

**Mémoire présenté devant l'Université de Paris-Dauphine
pour l'obtention du Certificat d'Actuaire de Paris-Dauphine
et l'admission à l'Institut des Actuares
le 31 janvier 2025**

Par : Aurélien AUGER

Titre : Analyse de l'impact prospectif du changement climatique sur les inondations par débordement

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

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

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

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

Entreprise :

Nom : Accenture

Signature :

Signed by:

7AD7C1598D05409...

Directeur de Mémoire en entreprise :

Nom(s) : Quentin LOPEZ

Baptiste ALLAIRE

Signature(s) :

Signed by: Signed by:

259A6C99DDC9432... 86AD1FB0F5CD48E...

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

Secrétariat :

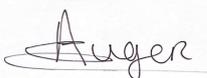
Bibliothèque :

Signature du responsable entreprise

Signed by:

7AD7C1598D05409...

Signature du candidat



Résumé

Le changement climatique représente un défi majeur pour le secteur de l'assurance, en raison de l'intensification attendue des catastrophes naturelles, comme les inondations. Cette évolution accroît les risques pris en charge par le régime CatNat, exposant les assureurs à des sinistres plus fréquents et coûteux. Les régulateurs, tels que l'ACPR et l'EIOPA, incitent ainsi les acteurs du secteur à intégrer ces projections dans leurs stratégies de souscription, de tarification et de provisionnement.

Dans ce contexte, ce mémoire propose une méthodologie basée sur l'*Open Data* pour quantifier l'impact du changement climatique sur le risque d'inondation par débordement d'un cours d'eau. L'étude se concentre sur le Gardon d'Alès, adoptant une approche répliquable articulée en deux modules : un module climatique, qui estime les hauteurs d'eau attendues dans la rivière pour une année donnée et les zones inondées correspondantes, et un module actuariel, qui calcule les pertes assurantielles liées à ces crues sur une base d'habitations. Ces deux blocs permettent d'évaluer la sinistralité annuelle via l'*Average Annual Loss* (AAL), une métrique calculée pour 2024 puis projetée à 2050 à l'aide d'études climatiques s'appuyant sur le scénario RCP 4.5 du GIEC.

La comparaison des risques pour 2024 et 2050 met en évidence l'évolution de la fréquence et de la gravité des sinistres dans un contexte de changement climatique. Cette méthodologie fournit une base robuste pour anticiper les impacts climatiques sur les portefeuilles assurantiels et soutenir les décisions stratégiques des acteurs du secteur.

Mots-clés : Catastrophes naturelles, inondations par débordement, théorie des valeurs extrêmes, période de retour, projections climatiques, Average Annual Loss (AAL).

Abstract

Climate change represents a major challenge for the insurance industry, due to the expected intensification of natural disasters, such as floods. This development increases the risks covered by the CatNat regime, exposing insurers to more frequent and costly claims. Regulators, such as the ACPR and EIOPA, encourage players in the sector to integrate these projections into their underwriting, pricing and provisioning strategies.

In this context, this thesis proposes a methodology based on Open Data to quantify the impact of climate change on the risk of flooding by overflowing a watercourse. The study focuses on the Gardon d'Alès, adopting a replicable approach articulated in two modules: a climate module, which estimates the expected water heights in the river for a given year and the corresponding flooded areas, and an actuarial module, which calculates the insurance losses linked to these floods on a housing basis. These two blocks make it possible to assess the annual loss experience via the Average Annual Loss (AAL), a metric calculated for 2024 and then projected to 2050 using climate studies based on the IPCC RCP 4.5 scenario.

The comparison of risks for 2024 and 2050 highlights the evolution of the frequency and severity of claims in a context of climate change. This methodology provides a robust basis for anticipating climate impacts on insurance portfolios and supporting strategic decisions by industry players.

Keywords : Natural disasters, overflow floods, extreme value theory, return period, climate projections, Average Annual Loss (AAL).

Note de Synthèse

Mise en contexte

Le changement climatique représente un enjeu critique du XXI^{ème} siècle, entraînant des perturbations significatives des systèmes climatiques mondiaux et une intensification des catastrophes naturelles, largement attribuées aux activités anthropiques et aux émissions de gaz à effet de serre. Selon le 6^{ème} rapport du Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat (GIEC, 2023), la température moyenne mondiale a augmenté de 1,1 °C par rapport à l'ère préindustrielle, avec une prévision atteignant 1,5 °C dès les années 2030 en l'absence de mesures d'atténuation substantielles. Cette tendance au réchauffement global est susceptible d'amplifier la fréquence et la sévérité des événements climatiques extrêmes, posant des défis croissants pour le secteur de l'assurance, notamment pour le régime des catastrophes naturelles (CatNat) cofinancé par l'État français. En réponse à l'augmentation des indemnités attendues, une révision législative prévoit une hausse de la surprime CatNat intégrée aux contrats d'assurance à partir de 2025.

À l'échelle européenne, l'*European Insurance and Occupational Pensions Authority* (EIOPA) et les différents régulateurs nationaux intensifient leurs initiatives pour évaluer les risques climatiques et renforcer la résilience des acteurs économiques. En France, l'Autorité de Contrôle Prudentiel et de Résolution (ACPR) a lancé en 2020 un exercice climatique, reconduit en 2023, proposant des cadres méthodologiques pour analyser l'impact des scénarios climatiques sur le secteur financier. Ces efforts témoignent de la nécessité croissante d'adapter les stratégies assurantielles et de développer des outils avancés pour anticiper les effets futurs du changement climatique.

Parmi les aléas climatiques couverts par l'assurance en France, les inondations occupent une place majeure, représentant environ 56 % des événements de catastrophes naturelles déclarés depuis 1982, selon les données de Géorisques. Ces événements ont engendré un coût total d'indemnisation de 27,8 milliards d'euros dans le cadre du régime des catastrophes naturelles. Cette étude se concentre spécifiquement sur les inondations par débordement, définies par une élévation du niveau d'un cours d'eau conduisant à un débordement de son lit majeur. Ce risque constitue un enjeu significatif, en raison de l'exposition d'environ un tiers des logements français (Géorisques), directement liée à la densité et à l'étendue du réseau hydrologique en métropole.

Ce mémoire évalue l'impact du changement climatique sur les inondations par débordement, en quantifiant ce risque en 2024 et à l'horizon 2050. Ce dernier horizon, recommandé par l'ACPR, permet d'observer les effets du changement climatique tout en restant pertinent pour les stratégies assurantielles à long terme. La méthodologie développée, répliquable pour tout cours d'eau sous réserve de données disponibles, est appliquée au Gardon d'Alès, situé dans le Gard, un département particulièrement exposé aux inondations. Cette vulnérabilité s'explique par la fréquence des épisodes cévenols, caractérisés par des pluies intenses pouvant entraîner des coûts d'indemnisation élevés.

Macro description de la méthodologie

Pour répondre à la problématique posée, une méthodologie intégrant un module climatique et un module actuariel a été élaborée. Le module climatique s'appuie sur l'analyse des hauteurs d'eau (nommées HE dans la suite) relevées par les stations hydrométriques des cours d'eau étudiés. La théorie des valeurs extrêmes est ensuite appliquée sur un historique de hauteurs maximales annuelles afin d'attribuer une période de retour à chaque niveau d'eau observé. Par ailleurs, un modèle d'empreinte de crue a été développé afin d'identifier les zones géographiques inondées en fonction de différentes hauteurs d'eau, permettant ainsi de relier les conditions hydrologiques à leurs impacts spatiaux.

Le module actuariel exploite ces résultats pour évaluer l'impact des inondations sur une base d'expositions créée à partir de données en libre accès. Cette base recense les habitations (maisons et appartements) situées à proximité des cours d'eau, en y associant une estimation des sommes assurées (bâti et contenu). Ces dernières permettent de mesurer les pertes assurantielles et d'élaborer une métrique du risque d'inondation. L'analyse se concentre sur l'*Average Annual Loss* (AAL), un indicateur clé en assurance, afin de quantifier la sinistralité attendue en 2024 et à l'horizon 2050, illustrant ainsi l'impact du changement climatique sur les inondations par débordement par comparaison de ces deux horizons. La **Figure 1** suivante permet de résumer le déroulé des deux modules présentés.

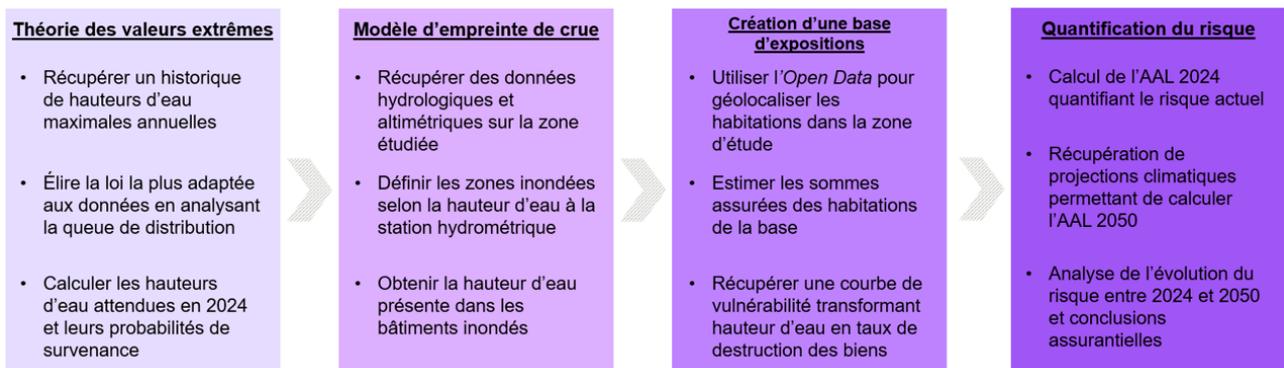


FIGURE 1 : Synthèse de la méthodologie globale

Implémentation du module climatique

La modélisation débute par une analyse climatique visant à modéliser le risque d'inondation par débordement. Elle combine l'étude de la fréquence des crues via la théorie des valeurs extrêmes et la conversion des hauteurs d'eau du cours d'eau ciblé en zones potentiellement inondables à l'aide d'un modèle d'empreinte de crue.

