologiques et de caractéristiques des bassins versants. Cela permet d'estimer la probabilité et l'intensité d'événements futurs, mais ne reflète pas la réalité d'une crue en temps réel. Ces modèles aident surtout les assureurs à tarifier leurs contrats.

Impact Forecasting utilise des données de télédétection et des simulations hydrauliques pour cartographier les zones inondables et estimer les dommages potentiels. Cela aide les assureurs à mieux comprendre leur exposition et à optimiser leur couverture de réassurance.

En résumé, tous ces outils permettent de mesurer et de quantifier le risque d'inondation de manière plus fine, mais aucun ne peut se substituer à une évaluation des dommages réels suite à un événement. Les assureurs doivent donc attendre la remontée des sinistres et la publication de l'arrêt de catastrophe naturelle pour savoir quelles zones sont touchées et indemniser les sinistrés.

### **1.3.3 L'imagerie satellite comme méthode d'impulsion**

À la suite d'une inondation, il y a souvent un délai important avant que les informations sur l'étendue et la gravité des dégâts ne remontent aux assureurs, retardant ainsi le processus d'estimation des pertes. Or d'un autre côté, il est parfois nécessaire pour les compagnies d'assurance d'évaluer rapidement un montant de provisions.

### **La réponse à un besoin**

Le provisionnement en assurance est le processus par lequel l'assureur met de côté des fonds pour couvrir des obligations futures, telles que des sinistres ou des pertes potentielles.

Lorsqu'il s'agit de provisionner les sinistres, la réactivité permet non seulement d'assurer une indemnisation efficace et opportune aux assurés, mais aussi de limiter l'impact financier sur les compagnies d'assurance.

De plus, dans un contexte de changement climatique où la fréquence et l'intensité des événements météorologiques extrêmes tendent à augmenter, la capacité à provisionner rapidement les sinistres devient un enjeu stratégique majeur pour la pérennité et la compétitivité des compagnies d'assurance. En effet, la prise en compte de l'augmentation, à la fois en fréquence et en sévérité, des événements naturels, doit être répercutée dans les méthodes de calcul des provisions.

Selon le Groupe de Travail sur le Provisionnement des Sinistres Non-Vie de l'Institut des Actuaires, l'hypothèse principale du provisionnement classique est que "le développement de la sinistralité future se comporte comme celle du passé" [18]. Dans le contexte actuel de réchauffement climatique et d'observation de phénomènes de plus en plus violents, cette hypothèse n'est plus forcément valide.

Les actuaires doivent alors se baser sur des estimations à dire d'experts pour évaluer l'ampleur des pertes, ce qui manque souvent de précision. Cela peut entraîner des écarts significatifs entre les provisions pour sinistres à payer (PSAP) constituées et les besoins réels, générant ainsi des pertes pour les assureurs.

En raison du délai de déclaration des sinistres, une partie importante des provisions doit être constituée sous forme de provisions pour sinistres non encore déclarés (IBNR - Incurred But Not Reported). L'évaluation de ces provisions IBNR, qui correspondent aux sinistres déjà survenus mais non encore officiellement déclarés à l'assureur, est particulièrement complexe et incertaine.

Dans un contexte de catastrophe naturelle, il peut être difficile d'estimer l'étendue de l'inondation, sans accès aux zones touchées. L'apport de données satellites peut alors s'avérer utile, notamment en fournissant des données précieuses rapidement et sur de vastes zones, ce qui permet une évaluation plus rapide des sinistres pour les compagnies.

Face à cette problématique, des outils émergents comme la data science apparaissent comme une solution prometteuse. En particulier, dans le cadre de l'étude des inondations par débordement, l'analyse avancée de données, y compris celles issues de l'observation satellite, peuvent servir de levier et offrir la possibilité d'accélérer et d'affiner considérablement l'évaluation des dommages, et ainsi de répondre aux problématiques précédemment énoncées rencontrées par les assureurs.

### **Les avantages**

L'utilisation de l'imagerie satellite présente de nombreux avantages pour répondre aux besoins des assureurs en termes d'évaluation rapide et précise des dommages liés aux

inondations. Tout d'abord, la couverture satellitaire permet d'obtenir une vision d'ensemble de la zone sinistrée, y compris dans des zones difficilement accessibles, et ce dans un délai très court. Cela permet de cartographier rapidement l'étendue des zones inondées et d'identifier les secteurs les plus touchés.

De plus, les techniques d'analyse d'images offrent la possibilité d'automatiser l'identification des zones inondées et l'estimation des dommages, rendant le processus plus rapide et moins coûteux.

En combinant ces données satellitaires avec des informations sur l'occupation des sols et la vulnérabilité des bâtiments, il devient possible d'évaluer de façon précise les dommages subis par les biens assurés. Cela permet aux assureurs de provisionner de manière plus juste et réactive, en s'affranchissant des délais de terrain pour l'évaluation des sinistres. Cette réactivité permet d'assurer une indemnisation efficace des sinistrés tout en limitant l'impact financier pour les compagnies d'assurance.

Enfin, la possibilité de suivre l'évolution de l'événement grâce à des acquisitions satellitaires régulières offre une vision dynamique de la catastrophe, se rapprochant du concept de modèle live CAT. Cela permet d'ajuster en temps réel les provisions constituées et de sécuriser la situation financière des assureurs face à l'augmentation de la fréquence et de l'intensité des inondations.

### **Applications opérationnelles concrètes**

L'utilisation de l'imagerie satellite pour l'évaluation des dommages liés aux inondations présente de nombreuses applications opérationnelles concrètes pour les compagnies d'assurance.

Tout d'abord, ces données permettent d'améliorer significativement le processus de provisionnement des sinistres. En fournissant une évaluation rapide et précise des dommages, les images satellitaires offrent une base solide pour la constitution de provisions adaptées, limitant ainsi les écarts entre les montants provisionnés et les coûts réels de l'événement. Cela contribue à sécuriser la situation financière des assureurs face à l'augmentation de la fréquence et de l'intensité des inondations liée au changement climatique.

Au-delà du provisionnement, les données satellitaires peuvent également être exploitées pour des actions de prévention et de réduction de la vulnérabilité. En identifiant précisément les zones les plus exposées et les biens les plus vulnérables, les assureurs peuvent cibler leurs efforts de sensibilisation et d'accompagnement des assurés. Ils peuvent ainsi encourager la mise en place de mesures de protection adaptées, comme la surélévation des biens ou l'installation de systèmes d'alerte. Cette approche proactive permet de limiter les dommages futurs et de réduire les coûts pour l'assurance.

Enfin, l'utilisation de l'imagerie satellite s'inscrit dans une prise en compte croissante des risques climatiques par les assureurs. En intégrant ces données dans leurs processus d'évaluation et de gestion des risques, les compagnies d'assurance démontrent leur capacité à s'adapter à un environnement en mutation. Cela leur permet également d'améliorer leur communication auprès des assurés et des pouvoirs publics sur ces enjeux, renforçant ainsi leur légitimité et leur rôle de partenaire dans la gestion des risques naturels.

## Chapitre 2

# Cartographie du risque inondation

### 2.1 Données utilisées

Dans le cadre de ce mémoire, des données open data ont été exploitées. L'open data désigne des données numériques librement accessibles et réutilisables par tous. Ces données proviennent généralement d'organismes publics ou privés qui choisissent de les diffuser dans un format ouvert, sans restriction d'accès ni de réutilisation. L'open data permet ainsi de valoriser l'information du secteur public et de stimuler l'innovation en facilitant la création de nouveaux services et applications grâce à la mise à disposition d'un système informationnel riche et fiable.

#### 2.1.1 Les données satellites

En 2023, l'Europe a innové en matière d'accès aux données satellitaires, grâce à l'introduction du "Copernicus Data Space Ecosystem", accessible via [dataspace.copernicus.eu](https://dataspace.copernicus.eu). Cette initiative marque une étape significative dans la facilitation de l'accès aux données pour les utilisateurs, en élargissant considérablement les ressources disponibles pour la recherche, la surveillance environnementale et le développement d'applications liées à l'observation de la Terre.

#### La plateforme Copernicus

Récemment, en janvier 2024, le Copernicus Browser [11] a été créé. C'est une plateforme en ligne centralisée qui permet d'accéder à une vaste quantité de données d'observation de la Terre en libre accès, issues du programme Copernicus de l'Union Européenne. Cette plateforme est très intuitive et permet d'explorer et d'interagir avec les images satellites fournies par les missions Copernicus Sentinels (Sentinel-1<sup>1</sup>, Sentinel-2<sup>2</sup>, Sentinel-3<sup>3</sup> et

---

1. Sentinel-1 est une série de satellites équipés de radars à synthèse d'ouverture, capables de fournir des images de haute résolution grâce à l'envoi de signaux radio vers la Terre.

2. Sentinel-2 est une mission d'observation de la Terre qui utilise deux satellites pour capturer des images multi-spectrales des terres émergées.

3. Sentinel-3 est conçu pour des missions d'océanographie et de surveillance de la végétation.

Sentinel-5P<sup>4</sup>), ainsi que des données complémentaires de haute résolution provenant de missions contributives de l'ESA, des États membres et d'opérateurs tiers internationaux. Par ailleurs, il offre un accès complet aux archives des missions Sentinel-1, Sentinel-2, Sentinel-3 (sur les zones terrestres et côtières) et Sentinel-5P depuis octobre 2016.

Afin de rechercher des données, il suffit de se déplacer sur la carte du monde, et d'indiquer les dates recherchées, et le satellite souhaité. Au-delà de la simple visualisation, le Copernicus Browser permet aux utilisateurs de rechercher et de découvrir facilement les données pertinentes pour leurs besoins spécifiques, grâce à des outils de traitement de données de haute qualité intégrés. Si la consultation est accessible à tous, il faut néanmoins s'inscrire gratuitement afin de pouvoir télécharger les images.

## Les données Sentinel 2

La constellation Sentinel de Copernicus offre ainsi une variété de données satellites pertinentes pour une multitude d'applications environnementales, incluant l'évaluation et la gestion des risques naturels tels que les inondations. Parmi ces satellites, Sentinel 2, qui fournit des images optiques de haute résolution pour les services terrestres, a été celui retenu dans le cadre de cette étude.

Sentinel 2 est équipé de capteurs multispectraux qui capturent des images dans 13 bandes spectrales différentes, couvrant des longueurs d'onde allant de l'ultraviolet proche à l'infrarouge court. Ses données sont mises à jour tous les cinq jours, permettant une disponibilité rapide des données en cas d'inondation. La haute résolution spatiale de ces images, jusqu'à 10 mètres pour certaines bandes, permet une analyse précise des changements à moyenne échelle, ce qui est important pour identifier les zones potentiellement inondées.

## L'indice NDWI

Plusieurs traitements d'images sont disponibles sur la plateforme Copernicus Browser. En particulier, l'indice de différence normalisée en eau (Normalized Difference Water Index - NDWI), calculé à partir des données Sentinel-2, est un outil efficace pour identifier et surveiller l'eau de surface. Cet indice utilise la réflectance dans la bande verte, c'est-à-dire la proportion de lumière verte réfléchiée par une surface, (bande 3 de Sentinel-2, 0,560  $\mu\text{m}$ ) et la bande de l'infrarouge proche (bande 8, 0,842  $\mu\text{m}$ ) selon la formule suivante :

$$NDWI = \frac{(Green - NIR)}{(Green + NIR)}$$

Où Green représente la réflectance dans la bande verte et NIR<sup>5</sup> la réflectance dans la bande de l'infrarouge proche.

---

4. Sentinel-5P (P pour précurseur) est dédié à la surveillance de la composition de l'atmosphère, et assure la continuité des observations atmosphériques en attendant le lancement de Sentinel-5.

5. Near Infrared Reflectance

L'eau absorbe fortement l'énergie dans l'infrarouge proche, tandis que sa réflectance est relativement élevée dans le vert. Cette combinaison de bandes maximise ainsi la réflectance de l'eau de surface et minimise les interférences causées par la végétation et les caractéristiques du sol. Les valeurs de NDWI pour l'eau libre sont généralement supérieures à 0,5, tandis que la végétation a des valeurs plus faibles, généralement entre 0 et 0,2. Cet indice permet donc de distinguer efficacement les zones d'eau des autres surfaces terrestres.

Le NDWI est particulièrement utile pour surveiller les changements dans les masses d'eau, tels que les inondations, les sécheresses et les variations saisonnières des niveaux d'eau, et a donc été exploité dans le cadre de ce travail.



FIGURE 2.1 – Image satellite de l'inondation à Bayonne, NDWI (*Portail Copernicus* [11])

En effet, dans le cadre de l'analyse d'une inondation, l'indice NDWI calculé à partir des données Sentinel 2 peut s'avérer très utile pour identifier les zones potentiellement touchées lors de fortes pluies ou de débordements de cours d'eau.

### 2.1.2 Les données d'altitude

Afin de déceler les potentielles zones inondées, il faut avoir une compréhension précise de la topographie du terrain. Effectivement, les images satellites sont précieuses, mais dans certains cas, elles présentent des limites en matière de résolution spatiale, en particulier en milieu urbain dense où les rues étroites et les petites infrastructures des centres-villes ne sont pas forcément clairement identifiables. Pour pallier ces limites et améliorer la détection des zones à risque en atteignant une résolution de l'ordre de quelques mètres, l'intégration de données altimétriques provenant de modèles numériques de terrain (MNT) s'est avérée utile.

## **BD ALTI**

La BD ALTI (Base de Données Altimétrique) de l'IGN (Institut National de l'Information Géographique et Forestière, et historiquement Institut Géographique National), disponible sur la plateforme Géoservices [22] a été retenue pour cette étude. La BD ALTI est le référentiel numérique décrivant le relief de la France métropolitaine et des départements d'outre-mer. Elle provient du Référentiel à Grande Échelle (RGE) ALTI qui permet l'obtention de MNT avec des résolutions allant de 1 à 25 mètres.

La BD ALTI propose un MNT à 25 mètres de résolution, décrivant le relief du territoire français à moyenne échelle. Cela offre une précision suffisante pour des analyses environnementales à moyenne échelle. Couvrant l'ensemble du territoire national, cette base aide à conserver une homogénéité des données, permettant une comparaison cohérente entre les différents départements d'étude.

Les altitudes sont calculées par rapport au niveau de la mer, défini par le géoïde, qui est une surface équipotentielle de la gravité terrestre approximant le niveau moyen des océans en absence de marées et de courants.

La BD ALTI est mise à jour régulièrement lors de nouvelles acquisitions ou d'évolutions majeures du relief. Cependant, des restrictions s'appliquent sur certaines zones contrôlées (militaires, etc.) où les données sont dégradées ou absentes.

### **Présentation des données**

Les données de la BD ALTI se présentent sous forme de grilles régulières décrivant le relief du territoire national avec un pas de 25 mètres. Elles sont téléchargeables département par département sur le site de l'IGN. Pour chaque département, un dossier contenant plusieurs fichiers est disponible. Il contient notamment un fichier shapefile référençant les dalles disponibles, ainsi que l'ensemble des dalles au format ASCII Grid couvrant le département. Ce dossier comprend également des métadonnées et d'autres informations complémentaires sur les données fournies.

Chaque dalle couvre une surface de 25 km<sup>2</sup> (1000 x 1000 pixels de 25m x 25m). Les formats de données disponibles sont ASCII Grid, GeoTIFF, XYZ et MNT (GeoConcept). Le format retenu est le format ASCII Grid. Le système de projection utilisé est le Lambert-93, une projection conique conforme qui minimise les distorsions sur la France, garantissant ainsi une précision et une cohérence élevées pour les analyses spatiales. Cela permet en effet de tenir compte de la forme ellipsoïdale de la Terre lors de la projection.

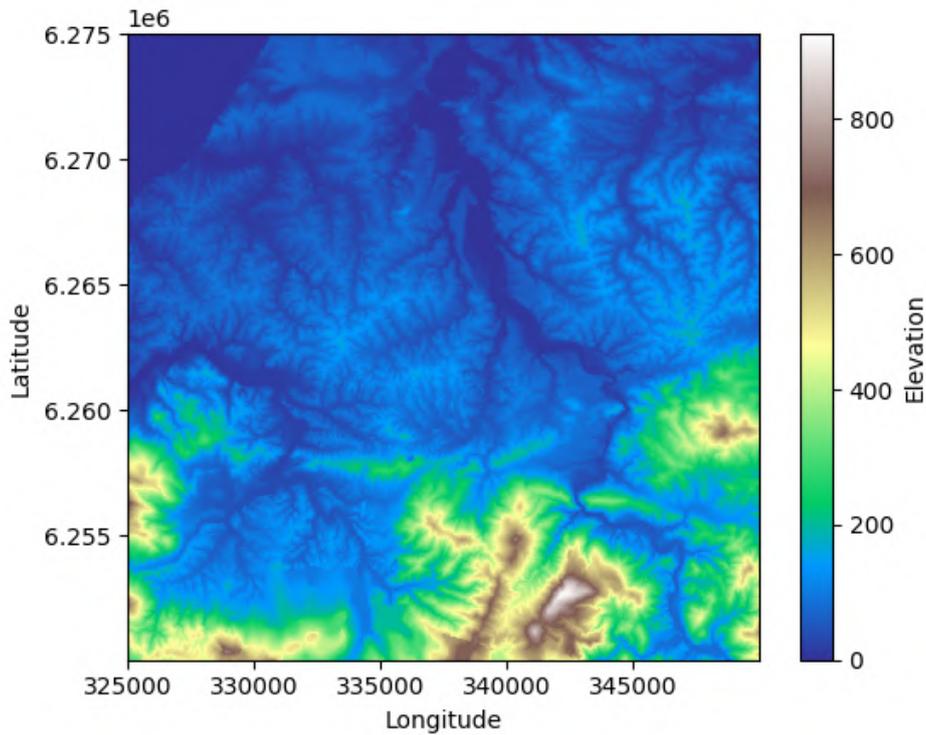


FIGURE 2.2 – Exemple d’une dalle (*BD ALTI* [22])

### RGE ALTI

Une autre base de données disponible qui a été considérée pour ce mémoire est la base RGE ALTI 5m de l’IGN. Bien qu’elle offre une résolution spatiale plus fine, permettant une représentation extrêmement précise du relief, son utilisation n’a pas été envisageable dans le cadre de cette étude.

La raison principale réside dans le volume considérable de données que représentent les dalles RGE ALTI 5m, couvrant une superficie de seulement 5 km<sup>2</sup> chacune. La manipulation et le traitement d’un tel volume de données raster à très haute résolution nécessitent des ressources informatiques en termes de puissance de calcul et de capacité de stockage nettement supérieures à celles disponibles pour mener à bien ce projet.

C’est pourquoi la BD ALTI de l’IGN, avec sa résolution spatiale de 25 mètres, s’est avérée être un compromis judicieux entre précision et faisabilité technique. Bien que moins détaillée que le RGE ALTI 5m, la BD ALTI permet d’avoir un niveau de détail suffisant pour répondre efficacement aux besoins de l’analyse, tout en évitant une surcharge informatique.

### 2.1.3 Les données limnimétriques

Les données limnimétriques sont des données fournissant des mesures précises des niveaux d'eau dans les cours d'eau. Elles jouent elles aussi un rôle dans l'analyse des risques d'inondation, et ont donc été utiles à cette étude. Les données ici utilisées proviennent du réseau de stations de mesure gérées par Hydroportail [15], la base de données nationale de l'hydrométrie en France.

#### Hydroportail

Hydroportail est une application web développée par le Service Central d'Hydrométéorologie et d'Appui à la Prévision des Inondations (SCHAPI), un service technique national rattaché au ministère de la Transition Écologique. Il a remplacé la banque HYDRO en janvier 2022. Ce portail centralisé regroupe les données hydrométriques et météorologiques du réseau de mesures des Services de Prévision des Crues. Il permet d'accéder à des données sur tout le territoire français, y compris dans les territoires d'Outre-mer.

Hydroportail offre un accès libre et gratuit à l'ensemble des données en temps réel et historiques. Cependant, la répartition géographique de ces stations n'est pas homogène sur le territoire national, certaines régions bénéficiant d'une densité de stations assez élevée, et d'autres présentant des lacunes locales en termes de couverture.

Au-delà de la simple mise à disposition des données brutes, Hydroportail propose également une cartographie interactive permettant de visualiser l'emplacement des stations et leurs données associées. Pour chaque station, des informations détaillées sont fournies, comme par exemple les coordonnées GPS de la station, le zéro de l'échelle, le cours d'eau et le bassin versant associés.

Il faut créer un compte gratuitement pour accéder aux données Hydroportail, permettant également d'enregistrer des préférences de visualisation, des listes de stations favorites ou encore des analyses récurrentes. Un module de téléchargement permet également d'extraire facilement les données brutes ou traitées au format souhaité (csv, xml, etc.).

#### Station limnimétrique

Les données sont mesurées dans des stations limnimétriques, qui sont équipées de capteurs qui enregistrent en continu le niveau d'eau à des intervalles de temps réguliers, qui ne sont pas les mêmes pour chaque station. Ces mesures sont ensuite transmises et centralisées dans la base de données.

Chaque station limnimétrique possède plusieurs échelles limnimétriques, en général de 1m et souvent installées en escalier, afin de toujours pouvoir lire la hauteur d'eau. Une échelle limnimétrique se définit grâce à un point de référence appelé "zéro de l'échelle". Ce zéro est spécifique à chaque station et représente une altitude de référence fixe par

rapport à laquelle toutes les mesures de niveau d'eau sont prises. Le zéro de l'échelle est déterminé par des relevés géodésiques précis et est souvent lié au niveau moyen de la mer pour assurer une cohérence entre les différentes stations.

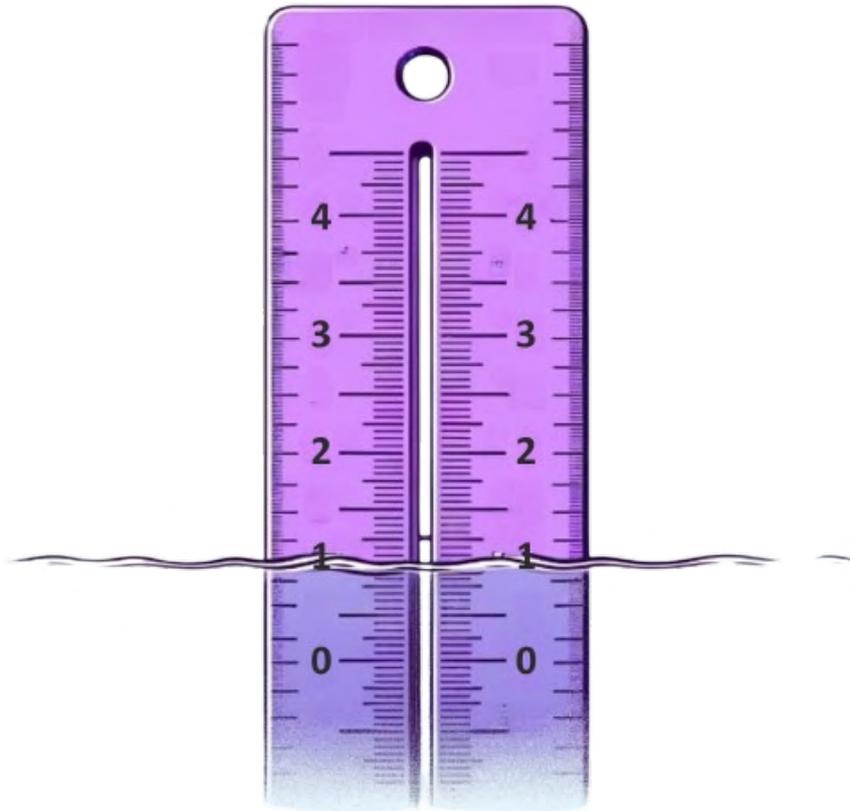


FIGURE 2.3 – Échelle limnimétrique

Par exemple, si le zéro de l'échelle est fixé à un point qui correspond à une hauteur de 5 mètres au-dessus du niveau de la mer, alors toutes les mesures de niveau d'eau enregistrées par la station seront calculées par rapport à ce point de référence. Sur cet exemple, si le niveau d'eau mesuré est de 2 mètres dans la station, il faut comprendre que la hauteur d'eau est de 2m au-dessus du zéro de l'échelle, soit à 7 mètres au-dessus du niveau de la mer.