L'analyse par la théorie des valeurs extrêmes s'appuie sur un historique des hauteurs d'eau maximales annuelles, sélectionné selon deux critères : la fiabilité des données issues de la plateforme Hydroportail et la considération des récentes crues majeures du cours d'eau étudié. Cette méthode identifie la loi statistique optimale pour modéliser les maxima annuels et estimer, à partir de la queue de distribution, les hauteurs d'eau associées à des périodes de retour spécifiques : 2, 5, 10, 20, 50, 100 et 200 ans. Ces périodes sont directement liées aux probabilités d'occurrence des hauteurs correspondantes.

$$\text{Probabilité de survenance} = \frac{1}{\text{Période de retour}}. \quad (1)$$

Une fois les hauteurs d'eau et leurs probabilités établies, les zones inondées sont déterminées grâce à un modèle d'empreinte de crue. Celui-ci mobilise des données hydrologiques issues de la base Carthage pour localiser la rivière et des données altimétriques du modèle RGE Alti 5m, offrant une précision de 5 mètres. L'analyse identifie les pixels (5x5 m) dont l'altitude est inférieure à celle de la rivière en crue. Le logiciel SAGA GIS[®] a permis d'adapter les données altimétriques à l'étude.

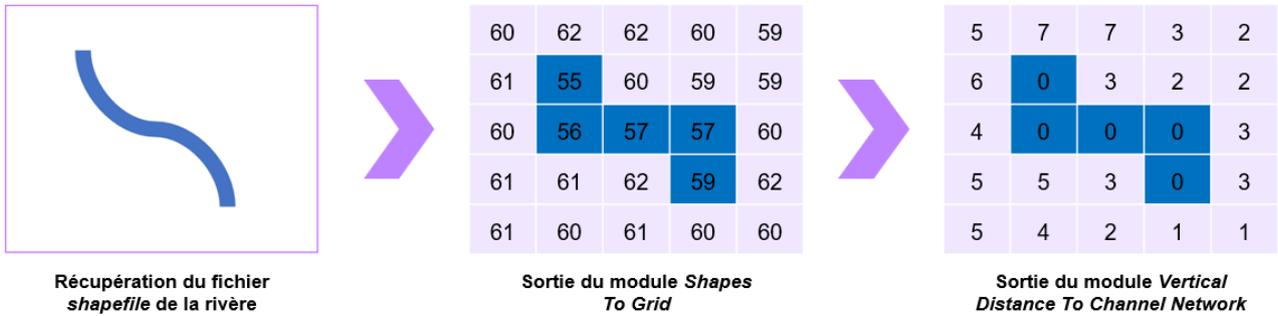
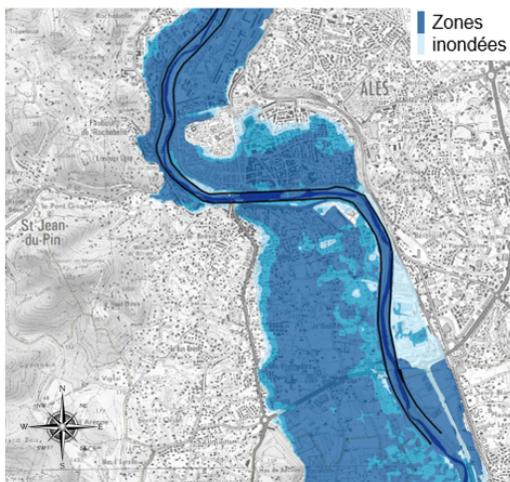


FIGURE 2 : Déroulé méthodologique de l'utilisation du logiciel SAGA GIS[®]

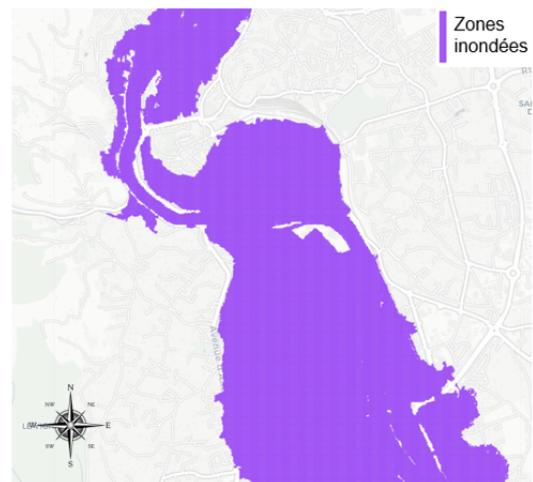
Comme l'explique la **Figure 2**, deux modules de SAGA GIS[®] ont été utilisés. Le premier, *Shapes To Grid*, superpose le modèle numérique de terrain (RGE Alti) à la zone d'étude pour déterminer l'altitude de chaque pixel de 5 m². Le second, *Vertical Distance To Channel Network*, calcule pour chaque pixel la différence d'altitude avec le point le plus proche de la rivière, modifiant ainsi le modèle numérique de terrain. Cette approche permet de simuler une élévation de l'altitude de la rivière afin d'identifier rapidement les pixels inondés, c'est-à-dire ceux dont l'altitude est inférieure à celle de la rivière en crue. La quantité d'eau présente dans les pixels où se situent des habitations peut ensuite être calculée à l'aide de la formule (2).

$$HE_{habitation} = |HE_{relevée \ à \ la \ station} - Altitude_{habitation}|. \quad (2)$$

Le modèle d'empreinte de crue est validé à l'aide des cartes des Territoires à Risque Important d'Inondation (TRI) fournies par le gouvernement, représentant les zones inondées pour des crues décennales, centennales et millénales. Cette validation utilise des métriques telles que le *Recall*, la *Precision* et le *F1-score* pour mesurer la concordance entre les zones simulées par le modèle et celles des cartes TRI.



(a) Empreinte du TRI - Crue millénale (7.3m)



(b) Empreinte modélisation - HE = 7.3m

FIGURE 3 : Validation de la modélisation à l'aide des cartes du TRI

Implémentation du module actuariel

Une fois l'inondation par débordement modélisée, le risque assurantiel est quantifié sur une base d'expositions composée de maisons et d'appartements, représentative d'un portefeuille multirisques habitation (MRH) détenu par les assureurs. Des données *Open Source* (bases DPE, DVF+, INSEE) ont été utilisées pour localiser les biens, estimer leurs superficies et déterminer leurs sommes assurées (bâti et contenu). À partir des zones inondées simulées, les pertes assurantielles sont calculées grâce à une courbe de vulnérabilité publique de la Commission Européenne (JRC), qui traduit la hauteur d'eau présente dans un bâtiment en taux de destruction de ce dernier. Ce taux est appliqué à la somme des garanties bâti et contenu pour estimer les pertes pour chaque habitation inondée.

Méthode d'analyse de l'impact du changement climatique

La combinaison des modules climatique et actuariel permet de quantifier le risque lié au débordement d'un cours d'eau à travers l'*Average Annual Loss* (AAL). Cette métrique, couramment utilisée en assurance, a été retenue pour sa capacité à intégrer un ensemble discret de hauteurs d'eau tout en optimisant précision et performance de calcul. Dans ce mémoire, l'AAL estime la sinistralité annuelle attendue due aux inondations par débordement. Elle synthétise les résultats du module climatique sur la fréquence des crues et les pertes assurantielles calculées dans le module actuariel. Cette métrique est définie mathématiquement de la manière suivante.

$$\text{AAL}^{(1)} = \sum_{i=1}^7 \text{probabilité inondation}_i \times \text{pertes assurantielles}_i,$$

où i représente une période de retour pouvant être de 2, 5, 10, 20, 50, 100 ou 200 ans.

Pour analyser l'impact du changement climatique sur le péril sélectionné, l'AAL est calculée pour l'année 2024 et à l'horizon 2050.

Le calcul de l'AAL 2024 s'appuie sur l'historique des hauteurs d'eau du Gardon d'Alès entre le 01/01/2000 et le 31/12/2023. La théorie des valeurs extrêmes est appliquée aux maximums annuels afin d'estimer la probabilité d'occurrence des différentes intensités d'inondation. Les pertes assurantielles associées à ces événements sont ensuite utilisées pour déterminer l'AAL 2024.

Pour l'estimation de l'AAL 2050, des projections climatiques basées sur le scénario RCP 4.5 du GIEC, identifié comme le plus probable par l'ACPR, ont été intégrées. Ces projections, issues d'une collaboration entre le *Swedish Meteorological and Hydrological Institute* (SMHI) et Copernicus, fournissent pour chaque bassin-versant en France l'évolution des débits d'eau relevés dans la rivière associés à différentes périodes de retour (2, 5, 10 et 50 ans). À partir d'une courbe de tarage reliant le débit à la hauteur d'eau, les hauteurs projetées pour 2050 sont calculées. Les hauteurs correspondant aux périodes de retour de 20, 100 et 200 ans sont ensuite extrapolées en utilisant une relation linéaire entre la hauteur d'eau et le logarithme de la période de retour de cette dernière.

Cette méthodologie permet d'estimer les probabilités des sept scénarios d'inondation retenus et de calculer les pertes assurantielles associées, aboutissant au calcul de l'AAL 2050. Ce résultat est ensuite comparé à l'AAL 2024 afin d'évaluer l'impact du changement climatique sur la sinistralité liée aux débordements du cours d'eau. L'ensemble du processus développé est synthétisé en **Figure 4**

(1) A noter que l'AAL utilisé ici ne correspond pas strictement à sa définition mathématique, qui repose sur une moyenne des pertes sur l'ensemble de la distribution statistique, mais à une moyenne calculée sur 7 points.