Images satellites, Copernicus	Modèle numérique de terrain, IGN	Données limnimétriques, Eau France
<p><b>Description des données</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 8 images satellites</li> <li>• Indice NDWI</li> </ul> <p><b>Plateforme</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Copernicus Browser</li> </ul> <p><b>Avantages</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Données gratuites</li> <li>• Données mises à jour tous les 5 jours</li> </ul>	<p><b>Description des données</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Dalles d'altitude carroyant la région avec une résolution de 25m</li> </ul> <p><b>Plateforme</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• BD ALTI</li> </ul> <p><b>Avantages</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Données gratuites</li> <li>• Uniformité sur le territoire français</li> <li>• Précision et faisabilité technique</li> </ul>	<p><b>Description des données</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Rélevés journaliers de hauteurs d'eau de 6 stations sur la région d'étude</li> </ul> <p><b>Plateforme</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Hydroportail</li> </ul> <p><b>Avantages</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Données gratuites</li> <li>• Fournit diverses informations (zéro de l'échelle, coordonnées des stations, etc.)</li> </ul>

TABLE 2.1 – Synthèse des données utilisées

## 2.2 Méthodologies pour la modélisation de l’empreinte physique

Cette section présente les différentes approches et techniques utilisées pour modéliser et quantifier l’empreinte physique de l’inondation.

### 2.2.1 Cadre technique

Cette partie traite des outils nécessaires à la mise en œuvre des méthodologies de modélisation.

#### Les données géospatiales

Les données géospatiales sont des informations qui décrivent des objets ou des événements avec une localisation géographique précise. Elles intègrent des coordonnées géographiques, telles que la latitude et la longitude, pour situer précisément ces entités dans l’espace.

Les données géospatiales se divisent principalement en deux types : les données vectorielles et les données matricielles (ou *raster*).

Les données vectorielles représentent les objets géographiques sous forme de points, de lignes ou de polygones. Chaque élément vectoriel est défini par des coordonnées précises (x, y) et peut contenir des attributs supplémentaires. Il y a divers types de données vectorielles :

Type de données vectorielles	Description
Points	Représentent des emplacements spécifiques, comme des arbres.
Lignes	Représentent des objets linéaires comme une frontière, des routes ou des rivières.
Polygones	Représentent des zones fermées comme des bâtiments ou des lacs.

TABLE 2.2 – Types de données vectorielles

Les données matricielles se composent de grilles de cellules (pixels), où chaque cellule a une valeur numérique représentant une caractéristique de la surface terrestre. Elles sont souvent utilisées pour représenter des phénomènes continus comme :

Type de données matricielles	Description
Images satellites	Chaque pixel peut représenter une couleur ou une intensité de lumière réfléchie.
Modèles numériques de terrain (MNT)	Chaque pixel représente une altitude.

TABLE 2.3 – Types de données matricielles

Ces deux types de données ont donc été essentiels à la réalisation de ce mémoire, puisqu'ils ont permis la visualisation de cartes. En facilitant les traitements géospatiaux, ces données ont été utiles pour analyser, modéliser et comprendre les phénomènes étudiés.

### Systèmes de coordonnées

Un système de coordonnées est un ensemble de règles mathématiques et géodésiques permettant de définir la position exacte d'un point sur la surface de la Terre. Ce système utilise des valeurs numériques appelées coordonnées géographiques, qui incluent généralement la latitude, la longitude, et parfois l'altitude.

Le système WGS 84 (World Geodetic System 1984) est un système de coordonnées classique, qui utilise des coordonnées géographiques (latitude et longitude) pour définir des positions. Ce système est couramment utilisé pour la navigation GPS et les applications géospatiales internationales car il offre une représentation précise à l'échelle mondiale. Les coordonnées en WGS 84 sont exprimées en degrés et permettent de localiser des points partout sur la planète. C'est le système le plus connu.

Le système Lambert 93 est un système de coordonnées projeté spécifiquement conçu pour la France. Il utilise la projection conique conforme de Lambert, qui minimise les distorsions pour les régions de taille modérée comme un pays. Lambert 93 est particulièrement

utile pour les applications locales et régionales en France, car il fournit une précision accrue pour les calculs de distance, d'aire et de direction par rapport aux coordonnées géographiques. Les coordonnées en Lambert 93 sont exprimées en mètres, ce qui facilite les calculs cartographiques et les analyses spatiales à grande échelle.

Ces deux systèmes ont été utilisés dans le cadre de ce mémoire. La conversion entre ces systèmes est possible et relativement simple grâce à des outils logiciels spécialisés. Cette interopérabilité permet de combiner des données provenant de sources diverses.

## Diagrammes de Voronoï

Les diagrammes de Voronoï, nommés d'après le mathématicien russe Georgy Voronoï, sont des constructions géométriques qui partitionnent un espace métrique en régions distinctes. Le principe de base repose sur un ensemble de points définis au départ, appelés sites ou générateurs, répartis dans cet espace. Chaque région, ou cellule de Voronoï, est définie comme l'ensemble des points qui sont plus proches de son site respectif que de tout autre site.

Soit  $E$  un espace euclidien et  $S = p_1, \dots, p_n$  un ensemble fini de sites dans  $E$ . Le diagramme de Voronoï de  $S$  est une subdivision de  $E$  en  $n$  cellules, où la cellule  $R_i$  correspondant au site  $p_i$  est définie comme :

$$R_i = \{x \in E : d(x, p_i) \leq d(x, p_j), \forall j \neq i\}$$

où  $d(x, y)$  représente la distance entre les points  $x$  et  $y$ .

Typiquement, cette distance est euclidienne, mais d'autres métriques peuvent être utilisées.

Chaque cellule  $R_i$  contient tous les points de l'espace qui sont plus proches de  $p_i$  que de tout autre site. La frontière entre deux cellules adjacentes est constituée des points équidistants de leurs générateurs respectifs, formant ainsi un hyperplan affine dans  $E$ .

Dans le cadre de ce mémoire, le concept des diagrammes de Voronoï a été appliqué pour déterminer les zones d'influence des stations limnimétriques existantes. Cette approche permet d'attribuer à chaque point de l'espace étudié la station la plus proche, palliant ainsi l'absence d'un réseau de mesure continu. De plus, elle permet une solution alternative au lissage des niveaux d'eau entre les stations, ce qui aurait été plus coûteux en termes de puissance de calcul.

## Métriques d'évaluation

Plusieurs métriques ont été utilisées afin de valider les modèles.

**Précision** La précision, ou *precision*, est le ratio des vrais positifs (TP) sur le nombre total de prédictions positives (TP + FP). Elle indique la proportion des prédictions positives qui sont réellement correctes.

$$Precision = \frac{TP}{TP + FP}$$

Avec :

- TP *True Positive* ;
- FP *False Positive*.

**Rappel** Le rappel, ou *recall*, est le ratio des vrais positifs (TP) sur le nombre total d'instances réellement positives (TP + FN). Il mesure la capacité du modèle à identifier toutes les instances positives.

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

Avec :

- TP *True Positive* ;
- FN *False Negative*.

**F1 Score** Le score F1 est la moyenne harmonique de la précision et du rappel. Il fournit une mesure qui équilibre les deux métriques.

$$F1\ Score = 2 \times \frac{Precision \times Recall}{Precision + Recall}$$

## 2.2.2 Traitements de l'Open Data

Les données récupérées ont du être traitées afin de pouvoir être utilisées.

### Données satellites

Deux méthodes de traitement d'images satellites ont été utilisées.

Pour le premier modèle (qui sera détaillé dans le paragraphe 2.3.2), une analyse par différence d'images a été menée. Les étapes suivies sont les suivantes :

1. Acquisition des images : deux images satellites ont été obtenues, une avant l'inondation (état de référence) et une après l'inondation (état inondé).
2. Préparation des images : les deux images ont été sélectionnées pour couvrir exactement la même zone géographique, avec des dimensions identiques et des coordonnées spatiales correspondantes.
3. Calcul de la différence : une soustraction pixel par pixel a été effectuée entre l'image après inondation et l'image de référence.

4. Identification des pixels de changement : les pixels présentant une différence significative ont été identifiés comme potentiellement inondés.
5. Seuillage : un seuil a été appliqué pour distinguer les changements significatifs (inondation) du bruit de fond.
6. Vectorisation des zones inondées : les zones classées comme inondées ont été converties en polygones vectoriels.
7. Projection en coordonnées géographiques : les polygones ont été projetés dans un système de coordonnées GPS pour leur géoréférencement.
8. Cartographie finale : une carte des zones inondées a été générée.

Pour le deuxième modèle (qui sera détaillé dans le paragraphe 2.4.2), huit images satellites Sentinel-2 avec traitement NDWI couvrant la zone ont été récupérées depuis le portail Copernicus pour plus de précision.

Grâce à cela, une empreinte préliminaire des zones potentiellement inondées a pu être obtenue par détection satellitaire unique. Pour ce faire, un algorithme spécifique de traitement d'images a été appliqué sur les images afin de délimiter avec précision les zones inondées. Les étapes de cet algorithme sont les suivantes :

1. Filtrage des couleurs : un filtre a été appliqué pour différencier les zones d'eau (bleues) des zones terrestres (vertes).
2. Identification des pixels d'eau : les pixels correspondant aux zones d'eau ont été identifiés grâce au filtre de couleur.
3. Vectorisation des zones inondées : les zones inondées ont été vectorisées sous forme de polygones.
4. Projection en coordonnées GPS : les polygones ont été projetés dans un système de coordonnées GPS pour permettre leur géoréférencement.
5. Cartographie des zones inondées : une carte des zones inondées a été générée.

### **Données topographiques**

Les dalles BD ALTI, présentées dans la partie 2.1.2, ont été récupérées pour les départements des Landes et des Pyrénées-Atlantiques. Elles ont été utilisées dans le cadre du second modèle, qui sera présenté dans le paragraphe 2.4.2.

Dans un premier temps, les zones inondées identifiées ont permis de localiser les villes touchées par les inondations, et seules les dalles couvrant ces zones ont été conservées. Cela évite d'avoir à traiter des données superflues. Huit dalles ont ainsi été nécessaires. Elles sont présentées à l'annexe D.

Cela a permis d'observer la topographie complète de la région d'intérêt et d'avoir une vue d'ensemble du paysage altimétrique.

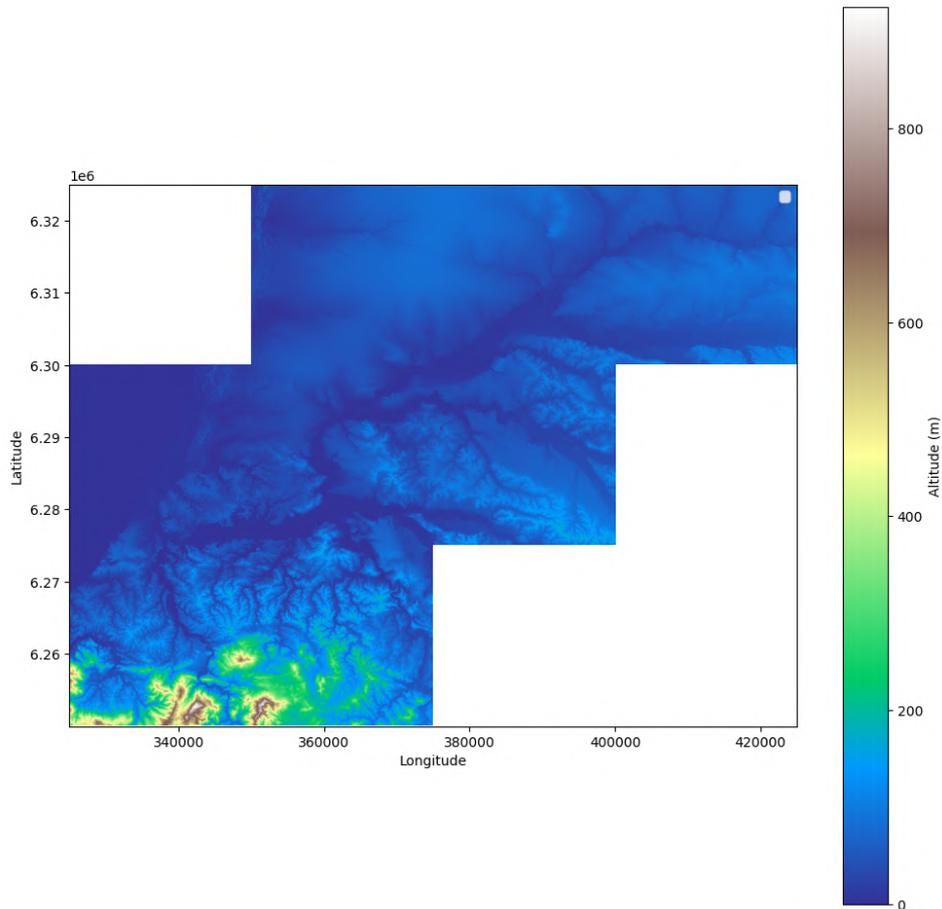


FIGURE 2.4 – Relief de la région d’étude, (*BD ALTI* [22])

Ces dalles ont par la suite été converties en un géodataframe. Un géodataframe est un tableau qui permet de stocker et de manipuler des données géospatiales.

Dans ce géodataframe, chaque ligne représente un pixel de 25m x 25m provenant des dalles BD ALTI. Pour chaque pixel, les informations suivantes sont renseignées :

- Géométrie : la géométrie vectorielle du pixel, à chaque fois un polygone carré de 25m x 25m ;
- Centroïde : les coordonnées du point central (centroïde) du pixel ;
- Altitude : la valeur d’altitude (en mètres) associée à ce pixel.

Initialement, le géodataframe contenait environ 8 millions de lignes, représentant tous les pixels des dalles sélectionnées. Cependant, pour optimiser les traitements ultérieurs, une étape de réduction de la taille des données a été effectuée, pour ne conserver que les pixels qui correspondaient aux communes identifiées comme inondées lors de la détection

par imagerie satellite. Ainsi, le géodataframe final ne contient plus que 2 millions de lignes.

Cette étape de filtrage a permis de réduire considérablement la taille des données à traiter, tout en conservant les informations altimétriques essentielles pour les zones d'intérêt. Cela facilite les traitements ultérieurs et optimise les performances de calcul.

Des données complémentaires ont ensuite été ajoutées :

- Commune associée : pour chaque pixel, la commune à laquelle il appartient a été identifiée et ajoutée dans le géodataframe ;
- Statut d'inondation : les pixels ont été marqués comme "inondés" ou "non inondés" en se basant sur les zones inondées détectées précédemment par imagerie satellitaire.

Une fois le géodataframe complet, il est possible de visualiser les informations altimétriques sous forme de carte. Prenons l'exemple de la ville de Bayonne :

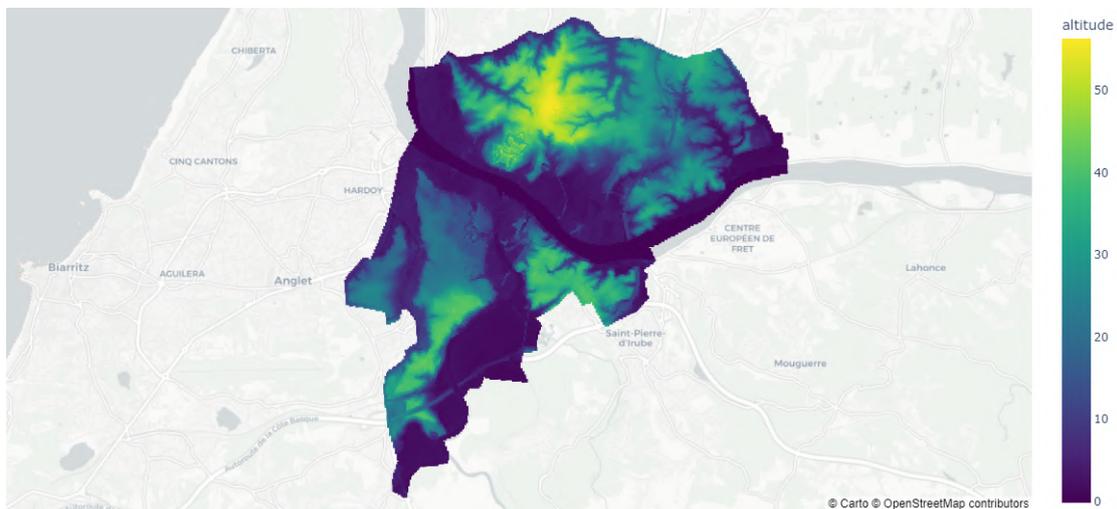


FIGURE 2.5 – Relief de la ville de Bayonne (*BD ALTI* [22])

### Données de hauteur d'eau

Les stations limnimétriques suivantes, situées dans la zone d'étude, ont été identifiées pour collecter les données de hauteur d'eau :

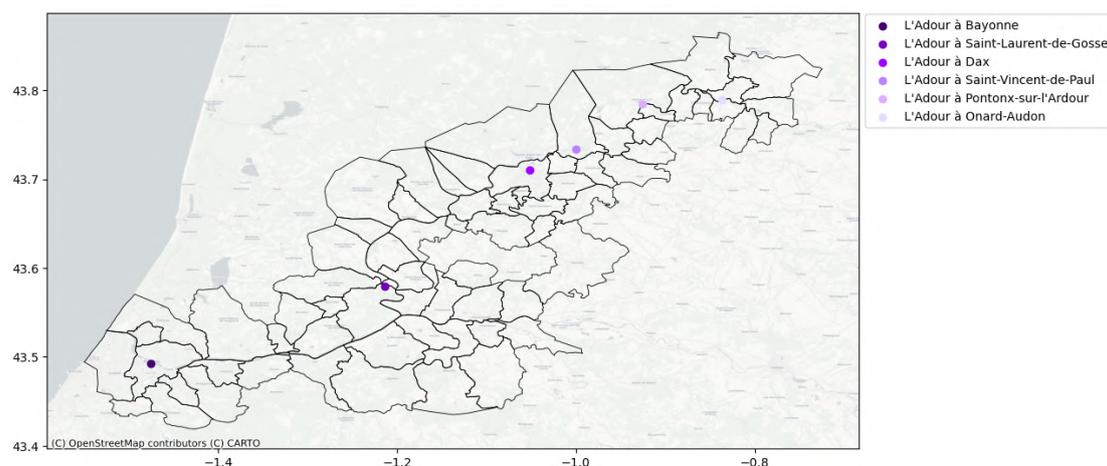


FIGURE 2.6 – Stations limnimétriques considérées

Parmi les stations hydrométriques de la région étudiée, une station supplémentaire était initialement disponible à l’embouchure de l’océan. Cependant, les données provenant de cette station se sont révélées inexploitable en raison de l’influence des marées sur les mesures de hauteur d’eau.

Les données de hauteur d’eau pour la durée de l’événement ont donc été récupérés sur ces stations, et les maximums atteints ont été identifiés.

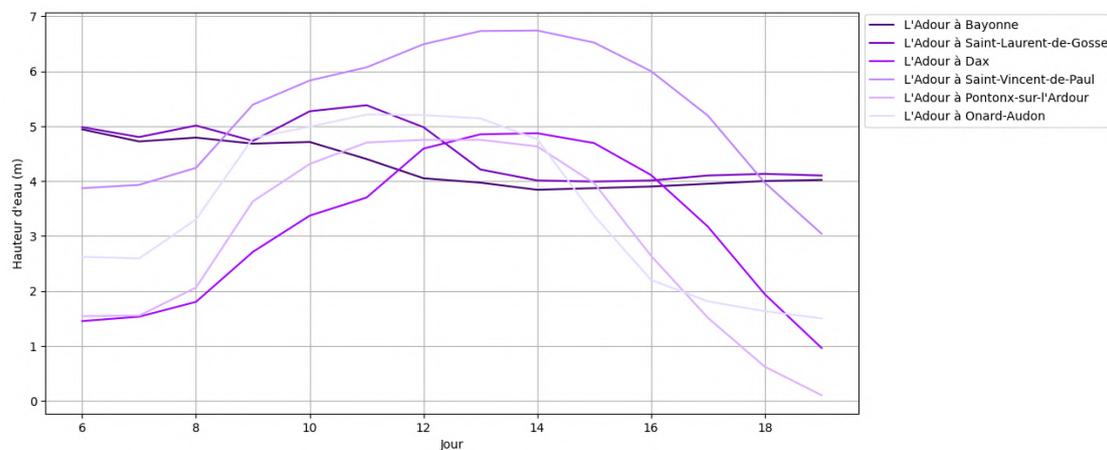


FIGURE 2.7 – Données de hauteur d’eau (*Hydroportail* [15])

Cependant, les stations hydrométriques étant des points de mesure ponctuels, il était nécessaire d’extrapoler ces données sur l’ensemble de la zone d’étude. Pour ce faire, la méthode des polygones de Voronoï a été utilisée autour de chaque station hydrométrique.

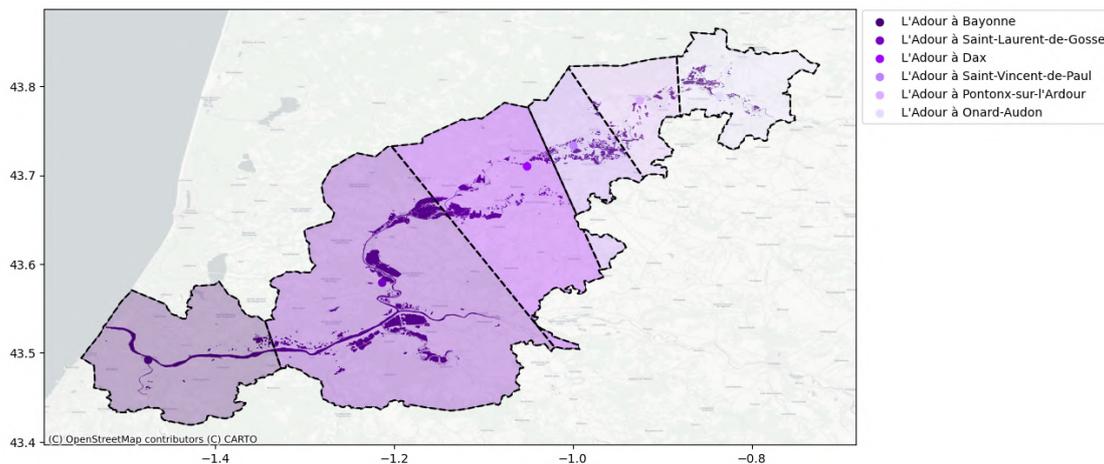


FIGURE 2.8 – Zones de Voronoï

Pour chaque polygone de Voronoï, le niveau d'eau maximal mesuré à la station hydrométrique correspondante pendant l'événement a été attribué à l'ensemble du polygone. Autrement dit, l'hypothèse a été faite que le niveau d'eau des zones inondées était constant sur toute la surface du polygone de Voronoï associé à une station donnée, avec :

$$N_i = H_i + Z_i$$

Où  $N_i$  représente le niveau de l'eau associée à la cellule de Voronoï  $i$ ,  $H_i$  la hauteur d'eau mesurée dans la station  $i$  et  $Z_i$  le zéro de l'échelle de la station  $i$ .

Cette approche par polygones de Voronoï permet d'extrapoler les mesures ponctuelles des stations sur l'ensemble de la zone d'étude, en se basant sur la proximité géographique. Bien que simplifiée, elle fournit une première approximation spatiale des niveaux d'eau atteints lors de l'inondation.

## 2.3 Première approche : Modélisation par détection satellitaire

Dans un premier temps, un modèle a été construit en utilisant seulement des données satellites.

### 2.3.1 Cas d'étude : inondations dans la Vallée de la Roya en Octobre 2020

Les inondations dans la vallée de la Roya en octobre 2020 représentent l'un des événements météorologiques les plus catastrophiques de l'histoire récente des Alpes-Maritimes.

La vallée de la Roya, située dans le sud-est de la France, à la frontière avec l'Italie, fait partie du parc national du Mercantour. Cette région montagneuse est caractérisée par des reliefs escarpés et des cours d'eau à régime torrentiel, ce qui la rend particulièrement vulnérable aux phénomènes de crues rapides.

Le 2 octobre 2020, la tempête Alex a frappé la région avec une violence exceptionnelle. Les services météorologiques avaient prévu des précipitations importantes, mais l'intensité réelle du phénomène a largement dépassé les prévisions.