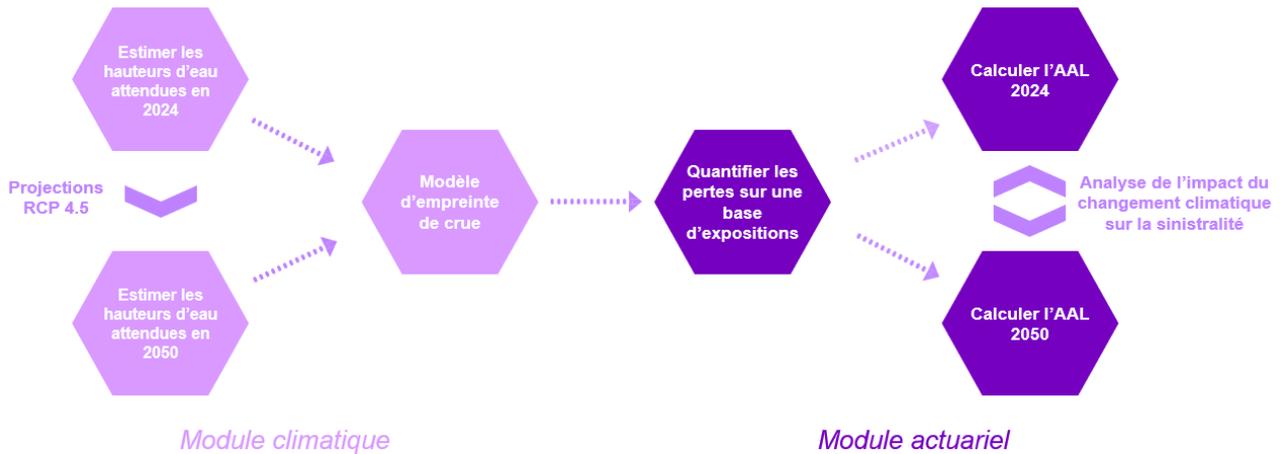


FIGURE 4 : Synthèse des différentes étapes de l'étude mises en place

L'analyse de l'impact du changement climatique s'articule autour de deux axes principaux. Premièrement, elle examine le glissement des périodes de retour associées à certaines hauteurs d'eau, mettant en évidence une augmentation de la fréquence des événements extrêmes. Deuxièmement, elle évalue l'évolution potentielle de la sinistralité à travers la comparaison de l'*Average Annual Loss* (AAL) entre 2024 et 2050, soulignant ainsi les implications financières du changement climatique. Par ailleurs, la méthodologie proposée, conçue pour être répliquable à tout cours d'eau sous réserve de la disponibilité de données hydrométriques et altimétriques, ouvre la possibilité de développer une cartographie nationale de l'impact du changement climatique sur les inondations par débordement en France métropolitaine.

Mise en application et résultats

L'étude du débordement du Gardon d'Alès, principal cas analysé dans ce mémoire, met en évidence une augmentation du risque à horizon 2050, tant en fréquence qu'en sévérité.

<u>Sinistralité attendue en 2024</u>				<u>Sinistralité attendue en 2050</u>			
PDR (années)	HE 2024 (m)	Pertes assurantielles (€)	Contribution AAL 2024 (€)	PDR (années)	HE 2050 (m)	Pertes assurantielles (€)	Contribution AAL 2050 (€)
2	1.95	0	0	2	2.07	0	0
5	2.69	0	0	5	2.97	0	0
10	3.27	0	0	10	3.66	0	0
20	3.92	0	0	20	4.51	21 253 994	1 062 700
50	4.89	25 963 086	519 262	50	5.57	80 102 656	1 602 053
100	5.73	87 757 923	877 579	100	6.27	111 721 601	1 117 216
200	6.69	129 447 332	647 237	200	7.03	144 041 742	720 209
			2 044 078				4 502 178

FIGURE 5 : Analyse de l'impact du changement climatique sur le débordement du Gardon d'Alès

Ce tableau illustre l'impact du changement climatique sur le débordement du Gardon d'Alès. Un glissement des périodes de retour est observé, puisqu'un événement centennal aujourd'hui pourrait devenir cinquantiennal en 2050. Par ailleurs, les assureurs pourraient anticiper une augmentation de **120 %** de la sinistralité à horizon 2050, toutes choses égales par ailleurs.

Étude des sensibilités

Ces résultats s'appuient sur plusieurs hypothèses qui nécessitent d'être validées et approfondies à l'aide d'analyses de sensibilité. Trois tests principaux ont été réalisés à cette fin. **Premièrement**, un choc de $\pm 5\%$ a été appliqué aux hauteurs d'eau attendues en 2024 afin de valider l'utilisation de la théorie des valeurs extrêmes. Cette analyse a mis en évidence les limites de l'*Average Annual Loss* (AAL) en tant qu'estimateur précis de sinistralité tout en confirmant sa pertinence comme outil de comparaison entre scénarios. **Deuxièmement**, une sensibilité a été testée sur les hauteurs d'eau centennales et bicentennales projetées pour 2050, également avec un choc de $\pm 5\%$. Les résultats ont confirmé la robustesse de la relation linéaire entre une hauteur d'eau et le logarithme de la période de retour de cette dernière, avec une augmentation de la sinistralité projetée variant entre $+110\%$ et $+130\%$, selon l'amplitude du choc. **Troisièmement**, l'étude a été enrichie par l'intégration d'évolutions économiques et démographiques. En ce qui concerne l'impact démographique, il a été jugé négligeable pour le département du Gard et n'a pas été pris en compte. Cependant, l'analyse économique a révélé des effets significatifs. L'inflation générale combinée à l'augmentation des coûts de construction et de réparation a conduit à une projection de sinistralité atteignant $+232\%$ dans un scénario économique aggravé, contre $+120\%$ dans le scénario central. Ces résultats illustrent les ajustements attendus de la tarification par les assureurs, qui devront tenir compte de l'inflation ainsi que de la hausse des coûts liés aux sinistres pour maintenir la viabilité économique du secteur.

Enfin, pour démontrer la répliquabilité de la méthodologie développée dans cette étude, une analyse a été menée sur un second cours d'eau : la Seine à Paris. Cette zone, marquée par une forte densité de population et une importante exposition économique, présente un risque majeur en cas de débordement, comme en témoigne la crue de 1910. Les résultats confirment un impact significatif du changement climatique, similaire à celui observé sur le Gardon d'Alès. Un événement actuellement vicennal pourrait devenir décennal d'ici 2050, et une augmentation de $+370\%$ de la sinistralité est anticipée, soulignant l'urgence de renforcer la gestion du risque dans cette région.

Conclusion

Ce mémoire démontre que le changement climatique affectera de manière significative les activités assurantielles dans les années à venir. La modélisation développée offre une application directe en contexte opérationnel, en permettant d'identifier à l'échelle nationale les zones où l'augmentation de la fréquence et de la sinistralité des inondations par débordement deviendra significative. Ces résultats fourniront aux assureurs des éléments clés pour ajuster leur politique de souscription, avec des enjeux de désengagement à prendre en compte, un sujet déjà abordé par le rapport Langreny. Concernant la tarification, l'augmentation de la surprime CatNat, attendue pour 2025, est un premier indicateur de l'évolution des pratiques. En matière de provisionnement, ce mémoire permet de définir des stratégies basées sur les prévisions climatiques à court et à long terme.

Dans la continuité de ces travaux, l'application de la méthodologie développée à un portefeuille réel d'assurance à l'échelle nationale permettrait de tester sa pertinence dans un cadre opérationnel. Une telle démarche offrirait aux assureurs des données précieuses pour ajuster leurs stratégies de souscription, de tarification et de provisionnement, en tenant compte des dynamiques de risque émergentes. Par ailleurs, l'intégration d'études climatiques complémentaires, visant à estimer les risques sur des horizons temporels plus courts, renforcerait l'applicabilité du processus développé, notamment dans le cadre des analyses d'auto-évaluation des risques et de la solvabilité (*Own Risk and Solvency Assessment*, ORSA).

Synthesis note

Setting the context

Climate change is a critical issue for the 21st century, causing significant disruption to global climate systems and an increase in natural disasters, largely attributed to human activities and greenhouse gas emissions. According to the 6th report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC, 2023), the global average temperature has risen by 1.1°C compared with the pre-industrial era, with a forecast of 1.5°C by the 2030s in the absence of substantial mitigation measures. This global warming trend is likely to increase the frequency and severity of extreme climatic events, posing growing challenges for the insurance industry, particularly for the natural disaster scheme (CatNat) co-financed by the French government. In response to the expected increase in compensation, a legislative review provides for an increase in the CatNat surcharge built into insurance contracts from 2025.

At the European level, the European Insurance and Occupational Pensions Authority (EIOPA) and the various national regulators are stepping up their initiatives to assess climate risks and strengthen the resilience of economic actors. In France, the Prudential Control and Resolution Authority (ACPR) launched a climate exercise in 2020, to be repeated in 2023, proposing methodological frameworks to analyse the impact of climate scenarios on the financial sector. These efforts demonstrate the growing need to adapt insurance strategies and develop advanced tools to anticipate the future effects of climate change.

Among the climatic hazards covered by insurance in France, flooding plays a major role, accounting for around 56 % of natural disaster events declared since 1982, according to G eorisques data. These events have generated a total compensation cost of  27.8 billion under the natural disasters regime (CatNat). This study focuses specifically on overflow flooding, defined as a rise in the level of a river leading to the overflow of its major bed. This is a significant risk, as around a third of French homes are exposed (G eorisques), directly linked to the density and extent of the hydrological network in mainland France.

This report assesses the impact of climate change on overtopping floods, by quantifying this risk in 2024 and for the year 2050. This time horizon, recommended by the ACPR, allows the effects of climate change to be observed while remaining relevant for long-term insurance strategies. The methodology developed, which can be replicated for any watercourse subject to the availability of data, is applied to the Gardon d'Al es, located in the Gard department, which is particularly vulnerable to flooding. This vulnerability can be explained by the frequency of C evennes episodes, characterised by intense rainfall that can result in high compensation costs.

Macro description of the methodology

A methodology incorporating a climatic module and an actuarial module was developed in response to the problem posed. The climatic module is based on the analysis of water levels (called HE in the following) recorded by the hydrometric stations of the rivers studied. The extreme value theory is then applied to a history of maximum annual heights in order to assign a return period to each observed water level. In addition, a flood footprint model was developed to identify the geographical areas flooded as a function of different water heights, thus making it possible to link hydrological conditions to their spatial impacts.

The actuarial module uses these results to assess the impact of flooding on an exposure database created from open-access data. This database lists the dwellings (houses and flats) located close to watercourses, together with an estimate of the sums insured (buildings and contents). This information can be used to measure insurance losses and develop a flood risk metric. The analysis focuses on the Average Annual Loss (AAL), a key insurance indicator, in order to quantify the expected loss experience in 2024 and in 2050, thus illustrating the impact of climate change on overflow flooding by comparing these two horizons. The **Figure 6** summarises the two modules presented.