La configuration géographique de la vallée a amplifié les effets dévastateurs de ces précipitations extrêmes. Les eaux de ruissellement, ne pouvant être absorbées par les sols, ont rapidement gonflé les cours d'eau. La Roya, ainsi que ses affluents, se sont transformés en torrents furieux, charriant des quantités impressionnantes de débris et de sédiments. Les villages de la vallée, et en particulier Breil-sur-Roya, Roquebillère et Saint-Martin-Vésubie, ont été frappés de plein fouet par ces crues soudaines et violentes.

Les conséquences de cette catastrophe ont été dévastatrices. Des maisons entières ont été emportées par les flots, des routes et des ponts ont été détruits, isolant complètement certaines communautés. L'infrastructure de la vallée a été gravement endommagée : le réseau routier a été coupé en de nombreux endroits, la voie ferrée reliant Nice à Cuneo a été partiellement détruite, et les réseaux d'électricité, d'eau potable et de télécommunications ont été sévèrement impactés.

Les autorités ont dû organiser des opérations de sauvetage d'urgence, mobilisant des hélicoptères pour évacuer les habitants piégés dans des zones inaccessibles par voie terrestre. Le bilan humain a été lourd, avec plusieurs victimes et de nombreux disparus. Les dégâts matériels ont été estimés à 210 millions d'euros, selon la CCR [7].

La reconstruction de la vallée s'est avérée être un défi colossal, nécessitant des mois, voire des années d'efforts. Cet événement a mis en lumière la vulnérabilité des zones montagneuses face aux phénomènes météorologiques extrêmes et a soulevé des questions importantes sur l'aménagement du territoire et la gestion des risques naturels dans ces régions.

Par ailleurs, l'intensité exceptionnelle de cet événement a suscité un vif intérêt au sein de la communauté scientifique, donnant lieu à de nombreuses études et publications qui ont fourni des données précieuses pour la validation de cette recherche, ce qui a largement motivé le choix de se concentrer sur cet épisode particulier pour cette étude.

### **2.3.2 Implémentation du modèle**

Pour l'analyse des inondations, deux images ont été récupérées : une avant l'événement, et une après. Une analyse par différence d'images a été effectuée, comme détaillé au paragraphe 2.2.2.

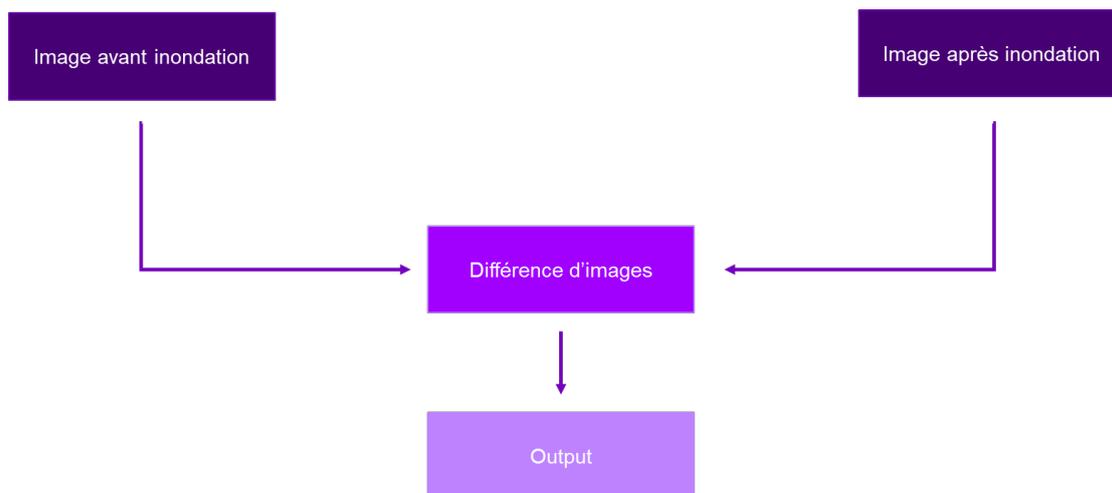


FIGURE 2.9 – Premier modèle

### 2.3.3 Résultats et validation

Le modèle a été calibré sur les villes de Breil-sur-Roya, Roquebillière et Saint-Martin-Vésubie, et des empreintes d'inondation ont ainsi été obtenues pour les trois villes. Toutes les données satellites utilisées sont présentées à l'annexe B.1.

Une étude similaire a été menée par le Service Régional de Traitement d'Image et de Télédétection (SERTIT), et a permis d'établir une comparaison afin d'estimer la pertinence des résultats. Il est présenté sur le graphique ci-dessous les empreintes obtenues et les données de validation.

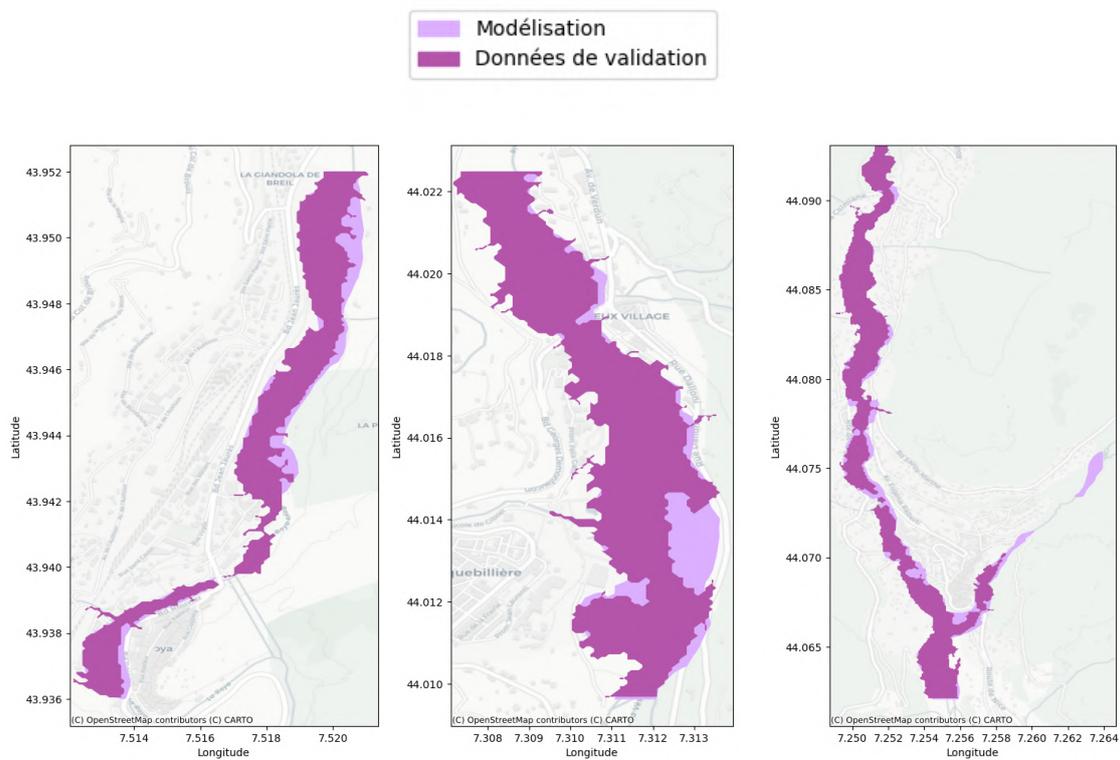


FIGURE 2.10 – Breil-sur-Roya

FIGURE 2.11 – Roquebillière

FIGURE 2.12 – Saint-Martin-Vésubie

Pour évaluer les performances du modèle appliqué aux inondations dans les Alpes-Maritimes, les métriques de précision, rappel et F1-score pour les trois villes spécifiques - Breil-sur-Roya, Roquebillière et Saint-Martin-Vésubie - ont été calculées. Les résultats sont présentés dans le tableau ci-dessous.

Ville	Précision	Rappel	F1-Score
Breil-sur-Roya	0,77	0,78	0,78
Roquebillière	0,85	0,84	0,84
Saint-Martin-Vésubie	0,72	0,80	0,76

TABLE 2.4 – Résultats des métriques de performance par ville pour le premier modèle

Dans l'ensemble, de bonnes performances du modèle sont observées, avec des métriques entre 70 et 85 %.

## **Breil-sur-Roya**

Les résultats pour la ville de Breil-sur-Roya indiquent une performance relativement équilibrée. Une précision de 0,77 signifie que parmi toutes les prédictions de zones inondées faites par le modèle, 77 % étaient correctes. Un rappel de 0,78 indique que parmi toutes les zones réellement inondées, 78 % ont été correctement identifiées par le modèle. Le F1-score de 0,78 montre un bon équilibre entre les deux métriques.

## **Roquebillière**

L'application du modèle à la ville de Roquebillière montre les meilleures performances parmi les trois villes. Les métriques obtenues indiquent que le modèle est très efficace pour identifier les zones inondées dans cette région. Une précision de 0,85 signifie que 85 % des prédictions de zones inondées étaient correctes. Un rappel de 0,84 signifie que 84 % des zones réellement inondées ont été identifiées correctement. Le F1-score de 0,84 confirme que le modèle maintient un bon équilibre entre la précision et le rappel. Cela est dû aux caractéristiques de la ville qui contient moins de zones urbaines en bordure de fleuve, ce qui rend la détection plus fiable.

## **Saint-Martin-Vésubie**

Pour Saint-Martin-Vésubie, les résultats sont légèrement moins bons, avec une légère tendance à identifier correctement les zones inondées (rappel) par rapport à la précision. Le rappel plus élevé de 0,80 indique que le modèle est assez bon pour détecter les zones inondées, mais la précision relativement plus faible de 0,72 suggère qu'il y a un nombre non négligeable de faux positifs. Le F1-score de 0,76 montre un équilibre acceptable.

### **2.3.4 Limites de la modélisation**

Cette modélisation par détection d'images présente plusieurs limites.

Tout d'abord, la performance du modèle dépend fortement de la qualité des données satellites d'entrée. Si les images sont de mauvaise qualité, la détection des zones inondées sera compromise. De plus, les images satellites n'offrent pas toujours une résolution suffisante pour permettre une détection précise en milieu urbain, où les structures complexes et la densité du bâti peuvent masquer les signes d'inondation.

D'autre part, les caractéristiques géographiques spécifiques de chaque région, telles que la topographie, la végétation dense ou les zones d'ombre, peuvent également influencer les résultats du modèle et conduire à des erreurs d'interprétation.

Par ailleurs, il est nécessaire d'acquérir deux images satellites "avant" et "après" sur la même zone géographique, ce qui peut être source de détections erronées dues à des différences non liées à l'inondation, telles que des changements saisonniers de végéta-

tion, des variations d'illumination, des modifications du paysage par l'activité humaine, conduisant ainsi à une interprétation inexacte de l'étendue réelle de l'inondation.

## 2.4 Seconde approche : Amélioration de la modélisation

Le premier modèle présentait certaines limites, notamment dans les zones urbaines denses où la détection satellite était difficile. Pour pallier cette limite, un second modèle a été développé. Il croise les informations disponibles par satellite avec des informations sur la topographie du terrain et sur les hauteurs d'eau. De plus, il prend en entrée des images satellites récupérées après l'inondation et traitées avec l'indice NDWI afin d'améliorer la précision de la détection.

Le cas d'étude précédent n'était plus pertinent car aucune donnée de hauteur d'eau n'était disponible pour cette inondation. De plus, la nouvelle zone a été choisie pour observer un phénomène en ville, où les rues étroites sont nombreuses, afin de répondre à la limite du modèle soulevée.

### 2.4.1 Cas d'étude : inondations dans les Pyrénées-Atlantiques et les Landes du 10 décembre 2021

Cette seconde étude portera sur les inondations qui ont eu lieu entre Bayonne et Dax le 10 décembre 2021.

Les Pyrénées-Atlantiques (64) et les Landes (40) sont deux départements situés dans le sud-ouest de la France, faisant partie de la région Nouvelle-Aquitaine.

Le bassin de l'Adour est une composante essentielle des Pyrénées-Atlantiques et des Landes. L'Adour prend sa source dans les Hautes-Pyrénées, au col du Tourmalet, à une altitude d'environ 2 200 mètres, et parcourt près de 335 kilomètres avant de se jeter dans l'océan Atlantique, près de Bayonne.

Les Pyrénées-Atlantiques et les Landes sont régulièrement confrontés à des phénomènes météorologiques extrêmes, notamment des crues et des inondations. L'histoire de la région est marquée par de nombreux événements de ce type, souvent liés à la dynamique du fleuve Adour et de ses affluents, ainsi qu'aux précipitations intenses sur le relief pyrénéen.

L'événement du 10 décembre 2021 est un exemple de ces dynamiques. Fin 2021, le sud-ouest de la France a été frappé par un épisode de pluies diluviennes d'une rare intensité, provoquant l'une des pires crues qu'ait connues la région. Le passage de la tempête Barra les 7 et 8 décembre avait déjà apporté d'importantes quantités de pluie, mais c'est dans l'après-midi du 9 décembre qu'une nouvelle perturbation particulièrement active a frappé, déversant de 50 à plus de 150 mm<sup>6</sup> de précipitations sur la moitié ouest de la chaîne des

---

6. Soit 50 à 150 litres d'eau par mètre carré, les deux mesures sont équivalentes.

Pyrénées.

Le lendemain, la pluie n'a pas cessé, avec 40 à 100 mm supplémentaires s'abattant sur l'ensemble du massif. En seulement 4 jours, du 7 au 10 décembre, les cumuls pluviométriques ont ainsi atteint des niveaux records, variant selon les endroits de 130 à plus de 300 mm.

Ces pluies diluviennes sont tombées sur des sols déjà gorgés d'eau par plusieurs semaines de précipitations dans la région. Selon Météo France [26], un facteur aggravant est venu s'ajouter avec un vent d'ouest soufflant en tempête, entre 80 et 110 km/h, qui a freiné l'écoulement naturel des eaux vers l'océan Atlantique.

Les pluies extrêmement abondantes qui se sont abattues sur une grande partie des Pyrénées ont coïncidé avec une hausse soudaine des températures, accélérant la fonte de la neige présente en montagne. La combinaison de ces deux phénomènes a alors entraîné une crue simultanée et importante des gaves de Pau et d'Oloron.

Face à la montée rapide et incontrôlable des eaux, les autorités ont dû procéder à l'évacuation d'urgence de centaines de personnes. À Peyrehorade, le gave réuni a atteint des niveaux records, proches de la crue historique de 2014 qui avait déjà causé d'importants dégâts. De nombreuses routes ont été coupées, isolant des villages entiers dans les Landes et les Pyrénées-Atlantiques.

Les dégâts ont été si importants et étendus que le ministre de l'Intérieur n'a pas tardé à annoncer la reconnaissance de l'état de catastrophe naturelle pour les départements sinistrés. Des centaines de maisons ont été endommagées, le réseau routier très impacté, des exploitations agricoles dévastées. Les dégâts ont été estimés à environ 80 millions d'euros par la CCR. [8]

Cet épisode restera gravé dans les mémoires. Malgré les progrès de la prévision météorologique, la violence de cet événement naturel extrême a surpris par son intensité et sa soudaineté.

#### **2.4.2 Détails du modèle**

Afin d'améliorer le modèle précédent, le choix a été fait d'apporter des données sur la topographie du terrain, en les croisant avec une connaissance de données de hauteurs d'eau.

Tout d'abord, une première analyse a été faite grâce aux images satellites. Huit images couvrant la zone ont été traitées pour plus de précision. Ces images ont été acquises le 14 décembre 2021. La démarche exacte a été détaillée dans le paragraphe 2.2.2, et les images satellites utilisées sont présentées en annexe B.2. Cela permet d'obtenir une première empreinte d'inondation, qui est présentée en annexe C.

Les données de hauteur d'eau ont ensuite été croisées au modèle numérique de terrain afin d'obtenir une hauteur d'eau en tout point inondé, comme expliqué dans le paragraphe 2.2.2.

Pour identifier les zones potentiellement inondées, la règle suivante a été appliquée : tout point (pixel) dont l'altitude est inférieure au niveau d'eau maximal de la cellule de Voronoï dans laquelle il se trouve a été considéré comme inondé.

L'approche menée peut conduire à des sur-détections, c'est-à-dire à l'identification de zones inondées qui ne le sont pas réellement. Ces "bruits" peuvent être causés par diverses raisons, comme des imprécisions dans les détections satellitaires.

Pour éliminer ces sur-détections, un traitement supplémentaire a été effectué. Les zones identifiées comme inondées mais présentant des caractéristiques inhabituelles (par exemple, des zones isolées de très petite taille) ont été analysées et, si nécessaire, supprimées de la cartographie finale.

Le modèle retenu a donc été le suivant :

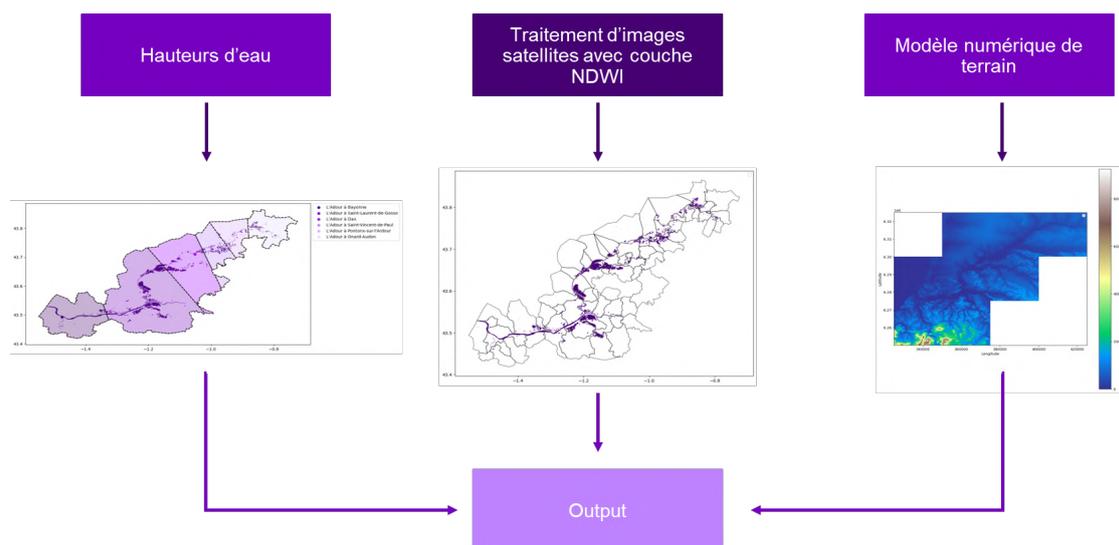


FIGURE 2.13 – Second modèle

### 2.4.3 Résultats et validation

Ce modèle a ainsi permis d'obtenir une empreinte d'inondation, dans une zone urbaine où la situation n'était pas forcément nettement visible sur les images satellites. En effet, les images satellites permettaient de détecter 128 733 pixels inondés, tandis que 335 955 pixels inondés ont au final été identifiés. La figure ci-dessous présente le résultat obtenu.

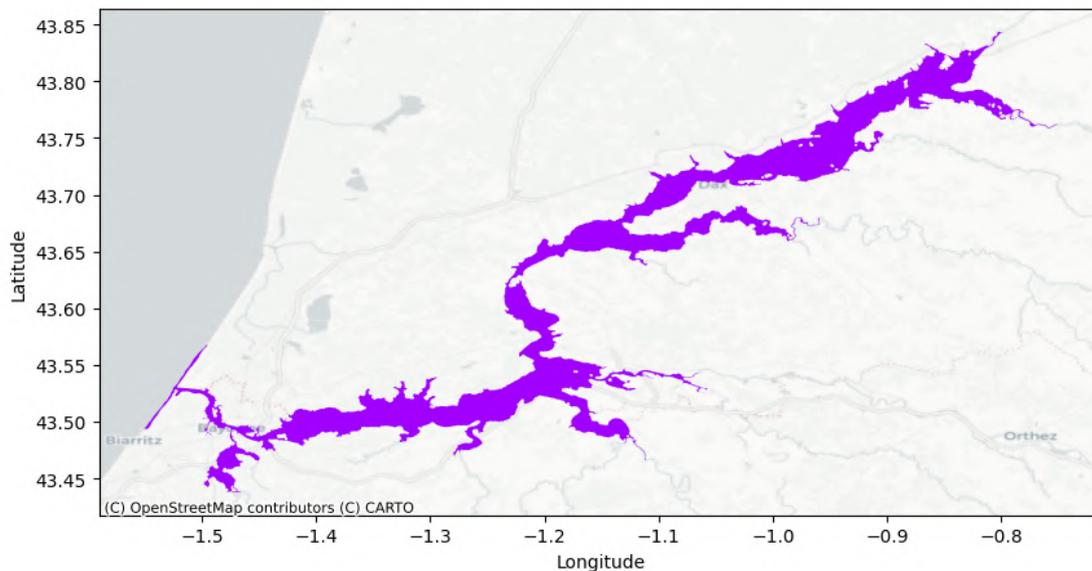


FIGURE 2.14 – Empreinte d’inondation pour la crue de l’Adour

Afin de valider le modèle, une étude réalisée par la Direction Régionale de l’Environnement, de l’Aménagement et du Logement (DREAL) et mise en ligne sur la plateforme Data Gouv a été utilisée.

Cependant, les travaux de la DREAL se portent sur une zone spécifique aux alentours de Dax, et non sur l’étendue entière de la zone d’étude. Les résultats ont donc été comparés sur cette zone uniquement.

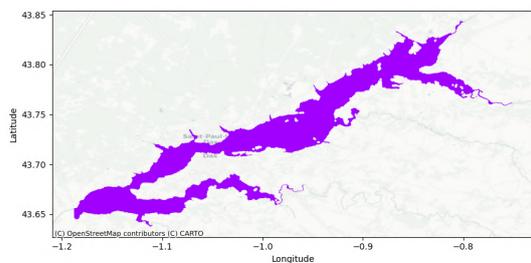


FIGURE 2.15 – Modélisation

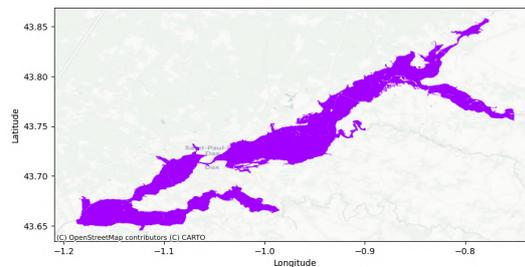


FIGURE 2.16 – Travaux de la DREAL (*Data Gouv* [19])

La comparaison entre les cartes produites par ce modèle et les données de référence révèle une forte correspondance spatiale. Cette concordance, tant au niveau de l’étendue que de la localisation des zones inondées, renforce la confiance dans la pertinence et l’efficacité de la méthodologie développée.

Pour approfondir la validation du modèle, une analyse quantitative complémentaire a été effectuée, en calculant la précision, le rappel et le F1-score.

<b>Précision</b>	0,90
<b>Rappel</b>	0,91
<b>F1-Score</b>	0,90

TABLE 2.5 – Résultats des métriques de performance pour le second modèle

Les résultats du second modèle, qui intègre les données satellites, la topographie du terrain et les données de hauteur d'eau, montrent une très bonne performance avec une précision de 0,90, un rappel de 0,91 et un F1-score de 0,90. Cette haute précision indique que le modèle fait peu d'erreurs lorsqu'il prédit des zones inondées, et le rappel élevé de 0,91 signifie que le modèle détecte presque toutes les zones inondées. L'équilibre entre précision et rappel, reflété par le F1-score de 0,90, montre que le modèle gère efficacement les deux types d'erreurs, ce qui est important pour une application pratique. Globalement, ces résultats démontrent que le modèle est adapté pour la détection des zones inondées.

#### 2.4.4 Avantages et limites

Cette nouvelle approche présente plusieurs avantages notables par rapport au modèle précédent. Tout d'abord, elle ne nécessite qu'une seule image satellite post-inondation, contrairement à l'ancien modèle qui requérait deux images (avant et après l'événement). Cette simplification réduit considérablement les contraintes d'acquisition de données et améliore la réactivité du modèle. De plus, elle intègre les caractéristiques géographiques de la zone étudiée, ce qui permet de limiter les sous-détections, notamment dans les zones où la détection par satellite seule pourrait être insuffisante.