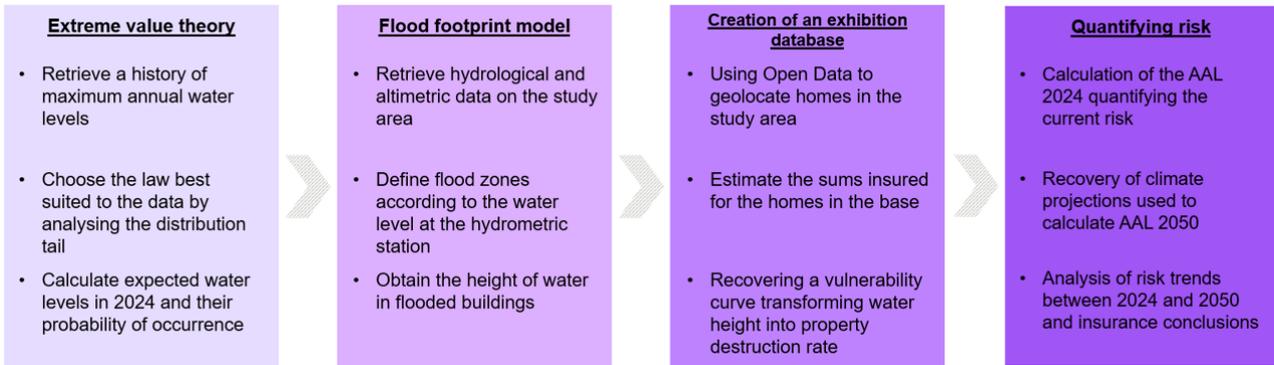


Figure 6: Summary of the overall methodology

Implementation of the climate module

The modelling begins with a climatic analysis designed to model the risk of overflow flooding. It combines the study of flood frequency using extreme value theory and the conversion of water levels in the targeted watercourse into potentially flood-prone areas using a flood footprint model.

The extreme value theory analysis is based on a history of maximum annual water levels, selected according to two criteria: the reliability of the data from the Hydroportail platform and consideration of recent major floods on the river under study. This method identifies the optimal statistical law for modelling the annual maxima and estimating, from the distribution tail, the water heights associated with specific return periods: 2, 5, 10, 20, 50, 100 and 200 years. These periods are directly linked to the probability of occurrence of the corresponding heights.

$$\text{Probability of occurrence} = \frac{1}{\text{Period of return}}. \quad (3)$$

Once the water heights and their probabilities have been established, the flooded areas are determined using a flood footprint model. This uses hydrological data from the Carthage database to locate the river and altimetric data from the RGE Alti 5m model, which is accurate to within 5 metres. The analysis identifies pixels (5x5 m) whose altitude is lower than that of the river in flood. SAGA GIS[®] software was used to adapt the elevation data to the study.

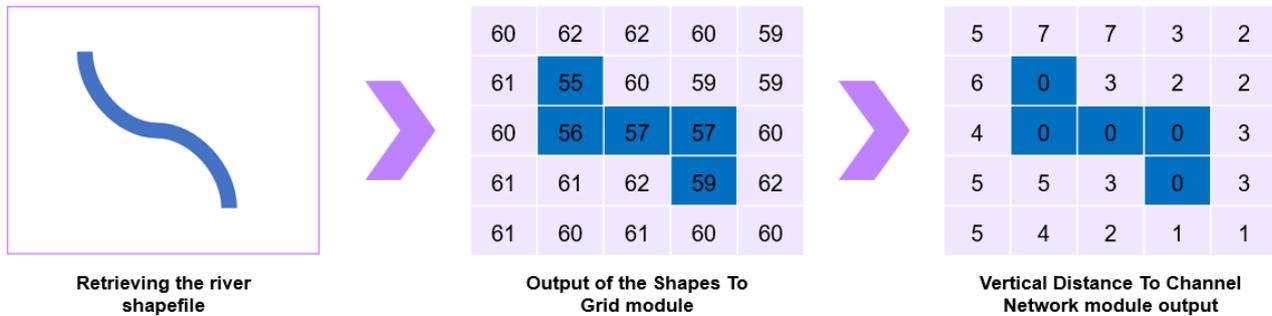
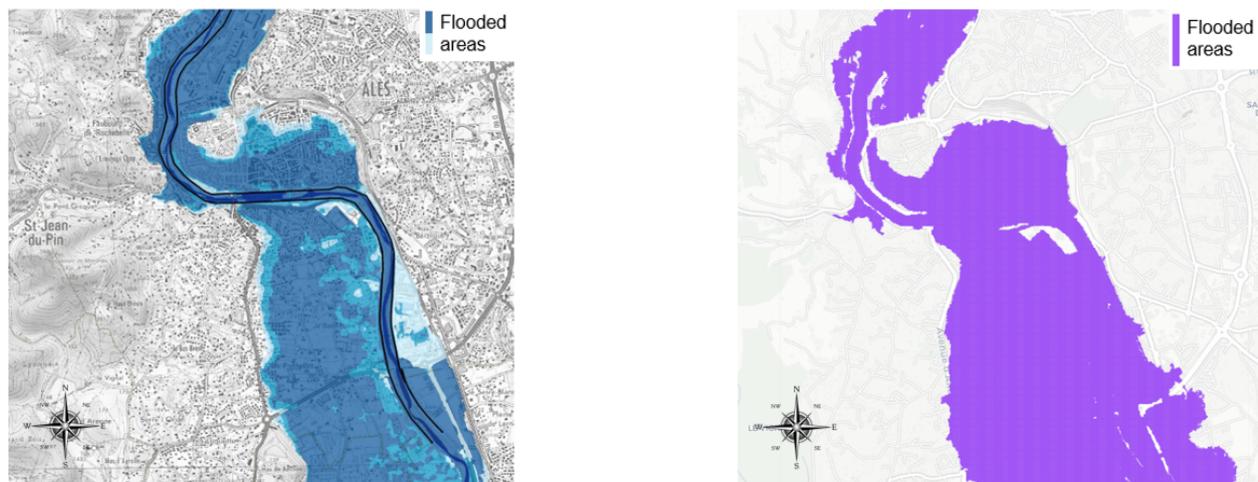


Figure 7: Methodology for using the SAGA GIS[®] software

As explained in **Figure 7**, two modules of SAGA GIS[®] were used. The first, *Shapes To Grid*, superimposes the digital terrain model (RGE Alti) on the study area to determine the altitude of each 5 m² pixel. The second, *Vertical Distance To Channel Network*, calculates for each pixel the difference in altitude with the closest point to the river, thus modifying the digital terrain model. This approach makes it possible to simulate a rise in the altitude of the river in order to quickly identify flooded pixels, i.e. those whose altitude is lower than that of the flooded river. The amount of water present in pixels where houses are located can then be calculated using formula (4).

$$HE_{dwelling} = |HE_{\text{measured at the station}} - \text{Dwelling altitude}|. \quad (4)$$

The flood footprint model is validated using maps of the Territoires à Risque Important d'Inondation (TRI) provided by the government, representing flooded areas for decennial, centennial and millennial floods. This validation uses metrics such as *Recall*, *Precision* and *F1-score* to measure the agreement between the areas simulated by the model and those on the TRI maps.



(a) TRI footprint - Millennium flood (7.3m)

(b) Footprint modelling - HE = 7.3m

Figure 8: Validation of modelling using TRI maps

Implementation of the actuarial module

Once overflow flooding has been modelled, the insurance risk is quantified on a base of exposures made up of houses and flats, representative of a Multi-Risk Housing (MRH) portfolio held by insurers. Open source data (DPE, DVF+, INSEE databases) was used to locate the properties, estimate their surface areas and determine the sums insured (buildings and contents). Based on the simulated flooded areas, insurance losses are calculated using a public vulnerability curve from the European Commission (JRC), which translates the height of water in a building into its destruction rate. This rate is applied to the sum of the building and contents cover to estimate the losses for each flooded home.

Method for analysing the impact of climate change

By combining the climatic and actuarial modules, we can quantify the risk associated with the overflowing of a watercourse using the Average Annual Loss (AAL). This metric, commonly used in insurance, was chosen for its ability to integrate a discrete set of water levels while optimising accuracy and calculation performance. In this thesis, the AAL estimates the expected annual loss due to overflow floods. It synthesizes the results of the climate module on the frequency of floods and the insurance losses calculated in the actuarial module. This metric is mathematically defined as follows.

$$\text{AAL}^{(1)} = \sum_{i=1}^7 \text{flood probability}_i \times \text{insurance losses}_i,$$

where i represents a return period that can be 2, 5, 10, 20, 50, 100 or 200 years.

To analyze the impact of climate change on the selected hazard, the AAL is calculated for the year 2024 and for the 2050 horizon.

The calculation of the 2024 AAL is based on the history of water levels in the Gardon d'Alès from 01/01/2000 to 31/12/2023, to which the theory of extreme values on annual maximums is applied to estimate the probability of occurrence of flood intensities. The insurance losses associated with these events are used to determine the 2024 AAL.

To estimate the AAL 2050, climate projections based on the IPCC RCP 4.5 scenario, identified as the most likely by the ACPR, have been incorporated. These projections, which are the result of a collaboration between the Swedish Meteorological and Hydrological Institute (SMHI) and Copernicus, provide the evolution of water flows associated with different return periods (2, 5, 10 and 50 years) for each river basin in France. Based on a rating curve linking the flow to the water level, the projected water levels for 2050 are calculated. The heights corresponding to return periods of 20, 100 and 200 years are then extrapolated using a linear relationship between the water height and the logarithm of the return period.

This methodology makes it possible to estimate the probabilities of the seven flood scenarios selected and to calculate the associated insurance losses, leading to the calculation of the AAL 2050. This result is then compared with the AAL 2024 in order to assess the impact of climate change on the loss experience associated with river overflows. The entire process is summarised in **Figure 9**.

(1) Note that the AAL used here does not strictly correspond to its mathematical definition, which is based on an average of losses over the entire statistical distribution, but rather to an average calculated from 7 points.