Cependant, cette méthode présente encore certaines limites. Elle reste dépendante de l'acquisition de données satellitaires, qui peut être affectée par divers facteurs tels que la couverture nuageuse ou la fréquence de passage des satellites. Son efficacité peut également être réduite dans les zones dépourvues de stations limnimétriques, car les données de hauteur d'eau sont utilisées pour affiner la modélisation dans ces régions. De plus, un pixel donné est soit inondé, soit non inondé, ce qui signifie que les états "partiellement inondé" ou "inondé entre x et y %" ne sont pas représentés. Compte tenu de la maille, cela pourrait également constituer un axe d'amélioration.

Malgré ces limitations, cette approche représente une amélioration significative en termes de précision et de faisabilité opérationnelle par rapport au modèle initial.

## Chapitre 3

# Évaluation des pertes brutes

### 3.1 Données utilisées

Afin d'évaluer les pertes brutes, il a fallu obtenir des renseignements sur les bâtiments exposés. Pour cela, plusieurs bases de données en *Open Data* ont été utilisées.

#### 3.1.1 La base des DPE

Afin d'identifier les logements, la base des Diagnostics de Performance Énergétique (DPE) a été exploitée pour identifier et caractériser les logements dans le cadre de cette étude. Cette base de données, accessible sur le Portail open data de l'ADEME [1], contient des informations telles que la géolocalisation et le type de bien, essentielles à l'analyse.

La base des DPE est structurée en cinq sous-bases distinctes :

- DPE tertiaires (avant juillet 2021)
- DPE tertiaires (depuis juillet 2021)
- DPE logements existants (avant juillet 2021)
- DPE logements existants (depuis juillet 2021)
- DPE logements neufs (depuis juillet 2021)

Pour cette étude, qui se concentre sur les bâtiments existants en 2021, seules les bases "DPE logements existants" ont été exploitées. Cette sélection permet d'avoir une vision complète des logements existants sur l'ensemble de l'année 2021.

Tous les logements en France doivent avoir un DPE, ce qui signifie qu'ils sont tous recensés dans cette base. Cela garantit une couverture exhaustive et précise des logements, facilitant ainsi une analyse détaillée de leur répartition et de leurs caractéristiques énergétiques. La base des DPE, avec ses données géolocalisées, permet ainsi d'obtenir les expositions. L'approche sera détaillée dans le paragraphe 3.2.2.

Dans le cadre de cette étude, une approche ciblée a été adoptée pour la collecte et le traitement des données. La base de données, disponible au format CSV, offre la possibilité de filtrer les informations en amont du téléchargement, permettant ainsi une sélection précise des éléments pertinents.

Cette fonctionnalité s'est avérée particulièrement utile pour l'analyse, car elle a permis de se concentrer uniquement sur les colonnes essentielles. Ainsi, seules les informations relatives au type de bâtiment, au code INSEE, aux coordonnées GPS et au numéro de département ont été extraites.

De plus, afin de circonscrire l'étude à une zone géographique spécifique, le jeu de données a été filtré pour ne retenir que les entrées correspondant aux départements des Landes (40) et des Pyrénées-Atlantiques (64). Cette méthode de prétraitement a non seulement optimisé le volume de données à manipuler, mais a également permis de focaliser l'analyse sur les régions d'intérêt.

### 3.1.2 La base DVF+

Une autre base qui a été nécessaire à cette étude est la base DVF+ (Demandes de Valeurs Foncières enrichie). La base DVF+ est une ressource de données immobilières française particulièrement riche et détaillée.

Créée et maintenue par le CEREMA (Centre d'Études et d'expertise sur les Risques, l'Environnement, la Mobilité et l'Aménagement) [13], elle enrichit les données brutes de la base DVF originale, qui est produite par la Direction Générale des Finances Publiques (DGFIP).

La DVF+ intègre des informations supplémentaires provenant d'autres sources, notamment le cadastre et les fichiers fonciers, pour offrir une vision plus complète et précise du marché immobilier français. Elle contient des données sur les transactions immobilières, incluant le prix de vente, la date de la transaction, la localisation précise du bien, le nombre de pièces, et d'autres caractéristiques.

Cette base de données est mise à jour régulièrement et couvre l'ensemble du territoire français, à l'exception de l'Alsace-Moselle et de Mayotte qui ont des régimes fonciers particuliers.

La base DVF+ est disponible en téléchargement aux formats CSV, GPKG et SQL, avec des fichiers distincts pour chaque département. Pour cette étude, il a été décidé de télécharger les données des départements 40 (Landes) et 64 (Pyrénées-Atlantiques) au format GPKG.

### 3.1.3 Données au carreau de 1km de l'INSEE

La base "Revenus, pauvreté et niveau de vie en 2017 - Données carroyées" est un ensemble de données statistiques précieux qui offre une vue détaillée de la situation socio-économique en France à une échelle géographique fine.

Ces données proviennent du Fichier Localisé Social et Fiscal (FiLoSoFi) et sont mises à disposition par l'INSEE (Institut National de la Statistique et des Études Économiques) [24].

La base contient notamment des variables sur la superficie des ménages et sur le niveau de vie des populations. Toutes les variables mises à disposition par cette base sont présentées à l'annexe E. Les informations sont présentées sous forme de carreaux, permettant une analyse spatiale précise des phénomènes socio-économiques.

Cette approche carroyée offre l'avantage de préserver la confidentialité des données individuelles tout en fournissant une granularité géographique fine, ce qui est particulièrement utile pour les analyses urbaines et la planification territoriale.

Les chercheurs, les collectivités locales et les décideurs politiques peuvent utiliser ces données pour étudier les disparités de revenus, la répartition de la pauvreté, et les variations du niveau de vie à travers différentes zones géographiques en France.

Cette base existe aux mailles 200 m et 1 km, mais en raison de contraintes calculatoires, c'est la base au carreau de 1 km qui a été retenue pour cette étude.

Elle est disponible aux formats Shapefile, GPKG et CSV. C'est ici le format GPKG qui a été utilisé.

Voici un résumé des données et des variables utilisées.

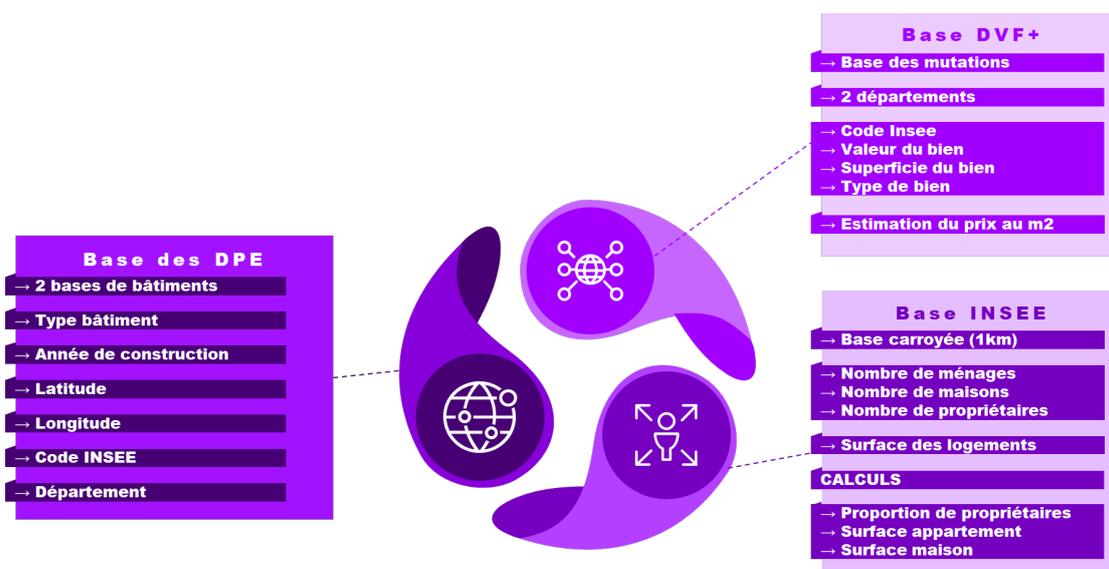


FIGURE 3.1 – Schéma récapitulatif des données utilisées

## 3.2 Création de la base d'étude

Pour évaluer les pertes brutes, une base de données a été élaborée en s'appuyant sur les informations des DPE, puis a par la suite été enrichie avec des données supplémentaires.

### 3.2.1 Retraitement des données

Dans un premier temps, deux ensembles de données ont été récupérés :

- la base de données des DPE pour les logements existants avant juillet 2021 ;
- la base de données des DPE pour les logements après juillet 2021.

Chaque ligne de ces bases de données a ensuite été géocodée. Ce processus a consisté à créer une colonne contenant des points géographiques à partir des coordonnées de latitude et de longitude de chaque logement. En créant un objet POINT pour chaque entrée, ces bases de données ont été converties en géodataframes, ouvrant ainsi la voie à une analyse spatiale approfondie.

La base de données après juillet 2021 utilisait le LAMBERT 93, un système de coordonnées différent de celui utilisé dans la base avant juillet 2021. Pour assurer la cohérence des données et permettre par la suite une analyse spatiale, les deux bases ont été uniformisées dans le système WGS84.

Par ailleurs, les catégories de bâtiments étaient nommées différemment dans chacune des bases. La base après juillet 2021 utilisait les termes 'maison', 'immeuble' et 'appartement', tandis que celle avant juillet 2021 employait 'Logement', 'Maison Individuelle' et 'Bâtiment collectif à usage principal d'habitation'. Pour assurer la cohérence et faciliter l'analyse, une harmonisation de ces catégories a été mise en oeuvre, pour ne conserver que 'maison' et 'appartement'.

Pour finaliser la création de la base d'étude, ces deux géodataframes préalablement traités ont été fusionnés. Cette étape de concaténation a permis de rassembler en un seul ensemble cohérent toutes les données des DPE, couvrant ainsi les périodes avant et après juillet 2021. Le résultat est une base de données géospatiale unifiée, comportant les variables suivantes :

Variable	Description
Année_construction	Variable numérique
Type_bâtiment	Maison ou appartement (variable chaîne de caractères)
Code_INSEE_(BAN)	Nombre entier
Coordonnée_cartographique_X_(BAN)	Longitude (variable numérique)
Coordonnée_cartographique_Y_(BAN)	Latitude (variable numérique)
N°_département_(BAN)	Nombre entier
geometry	POINT

TABLE 3.1 – Présentation des variables

### 3.2.2 Identification des expositions

Après l'obtention de la base de données unifiée, une étape de raffinement a été entreprise pour cibler spécifiquement la zone inondée et éliminer les doublons. Cette démarche repose sur plusieurs hypothèses et considérations importantes.

Concernant les maisons, il a été constaté que certaines avaient fait l'objet de multiples DPE. La suppression des doublons s'est donc avérée nécessaire pour éviter une double comptabilisation des mêmes propriétés, ce qui aurait faussé les estimations de pertes.

Pour les appartements, l'hypothèse retenue est que seuls les logements situés au rez-de-chaussée sont directement affectés par l'inondation. Cette approche semble cohérente avec la réalité des inondations urbaines, où les étages supérieurs sont généralement épargnés par les dégâts directs des eaux.

Le retraitement des données pour les appartements a donc eu un double effet bénéfique : il a permis de supprimer les doublons et de ne conserver qu'un seul appartement (correspondant au rez-de-chaussée) par immeuble. Cette méthode semble pertinente, l'objectif étant d'estimer une perte moyenne sur l'ensemble de la zone inondée, les estimations étant compensées par la moyenne sur la large étendue de la zone d'étude.

Ces ajustements méthodologiques ont abouti à un ensemble de données plus précis et représentatif des expositions.

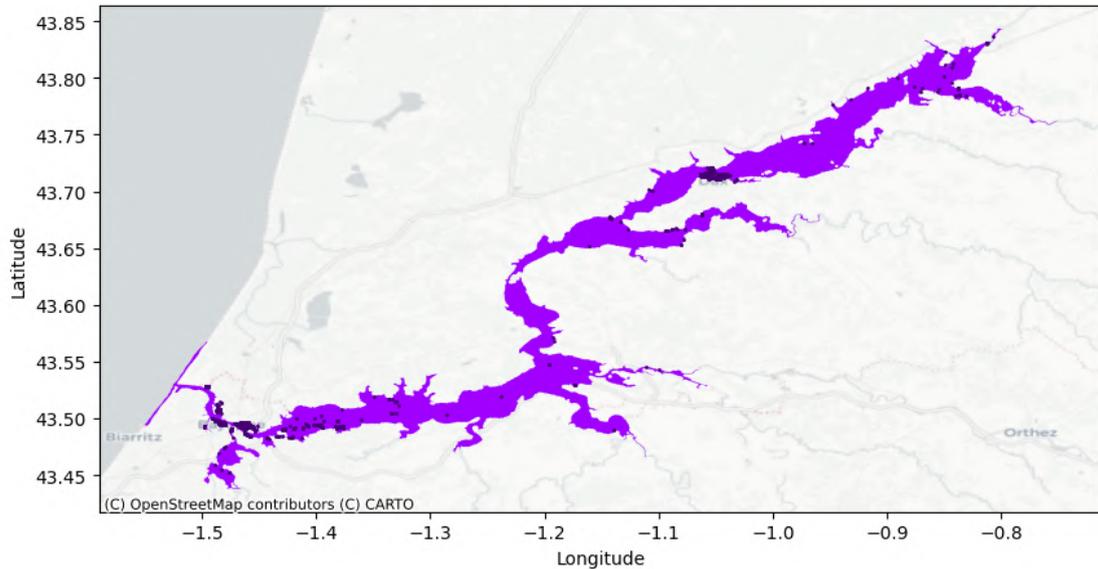


FIGURE 3.2 – Cartographie des expositions

La carte présentée ci-dessus offre une visualisation de l'exposition aux inondations dans la région. Les bâtiments situés à l'intérieur de la zone inondable sont représentés par des points en violet foncé, mettant en évidence les zones les plus vulnérables.

Les centres urbains de Bayonne et Dax se distinguent particulièrement par une forte concentration de ces points, révélant une exposition significative de ces zones densément peuplées. Cette concentration suggère un risque élevé pour un grand nombre de bâtiments et d'habitants dans ces agglomérations.

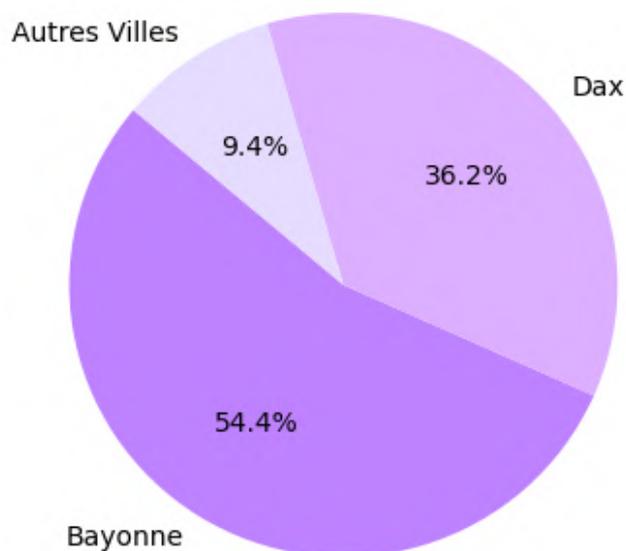


FIGURE 3.3 – Répartitions des expositions par villes

Ce graphique confirme la prédominance des expositions dans les centres-villes de Bayonne et de Dax, qui se distinguent par une concentration notable d'expositions, ce qui reflète leur rôle de pôles culturels et économiques régionaux. La prédominance des expositions dans ces villes est également liée à la densité de population et à l'infrastructure culturelle développée, attirant ainsi un plus grand nombre d'événements et d'expositions.

Par ailleurs, le long du cours d'eau principal, une série continue de points violets est observable. Cette distribution indique que l'impact de l'inondation s'étend au-delà des grands centres urbains, affectant également plusieurs communes rurales riveraines. Cette observation souligne la nature étendue et variée de l'exposition au risque d'inondation dans la région, touchant aussi bien les zones urbaines que les territoires moins densément peuplés.

La carte montre ainsi une répartition des expositions dans les départements des Pyrénées-Atlantiques et des Landes, avec environ 60% des expositions situées dans les Pyrénées-Atlantiques et 40% dans les Landes.

Cette répartition relativement équilibrée reflète toutefois la concentration significative d'expositions à Bayonne observée sur la figure 3.3.

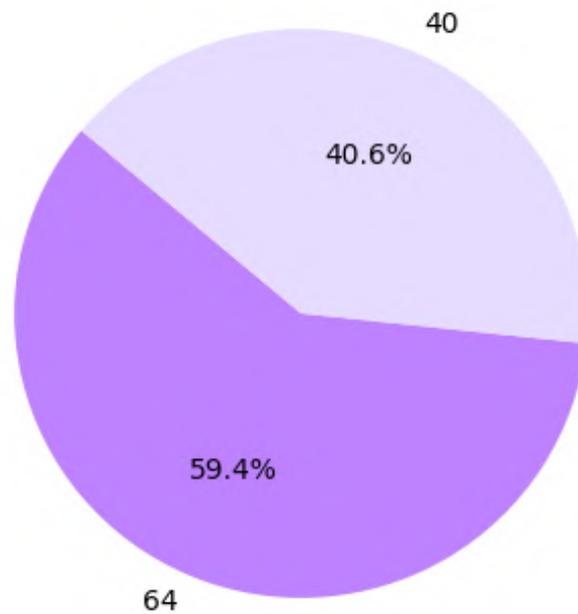


FIGURE 3.4 – Répartition des expositions sur les départements d'étude

La zone d'étude étant très étendue, il est difficile de visualiser précisément les logements. Voici un zoom au niveau de Bayonne, mettant en avant les expositions.

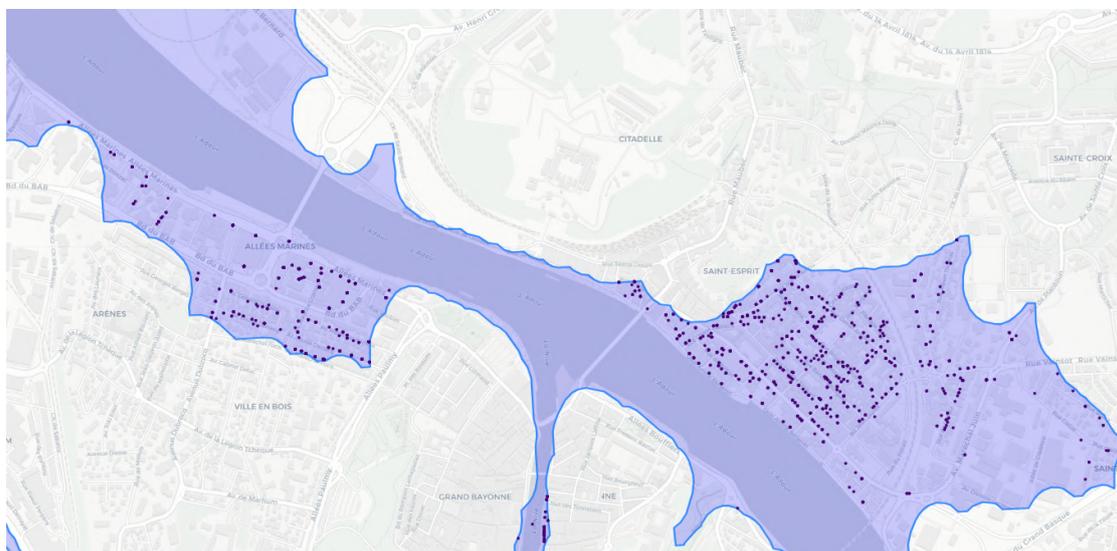


FIGURE 3.5 – Cartographie des expositions, zoom sur la ville de Bayonne

Sur ce schéma, les expositions sont repérées par des points violets. L'empreinte d'inon-

ation est elle en bleu.

Les zones inondables suivent principalement le cours d'eau traversant la ville, couvrant les deux rives. Une forte concentration de points violets est visible le long de la rivière, indiquant que de nombreux lieux d'exposition se trouvent dans des zones potentiellement à risque en cas d'inondation.

Il est possible sur la zone d'étude, d'étudier les parts d'expositions suivant diverses caractéristiques. Par exemple, une prédominance des appartements par rapport aux maisons est observée dans ce secteur.

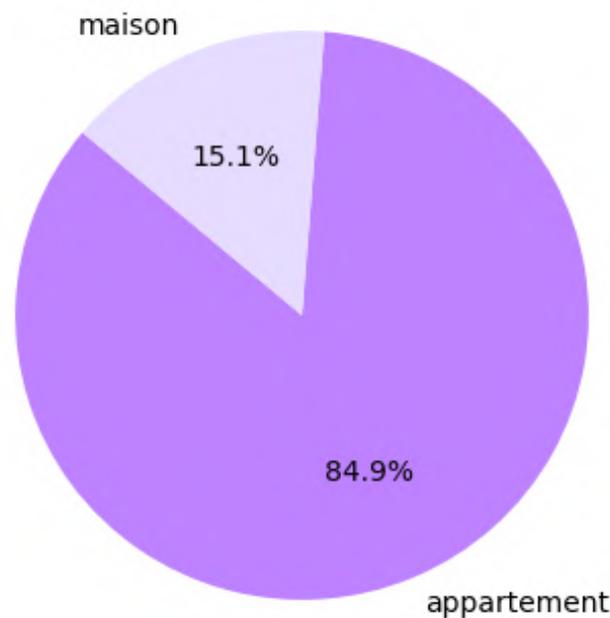


FIGURE 3.6 – Part d'appartements et de maisons dans les expositions

Cette tendance s'explique par la forte concentration d'expositions dans les centres-villes de Bayonne et de Dax, comme observé sur la figure 3.3, où les appartements sont plus courants en raison de la densité urbaine et de la disponibilité limitée de terrains pour des maisons individuelles.

### 3.2.3 Enrichissement de la base de données

La base d'exposition initialement créée a par la suite été considérablement enrichie grâce à l'intégration des données carroyées fournies par l'INSEE, dont la présentation se trouve à la partie 3.1.3.

La géométrie de chaque carreau a été intégrée, permettant une représentation spatiale précise de toutes ces informations.

Le niveau de vie des habitants de chaque carreau a été incorporé, et rapporté au niveau de vie par ménage, fournissant un indicateur qui sera utilisé dans l'estimation des sommes assurées du contenu, dans la partie 3.3.2.

Parmi les variables intégrées, il y a également le nombre de ménages par carreau, offrant ainsi une vision détaillée de la répartition de la population. Le nombre de maisons a également été inclus, permettant de mieux comprendre la typologie de l'habitat dans chaque zone.

### 3.3 Estimation des sommes assurées

Il n'existe aucun fichier d'*Open Data* recensant les sommes assurées. Elles ont donc dû être estimées.

#### 3.3.1 Sommes assurées du bâti

Les sommes assurées bâties représentent le montant indiqué dans le contrat d'assurance qui correspond à l'engagement maximal de l'assureur pour couvrir les dommages potentiels aux bâtiments assurés.

Afin de calculer le prix du bâtiment, le prix au mètre carré par commune a tout d'abord été déterminé. Pour cela, la base DVF+ a été exploitée, permettant de calculer distinctement un prix au mètre carré pour les appartements et un autre pour les maisons.

Pour ce faire, les transactions immobilières sont étudiées, afin d'obtenir un prix au mètre carré pour chaque bien. Les valeurs aberrantes pour lesquelles le prix au mètre carré est égal à la valeur foncière sont ensuite supprimées. En effet, il s'agit des biens pour lesquels la superficie n'est pas connue, et par défaut estimée à 1 m<sup>2</sup>.

Enfin, le prix au mètre carré moyen est calculé par commune. Il y avait certaines villes pour lesquelles aucune information de transaction immobilière n'était disponible. Ce dernier a donc été estimé comme la moyenne des prix au mètre carré des autres villes de la zone d'étude.

Voici un aperçu des prix au mètre carré dans les principales villes de Bayonne et Dax, ainsi que la moyenne sur le reste de la zone d'étude.

Ville	Prix au m <sup>2</sup> pour un appartement	Prix au m <sup>2</sup> pour une maison
Bayonne	3035,03	3681,49
Dax	1937,19	1928,59
Moyenne dans les autres communes	1783,57	1582,21

TABLE 3.2 – Prix au mètre carré des appartements et maisons obtenus dans la zone d'étude

Bayonne se distingue nettement avec les prix au m<sup>2</sup> les plus élevés, tant pour les appartements (3035 €/m<sup>2</sup>) que pour les maisons (3681 €/m<sup>2</sup>). Cette différence marquée par rapport aux autres villes s'explique probablement par l'attrait touristique et économique de Bayonne, ainsi que sa proximité avec la côte basque. Par ailleurs, les maisons y sont sensiblement plus chères que les appartements. Cela peut s'expliquer notamment par le fait qu'il y a peu de maisons à Bayonne.

Dax présente des prix nettement inférieurs, avec des valeurs presque identiques pour les appartements (1937 €/m<sup>2</sup>) et les maisons (1929 €/m<sup>2</sup>), suggérant un marché immobilier plus équilibré entre ces deux types de biens.

Enfin, les autres communes de la zone d'étude affichent les prix les plus bas, avec une particularité : les appartements (1784 €/m<sup>2</sup>) y sont légèrement plus chers que les maisons (1582 €/m<sup>2</sup>), contrairement à la tendance observée à Bayonne.

Cette inversion pourrait s'expliquer par une offre plus importante de maisons dans ces zones moins urbanisées, ou par une demande accrue pour les appartements, peut-être plus rares ou situés dans des emplacements plus prisés.

Ces écarts de prix reflètent les disparités économiques et d'attractivité entre ces différentes zones, Bayonne se positionnant clairement comme le marché immobilier le plus dynamique et le plus cher de la région de cette étude, représentant un risque plus accru pour les assureurs.

Dans un second temps, il a fallu s'intéresser à la superficie des expositions. La base DVF+ comportait beaucoup de valeurs manquantes ou aberrantes sur la variable portant sur les superficies. En l'absence de données cohérentes, cette dernière a donc été estimée en utilisant la base de données carroyées de l'INSEE.

Connaissant le nombre de maisons et d'appartements par carreau et la somme de leurs superficies, et en partant de l'hypothèse qu'un appartement fait en moyenne 0,56 fois la superficie d'une maison en France (INSEE), la superficie moyenne  $S$  des maisons et

appartements par carreau a été calculée et appliquée. Le calcul détaillé est le suivant :

$$N_{\text{maisons}} \times S_{\text{maison}} + N_{\text{appartements}} \times 0,56 \times S_{\text{maison}} = S_{\text{Tot}}$$

$$S_{\text{maison}} \times (N_{\text{maisons}} + 0,56 \times N_{\text{appartements}}) = S_{\text{Tot}}$$

$$S_{\text{maison}} = \frac{S_{\text{Tot}}}{N_{\text{maisons}} + 0,56 \times N_{\text{appartements}}}$$

où  $N_{\text{maisons}}$  et  $N_{\text{appartements}}$  représentent respectivement le nombre de maisons et d'appartements par carreau,  $S_{\text{Tot}}$  la superficie totale des logements du carreau et  $S$  est la superficie moyenne d'une maison à déterminer.

Les sommes assurées bâties sont ainsi calculées de manière à refléter la valeur des biens immobiliers dans la zone d'étude.

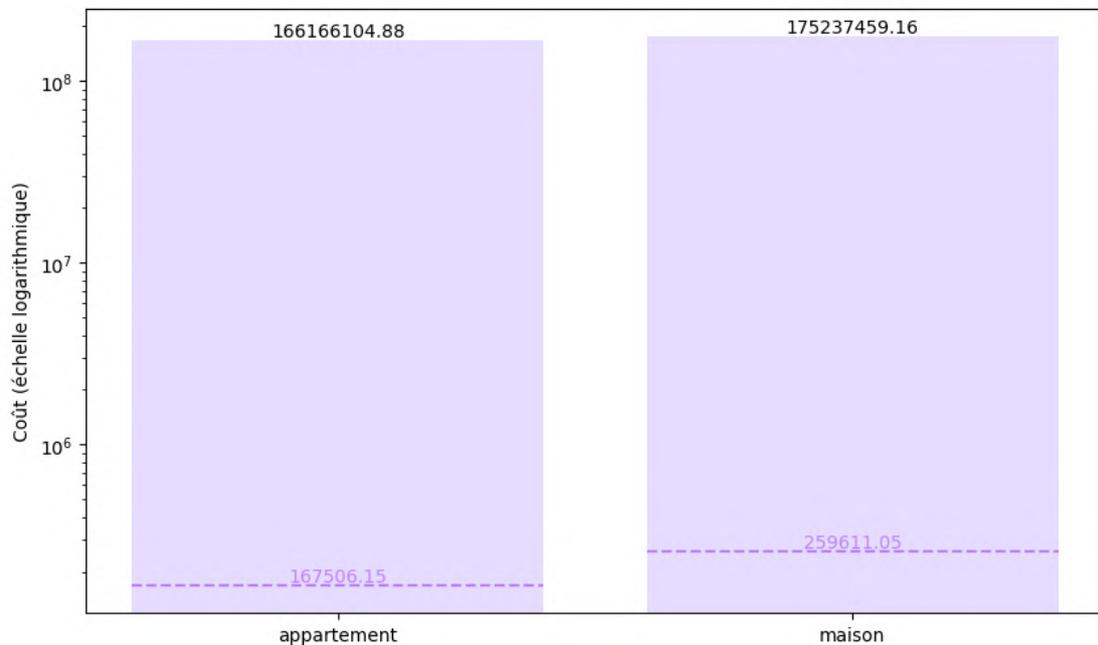


FIGURE 3.7 – Total et moyenne des sommes assurées du bâti

En traçant un graphique comparatif du coût total et moyen des maisons et des appartements, une tendance notable est observée : bien que les maisons représentent une proportion nettement inférieure du nombre total de logements, leur coût total assuré est considérablement plus élevé que celui des appartements.

Cette disparité s'explique par plusieurs facteurs. Les maisons ont généralement une valeur unitaire plus élevée, souvent due à une plus grande surface habitable, la présence de terrains associés, et parfois des structures annexes comme des garages ou des dépendances. De plus, il a été vu que leur prix au mètre carré était supérieur, ce qui s'explique par le

fait que la qualité de construction et les matériaux utilisés pour les maisons peuvent être supérieurs à ceux des appartements, augmentant ainsi leur valeur assurée.

Cela se traduit par une somme assurée du bâti moyenne beaucoup plus élevée pour les maisons, avec un coût moyen de 259 611 € contre 167 506 € pour les appartements.

### 3.3.2 Sommes assurées du contenu

Les sommes assurées contenues représentent le montant maximal que l'assureur s'engage à verser lorsqu'un sinistre affecte le contenu d'un bien immobilier. Cette garantie couvre généralement les meubles, les appareils électroménagers, les vêtements, les objets de valeur et autres effets personnels présents dans le logement assuré. Ce montant est estimé par l'assuré lors de la souscription à un contrat d'assurance.

En l'absence de portefeuille assurantiel, le choix a été fait d'entraîner un modèle prédictif sur des données, afin d'estimer dans un second temps les sommes assurées contenues nécessaires à l'étude.

Les classes des sommes assurées contenues ont dans un premier temps été anonymisées. Ainsi, les sommes assurées contenues pourront prendre les valeurs 1000, 5000, 10000 et 50000.

Après avoir estimé la performance de différents modèles de classification, le choix a été porté sur le *Gradient Boosting*, qui présentait de meilleurs résultats.

Le *Gradient Boosting Classifier* est une méthode d'apprentissage automatique utilisée pour les tâches de classification.

Le *Gradient Boosting* fonctionne en construisant des modèles de manière séquentielle. Chaque nouveau modèle est ajusté pour corriger les erreurs commises par les modèles précédents. Cette correction est effectuée en minimisant une fonction de perte, souvent par une descente de gradient.

L'algorithme commence par une initialisation où un modèle de base est construit. Ce modèle initial peut être simplement la prédiction constante de la classe majoritaire ou la probabilité moyenne de la classe positive.

Ensuite, pour chaque itération  $m$ , les résidus  $r_i^{(m)}$  pour chaque échantillon  $i$ , qui sont les erreurs de prédiction du modèle précédent, sont calculés. Les résidus sont définis comme la différence entre la valeur réelle  $y_i$  et la prédiction  $\hat{y}_i^{(m-1)}$  du modèle précédent :

$$r_i^{(m)} = y_i - \hat{y}_i^{(m-1)}$$

Un nouveau modèle est alors ajusté sur ces résidus. Il essaie de prédire les résidus des

prédictions précédentes, c'est-à-dire qu'il est formé pour corriger les erreurs commises par le modèle précédent.

Ces prédictions sont ensuite ajoutées aux prédictions globales du modèle avec un facteur de taux d'apprentissage  $\eta$  (*learning rate*), qui contrôle la contribution de chaque nouveau modèle au modèle final. La mise à jour des prédictions se fait ainsi :

$$\hat{y}_i^{(m)} = \hat{y}_i^{(m-1)} + \eta \cdot h_m(x_i)$$

où  $h_m(x_i)$  est la prédiction du  $m$ -ième modèle pour l'échantillon  $i$ . Ces étapes sont répétées pour un nombre déterminé d'itérations ou jusqu'à ce que le modèle atteigne une certaine performance.

Faute de données, le modèle a du être entraîné avec comme variables explicatives les variables communes aux données internes d'entraînement et aux données de la base d'étude. Ainsi, les variables retenues sont les suivantes :

Variables	Commentaire
Code commune INSEE	Variable décomposée en indicatrices (encodage <i>one hot</i> <sup>1</sup> )
Superficie	Variable numérique
Niveau de vie	Variable numérique (données INSEE)

TABLE 3.3 – Variables utilisées pour le modèle

Après entraînement du modèle sur 80 % des données, il a été testé sur le reste de la base. Les résultats se sont révélés satisfaisants, avec un *Accuracy* de 0,94. C'est une mesure de performance d'un modèle de classification qui indique le pourcentage de prédictions correctes par rapport au nombre total de prédictions effectuées.

Les métriques de performance du modèle pour chaque catégorie de données, en termes de précision, rappel et F1-Score, ainsi que les moyennes et la précision globale ont également été calculées.

Catégorie	Précision	Rappel	F1-Score
1000	0,92	0,71	0,80
5000	1,00	0,85	0,92
10000	0,94	0,99	0,97
50000	1,00	0,78	0,88
<b>Moyenne macro</b>	0,96	0,83	0,89
<b>Moyenne pondérée</b>	0,94	0,94	0,94

TABLE 3.4 – Résultats des métriques de performance par catégorie pour le modèle

---

1. L'encodage *one-hot* est une technique de transformation de variables catégorielles en variables numériques binaires, où chaque catégorie est représentée par une colonne binaire indiquant sa présence (1) ou son absence (0) pour chaque observation, permettant ainsi leur utilisation dans des modèles d'apprentissage automatique.

La précision varie entre 0,92 pour la catégorie 1000 et 1,00 pour les catégories 5000 et 50000, indiquant que lorsque le modèle fait une prédiction pour ces catégories, elle est correcte.

Le rappel est le plus élevé pour la catégorie 10000 (0,99), ce qui signifie que presque toutes les instances de cette catégorie sont correctement identifiées par le modèle. Le rappel le plus bas est observé pour la catégorie 1000 (0,71), suggérant que le modèle manque quelques échantillons dans cette classe.

Le F1-Score, qui est une mesure combinée de la précision et du rappel, est également élevé pour toutes les catégories, avec un pic de 0,97 pour la catégorie 10000. Le F1-Score le plus bas est de 0,80 pour la catégorie 1000, reflétant le compromis entre la précision et le rappel dans cette catégorie.

La moyenne macro montre une performance équilibrée avec une précision de 0,96, un rappel de 0,83 et un F1-Score de 0,89, et la moyenne pondérée reflète bien la distribution des données avec des valeurs égales de 0,94 pour la précision, le rappel et le F1-Score, indiquant que le modèle gère bien les catégories majoritaires et minoritaires.

La matrice de confusion a été tracée. Elle permet de donner une vue d'ensemble des prédictions correctes et des erreurs :

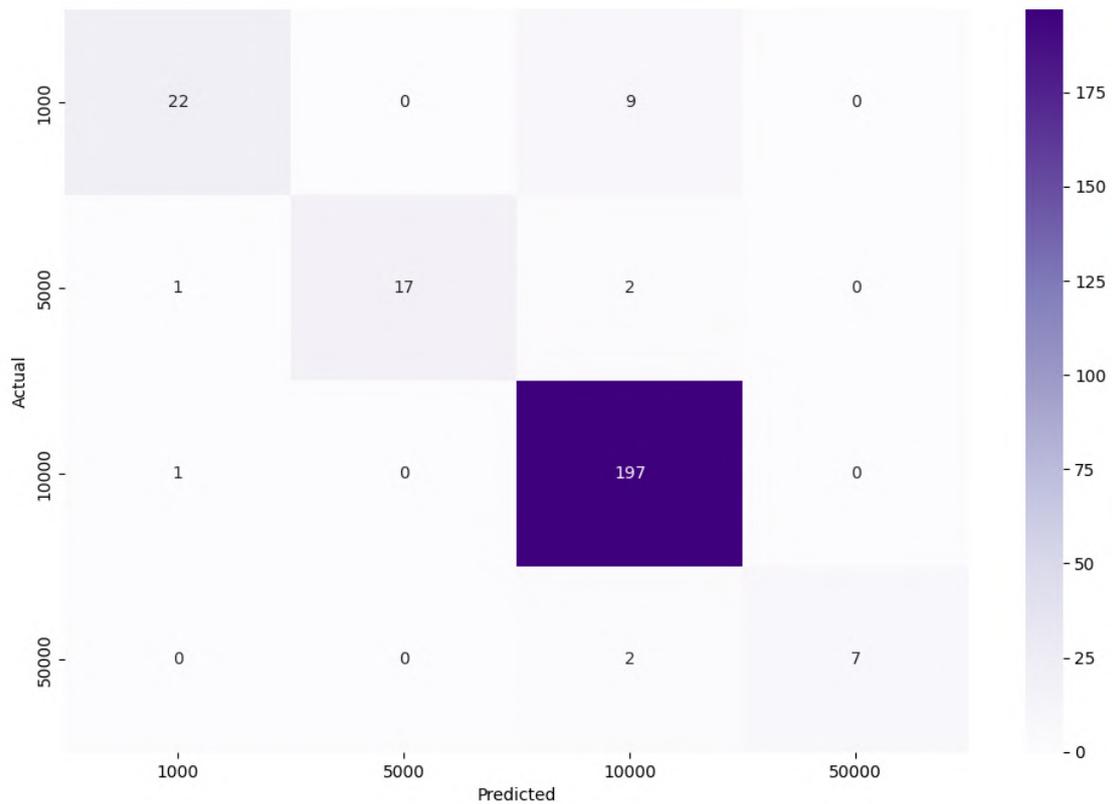


FIGURE 3.8 – Matrice de confusion du modèle Gradient Boosting

En lisant les valeurs sur la diagonale, il se dessine que la majorité des prédictions sont correctes, témoignant du fait que le modèle a bien appris à distinguer les différentes catégories.

Il y a cependant tout de même quelques erreurs de prédiction, notamment entre les catégories 1000 et 10000, où 9 échantillons de la catégorie 1000 ont été prédites comme 10000.

Le modèle montre ainsi des performances solides, et compte tenu du peu de données à disposition, il a été retenu pour l'estimation. Son application à la base d'étude a ainsi permis d'obtenir des montants de sommes assurées contenues.

Les sommes assurées pour le contenu des logements offrent également des aperçus intéressants une fois analysés en détail.

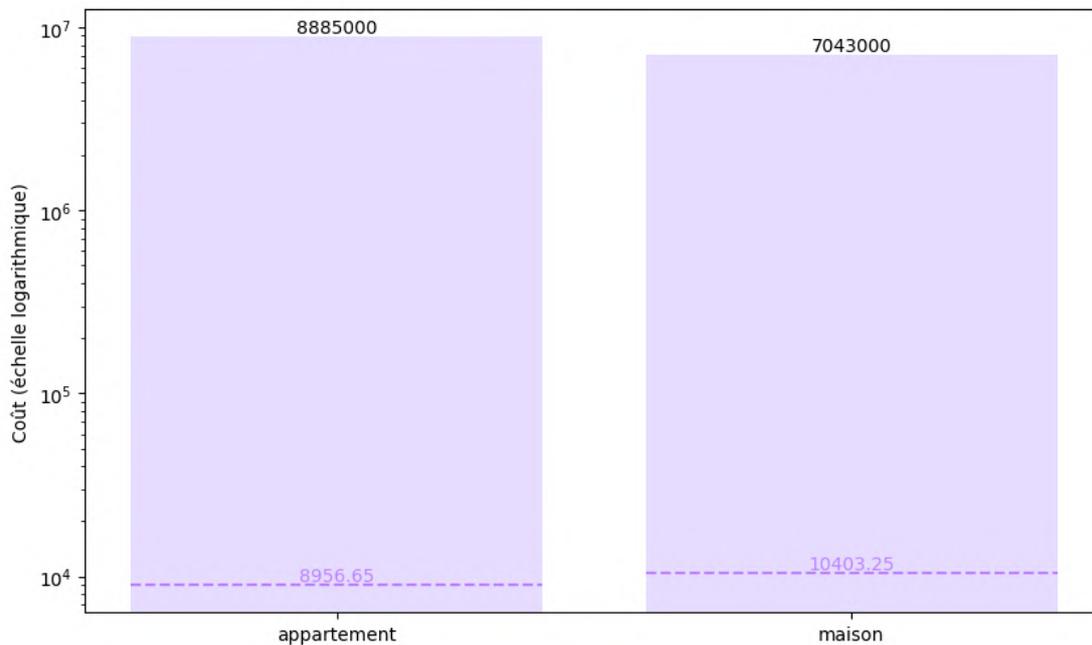


FIGURE 3.9 – Total et moyenne des sommes assurées du contenu

En traçant un graphique comparatif du coût total et moyen des contenus pour les maisons et les appartements, une tendance distincte émerge.

Contrairement aux sommes assurées bâties, le coût total assuré pour le contenu des appartements dépasse celui des maisons d'environ un milliard d'euros, malgré une proportion de logements en appartement beaucoup plus forte à la base. Cette différence n'est donc pas représentative de la proportion des types de logements, mais elle s'explique par plusieurs facteurs.

Tout d'abord, comme le montre le graphique, le coût moyen assuré pour le contenu des maisons est plus élevé que celui des appartements. Les maisons, souvent plus spacieuses, contiennent généralement des biens de plus grande valeur ou en plus grande quantité, ce qui augmente leur coût moyen assuré. Cependant, la part plus importante d'appartements contribue à ce coût total supérieur pour les appartements.

Par ailleurs, bien que significatif, le coût total assuré pour le contenu des logements reste beaucoup moins élevé que celui des sommes assurées bâties. Cela reflète la réalité que les structures elles-mêmes représentent une valeur financière plus importante que le contenu qu'elles abritent.

	<b>Appartement</b>	<b>Maison</b>	<b>Total</b>
<b>Coût moyen Bâti</b>	167 506,15	259 611,05	181 413,99
<b>Coût moyen Contenu</b>	8 956,65	10 403,25	9 175,09
<b>Somme assurée Bâti</b>	166 166 104,88	175 237 459,16	341 403 564,04
<b>Somme assurée Contenu</b>	8 885 000,00	7 043 000,00	15 928 000,00
<b>Somme assurée totale</b>	175 051 104,88	182 280 459,16	357 331 564,04

TABLE 3.5 – Résumé des sommes assurées et des coûts moyens

### 3.4 Calibrage des taux de destruction

Afin de procéder à l'évaluation d'un coût par bâtiment touché, il a fallu appliquer des taux de destruction.

Les taux de destruction sont des estimations qui quantifient le pourcentage de la valeur totale d'un bâtiment susceptible d'être endommagé en cas de sinistre. Ils varient selon le type de bâtiment et la gravité des dommages potentiels, et sont utilisés pour prévoir les coûts de réparation ou de reconstruction.

Dans ce cas, aucun historique de sinistralité spécifique aux inondations n'était à disposition, ce qui a imposé le choix de ne pas estimer les taux de destruction dans cette étude.

En conséquence, une étude existante qui fournit des taux de destruction standardisés, basés sur des analyses de risques et des cas similaires, a été utilisée.

#### 3.4.1 Caractérisation des potentiels dommages

Selon le Centre Européen de Prévention du Risque d'Inondation (CEPRI) [10], la destruction des bâtiments en cas d'inondation est déterminée par plusieurs facteurs essentiels. La hauteur d'eau est le critère le plus important, mais son impact sur les dégâts n'est pas linéaire. Les dommages augmentent par paliers lorsque certains seuils sont franchis, comme celui des allèges des fenêtres.

<b>Seuils de hauteurs d'eau</b>	<b>L'eau est susceptible d'atteindre et d'endommager</b>	
Du sol à la plinthe	<ul style="list-style-type: none"> <li>• les revêtements du sol et leurs supports</li> <li>• les plinthes</li> </ul>	
De la plinthe à l'allège	<ul style="list-style-type: none"> <li>• les prises de courant</li> <li>• les revêtements muraux</li> <li>• les cloisons</li> <li>• les murs en élévation</li> </ul>	Selon la hauteur de leur emplacement : <ul style="list-style-type: none"> <li>• les installations électriques</li> <li>• les installations de chauffage</li> <li>• les installations d'eau chaude</li> </ul>
De l'allège à sous le plafond	<ul style="list-style-type: none"> <li>• les menuiseries</li> <li>• les vitrages</li> <li>• les luminaires</li> </ul>	
Du plafond au 1 <sup>er</sup> étage	<ul style="list-style-type: none"> <li>• les conduits électriques (courants forts ou courants faibles)</li> <li>• les canalisations passant dans le plancher haut ou faux plafond</li> </ul>	

TABLE 3.6 – Dommages par paliers de hauteurs d'eau (CEPRI, [10])

La durée d'immersion est également déterminante, car une exposition prolongée à l'eau intensifie la dégradation des matériaux par capillarité et hydrolyse.

La vitesse du courant d'immersion peut exercer une pression considérable sur les structures, augmentant le risque d'érosion des fondations et d'effondrement.

Enfin, la turbidité et la pollution de l'eau, due à la présence de particules en suspension et de contaminants comme les hydrocarbures, aggravent les dégâts en rendant les matériaux plus vulnérables et en compliquant les travaux de nettoyage et de réhabilitation.

La vulnérabilité d'un bâtiment face aux inondations ne dépend pas seulement des caractéristiques de l'eau, mais également de plusieurs facteurs inhérents à la construction elle-même.

L'ancienneté du bâtiment joue un rôle important : les structures plus anciennes peuvent être moins résistantes aux infiltrations d'eau en raison de l'usure des matériaux et des techniques de construction moins avancées.

Les matériaux utilisés dans la construction influencent également la résistance aux inondations. Par exemple, les bâtiments en bois ou en matériaux poreux peuvent subir des dommages plus importants par capillarité et dégradation, tandis que ceux construits en béton ou en briques peuvent offrir une meilleure résistance, bien que non invulnérables.

Les techniques de construction et les normes en vigueur au moment de l'édification du bâtiment sont également déterminantes. Les bâtiments construits selon des normes modernes, intégrant des mesures de prévention des inondations, comme des fondations surélevées ou des matériaux hydrofuges, sont généralement mieux protégés. La conception architecturale, incluant la disposition des ouvertures et la présence de systèmes de drainage efficaces, peut également influencer la gravité des dommages.

Enfin, l'entretien régulier et les rénovations jouent un rôle essentiel dans la résilience d'un bâtiment. Des structures bien entretenues, avec des systèmes de drainage et d'étanchéité en bon état, sont moins susceptibles de subir des dommages sévères en cas d'inondation.

### **3.4.2 Les données utilisées**

Face à la complexité de prendre en compte tous ces critères et en l'absence d'un portefeuille de sinistralité permettant de calibrer précisément les taux de destruction, une approche alternative a été adoptée pour cette étude.

La décision a été prise de s'appuyer sur une recherche plus globale et standardisée, à savoir l'étude "Global flood depth-damage functions : Methodology and the database with guidelines" réalisée par le *Joint Research Centre* (JRC) de la Commission européenne.