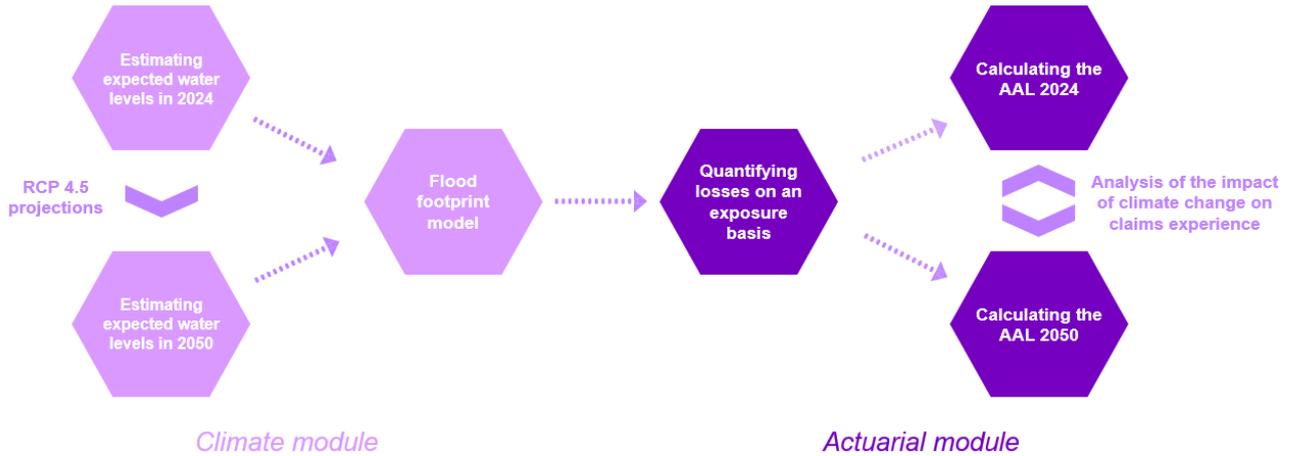


Figure 9: Summary of the various stages of the study implemented

The analysis of the impact of climate change focuses on two main areas. Firstly, it examines the shift in return periods associated with certain water levels, highlighting an increase in the frequency of extreme events. Secondly, it assesses the potential change in claims experience by comparing the Average Annual Loss (AAL) between 2024 and 2050, thereby highlighting the financial implications of climate change. In addition, the proposed methodology, designed to be replicable for any river subject to the availability of hydrometric and altimetric data, opens up the possibility of developing a national map of the impact of climate change on overflow flooding in mainland France.

Implementation and results

The study of the Gardon d’Alès overflow flood, the main case analysed in this thesis, highlights an increase in risk by 2050, in terms of both frequency and severity.

<i>Expected claims experience in 2024</i>				<i>Expected claims experience in 2050</i>			
PDR (years)	HE 2024 (m)	Insurance losses (€)	AAL 2024 contribution (€)	PDR (years)	HE 2050 (m)	Insurance losses (€)	AAL 2050 contribution (€)
2	1.95	0	0	2	2.07	0	0
5	2.69	0	0	5	2.97	0	0
10	3.27	0	0	10	3.66	0	0
20	3.92	0	0	20	4.51	21 253 994	1 062 700
50	4.89	25 963 086	519 262	50	5.57	80 102 656	1 602 053
100	5.73	87 757 923	877 579	100	6.27	111 721 601	1 117 216
200	6.69	129 447 332	647 237	200	7.03	144 041 742	720 209
			2 044 078				4 502 178

Figure 10: Analysis of the impact of climate change on the overflow of the Gardon at Alès

This table illustrates the impact of climate change on the overflow of the Gardon d’Alès. A shift in return periods is observed, with a 100-year event today becoming a 50-year event in 2050. Furthermore, insurers could anticipate an increase of 120 % in claims by 2050, all other things being equal.

Sensitivity study

These results are based on several assumptions that need to be validated and further investigated using sensitivity analyses. Three main tests were performed for this purpose. **First**, a shock of $\pm 5\%$ was applied to the water levels expected in 2024 in order to validate the use of extreme value theory. This analysis highlighted the limitations of the *Average Annual Loss* (AAL) as an accurate estimator of loss experience while confirming its relevance as a tool for comparing scenarios. **Second**, a sensitivity was tested on the projected centennial and bicentennial water levels for 2050, also with a shock of $\pm 5\%$. The results confirmed the robustness of the linear relationship between a water height and the logarithm of the return period of the latter, with an increase in the projected loss ratio varying between $+110\%$ and $+130\%$, depending on the magnitude of the shock. **Thirdly**, the study was enriched by the integration of economic and demographic developments. As for the demographic impact, it was considered negligible for the Gard department and was not taken into account. However, the economic analysis revealed significant effects. General inflation combined with the increase in construction and repair costs led to a loss ratio projection reaching $+232\%$ in an aggravated economic scenario, compared to $+120\%$ in the central scenario. These results illustrate the expected adjustments in pricing by insurers, who will have to take into account inflation as well as the increase in claims costs to maintain the economic viability of the sector.

Finally, to demonstrate the replicability of the methodology developed in this study, an analysis was carried out on a second river: the Seine in Paris. This densely populated and economically exposed area presents a major risk in the event of flooding, as demonstrated by the 1910 flood. The results confirm a significant impact of climate change, similar to that observed on the Gardon d'Alès.

Conclusion

This thesis demonstrates that climate change will have a significant impact on insurance activities in the years to come. The modelling developed offers a direct application in an operational context, by making it possible to identify, on a national scale, the zones where the increase in the frequency and claims experience of floods due to overtopping will become significant. These results will provide insurers with key elements for adjusting their underwriting policies, with withdrawal issues to be taken into account, a subject already addressed by the Langreny report. As far as pricing is concerned, the increase in the CatNat surcharge, expected by 2025, is an initial indicator of changes in practices. In terms of provisioning, this report makes it possible to define strategies based on short- and long-term climate forecasts.

Following on from this work, applying the developed methodology to a real insurance portfolio on a national scale would allow testing its relevance in an operational framework. Such an approach would provide insurers with valuable data to adjust their underwriting, pricing and provisioning strategies, taking into account emerging risk dynamics. Furthermore, integrating complementary climate studies, aimed at estimating risks over shorter time horizons, would strengthen the applicability of the developed process, particularly in the context of Own Risk and Solvency Assessment (ORSA) analyses.

Remerciements

Je tiens sincèrement à remercier toutes les personnes qui ont contribué à la réalisation de ce mémoire, de près comme de loin.

Tout d'abord, j'adresse mes remerciements aux personnes m'ayant offert la possibilité d'intégrer Accenture, Madame Chloé PARFAIT, Monsieur Gildas ROBERT et Monsieur Thibault HOUSSAY.

J'aimerais remercier chaleureusement mes tuteurs en entreprise, Messieurs Quentin LOPEZ et Baptiste ALLAIRE, pour leur accompagnement et leurs précieux conseils tout au long de ce stage.

Un grand merci à Messieurs Guillaume BESSON, Jorge OCHOA et Yann CUEFF, pour leur expertise et leur disponibilité.

Je souhaite également remercier Monsieur Emmanuel BERTHELE, directeur Recherche et Développement, ainsi que Monsieur Albin TRANCHARD, pour leurs orientations et la qualité des conseils métier apportés.

J'en profite pour remercier Monsieur Quentin GUIBERT, responsable du Master 2 Actuariat de l'Université Paris Dauphine-PSL, ainsi que mon tuteur académique Monsieur Tachfine EL ALAMI.

Un grand merci à l'ensemble des professeurs et membres de l'organisation de mon école d'ingénieur CY Tech, sans qui je n'aurais pu réaliser un double diplôme avec Dauphine et rédiger ce mémoire d'actuariat.

Un chaleureux remerciement à tous les consultants d'Accenture avec qui j'ai eu le plaisir d'échanger et de collaborer pendant plusieurs mois.

Enfin, j'aimerais remercier du fond du cœur ma famille, et particulièrement ma mère, qui a toujours su trouver les mots justes, dans les bons comme les mauvais moments.

Glossaire

AAL	<i>Average Annual Loss</i>
ACPR	<i>Autorité de Contrôle Prudentiel et de Résolution</i>
ADEME	<i>Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie</i>
AEP	<i>Aggregate Exceedance Probability</i>
AIC	<i>Critère d'Information Akaike</i>
AZI	<i>Atlas des Zones Inondables</i>
CATNAT	<i>Catastrophes Naturelles</i>
CCR	<i>Caisse centrale de réassurance</i>
CSC	<i>Capture et Stockage du Carbone</i>
DPE	<i>Diagnostic de Performance Énergétique</i>
DVF	<i>Demande de Valeur Foncière</i>
EAIP	<i>Enveloppes Approchées d'Inondations Potentielles</i>
EIOPA	<i>European Insurance and Occupational Pensions Authority</i>
FFB	<i>Fédération Française du Bâtiment</i>
FFSA	<i>Fédération Française des Sociétés d'Assurances</i>
FPRNM	<i>Fond de Prévention des Risques Naturels Majeurs</i>
GCM	<i>Global Climate Model</i>
GEMA	<i>Groupement des Entreprises Mutuelles d'Assurance</i>
GES	<i>Gaz à Effet de Serre</i>
GEV	<i>Generalized Extreme Value</i>
GIEC	<i>Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat</i>
HE	<i>Hauteur d'Eau</i>
ICC	<i>Indicateur d'Impact Climatique</i>
ICC FFB	<i>Indice de la Fédération Française du Bâtiment des coûts de construction</i>
IGN	<i>Institut National de l'Information Géographique et Forestière</i>
INSEE	<i>Institut National de la Statistique et des Études Économiques</i>
IPSL	<i>Institut Pierre-Simon Laplace</i>
LIDAR	<i>Light Detection And Ranging</i>
MNT	<i>Modèle Numérique de Terrain</i>
MRH	<i>MutliRisque Habitation</i>
MRN	<i>Mission Risques Naturels</i>
OEP	<i>Occurrence Exceedance Probability</i>
OMM	<i>Organisation Météorologique Mondiale</i>
ORSA	<i>Own Risk and Solvency Assessment</i>
PGRI	<i>Plan de Gestion des Risques d'Inondation</i>
PNUE	<i>Programme des Nations Unies pour l'Environnement</i>

PPRI	<i>Plans de Prévention des Risques d'Inondations</i>
QP	<i>Quote Part</i>
RCP	<i>Representative Concentration Pathways</i>
RGPD	<i>Règlement Général sur la Protection des Données</i>
RCM	<i>Regional Climate Model</i>
SAGA	<i>System for Automated Geoscientific Analyses</i>
SCR	<i>Capital de Solvabilité Requis</i>
SIG	<i>Système d'Information Géographique</i>
SL	<i>Stop Loss</i>
SMHI	<i>Swedish Meteorological and Hydrological Institute</i>
SSP	<i>Shared Socioeconomic Pathways</i>
TGN	<i>Tempête Neige Grêle</i>
TRI	<i>Territoires à Risque Important d'Inondation</i>
VIC	<i>Capacité d'Infiltration Variable</i>
ZICH	<i>Zones Inondées par Classes de Hauteurs d'Eau</i>

Table des matières

Résumé	3
Abstract	4
Note de Synthèse	5
Synthesis note	11
Remerciements	17
Glossaire	19
Table des matières	21
Introduction	23
1 Cadre de l'étude : CatNat et risque inondation	25
1.1 Les catastrophes naturelles en France	25
1.2 Présentation du péril inondation	35
1.3 Localisation spatiale : le Gardon d'Alès (Gard)	42
2 Théorie : alignement de l'exposition et des facteurs de risque	47
2.1 Analyse des périodes de retour des inondations	48
2.2 Développement d'un modèle d'empreinte de crue	54
2.3 Création d'une base d'expositions MRH à l'aide de l' <i>Open Data</i>	61
2.4 Quantification du risque actuel et prospectif	69
2.5 Perspective de la modélisation en contexte opérationnel	85
3 Application : implémentation et analyse des résultats	89
3.1 Modélisation de la théorie des valeurs extrêmes	89
3.2 Cartographie du risque dans la ville d'Alès	94

3.3 Caractéristiques des habitations exposées au risque	99
3.4 Analyse de l'impact du changement climatique	105
3.5 Étude des sensibilités du modèle	111
3.6 Limites globales inhérentes au modèle	127
Conclusion	129
Bibliographie	131
Annexes	135
A Empreintes de crue pour la ville d'Alès	135
B Empreintes de crue pour la ville de Paris	138
C Comparaison des hypothèses prises entre ce mémoire et le livre blanc de Covéa	140

Introduction

Le changement climatique se présente comme l'un des enjeux majeurs du XXI^{ème} siècle, affectant profondément de nombreux secteurs, dont celui de l'assurance. Les multiples études scientifiques réalisées au cours des dernières décennies démontrent que les activités anthropiques, notamment les émissions de gaz à effet de serre, perturbent les systèmes climatiques à l'échelle mondiale. Parmi les instances scientifiques, le Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat (GIEC) occupe une place centrale dans l'évaluation de ces impacts. Son 6^{ème} rapport (*GIEC, 2023* [1]), publié en mars 2023, souligne l'urgence climatique. Il y est précisé que l'action humaine a provoqué un réchauffement global de 1,1°C par rapport aux niveaux pré-industriels, avec une projection alarmante d'atteindre 1,5°C dès le début des années 2030 si aucune mesure n'est prise.

D'après les rapports du GIEC, les catastrophes naturelles, associées à des événements destructeurs provoqués par des phénomènes naturels, deviennent de plus en plus fréquentes et dévastatrices. Le secteur de l'assurance est particulièrement exposé aux conséquences du changement climatique, notamment à travers le régime des catastrophes naturelles (CatNat), cofinancé par l'État français. Ce régime est soutenu par une « surprime CatNat », incluse dans les contrats d'assurance multirisques habitation (MRH) et automobile, destinée à couvrir les indemnités des sinistres liés à ces événements. L'intensification des phénomènes climatiques extrêmes augmente progressivement le coût financier supporté par ce régime. Pour faire face à la hausse des indemnités, une nouvelle législation (*Arrêté ministériel n°1484, 2023* [2]), effective au 1^{er} janvier 2025, prévoit une augmentation de cette surprime, permettant ainsi de renforcer les fonds du régime CatNat.

Une prise de conscience de ces enjeux a été amorcée à l'échelle européenne par l'*European Insurance and Occupational Pensions Authority* (EIOPA), qui recommande une analyse approfondie de l'impact des risques climatiques en fonction de divers scénarios. En France, l'Autorité de Contrôle Prudentiel et de Résolution (ACPR), régulateur du secteur assurantiel, a publié en 2023 une nouvelle version de son exercice climatique (*ACPR, 2023* [3]), succédant à celui de 2020. Cet exercice propose des cadres méthodologiques essentiels pour mieux appréhender et gérer les risques climatiques émergents. Ces initiatives témoignent d'une volonté croissante d'améliorer les outils d'évaluation des risques et d'adapter les stratégies, afin de renforcer la résilience face aux impacts climatiques futurs.

C'est dans ce contexte climatique et assurantiel que ce mémoire s'inscrit, en proposant une méthodologie visant à quantifier de manière prospective un péril climatique : les inondations par débordement. Les inondations représentent un enjeu majeur pour les assureurs puisque 60 % des indemnités liées au régime CatNat proviennent de ce péril (*Géorisques, 2024* [4]). De plus, ce sont les inondations par débordement qui ont été spécifiquement ciblées car 16.8 millions d'habitants sont exposés à ce risque en métropole, soit plus d'un quart de la population (*Géorisques, 2024* [5]).

Ce travail propose une méthodologie, à partir de l'*Open Data*, pour évaluer le risque d'inondation par débordement. Le premier objectif est de quantifier ce risque pour l'année 2024, en se basant sur des conditions climatiques historiques. Le second est de mesurer l'impact du changement climatique en projetant ce risque à l'horizon 2050, en s'appuyant sur le scénario RCP 4.5 défini par le GIEC. Le choix de cet horizon temporel et de ce scénario est justifié par les recommandations de l'ACPR, qui le considère comme le plus probable à cette échéance. L'année 2050 est également jugée suffisamment éloignée pour observer les effets du changement climatique, tout en étant assez proche pour intégrer ces projections dans les stratégies actuarielles futures.

Le premier chapitre de ce mémoire fournit un cadre théorique, exposant le contexte assurantiel, climatique et hydrologique de l'étude, et justifie le choix de l'analyse du débordement du Gardon d'Alès, traversant la ville d'Alès. Il est montré que la méthodologie pourra être répliquée sur d'autres territoires, sous réserve de la disponibilité des données, avec des tests de sensibilité effectués sur un second cours d'eau : la Seine à Paris.

Le second chapitre de l'étude présente toutes les étapes mises en place pour étudier l'impact du changement climatique sur les inondations par débordement. Une première partie est consacrée à la modélisation climatique développée. À partir de l'historique des hauteurs d'eau relevées sur le Gardon d'Alès, la théorie des valeurs extrêmes permet d'estimer les hauteurs d'eau attendues en 2024 avec les probabilités de survenance qui y sont liées. Ces informations sont ensuite intégrées dans un modèle d'empreinte de crue, qui traduit les hauteurs d'eau en zones inondées. Des projections climatiques et hydrologiques sont ensuite utilisées pour estimer les hauteurs d'eau attendues en 2050, permettant ainsi d'analyser l'impact du changement climatique sur la fréquence des événements extrêmes.

Le péril à présent modélisé, la seconde partie du chapitre se consacre à la création d'une base d'expositions, plus précisément d'habitations, présentes dans la zone d'étude. Cette base, élaborée à l'aide de l'*Open Data*, est utilisée pour quantifier le risque modélisé précédemment. Le risque est quantifié à l'aide de l'*Average Annual Loss* (AAL), une métrique couramment utilisée en assurance pour estimer les pertes annuelles moyennes probables. L'AAL 2024 est comparée à celui de 2050 afin de quantifier l'impact du changement climatique sur la sinistralité liée aux inondations par débordement.

Enfin, les hypothèses prises tout au long de cette étude sont discutées dans **le dernier chapitre** en réalisant différentes sensibilités. Ces analyses permettent d'illustrer la robustesse et la répliquabilité de la modélisation mise en place en faisant varier différents paramètres comme la zone géographique, ou en intégrant l'évolution du contexte démographique et économique en 2050.

Chapitre 1

Cadre de l'étude : CatNat et risque inondation

Ce premier chapitre a pour objectif de poser les fondations du mémoire en exposant l'importance de modéliser le risque d'inondation par débordement pour un organisme d'assurance. Dans un premier temps, une revue des principales catastrophes naturelles touchant le territoire français sera réalisée, afin de fournir un panorama des aléas les plus fréquents et de leurs impacts. Cette revue sera suivie d'une analyse approfondie des réponses mises en place par l'État français et les compagnies d'assurance pour faire face à ces événements, en soulignant les mécanismes de gestion du risque et les dispositifs d'indemnisation. L'étude se focalisera sur le péril inondation, et plus spécifiquement sur les inondations provoquées par le débordement des cours d'eau français, avec une attention particulière portée sur l'intérêt à la fois actuariel et climatique de modéliser ce risque. La capacité des assureurs à anticiper ces sinistres est en effet essentielle pour affiner la tarification et ajuster les provisions. Enfin, le choix du département du Gard comme cadre géographique de l'étude sera justifié par ses caractéristiques topographiques uniques et sa forte exposition au risque d'inondation, faisant de cette région un exemple pertinent pour illustrer les enjeux étudiés dans ce mémoire.

1.1 Les catastrophes naturelles en France

Chaque année, à travers le monde, les dommages causés par les catastrophes naturelles se chiffrent en plusieurs centaines de milliards de dollars. Le changement climatique, qui affecte la planète depuis des années, influence la fréquence et la gravité de ces phénomènes naturels, plaçant ainsi leurs enjeux au centre des préoccupations du secteur assurantiel.

1.1.1 Définition des CatNat

Les catastrophes naturelles, désignées sous le terme **CatNat** dans la suite de cet écrit, ne disposent pas d'une définition officielle, malgré leur importance climatique et économique. De son côté, le Code des assurances définit les effets des CatNat comme étant « les dommages matériels directs non-assurables ayant eu pour cause déterminante l'intensité anormale d'un agent naturel, lorsque les mesures habituelles à prendre pour prévenir ces dommages n'ont pu empêcher leur survenance ou n'ont pu être prises » (*Article L125-1 du chapitre V du Code des assurances, 2023* [6](#)).