Cette étude, publiée en 2017, a été réalisée par Jan Huizinga, Hans de Moel et Wojciech Szewczyk, fournit une méthodologie robuste et des données généralisables pour estimer les dommages liés aux inondations, offrant ainsi une base solide en l'absence de données locales spécifiques.

L'objectif principal de cette recherche était de développer des fonctions de dommages liés aux inondations à l'échelle mondiale, en se basant sur une analyse approfondie de la littérature existante et des données disponibles.

Les chercheurs ont collecté et analysé des informations provenant de nombreux pays, en se concentrant sur les relations entre la profondeur de l'eau lors d'une inondation et les dommages causés aux différents types de biens et d'infrastructures.

L'un des aspects les plus importants de cette étude est qu'elle fournit des taux de destruction (ou fonctions de dommages) pour plusieurs secteurs clés, et ce, pour chaque continent.

Les secteurs couverts sont :

- les bâtiments résidentiels ;
- les bâtiments commerciaux ;
- les bâtiments industriels ;
- les transports ;
- les infrastructures (routes) ;
- l'agriculture.

Voici par exemple les données utilisées pour cette étude. Elles concernent les bâtiments résidentiels en Europe.

Hauteur d'eau [m]	Taux de destruction [%]
0	0
0.5	25
1	40
1.5	50
2	60
3	75
4	85
5	95
6	100

TABLE 3.7 – Taux de destruction en fonction de la hauteur d'eau (*JRC* [21])

La principale limite de ces taux de destruction est qu'ils ne tiennent pas compte des différents types de bâtiments, notamment en ce qui concerne le nombre d'étages. Néanmoins,

les différentes fonctions de dommages utilisées dans cette étude ont été normalisées, ce qui permet de considérer cette limite comme une approximation acceptable.

Ces fonctions de dommages peuvent par la suite être interpolées et présentées sous forme de courbes qui mettent en relation la profondeur de l'inondation avec le pourcentage de dommages subis par chaque type de bien ou d'infrastructure.

### 3.4.3 Interpolation

Une interpolation linéaire a été mise en oeuvre.

L'interpolation par une spline d'ordre 1, également connue sous le nom de spline linéaire, consiste à relier les points de données par des segments de droite.

Les données sont divisées en intervalles basés sur les points de données, ici par les taux communiqués par JRC. Pour chaque intervalle, un segment de droite est défini, de sorte que le segment passe par les points de données aux extrémités de l'intervalle.

Chaque segment de droite est représenté par une fonction linéaire  $f(x) = a_i x + b_i$  où les coefficients  $a_i$  et  $b_i$  sont déterminés pour chaque intervalle.

La spline linéaire assure la continuité à chaque point de données, mais elle ne garantit pas la continuité des dérivées aux points de jonction des segments.

Ce choix a tout d'abord été motivé car l'interpolation linéaire est une méthode simple et directe. Cette simplicité permet de minimiser les calculs tout en fournissant une estimation raisonnablement précise pour des données où les variations entre les points sont relativement régulières.

De plus, l'interpolation linéaire est particulièrement efficace lorsque les données suivent une tendance approximativement linéaire, ce qui signifie que les valeurs intermédiaires peuvent être estimées avec une bonne précision en utilisant une ligne droite, ce qui est le cas ici.

Voici la courbe interpolée obtenue.

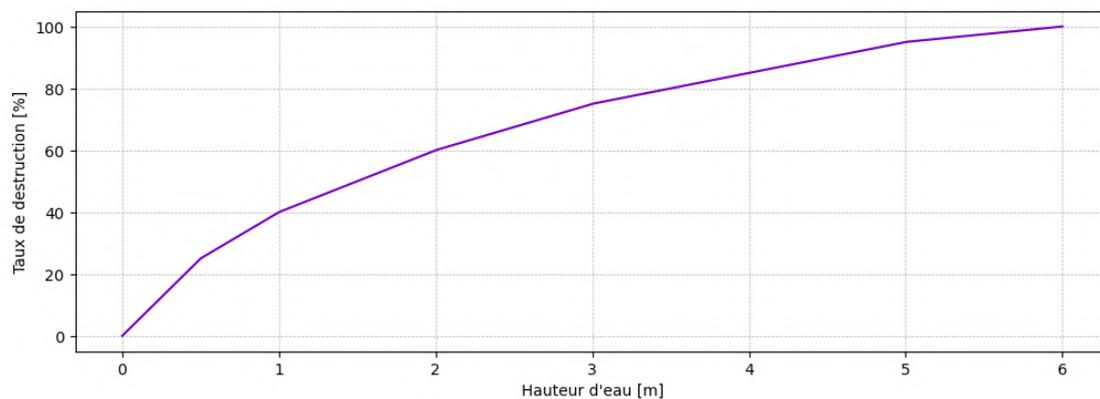


FIGURE 3.10 – Courbe de vulnérabilité obtenue par interpolation des données JRC [21]

La courbe de destruction en fonction de la hauteur d'eau révèle une relation complexe entre l'intensité des inondations et les dégâts occasionnés.

Dans la phase initiale, de 0 à 1 mètre, une augmentation rapide des dommages est observée, illustrant la vulnérabilité des infrastructures même face à des inondations mineures.

La progression s'accroît entre 1 et 3 mètres, atteignant un taux de destruction d'environ 60%, ce qui souligne l'impact dévastateur des inondations modérées sur les bâtiments et les équipements.

Au-delà de 3 mètres, la courbe s'infléchit, montrant une progression plus lente mais constante des dégâts, pour atteindre la destruction totale à 6 mètres.

## Chapitre 4

# Appréhension du risque inondation : Résultats

### 4.1 Calcul de la perte brute

Cette section présente une analyse approfondie du processus de calcul de la perte brute résultant de l'inondation du 10 décembre 2021 dans les Landes et les Pyrénées-Atlantiques. Par la suite, toutes les charges seront évaluées à l'ultime.

#### 4.1.1 Méthodologie

Afin d'estimer l'impact de l'inondation sur chacun des bâtiments, il a d'abord fallu s'intéresser au taux de destruction de chaque exposition. Il est déterminé en fonction de la hauteur d'eau dans le bâtiment concerné. Cette hauteur d'eau est obtenue par une formule spécifique :

$$H = \text{hauteur d'eau en station} + \text{zéro de l'échelle} - \text{altitude de l'exposition}$$

Il est important de noter que l'hypothèse d'une hauteur d'eau constante par cellule de Voronoï, mentionnée précédemment dans le paragraphe 2.2.2, est maintenue dans ce calcul.

Une fois ces calculs effectués, une étape de vérification est mise en place pour s'assurer de la cohérence des résultats, notamment concernant les hauteurs d'eau dans les maisons.

En théorie, ces hauteurs ne devraient jamais être négatives. Cependant, l'analyse de la base de données a révélé la présence de certaines valeurs négatives.

Pour mieux comprendre ces anomalies et leurs implications potentielles, ces cas particuliers ont fait l'objet d'un traçage spécifique. Cette approche permet non seulement d'identifier les incohérences dans les données, mais aussi d'approfondir la compréhension des facteurs influençant l'erreur.



FIGURE 4.1 – Aperçu des valeurs aberrantes

En examinant la carte pour identifier les incohérences, une tendance claire se dessine : toutes les infrastructures présentant un niveau d'eau inférieur à zéro, représentées par des points violets sur la carte, se situent en bordure de fleuve.

Cette situation découle des limitations inhérentes à la résolution du MNT. Le fleuve, étant très profond, engendre des incohérences ponctuelles, particulièrement marquées à proximité de ses rives. Ces expositions sont alors incorrectement identifiées comme étant à une profondeur très élevée.

Lorsque les infrastructures se trouvent très près du fleuve, les variations abruptes de profondeur ne sont donc pas toujours capturées avec précision. En conséquence, les calculs de hauteurs d'eau produisent des valeurs négatives, reflétant une profondeur exagérément importante.

Pour remédier à ces incohérences, un reclassement des hauteurs d'eau relatives à ces bâtiments a été effectué. Les habitations étant situées très proches du fleuve, il a été estimé qu'elles seraient les plus détruites. Un niveau de 6m d'eau a donc été imputé à ces expositions, correspondant à un taux de destruction de 100%.

Il est possible de visualiser la répartition des hauteurs d'eau dans les bâtiments inondés, avec la fréquence des différentes hauteurs d'eau sur l'axe vertical et la hauteur d'eau en mètres sur l'axe horizontal.

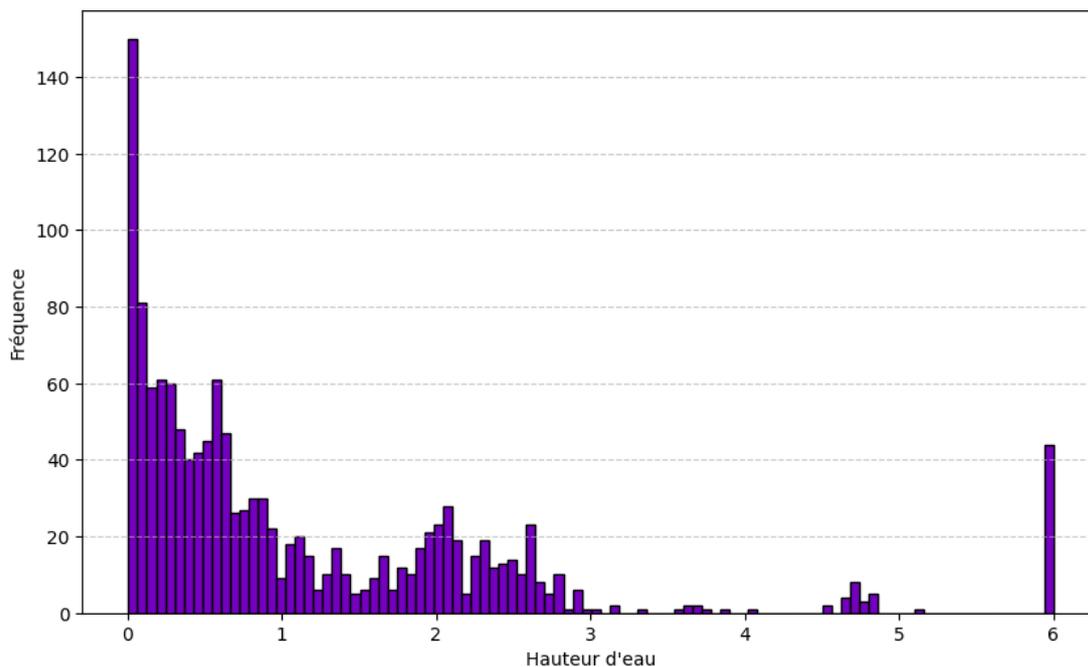


FIGURE 4.2 – Hauteurs d’eau des expositions

Il est constaté que la majorité des biens inondés sont affectés par des hauteurs d’eau très faibles, notamment entre 0 et 0,5 mètre, où plus de 140 occurrences sont observées. Cette concentration indique que les inondations les plus courantes entraînent des niveaux d’eau peu élevés.

À mesure que la hauteur d’eau augmente, la fréquence des inondations diminue progressivement. Entre 0,5 et 1 mètre, la fréquence reste notable mais diminue comparativement aux hauteurs inférieures à 0,5 mètre.

La fréquence reste significative jusqu’à environ 2 mètres de hauteur d’eau, bien qu’elle montre des variations ponctuelles. Au-delà de 2 mètres, la fréquence des inondations diminue fortement, avec quelques occurrences entre 2 et 3 mètres, et très peu de cas au-delà de 4 mètres.

Une pointe de fréquence à 6 mètres, visible sur le graphique, correspond au retraitement manuel de valeurs aberrantes en bordure de fleuve.

Une fois ces hauteurs d’eau obtenues, le taux de destruction correspondant est récupéré pour chaque habitation, et la charge brute par exposition est calculée. Cette dernière est obtenue selon la formule suivante :

Charge brute = (Somme assurée contenue+Somme assurée bâtie) × Taux de destruction

Enfin, le montant de charge total est obtenu en sommant toutes les charges brutes. Pour  $n$  expositions, la formule est la suivante :

$$\text{Charge totale} = \sum_{i=1}^n (\text{Charge brute}_i)$$

Où  $(\text{Charge brute}_i)$  est la charge correspondant à l'exposition  $i$ .

Voici un schéma récapitulatif de la méthodologie mise en oeuvre.

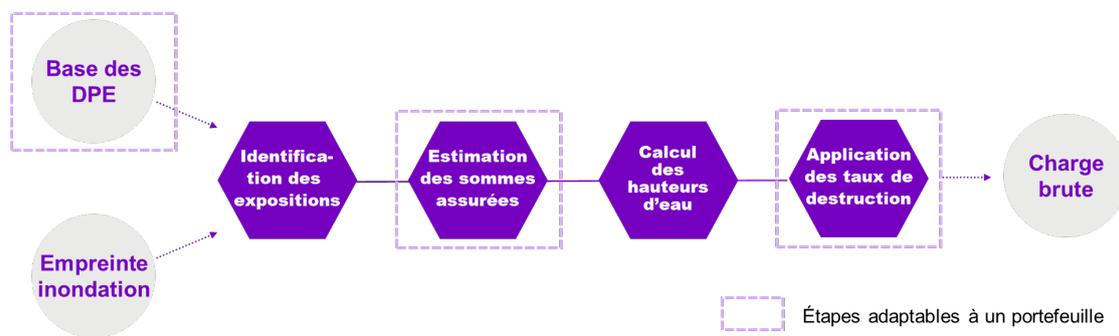


FIGURE 4.3 – Méthodologie d'estimation du montant de charge brute

### 4.1.2 Résultats

Après l'application de la méthodologie, un montant de charge brute a été obtenu, indiquant que les inondations survenues dans les Landes et les Pyrénées-Atlantiques le 10 décembre 2021 ont coûté 96 millions d'euros. Ces résultats peuvent être détaillés par commune, révélant une concentration des coûts élevés dans certaines zones.

Dax (40088) est la commune la plus touchée, avec un coût de 36 M€, suivie de Bayonne (64102) avec 32 M€, indiquant une forte exposition aux dommages.

Saint-Martin-de-Seignanx (40273) et Lahonce (64304) présentent également des coûts élevés de 3 M€ euros et 4 M€ respectivement, suggérant une vulnérabilité notable dans ces zones.

La répartition géographique des coûts montre que les communes avec des coûts élevés sont souvent situées le plus près des cours d'eau, reflétant l'impact de l'événement.

En revanche, les communes plus petites ou moins urbanisées, comme Préchacq-les-Bains (40237) avec un coût de 11 658 €, présentent des coûts beaucoup plus faibles, en raison

d'une moindre densité de population et d'infrastructures.

Voici le détail des coûts par commune, présentés sous forme de tableau par département.

Code INSEE	Commune	Coût moyen (euros)	Coût total (euros)
40018	Audon	53 506	160 519
40031	Bégaar	73 477	808 242
40088	Dax	81 974	36 314 610
40115	Gousse	28 859	28 859
40120	Hastingues	59 418	118 836
40125	Heugas	41 722	83 443
40179	Mées	89 222	446 108
40207	Oeyrely	100 063	700 443
40208	Onard	23 756	166 293
40222	Pey	61 314	61 314
40224	Peyrehorade	64 054	256 217
40230	Pontonx-sur-l'Adour	88 986	355 946
40231	Port-de-Lanne	143 815	431 444
40237	Préchacq-les-Bains	11 658	11 658
40244	Rivière-Saas-et-Gourby	124 857	1 123 713
40251	Saint-Barthélemy	171 015	2 394 210
40256	Saint-Étienne-d'Orthe	90 149	90 149
40261	Saint-Geours-de-Maremne	152 149	304 298
40263	Saint-Jean-de-Lier	74 393	818 327
40268	Saint-Laurent-de-Gosse	94 256	471 281
40271	Sainte-Marie-de-Gosse	199 995	799 980
40273	Saint-Martin-de-Seignanx	203 930	3 466 805
40279	Saint-Paul-lès-Dax	100 797	907 176
40283	Saint-Vincent-de-Paul	16 652	16 652
40293	Saubusse	138 361	553 442
40294	Saunac-et-Cambran	101 943	101 943
40300	Seyresse	66 770	267 082
40306	Sorde-l'Abbaye	44 088	44 088
40312	Tarnos	130 552	391 657
40313	Tartas	44 287	442 873
40314	Tercis-les-Bains	67 021	402 125
40315	Téthieu	98 879	98 879
40324	Vicq-d'Auribat	75 095	225 286
40334	Yzosse	81 857	163 714
<b>Total</b>			<b>53 M€</b>

TABLE 4.1 – Tableau récapitulatif des coûts par commune (1ère partie, Landes)

Code INSEE	Commune	Coût moyen (euros)	Coût total (euros)
64024	Anglet	22 215	44 430
64100	Bassussarry	668 068	668 068
64102	Bayonne	54 257	32 879 640
64140	Boucau	17 369	486 341
64250	Guiche	287 242	287 242
64304	Lahonce	95 451	4 295 300
64407	Mouguerre	111 692	2 345 529
64496	Saint-Pierre-d'Irube	30 544	61 088
64502	Sames	119 785	1 078 061
64540	Urçuit	85 722	257 165
64546	Urt	156 595	469 785
64558	Villefranque	170 203	170 203
<b>Total</b>			<b>43 M€</b>

TABLE 4.2 – Tableau récapitulatif des coûts par commune (2ème partie, Pyrénées-Atlantiques)

Il existe ainsi une grande disparité des coûts d'une commune à l'autre, indiquant que certaines communes sont beaucoup plus vulnérables et/ou ont subi des dommages beaucoup plus importants que d'autres.

Une analyse des coûts entre les deux départements révèle une différence significative : les Pyrénées-Atlantiques enregistrent un coût total de 43 M€, tandis que les Landes atteignent 53 M€.

Cette différence est notable, surtout compte tenu du fait que 60% des expositions se trouvent dans les Pyrénées-Atlantiques contre 40% dans les Landes, comme indiqué sur le graphique 3.4.

Cela suggère que les dommages dans les Landes sont plus importants par exposition, indiquant une vulnérabilité accrue ou une sévérité de l'événement plus importante. Cela pourrait également s'expliquer par une proportion plus importante de maisons dans les Landes que dans les Pyrénées-Atlantiques.

Il est par ailleurs possible de décliner ces résultats en distinguant les types des habitations.

Type de bâtiment	Coût (euros)
Appartement	32 531 800
Maison	63 538 670

TABLE 4.3 – Tableau récapitulatif des coûts par type de bâtiment

L'analyse des coûts des sinistres révèle une nette différence entre les appartements et les

maisons. Les dommages totaux pour les appartements s'élèvent à 32 M€, tandis que les maisons affichent un coût significativement plus élevé de 63 M€. Cela s'explique tout d'abord par un coût global des maisons plus élevé, comme remarqué sur le tableau 3.5.

En effet, la somme assurée totale pour les maisons est de 182 M€, face à 175 M€ pour les appartements. Cependant, malgré des coûts globaux relativement proches, les sinistres observés montrent que les maisons sont proportionnellement plus touchées que les appartements.

Cette disparité indique que, bien que les maisons représentent une part similaire du coût global total, elles subissent des dommages plus sévères que les appartements.

### **4.1.3 Validation**

Selon un rapport publié par la CCR en juillet 2022, qui dresse le bilan des catastrophes naturelles en France de 1982 à 2021, "le coût des dommages assurés pour cet événement est estimé entre 75 et 85 M€ pour l'ensemble du marché" [8].

L'estimation du coût des dommages assurés pour cet événement, calculée à 96 millions d'euros par le modèle développé dans cette étude, dépasse légèrement la fourchette de 75 à 85 millions d'euros rapportée par la CCR.

Plusieurs facteurs peuvent expliquer cette divergence. Le modèle utilise diverses hypothèses en raison d'un manque de données spécifiques, ce qui peut introduire une incertitude dans les résultats. De plus, cette estimation ne prend pas en compte les franchises et les clauses de limitation, couramment appliquées dans les contrats d'assurance pour réduire les montants indemnisés. L'absence de ces éléments dans le modèle pourrait expliquer une partie de l'écart observé.

Pour mieux comprendre l'impact de ces hypothèses sur les résultats, une analyse de sensibilités a été menée.

## **4.2 Sensibilités**

Cette section a pour objectif d'examiner les différentes hypothèses formulées tout au long de cette étude et leur impact sur les résultats, et de répondre à certaines interrogations qui pourraient rester.

### **4.2.1 Sensibilités sur la modélisation de l'empreinte d'inondation**

Il est naturel de se questionner sur l'impact qu'aurait une petite variation de hauteurs d'eau dans l'intensité du phénomène étudié. Cela permet de se rendre compte que des

variations de hauteurs d'eau, même minimales, peuvent avoir des conséquences significatives sur l'ampleur et la portée des inondations.

La réalisation d'une analyse de sensibilité sur les hauteurs d'eau en modifiant ces dernières de  $\pm 5\%$  dans chaque station constitue donc une démarche motivée par l'évaluation de l'impact potentiel des inondations par débordement. Cette approche permet ainsi d'explorer des scénarios alternatifs, offrant ainsi une vision plus complète des risques associés aux crues.

	<b>Appartement</b>	<b>Maison</b>	<b>Total</b>
<b>Scénario -5%</b>	24 330 460	53 714 150	78 M€
<b>Scénario de référence</b>	32 531 800	63 538 670	96 M€
<b>Scénario +5%</b>	44 075 400	75 322 950	119 M€

TABLE 4.4 – Sensibilités sur les hauteurs d'eau : tableau récapitulatif des coûts par type de bâtiment

L'analyse des résultats de la sensibilité sur les hauteurs d'eau met en lumière des variations considérables des coûts estimés pour différents types de bâtiments selon les scénarios de hauteurs d'eau.

Dans le scénario avec une réduction de 5% des hauteurs d'eau, les coûts sont estimés à 24 M€ pour les appartements et à 53 M€ pour les maisons, totalisant 78 M€. Cette situation représente une diminution significative de 18 M€ par rapport au scénario de référence, soulignant que même une légère baisse des hauteurs d'eau peut entraîner une réduction substantielle des dommages estimés.

À l'inverse, pour le scénario avec une augmentation de 5% des hauteurs d'eau, les coûts s'élèvent à 44 M€ pour les appartements et à 75 M€ pour les maisons, ce qui donne un coût total de 119 M€. Cela correspond à une hausse de 23 M€ par rapport au scénario de base, démontrant que même une légère augmentation des hauteurs d'eau peut engendrer des dommages considérables.

Il est également pertinent de noter que les appartements affichent une variation proportionnelle des coûts plus marquée en réponse aux changements de hauteur d'eau, ce qui suggère une sensibilité accrue aux petites fluctuations d'inondation dans cette zone.

Cette approche offre également l'opportunité d'évaluer la réactivité de ce modèle face à divers scénarios, tout en consolidant la validité de la méthodologie adoptée. En testant le modèle avec des variations des hauteurs d'eau, il est possible d'observer comment il s'adapte et réagit aux changements, ce qui permet de mieux comprendre ses limites et ses capacités prédictives.

Les coûts financiers évoluent de manière cohérente avec les changements de hauteur d'eau.

Une augmentation des niveaux d'eau entraîne logiquement une hausse des coûts, tandis qu'une diminution des niveaux d'eau se traduit par une baisse des dommages estimés.

Par ailleurs, il est intéressant de noter que le scénario choqué à -5% se rapproche des estimations de la CCR, dans la mesure où l'empreinte d'inondation modélisée représente un scénario pessimiste. En effet, cette modélisation ne prend pas en compte l'absorption d'eau par le sol en fonction de la distance au lit d'eau, ce qui accentue l'impact estimé de l'inondation.

Cette approche, en démontrant que le modèle peut fournir des estimations cohérentes et fiables dans des conditions variées, a ainsi permis de renforcer la confiance dans les résultats obtenus.

Il est également possible de représenter ces résultats sous forme d'écart en pourcentage par rapport au scénario de référence.

	Nombre de sinistrés (%)	Charge brute (%)
<b>Scénario -5%</b>	-16,41%	-18,75%
<b>Scénario +5%</b>	+15,04%	+23,96%

TABLE 4.5 – Sensibilités sur les hauteurs d'eau : écarts en pourcentage par rapport au scénario de référence

L'analyse des résultats du tableau de sensibilité sur les hauteurs d'eau révèle des variations significatives des coûts et du nombre de sinistrés en pourcentage par rapport au scénario de référence. Il convient de souligner l'effet amplificateur de ces variations : un changement de l'ordre de  $\pm 5\%$  de la hauteur d'eau se traduit par une variation approximative de  $\pm 20\%$  des coûts financiers.