L'EM-DAT, une base de données gérée par le Centre de Recherche sur l'Épidémiologie des Catastrophes (CRED), regroupe les dangers et les catastrophes dans le monde depuis 1988. Cette base fournit la définition suivante d'une CatNat : « situation ou un événement qui dépasse les capacités locales, nécessitant une demande d'assistance au niveau national ou international ; un événement imprévu et souvent soudain qui cause de grands dommages, des destructions et des souffrances humaines » (*EM-DAT, 2024* [7]).

Selon sa définition établie, l'EM-DAT a classifié les différents aléas climatiques pouvant être qualifiés de catastrophes naturelles. Ces derniers sont répertoriés dans la **Table 1.1**.

Type de CatNat	CatNat	Évènement marquant
Géologique	Séismes Mouvements de terrain Éruptions volcaniques	Séisme de Valdivia au Chili en 1960 (<i>IRSN, 2010</i> [8]).
Hydrologique	Inondations	Crue historique de 1910 à Paris, impactant environ 200 000 personnes (<i>CCR, 2016</i> [9]).
Météorologique	Tempêtes Cyclones Températures Extrêmes	Tempête Xynthia dont les dégâts sont estimés à 2.5 milliards d'euros en France (<i>Sénat, 2010</i> [10]).
Climatique	Sécheresse Feux de forêt	Sécheresse 2022 en France avec le mois de juillet le plus sec jamais enregistré (<i>Météo France, 2022</i> [11]).
Biologique	Épidémies Invasions d'insectes	L'épidémie Ebola causant le décès de plus de 11 000 personnes dans le monde (<i>Institut Pasteur, 2021</i> [12]).
Extra-terrestre	Météorites	Superbolide de Tcheliabinsk en Russie (2013) blessant plus d'un millier de personnes (<i>Le Monde, 2013</i> [13]).

TABLE 1.1 : Exemples de CatNat (*EM-DAT, 2024* [7])

Du fait de son climat général et de sa zone géographique, la France métropolitaine est plus sujette à certains événements que d'autres. Plutôt épargné par les événements extra-terrestres et géologiques, l'hexagone est massivement touché par les CatNat hydrologiques, météorologiques et climatiques. En effet, les inondations, la sécheresse et les événements relevant de phénomènes atmosphériques (tempêtes, cyclones, ouragans) sont fréquents sur le territoire. Selon l'EM-DAT, 92 % des CatNat ayant touché l'hexagone depuis l'année 2000 sont hydrologiques et météorologiques (*EM-DAT, 2024* [7]).

L'État français, directement impacté par ces CatNat qui interviennent sur son territoire, a dû se positionner pour gérer ces risques qui peuvent être dévastateurs pour la population. L'année 1982 marque un tournant dans la gestion de ces événements lorsqu'une loi relative aux catastrophes naturelles en France est promulguée (*Loi n° 82-600, 1982* [14]). Cette loi du 13 juillet 1982, désormais connue comme le **régime CatNat**, repose sur un partenariat public-privé entre l'État et les assureurs. L'objectif est de permettre aux victimes de bénéficier d'une indemnisation pour les dommages matériels causés par des événements naturels majeurs.

Les statistiques de ce régime, offrant une perspective à plus long terme que les données de l'EM-DAT, illustrent la fréquence des différents types de risques naturels en France. Notamment, les inondations représentent plus de 56 % des événements enregistrés (*Data Gov, Base GASPARE, 2024* [15]) comme l'illustre la **Figure 1.1**.

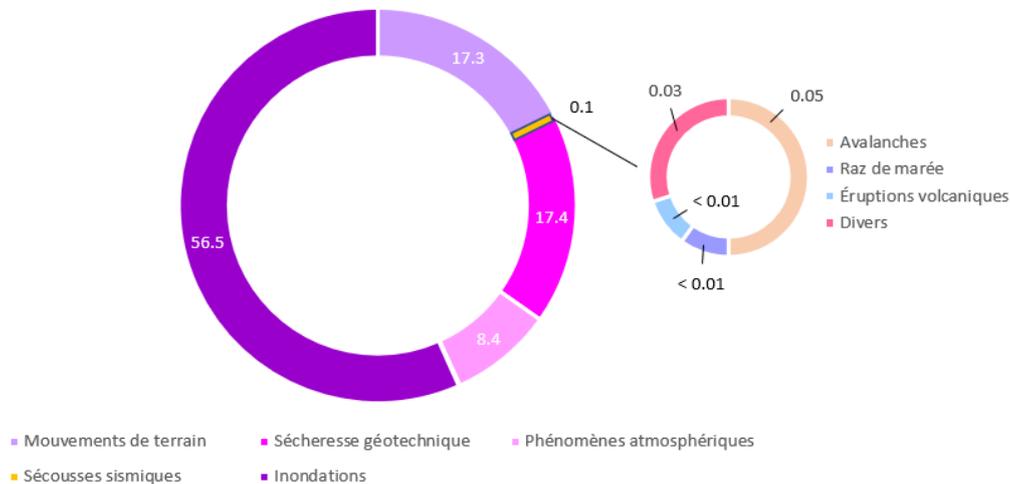


FIGURE 1.1 : Reconnaissances de l'état de CatNat par phénomènes depuis 1982 (*Ministère de la transition écologique, base de données GASPARE 2023* [15])

Le partenariat public-privé du régime CatNat sera étudié dans la suite. L'aspect privé sera abordé dans la section suivante, en analysant notamment les différentes actions menées par les assureurs français. L'importance du caractère public de cette alliance sera ensuite évoquée dans une autre section consacrée à la réassurance des CatNat par la Caisse Centrale de Réassurance (CCR).

1.1.2 Réponse des acteurs privés

1.1.2.1 Couverture des risques climatiques

En tant qu'acteurs essentiels de la protection des populations, les assureurs soutiennent les assurés en indemnisant les sinistres et en réparant les dommages. Tout détenteur d'un contrat d'assurance automobile avec une garantie « tous risques » ou « tiers étendu », ou d'un contrat incluant une garantie de dommages aux biens (comme les incendies ou les dégâts des eaux), bénéficie également d'une extension de couverture contre les dommages causés par les catastrophes naturelles.

Cette extension entraîne le paiement d'une surprime uniforme sur tout le territoire, avec des taux fixés par l'État. Bien que le taux de la surprime soit resté inchangé depuis 2001, les ressources du régime ont presque doublé au cours de cette même période. En effet, l'augmentation régulière des primes d'assurance, sur lesquelles est assise la surprime, a permis de faire passer les ressources du régime d'environ 1 milliard d'euros en 2001 à près de 1,9 milliard d'euros en 2022. Cependant, face à l'augmentation de la fréquence et de la sévérité des catastrophes naturelles, l'État prévoit l'augmentation de cette surprime à partir du 1^{er} janvier 2025 pour les contrats d'assurance des particuliers (*Arrêté ministériel n°1484, 2023* [2]).

- Passage d'un taux de 12 % à un taux de **20 %** sur les primes liées aux garanties de dommages du contrat de base pour les biens autres que les véhicules à moteur.
- Passage d'un taux de 6 % à un taux de **9 %** sur les primes vols et incendies (ou, à défaut, 0,50 % de la prime de dommages) pour les véhicules terrestres à moteur.

Ce mécanisme de protection des assurés ne couvre cependant pas tous les périls climatiques et s'active lorsqu'un processus bien particulier est mis en place. En effet, le régime CatNat couvre principalement les inondations, la sécheresse, les mouvements de terrain, les avalanches, les séismes, le volcanisme et les puissants vents cycloniques.

Les tempêtes, la grêle et la neige ne font pas partie des périls couverts par le régime CatNat, car ces aléas sont directement assurables au titre d'une couverture dommages classiques, appelée **couverture TGN** (tempête, grêle, neige).

Concernant le processus d'indemnisation des CatNat, les assureurs se positionnent après que l'État ait publié un arrêté de reconnaissance de catastrophes naturelles. Cet arrêté reconnaît qu'un événement naturel a causé des dommages importants sur un territoire donné. Une fois validé, il permet d'enclencher le processus de remboursement des assureurs, présenté dans la **Figure 1.2**, qui pourront eux-mêmes se réassurer auprès d'entreprises privées ou de l'État comme il sera expliqué dans la prochaine section.



FIGURE 1.2 : Mécanisme d'indemnisation du régime CatNat en France (CCR, 2022 [16])

1.1.2.2 Modèle CatNat

Les assureurs étant maintenant impliqués dans la couverture des CatNat, ils doivent maîtriser le risque afin de prendre des décisions en termes de tarification, de provisionnement ou encore sur des problématiques de réassurance. Pour cela, ils utilisent des modèles CatNat pour évaluer la probabilité et la sévérité des événements à venir, ce qui facilite la projection des dommages potentiels et des pertes assurées. Ces modèles vont au-delà des méthodes traditionnelles qui se basent uniquement sur les sinistres passés.

Ce type de modèle s'articule souvent autour de plusieurs modules ayant chacun une importance fondamentale dans le processus d'analyse des risques CatNat.

Module Exposition

Le module « Exposition » cherche à transformer un portefeuille d'assurés en input du modèle CatNat. Cette démarche peut-être décomposée en trois parties :

- Localiser le risque, c'est-à-dire être capable de géolocaliser les différents contrats présents dans le portefeuille.
- Répertorier les garanties et les éventuelles franchises de chaque contrat.
- Identifier les principales caractéristiques des contrats : type de bien assuré (habitations ou véhicules), ancienneté du bien, matériaux...

Module Aléa

L'objectif de ce module est de créer un catalogue d'événements naturels susceptibles de causer des dommages aux assurés et donc des pertes pour l'assureur. Les catastrophes naturelles restant plutôt rares, la plupart des événements du catalogue sont fictifs, mais doivent rester probables. À la suite de ce module, plusieurs dizaines de milliers d'événements sont créés et caractérisés par :

- Une empreinte physique : quelles zones du territoire sont impactées par l'événement ?
- Une intensité physique : hauteur d'eau de l'inondation, vitesse du vent, etc...
- Une fréquence d'occurrence : quelle est la probabilité que l'événement survienne dans l'année ?