Ces chiffres illustrent clairement l'impact considérable et non proportionnel des fluctuations des hauteurs d'eau sur les coûts estimés et le nombre de sinistrés. L'asymétrie observée peut s'expliquer par le fait que le taux de destruction atteint 100% plus rapidement dans le cadre du choc à +5%.

#### 4.2.2 Sensibilités sur l'estimation du coût

Les estimations de coûts présentées dans ce mémoire reposent sur plusieurs hypothèses clés. Ces postulats, bien que nécessaires à l'analyse, peuvent potentiellement introduire des biais dans l'évaluation de la situation réelle. Afin de garantir la robustesse des conclusions et d'identifier les facteurs les plus influents, ces hypothèses ont été soumises à un examen rigoureux.

Pour ce faire, une série de sensibilités sera mise en oeuvre dans cette partie. Cette approche méthodique permettra de quantifier l'impact de chaque hypothèse sur le résultat

final, d'identifier les variables les plus critiques pour l'estimation des coûts, et d'évaluer la stabilité des conclusions face à des variations des paramètres d'entrée.

Cette démarche vise à renforcer la crédibilité des estimations présentées, et à fournir une compréhension plus nuancée des facteurs influençant les coûts.

### Estimation des taux de destruction

Pour évaluer de manière rigoureuse la charge brute à la suite de cette inondation, une analyse de sensibilité sur les taux de destruction a été intégrée au modèle.

Cette approche vise à pallier l'absence de données spécifiques qui a conduit à utiliser les taux de destruction fournis par le JRC pour l'ensemble de l'Europe.

Afin de refléter une potentielle variabilité dans la vulnérabilité ou la résistance des infrastructures locales par rapport aux estimations européennes, des chocs de  $\pm 5\%$  ont été appliqués aux taux de destruction initiaux.

Pour garantir la cohérence avec le scénario de référence, les hauteurs d'eau reclassées pour les biens situés en bordure de fleuve ont été maintenues à un niveau de reclassement de 6 mètres.

Voici les courbes de vulnérabilité obtenues.

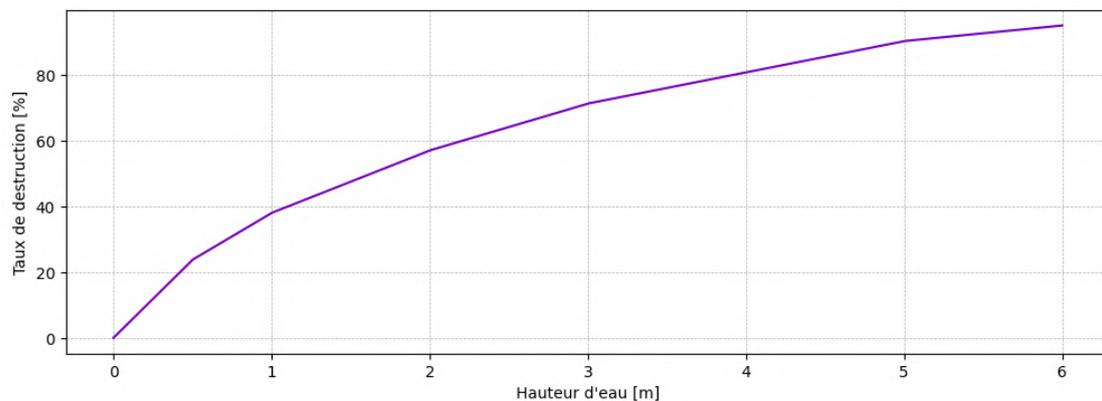


FIGURE 4.4 – Sensibilités sur les taux de destruction : courbe de vulnérabilité après l'application d'un choc de -5%

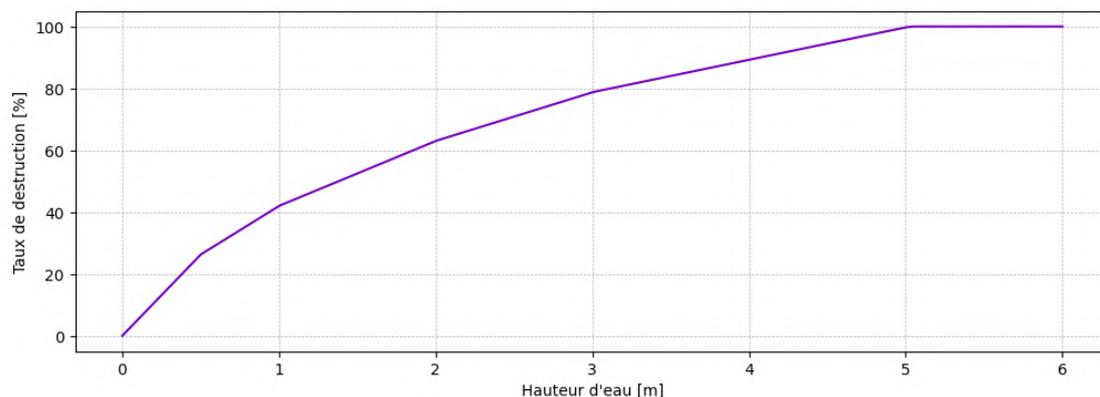


FIGURE 4.5 – Sensibilités sur les taux de destruction : courbe de vulnérabilité après l’application d’un choc de +5%

Cette approche permet d’observer les charges suivantes en fonction des différents scénarios de destruction.

	Appartement	Maison	Total	Écart (%)
<b>Scénario -5%</b>	30 905 210	60 361 740	91 M€	-5,21%
<b>Scénario de référence</b>	32 531 800	63 538 670	96 M€	–
<b>Scénario +5%</b>	33 784 370	66 579 200	100 M€	+4,17%

TABLE 4.6 – Sensibilités sur les taux de destruction : tableau récapitulatif des coûts par type de bâtiment et écarts en pourcentage par rapport au scénario de référence

La variation des coûts n’est pas parfaitement symétrique : une diminution de 5% des taux de destruction entraîne une baisse de 5,21% des coûts totaux, tandis qu’une augmentation de 5% ne provoque qu’une hausse de 4,17%. Cette asymétrie pourrait s’expliquer par des effets non linéaires dans le reclassement spécifique des biens en bordure de fleuve.

### Estimation des superficies

L’étude initiale sur les coûts liés aux inondations a utilisé un facteur de 0,56 pour calculer la superficie des appartements par rapport à celle des maisons.

Cependant, ce ratio peut varier selon les caractéristiques régionales de l’habitat. Pour tenir compte de cette variabilité potentielle, une analyse de sensibilité a été menée en modifiant ce facteur.

Deux scénarios alternatifs ont été testés : l’un avec un facteur de 0,5 et l’autre avec un facteur de 0,6, encadrant ainsi la valeur de référence.

Cette analyse de sensibilité s'avère utile pour plusieurs raisons. Premièrement, elle permet de prendre en compte les spécificités régionales potentielles en matière d'urbanisme et d'habitat.

La taille relative des appartements par rapport aux maisons peut varier significativement d'une région à l'autre, influençant ainsi l'exposition aux risques d'inondation et les coûts associés.

	Appartement	Maison	Total	Écart (%)
<b>Scénario x0,5</b>	31 714 020	66 236 750	98 M€	+2,08%
<b>Scénario de référence</b>	32 531 800	63 538 670	96 M€	–
<b>Scénario x0,6</b>	33 024 270	65 369 880	98 M€	+2,08%

TABLE 4.7 – Sensibilités sur les superficies : tableau récapitulatif des coûts par type de bâtiment et écarts en pourcentage par rapport au scénario de référence

Les deux scénarios alternatifs (x0,5 et x0,6) montrent une augmentation similaire de 2,08% des coûts totaux par rapport au scénario de référence.

Bien que l'écart de coûts soit symétrique, les valeurs des facteurs de calcul de la superficie des appartements par rapport aux maisons (0,5 et 0,6) ne sont pas parfaitement symétriques par rapport à la valeur de référence (0,56).

Cependant, malgré les variations dans les proportions de superficie, le coût total reste relativement stable, avec une augmentation modérée. Cette stabilité relative des coûts totaux, malgré les variations de superficie, suggère une compensation des variations entre les coûts des maisons et des appartements.

Ces résultats mettent en évidence l'importance de la précision dans l'estimation des superficies relatives des appartements et des maisons.

### **Reclassement des hauteurs d'eau en bordure de fleuve**

Dans le cadre de l'évaluation des coûts liés aux inondations, une attention particulière a été portée aux hauteurs d'eau en bordure de fleuve.

En raison des limitations de la maille de calcul, les hauteurs d'eau dans les habitations de ces zones ont initialement été estimées à 6 mètres, ce qui pourrait ne pas refléter avec précision les conditions réelles.

Pour améliorer la précision de l'évaluation, une analyse de sensibilité a été effectuée en variant le reclassement des hauteurs d'eau pour les maisons situées en bordure de fleuve. Cette analyse a exploré deux approches : l'utilisation du maximum des hauteurs d'eau

et l'utilisation de la moyenne.

Cette sensibilité est essentielle pour plusieurs raisons. Premièrement, l'utilisation de l'hypothèse de reclassement des hauteurs d'eau peut conduire à une surestimation des dommages, ce qui pourrait fausser les résultats.

En variant le reclassement, il est possible de vérifier si une estimation plus modérée des hauteurs d'eau pourrait offrir une meilleure représentation des risques et des coûts associés.

Il est possible d'observer les distributions de hauteurs d'eau correspondant à chaque reclassement.

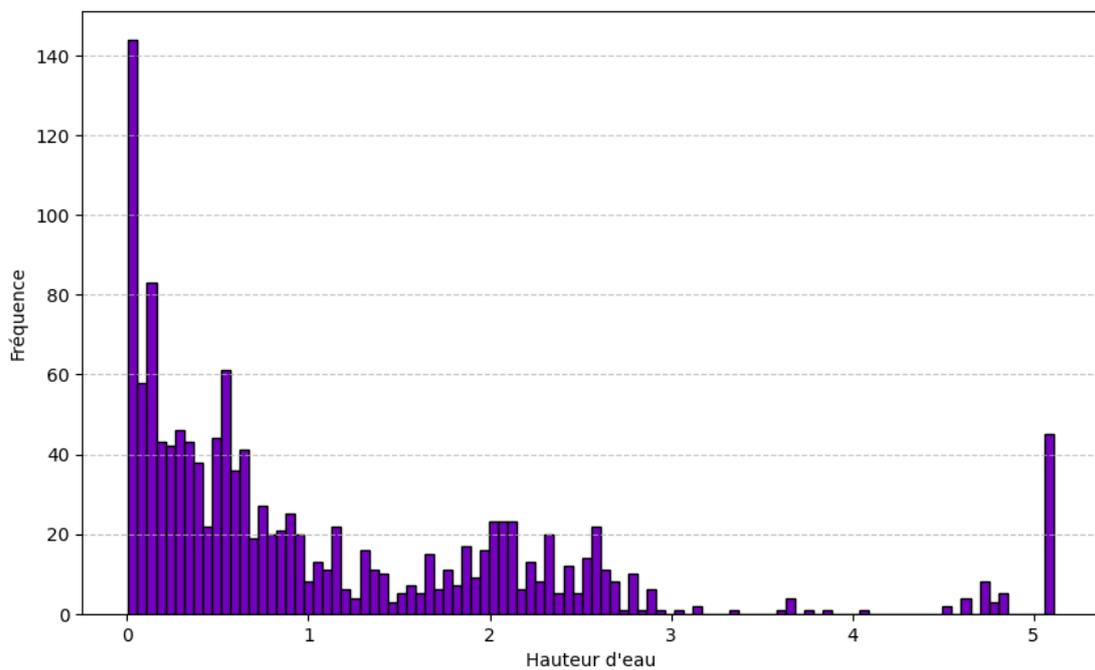


FIGURE 4.6 – Sensibilités sur le reclassement des hauteurs d'eau en bordure de fleuve : hauteurs d'eau des expositions après reclassement au maximum observé

Dans ce scénario, un reclassement au maximum des observations de hauteurs d'eau a été mis en place.

Concrètement, pour chaque observation, la hauteur d'eau maximale enregistrée dans les autres maisons a été identifiée, et cette valeur a été imputée aux expositions nécessitant un retraitement.

Cette méthode permet de simuler une situation extrême où chaque observation est asso-

ciée à la hauteur d'eau la plus élevée observée ailleurs.

Les résultats obtenus montrent une tendance similaire à celle observée précédemment, sur le graphique 4.2, mais avec une particularité notable : le pic lié au reclassement est marqué peu après une hauteur de 5 mètres d'eau, contre 6 précédemment.

Ce pic représente le maximum de hauteur d'eau observée, et c'est cette valeur qui a été utilisée pour le retraitement des données.

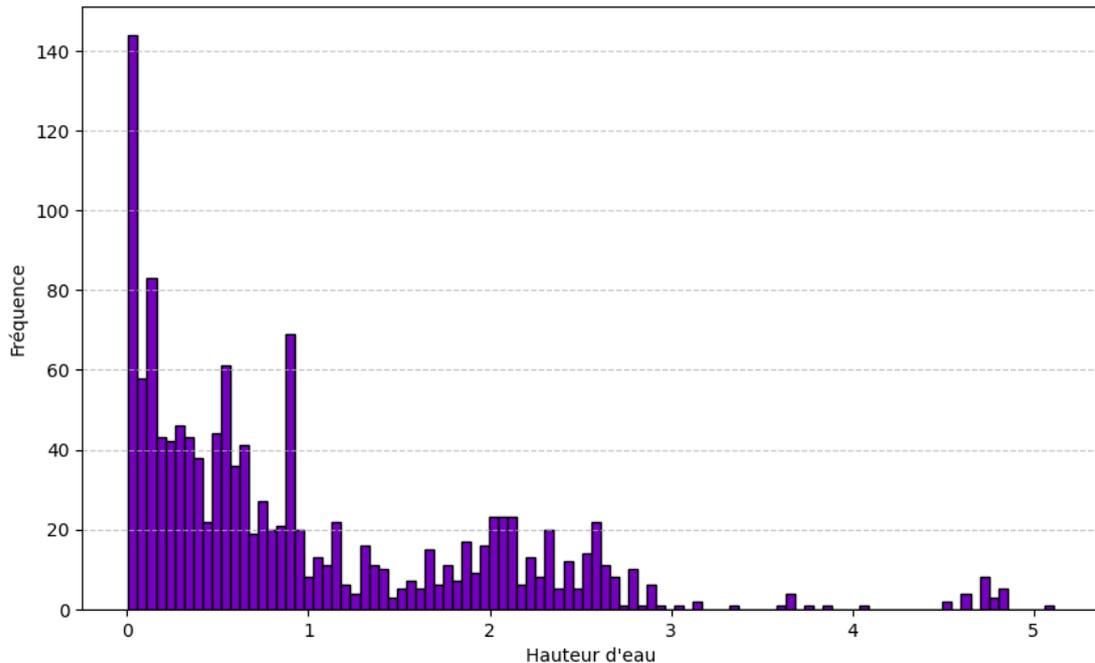


FIGURE 4.7 – Sensibilités sur le reclassement des hauteurs d'eau en bordure de fleuve : hauteurs d'eau des expositions après reclassement à la moyenne

Dans ce second cas de figure, le reclassement des observations a été effectué en utilisant la moyenne des hauteurs d'eau.

Cette méthode consiste à attribuer, pour chaque observation, la valeur moyenne des hauteurs d'eau enregistrées dans les autres maisons.

Les résultats obtenus montrent une distribution beaucoup plus lisse, notamment dans les valeurs extrêmes. En effet, le pic observé se situe légèrement avant une hauteur d'un mètre d'eau, ce qui correspond à une plage de valeurs où les expositions sont plus nombreuses.

À première vue, cette approche semble donc la plus naturelle, car elle permet de réduire

les variations extrêmes et d'atténuer les pics observés dans les hauteurs d'eau les plus élevées. En lissant ainsi les données, une représentation plus équilibrée et réaliste des expositions est obtenue.

Ces deux reclassements donnent les résultats suivants.

	<b>Appartement</b>	<b>Maison</b>	<b>Total</b>	<b>Écart (%)</b>
<b>Scénario à la moyenne</b>	27 844 050	61 836 400	89 M€	-7,29%
<b>Scénario au maximum</b>	32 198 920	63 417 790	95 M€	-1,04%
<b>Scénario de référence</b>	32 531 800	63 538 670	96 M€	–

TABLE 4.8 – Sensibilités sur le reclassement des hauteurs d'eau en bordure de fleuve : tableau récapitulatif des coûts par type de bâtiment et écarts en pourcentage par rapport au scénario de référence

Les résultats montrent que le scénario à la moyenne entraîne une diminution significative des coûts totaux, tandis que le scénario au maximum montre une diminution modérée. Dans les deux cas, les résultats sont plus proches de l'estimation de la CCR présentée au paragraphe 4.1.3.

Cette sensibilité pourrait ainsi remettre en cause l'hypothèse initiale, qui est peut-être trop discriminante envers les biens situés en bordure de fleuve.

En effet, l'estimation des hauteurs d'eau au maximum peut entraîner une surestimation des dommages et des coûts associés, ce qui pourrait résulter en une surévaluation des risques pour les biens situés dans ces zones.

Cependant, en l'absence de données plus précises, cette hypothèse initiale demeure la plus prudente pour l'assureur. Elle permet de prendre en compte les risques potentiels liés aux inondations dans le pire des scénarios.

## 4.3 Forces et limites de la modélisation

La modélisation présentée constitue un outil puissant pour la compréhension et l'analyse des phénomènes étudiés. Elle présente des forces et des limites qui seront explorées dans cette section.

### 4.3.1 Réplicabilité

La méthodologie de calcul de la charge brute lors d'une inondation, développée dans cette étude, présente une répliquabilité qui étend considérablement son champ d'application.

Bien qu'initialement conçue dans un contexte général, cette approche peut être aisément adaptée à l'analyse de portefeuilles spécifiques, où elle pourra être consolidée et sera donc

plus précise, offrant ainsi un outil précieux pour les assureurs.

La force de cette méthodologie réside dans sa flexibilité et sa capacité à être appliquée à grande échelle, potentiellement sur l'ensemble du territoire français, voire au-delà des frontières nationales.

La répliquabilité de cette approche est conditionnée par la disponibilité de données similaires à celles utilisées dans l'étude initiale. Avec les ajustements appropriés et l'accès aux informations pertinentes, cette méthodologie pourrait être déployée dans d'autres pays, offrant ainsi une perspective internationale sur l'évaluation des risques d'inondation.

Cependant, il faut souligner que l'application de cette méthode à des portefeuilles spécifiques nécessite une attention particulière à certains critères clés, détaillés ci-après.

### **Géocodage**

La majorité des contrats d'un portefeuille assurantiel incluent une adresse postale, mais ces adresses sont rarement géocodées.

Cependant, pour permettre le croisement des différents modules de l'outil présenté, il est indispensable de disposer des coordonnées de latitude et de longitude. Par conséquent, il est nécessaire de géocoder le portefeuille en amont. Pour ce faire, une approche utilisant l'API (*Application Programming Interface*) Adresses [12] du gouvernement a été mise en place.

L'API Adresses du gouvernement français est un service en ligne qui permet de géocoder des adresses, c'est-à-dire de convertir des adresses postales en coordonnées géographiques (latitude et longitude).

Elle offre une flexibilité remarquable dans ses fonctionnalités. Elle permet non seulement de géocoder une adresse spécifique, mais elle étend également cette capacité à des ensembles de données plus volumineux. En effet, l'API est capable de traiter des fichiers CSV entiers, offrant ainsi une solution efficace pour le géocodage en masse. Cependant, il est important de noter une limitation technique : la taille du fichier CSV fourni ne doit pas dépasser 50 Mo.

Voici un exemple d'utilisation de cette API. L'adresse de l'EURIA a été géocodée. Les *input* de la fonction sont donc, sous forme de chaînes de caractères :

- Adresse : "6 avenue Victor Le Gorgeu"
- Code Postal : "29200"
- Ville : "Brest"

Lors de l'utilisation de l'API, une requête est envoyée pour obtenir des informations géographiques précises sur l'adresse spécifiée. L'API utilise le format JSON (JavaScript Object Notation) pour retourner les données, qui est un format léger et facile à lire pour l'échange de données entre un serveur et une application web.

Dans cet exemple, une requête a été envoyée pour obtenir des informations sur l'adresse de l'EURIA. Le fichier JSON retourné contient plusieurs informations détaillées, y compris les coordonnées géographiques, le code postal, le code de la ville, et d'autres métadonnées utiles. Le fichier JSON correspondant à la réponse de l'API après cette requête de géocodage est présenté à l'annexe F.

Il est ensuite possible d'extraire les coordonnées GPS, et de les tracer sur une carte, pour s'assurer de la cohérence de la démarche. Cela permet de visualiser concrètement la localisation obtenue et de confirmer que le point affiché correspond bien à l'adresse de l'EURIA (6 avenue Victor Le Gorgeu, 29200 Brest), attestant ainsi de la précision et de la fiabilité du processus de géocodage utilisé.



FIGURE 4.8 – Adresse de l'EURIA géocodée

### **Adaptabilité du calcul des sommes assurées**

La nature et l'étendue des sommes assurées dans le cadre des risques d'inondation varient considérablement en fonction du statut de l'assuré par rapport au bien immobilier. Cette différenciation est un aspect à prendre en compte dans l'évaluation des risques et l'estimation des coûts potentiels liés aux sinistres.

Par exemple, un locataire n'assurera que le contenu de son logement, tandis qu'un propriétaire occupant devra assurer à la fois le bâtiment et son contenu.

	<b>Bâti assuré</b>	<b>Contenu assuré</b>
<b>Propriétaire résident</b>	Oui	Oui
<b>Locataire</b>	Non	Oui
<b>Propriétaire-bailleur</b>	Oui	Non

TABLE 4.9 – Fonctionnement des sommes assurées

Ces variations ont des implications significatives sur le calcul de la charge brute portée par l'assureur en cas d'inondation.

Il serait donc essentiel, dans le cadre de l'application de cette étude à un portefeuille, de tenir compte de ces nuances pour chaque catégorie d'assuré, afin d'obtenir une évaluation plus juste et réaliste des risques potentiels de l'assureur et des coûts associés.

C'est pourquoi la méthodologie développée a été pensée pour être facilement adaptable à ce contexte, avec la possibilité de prendre en compte ces facteurs.

De plus, la prise en compte des franchises et des clauses de limitation pourrait être introduite pour affiner encore davantage l'évaluation des risques et des coûts.

### **Prise en compte de la réassurance**

Bien que le modèle soit conçu pour fournir des prédictions précises du montant de charge brute attendu pour l'assureur suite à une inondation, il est évident que chaque assureur a ses propres stratégies et paramètres de réassurance qui influent sur ses coûts et ses risques.

Pour répondre à ces besoins spécifiques, un module de réassurance pourrait être ajouté pour être personnalisé en fonction des exigences de chaque assureur. Cela permettrait au modèle de prendre en compte les spécificités de la réassurance de chaque assureur, offrant ainsi des prédictions plus précises et plus pertinentes en terme de charge finale pour l'assureur.

En outre, ce module de réassurance pourrait également être étendu pour inclure des scénarios de reconnaissance de catastrophes naturelles.

Dans ce cas, le modèle pourrait simuler les conséquences financières d'une reconnaissance de CATNAT sur les coûts de l'assureur, en tenant compte des critères de réassurance spécifiques et des mécanismes de solidarité mis en place pour gérer ces événements exceptionnels.

### 4.3.2 Avantages de la méthode pour un assureur

L'utilisation de données satellites pour modéliser l'étendue d'une inondation présente plusieurs avantages significatifs pour un assureur.

Tout d'abord, cette méthode permet d'obtenir une estimation plausible des pertes peu de temps après la survenance de l'événement. Bien que cette estimation ne puisse pas remplacer le travail des équipes de terrain qui constatent les dommages directement, elle offre une vue d'ensemble rapide et précise de l'ampleur de l'inondation.

En effet, les données satellites sont accessibles relativement rapidement et facilement, généralement dans un délai de cinq jours après l'événement. L'exécution du modèle est également très efficace, prenant environ 30 minutes pour fournir une estimation des pertes, hors récupération des données. Une fois les données satellites acquises, il est alors possible d'obtenir dans la journée un résultat complet, incluant l'adaptation de l'étude à l'événement considéré, ce qui est nettement plus rapide que le temps nécessaire pour les remontées de terrain et leur consolidation. De plus, l'accès à ces données est gratuit, ce qui réduit les coûts associés à la collecte d'informations.

Cela permet aux assureurs de réagir promptement et de commencer à évaluer les impacts financiers sans attendre les rapports détaillés des équipes de terrain. En identifiant rapidement les bâtiments touchés et en estimant le montant des pertes brutes, les assureurs peuvent prioriser les interventions et évaluer l'ampleur des pertes de manière plus efficace.

### 4.3.3 Perspectives

Cette étude, bien que fournissant des résultats prometteurs, présente plusieurs axes d'amélioration et de développement potentiels.

Tout d'abord, les contraintes techniques et de puissance de calcul ont limité certains aspects de l'analyse. L'utilisation d'un modèle numérique de terrain à plus haute résolution pourrait affiner considérablement la précision des simulations d'inondation. De même, l'accès à des données satellites plus précises, bien que potentiellement coûteuses, pourrait permettre d'enrichir le modèle.

Par ailleurs, les méthodes de modélisation des inondations pourraient être perfectionnées en intégrant des paramètres supplémentaires. La prise en compte de l'imperméabilité des sols ou des structures artificielles comme les murs pouvant faire obstacle à l'écoulement de l'eau pourraient par exemple permettre d'obtenir une simulation plus précise des phénomènes d'inondation étudiés.

Enfin, il serait pertinent de valider et d'ajuster les hypothèses prises à l'aide de données historiques de sinistralité. Une étude approfondie d'événements passés, avec les données

réelles sur les bâtiments et les sommes assurées, ainsi que leurs coûts associés, permettrait de calibrer le modèle pour qu'il reflète au mieux la réalité. Cette approche comparative entre les prédictions du modèle et les données historiques offrirait l'opportunité d'affiner les estimations et d'améliorer la fiabilité des projections en termes de risques et de coûts assurantiels.

# Conclusion

Ce mémoire s'est attaché à explorer une démarche innovante : l'utilisation des données satellites comme levier pour l'appréhension du risque d'inondation.

L'objectif principal était de développer un outil accéléré, permettant aux compagnies d'assurance de procéder à un provisionnement rapide face à ce risque majeur. Cette approche novatrice vise à répondre aux défis croissants posés par les événements climatiques extrêmes, en particulier les inondations, qui représentent un enjeu financier considérable pour les assureurs.

L'étude conduite s'est structurée autour de plusieurs axes complémentaires. Dans un premier temps, un panorama complet du cadre de l'étude a été dressé, mettant en lumière les enjeux globaux liés au risque d'inondation et à son assurance. Cette contextualisation a souligné l'importance d'une nouvelle approche dans la gestion de ce risque.

Le cœur du travail a ensuite porté sur la modélisation du phénomène d'inondation. Le potentiel des données satellites, enrichies par des données extérieures pertinentes, a été exploité pour modéliser la dynamique réelle des inondations. Cette approche multidimensionnelle a permis de capturer la complexité et la variabilité spatiotemporelle des événements d'inondation.

Sur la base de cette modélisation, une méthodologie rigoureuse visant à quantifier la charge financière portée par l'assureur a été élaborée. Cette démarche a impliqué deux étapes : l'identification précise des expositions et la quantification de leur risque propre, afin d'appliquer des taux de destruction adaptés.

Pour valider la pertinence et l'efficacité du modèle, celui-ci a été appliqué à un cas réel d'inondation. Cette étude de cas a non seulement permis de vérifier la cohérence des résultats obtenus, mais a également mis en évidence le potentiel d'adaptation du modèle.

En effet, la structure flexible de l'outil laisse entrevoir la possibilité de l'ajuster aux besoins spécifiques des assureurs, avec notamment l'intégration potentielle de paramètres variés tels que les conditions de réassurance. Bien que cette personnalisation n'ait pas été mise en œuvre dans le cadre de cette étude, elle représente une perspective prometteuse

pour de futurs développements.

Il est important de souligner que l'étude s'est concentrée sur un événement spécifique, principalement en raison des limitations dans la disponibilité des données historiques. Néanmoins, la méthodologie développée présente l'avantage considérable d'être répliquable sur n'importe quel cours d'eau du globe.

Les perspectives ouvertes par ce travail sont nombreuses et prometteuses. La méthodologie élaborée pourrait par exemple être étendue à d'autres risques, tels que les incendies, élargissant ainsi le champ d'application de cette approche.

Cependant, il convient de reconnaître certaines limites à cette approche. Les contraintes en termes de puissance de calcul ont imposé des simplifications dans la modélisation de l'empreinte des inondations. Une amélioration de ces aspects computationnels permettrait d'affiner la précision du modèle.

De même, la quantification des coûts pourrait bénéficier d'une recherche plus approfondie, basée sur un volume plus important de données historiques, afin d'affiner les taux de destruction et d'améliorer la précision des estimations.

Malgré ces limitations, le modèle développé dans le cadre de ce mémoire répond de manière efficace à un besoin spécifique et pressant du secteur de l'assurance. Il offre une méthode d'estimation rapide et précise de l'ampleur des inondations par débordement, tant en termes géographiques que financiers.

Cette capacité à fournir une évaluation prompte et fiable des risques et des coûts potentiels représente un atout majeur pour les assureurs, leur permettant d'anticiper et de gérer plus efficacement les conséquences financières des événements d'inondation.

## Annexe A

# Carte des communes disposant d'un PPRN

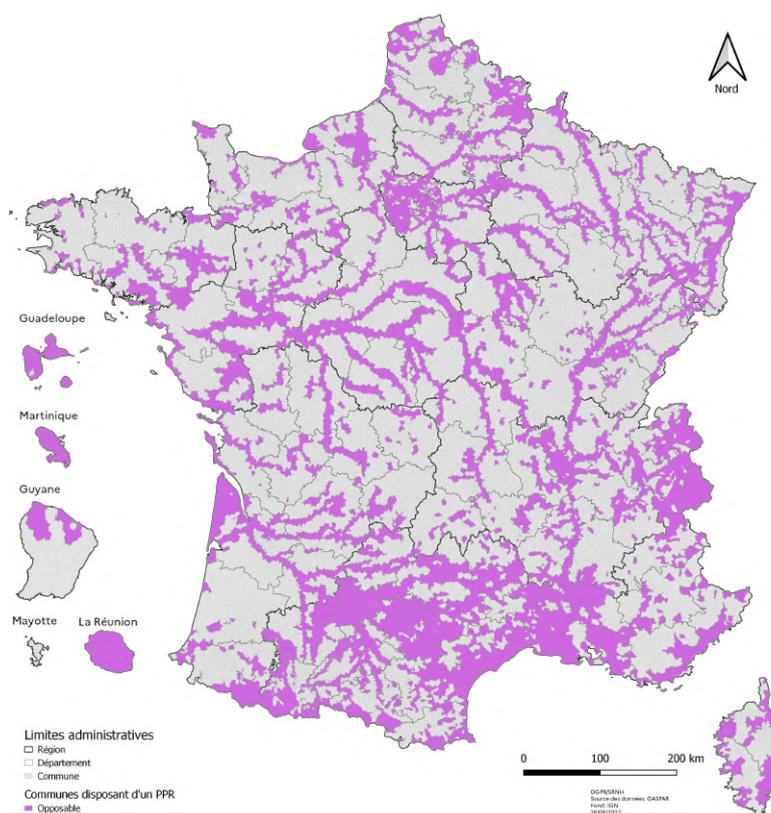


FIGURE A.1 – Carte des communes disposant d'un PPRN (*GéoRisques* [20])

## Annexe B

# Données satellites utilisées

### B.1 Inondations dans la Vallée de la Roya



FIGURE B.1 – Images satellites avant et après l’inondation, Breil-sur-Roya (*Copernicus* [11])



FIGURE B.2 – Images satellites avant et après l’inondation, Roquebillère (*Copernicus* [11])



FIGURE B.3 – Images satellites avant et après l’inondation, Saint-Martin-Vésubie (*Copernicus* [11])

## B.2 Inondations dans les Landes et les Pyrénées-Atlantiques

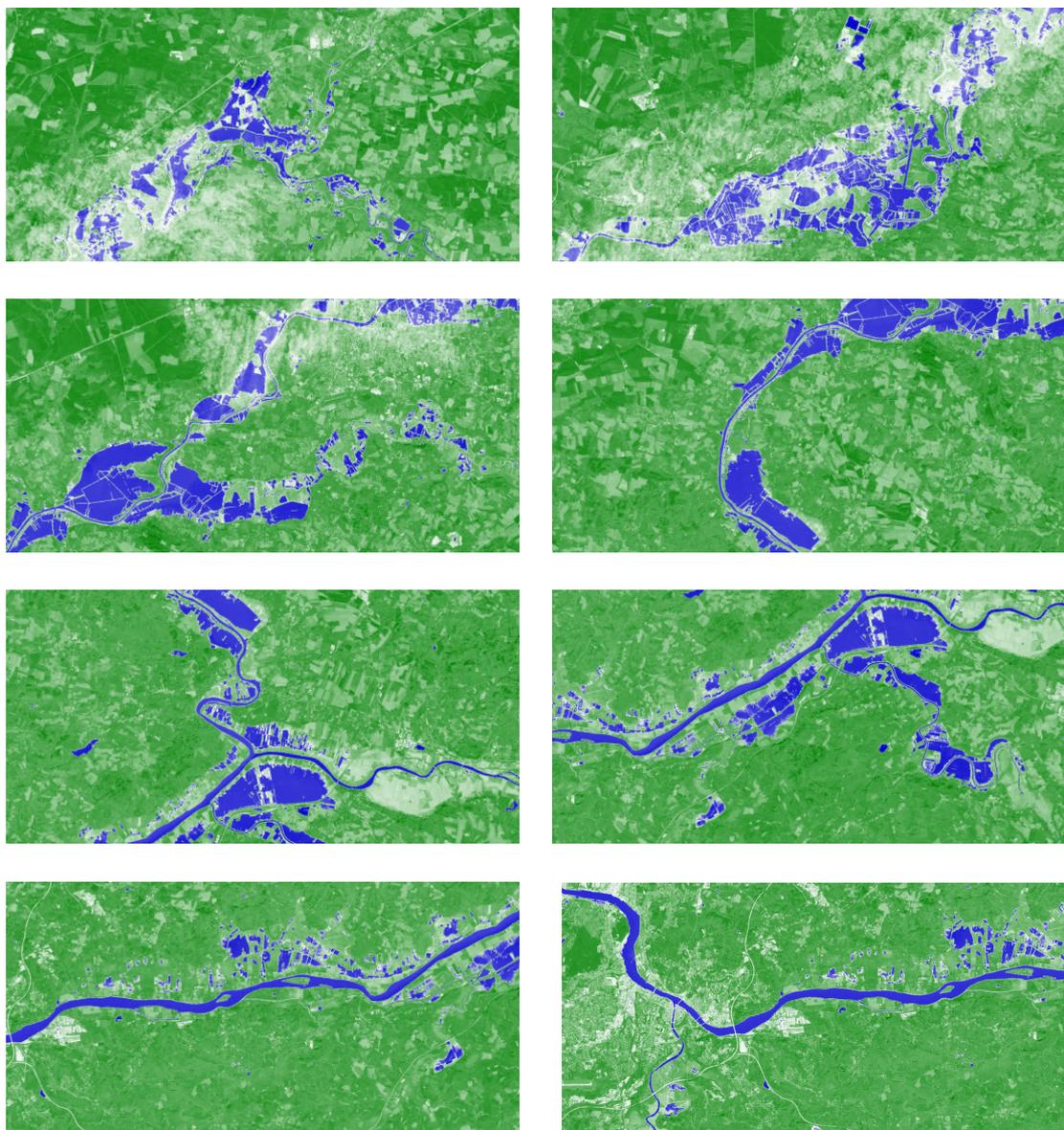


FIGURE B.4 – Images satellites avec indice NDWI (*Copernicus* [11])

## Annexe C

# Empreinte inondation par détection satellite

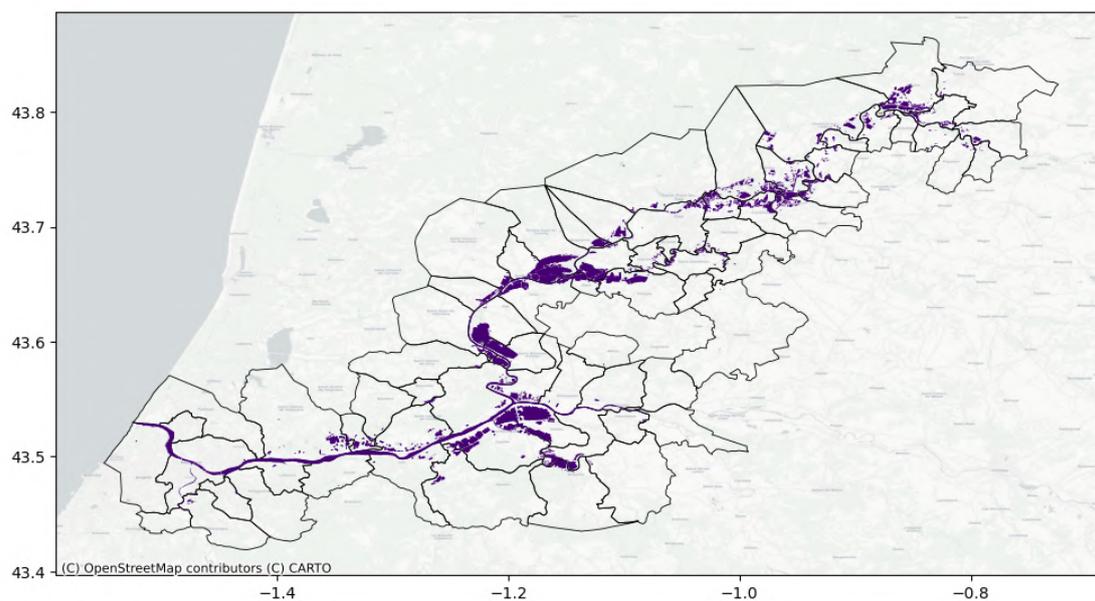


FIGURE C.1 – Empreinte inondation par détection satellite dans les Landes et Pyrénées-Atlantiques

## Annexe D

### Dalles de la BD ALTI sélectionnées

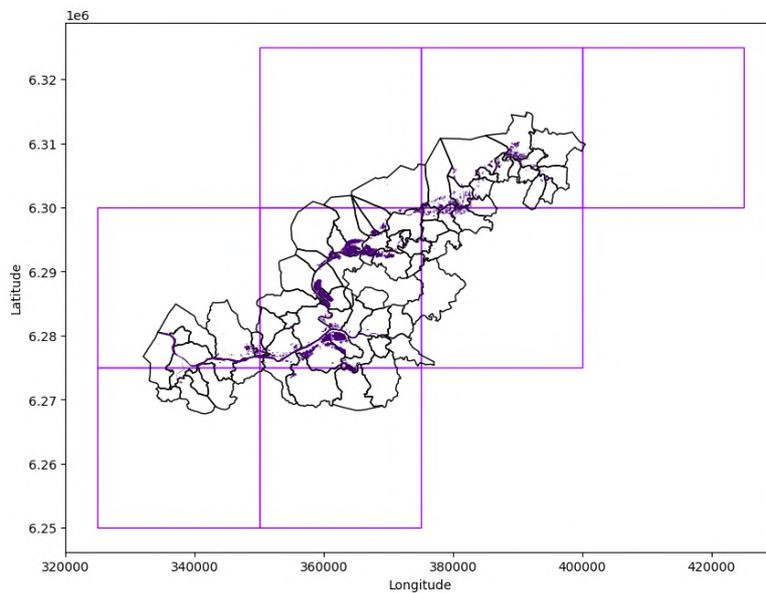


FIGURE D.1 – Dalles intersectant la zone

Sur cette figure, sont observés l’empreinte d’inondation détectée grâce aux images satellites, les communes concernées par cette inondation, et les huit dalles utilisées pour cette étude.

## Annexe E

# Données au carreau de 1 km : liste et description des variables

Variable	Description
Idcar_1km	Identifiant Inspire du carreau de 1 km
I_est_1km	Vaut 1 si le carreau est imputé par une valeur approchée, 0 ou 2 sinon
lcog_geo	Code officiel géographique au 1er janvier 2021 de la ou des commune(s) dans laquelle (lesquelles) se trouve le carreau
Ind	Nombre d'individus
Men	Nombre de ménages
Men_pauv	Nombre de ménages pauvres
Men_1ind	Nombre de ménages d'un seul individu
Men_5ind	Nombre de ménages de 5 individus ou plus
Men_prop	Nombre de ménages propriétaires
Men_fmp	Nombre de ménages monoparentaux
Ind_snv	Somme des niveaux de vie winsorisés des individus
Men_surf	Somme de la surface des logements du carreau
Men_coll	Nombre de ménages en logements collectifs
Men_mais	Nombre de ménages en maison
Log_av45	Nombre de logements construits avant 1945
Log_45/70	Nombre de logements construits entre 1945 et 1969
Log_70/90	Nombre de logements construits entre 1970 et 1989
Log_ap90	Nombre de logements construits depuis 1990
Log_inc	Nombre de logements dont la date de construction est inconnue
Log_soc	Nombre de logements sociaux
Ind_0/3	Nombre d'individus de 0 à 3 ans
Ind_4/5	Nombre d'individus de 4 à 5 ans
Ind_6/10	Nombre d'individus de 6 à 10 ans
Ind_11/17	Nombre d'individus de 11 à 17 ans
Ind_18/24	Nombre d'individus de 18 à 24 ans
Ind_25/39	Nombre d'individus de 25 à 39 ans
Ind_40/54	Nombre d'individus de 40 à 54 ans
Ind_55/64	Nombre d'individus de 55 à 64 ans
Ind_65/79	Nombre d'individus de 65 à 79 ans
Ind_80p	Nombre d'individus de 80 ans ou plus
Ind_inc	Nombre d'individus dont l'âge est inconnu

TABLE E.1 – Liste et description des variables (*INSEE*, [24])

## Annexe F

# Fichier JSON correspondant au géocodage de l'adresse de l'EURIA

```
1 {"type": "FeatureCollection",
2   "version": "draft",
3   "features": [
4     {
5       "type": "Feature",
6       "geometry": {
7         "type": "Point",
8         "coordinates": [-4.497347, 48.39973]
9       },
10      "properties": {
11        "label": "6 avenue Victor Le Gorgeu 29200 Brest",
12        "score": 0.9688454545454546,
13        "housenumber": "6",
14        "id": "29019_5157_00006",
15        "name": "6 avenue Victor Le Gorgeu",
16        "postcode": "29200",
17        "citycode": "29019",
18        "x": 145902.42,
19        "y": 6837373.59,
20        "city": "Brest",
21        "context": "29, Finistere, Bretagne",
22        "type": "housenumber",
23        "importance": 0.6573,
24        "street": "avenue Victor Le Gorgeu"
25      }
26    }
27  ],
28  "attribution": "BAN",
29  "licence": "ETALAB-2.0",
30  "query": "6 Avenue Victor le Gorgeu",
31  "filters": {
32    "postcode": "29200"
33  },
34  "limit": 5}
```

# Bibliographie

- [1] ADEME : Portail open data de l'ademe : Territoires & climat. <https://data.ademe.fr>.
- [2] ADEME : Les risques climatiques et leurs coûts pour la france : pour préserver l'économie, l'urgence d'agir dès à présent. <https://presse.ademe.fr>, 2023.
- [3] P.A. ARIAS et AL. : Technical summary. In *Climate Change 2021 – The Physical Science Basis : Working Group I Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, pages 33–144. Cambridge University Press, 2021. <https://www.ipcc.ch>.
- [4] Nicolas BAUDUCEAU, Juliette BUFFETRILLE, Rida El MAHALI, Ludovic FAYTRE, Sylvie GRECIET, Lise GONNETAN, Irénée JOASSARD, Éric PAUTARD, Eric PETIT-PAS et Lilian PUGNET : *Chiffres clés des risques naturels - Édition 2023*. Service des données et études statistiques, 2024. <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr>.
- [5] CCR : Garantie catnat. <https://catastrophes-naturelles.ccr.fr>.
- [6] CCR : Publications de la ccr sur les catastrophes naturelles. <https://catastrophes-naturelles.ccr.fr>.
- [7] CCR : Inondations dans les alpes-maritimes : 14 000 sinistres estimés pour un coût évalué à 210 millions d'euros. <https://catastrophes-naturelles.ccr.fr>, 2020.
- [8] CCR : Les catastrophes naturelles en france - bilan 1982-2021, 2022. <https://catastrophes-naturelles.ccr.fr>.
- [9] CDEMA : Generating physical vulnerability curves. <https://www.cdema.org>, 2014.
- [10] CEPRI : Le bâtiment face à l'inondation : Diagnostiquer et réduire sa vulnérabilité, 2010. <https://www.cepri.net>.
- [11] COPERNICUS : Copernicus data space ecosystem browser. <https://dataspace.copernicus.eu>.
- [12] DATA GOUV : Api adresse. <https://adresse.data.gouv.fr>.
- [13] DATAFONCIER : Dvf+ open-data. <https://datafoncier.cerema.fr>.
- [14] DRIEAT ÎLE-DE-FRANCE : Une carte dynamique pour sensibiliser aux inondations et favoriser la résilience. <https://www.drieat.ile-de-france.developpement-durable.gouv.fr>, 2021.

- [15] EAU FRANCE : Hydroportail. <https://www.hydro.eaufrance.fr>.
- [16] EAUFRANCE : Les inondations et les submersions marines. <https://www.eaufrance.fr>.
- [17] Sascha GARCIA : Catastrophes naturelles à répétition : un rapport pour lutter contre les possibles déserts assurantiels dans les zones à risques. *Libération*, 2024. <https://www.liberation.fr>.
- [18] GROUPE DE TRAVAIL SUR LE PROVISIONNEMENT DES SINISTRES NON-VIE DE L'INSTITUT DES ACTUAIRES : Guide de provisionnement des sinistres en assurance non-vie, 2023. <https://www.institutdesactuaires.com>.
- [19] GÉO DATA GOUV : Inondations dans les alpes-maritimes. <https://geo.data.gouv.fr>, 2021.
- [20] GÉORISQUES : Les risques naturels sur le territoire français : chiffres clés. <https://www.georisques.gouv.fr>.
- [21] J. HUIZINGA, H. De MOEL et W. SZEWCZYK : Global flood depth-damage functions : Methodology and the database with guidelines. *Publications Office of the European Union*, 2017. <https://publications.jrc.ec.europa.eu>.
- [22] IGN : Bd alti (R). <https://geoservices.ign.fr>, 2021.
- [23] INSEE : Catastrophe naturelle. <https://www.insee.fr>, 2016.
- [24] INSEE : Revenus, pauvreté et niveau de vie en 2017 - données carroyées. <https://www.insee.fr>, 2022.
- [25] Sylvain MOREAU et Lionel JANIN : Risques climatiques : six français sur dix sont d'ores et déjà concernés. *Service des données et études statistiques*, 2020. <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr>.
- [26] MÉTÉO-FRANCE : Importantes inondations dans le sud-ouest. <http://pluiesextremes.meteo.fr>, 2022.
- [27] OBSERVATOIRE DES TERRITOIRES : Nombre d'arrêtés de catastrophes naturelles publiés au jo. <https://www.observatoire-des-territoires.gouv.fr>.
- [28] OBSERVATOIRE PERMANENT DES CATASTROPHES NATURELLES : Bilan statistique des catastrophes naturelles en france et dans le monde en 2023. <https://www.catnat.net>, 2024.
- [29] ORGANISATION DES NATIONS UNIES : Climat : le nombre de catastrophes a été multiplié par cinq en 50 ans, causant plus de dégâts, mais moins de décès (onu), 2021. <https://news.un.org>.
- [30] Marie SÉGUR : Catastrophes climatiques : quelles limites au modèle assurantiel? *Futuribles*, 2021. <https://www.futuribles.com>.
- [31] VIE PUBLIQUE : Climat : vers une aggravation des risques naturels? <https://www.vie-publique.fr>, 2023.