Cette création d'événements fictifs est fondamentale dans l'analyse du risque. En effet, une partie des CatNat qui surviendront n'est potentiellement jamais encore arrivée, notamment dans un contexte de changement climatique. Il n'est donc pas possible de se baser uniquement sur un historique et il apparaît nécessaire d'envisager des scénarios extrêmes dévastateurs. Il résulte de ce module un tableau d'événements fictifs semblable à celui de la **Table 1.2**.

ID événement	Fréquence d'occurrence	ID zone géographique	Hauteur d'eau (en m)
1	0.5 %	1	5
2	1.0 %	5	4
2	0.3 %	2	6
3	2.0 %	2	1
4	8.0 %	4	0.5

TABLE 1.2 : Exemple de sortie d'un module aléa sur le péril inondation

Module Vulnérabilité

Ce module utilise les informations des deux modules précédents afin de caractériser l'impact des événements sur le portefeuille d'assurés. Plus clairement, il permet d'associer à une valeur physique (hauteur d'eau d'une rivière, vitesse du vent, etc.) un coût monétaire et donc une perte financière pour l'assureur. L'objectif final de cette partie est d'être capable des tracer des courbes de vulnérabilité dont un exemple est donné en **Figure 1.3**.

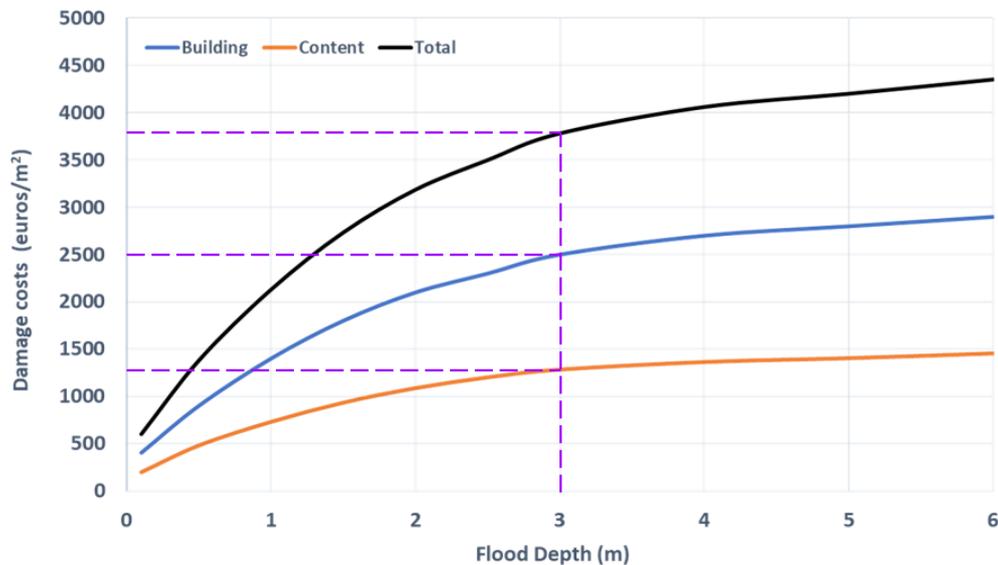


FIGURE 1.3 : Exemple de courbe de vulnérabilité pour le péril inondation (*Ecoact, 2022* 17)

Cette courbe montre qu'une hauteur d'eau de 3 mètres causerait environ 2 500 euros/m² de dégâts sur les bâtiments et 1 300 euros/m² sur le contenu de ces derniers.

Module Financier

Le module « Financier » met en œuvre les conditions financières spécifiques à chaque site touché par un événement assuré. Cela inclut des éléments tels que les franchises, les limites de couverture, la coassurance, la réassurance facultative, et d'autres paramètres financiers essentiels. L'intérêt final de ce module est, pour chaque contrat, d'obtenir la perte annuelle nette que pourrait supporter l'assureur.

Sorties du modèle

L'objectif final de cette série de modules est d'estimer la probabilité qu'un portefeuille donné subisse un certain seuil de pertes. Cette visualisation est rendue possible grâce à deux courbes : l'*Aggregate Exceedance Probability* (AEP) et l'*Occurrence Exceedance Probability* (OEP).

L'OEP représente la distribution de la perte maximale liée à une catastrophe naturelle sur une année. En analysant cette courbe, l'assureur est capable d'évaluer la probabilité de subir une perte de 100 M€ au cours de l'année, par exemple. Cependant, l'OEP se concentre uniquement sur l'événement annuel le plus coûteux et ne permet pas d'obtenir une vue globale du risque. Cette approche spécifique de l'OEP est généralisée par l'AEP, qui illustre la distribution des pertes totales sur une année donnée. Le principe est similaire à celui de l'OEP, mais l'AEP prend en compte la perte de l'ensemble des événements probables sur l'année.

Connaître la probabilité de réalisation d'un événement permet de faire le lien avec la période de retour attendue de cet événement. Par exemple, une inondation qui a une probabilité de 0.5 % de se produire sur une année signifie qu'elle pourrait se produire statistiquement une fois tous les 200 ans. Ainsi, les courbes AEP et OEP présentent souvent en abscisse la période de retour d'une certaine perte, et en ordonnée le montant des pertes associé, comme l'illustre la Figure 1.4.

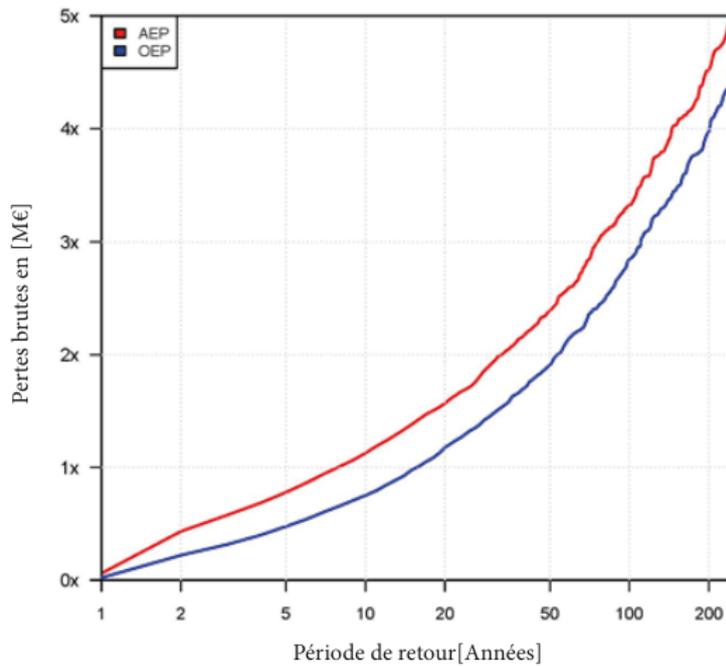


FIGURE 1.4 : Exemple de courbes AEP et OEP (*SCOR, 2018* [18])

Ce travail de modélisation des risques CatNat dont le processus vient d'être expliqué est très complexe. De ce fait, beaucoup d'assureurs font appel à des modélisateurs externes fournissant des données permettant de reconstituer les courbes évoquées précédemment. Trois types d'acteurs se partagent le marché :

- **Les leaders** : AIR, RMS et EQECAT. Ces modélisateurs imposent des limites aux assureurs en réduisant la possibilité de jouer sur les paramètres du modèle et en les rendant dépendants des périls et zones géographiques modélisés.
- **Les indépendants** : JBA Consulting, KatRisk ou encore OASIS LMF qui a la particularité d'avoir une architecture open data.
- **Les acteurs privés** : de grands réassureurs comme Swiss Re, SCOR ou Munich Re.

1.1.2.3 Prévention des risques

Devant couvrir les risques CatNat, les assureurs cherchent à réduire les conséquences liées à ces risques climatiques, et cela passe par différentes méthodes de prévention. La création de l'association **Mission Risques Naturels (MRN)** en 2000 par la Fédération Française des Sociétés d'Assurances (FFSA) et le Groupement des Entreprises Mutuelles d'Assurance (GEMA) marque une étape importante. Cette association vise à améliorer la connaissance et la prévention des risques naturels en apportant une contribution technique aux politiques de prévention. Elle sert d'interface entre les assureurs et les parties prenantes de la gestion des risques naturels, collabore avec les administrations et les collectivités, participe à des recherches et des colloques, et publie des documents de sensibilisation. De plus, elle réalise des études sur les risques naturels et fournit aux assureurs des outils, tels qu'un Système d'Information Géographique (SIG), pour évaluer l'exposition aux aléas.

D'autre part, il est maintenant courant que les assurés reçoivent des alertes SMS les informant de potentiels risques à venir et des actions à faire pour se protéger face aux aléas climatiques. En 2018, lors des sévères inondations survenues entre le 14 et 15 octobre dans l'Aude et l'Hérault, pas moins de 250 000 SMS ont été envoyés aux assurés, prévenant ainsi un tiers des foyers situés dans les zones sinistrés (*L'Argus de l'assurance*, 2018 [19]).

Le rapport Langrenay (*Langrenay T, Le Cozannet G, Merad M, 2024* [20]), remis le 2 avril 2024 à Bruno Le Maire et Christophe Béchu, présente des recommandations pour ajuster le système d'assurance français aux risques climatiques croissants sur le territoire national. Il souligne l'importance de renforcer la prévention individuelle et collective face à ces aléas, notamment par la création d'une plateforme dédiée à la prévention.

1.1.2.4 Financement de la transition écologique

Les assureurs jouent un rôle crucial dans le financement de l'économie, ayant accumulé fin 2022 des placements totalisant 2 427 milliards d'euros, soit environ 92 % du PIB français (*L'Argus de l'assurance*, 2022 [19]). Leur contribution est fondamentale pour impulser et accélérer la transition vers une économie plus écologique, notamment en investissant dans des initiatives durables. Ils proposent de plus en plus à leurs clients des options d'investissement vertes, responsables et solidaires au sein de leurs produits d'épargne. Ces unités de compte sont généralement labellisées par des organismes externes, tels que les labels ISR ou Greenfin, garantissant ainsi leur conformité aux critères établis en matière de durabilité et de responsabilité sociale.

Ce rôle est également souligné dans le rapport Langrenay, car il estime que les assureurs ont l'opportunité de contribuer fortement à l'atteinte des objectifs de l'Accord de Paris, notamment en renforçant les efforts de décarbonation des portefeuilles d'assurance. Cette contribution est illustrée par différentes actions présentées en **Figure 1.5** visant à favoriser la transition écologique.

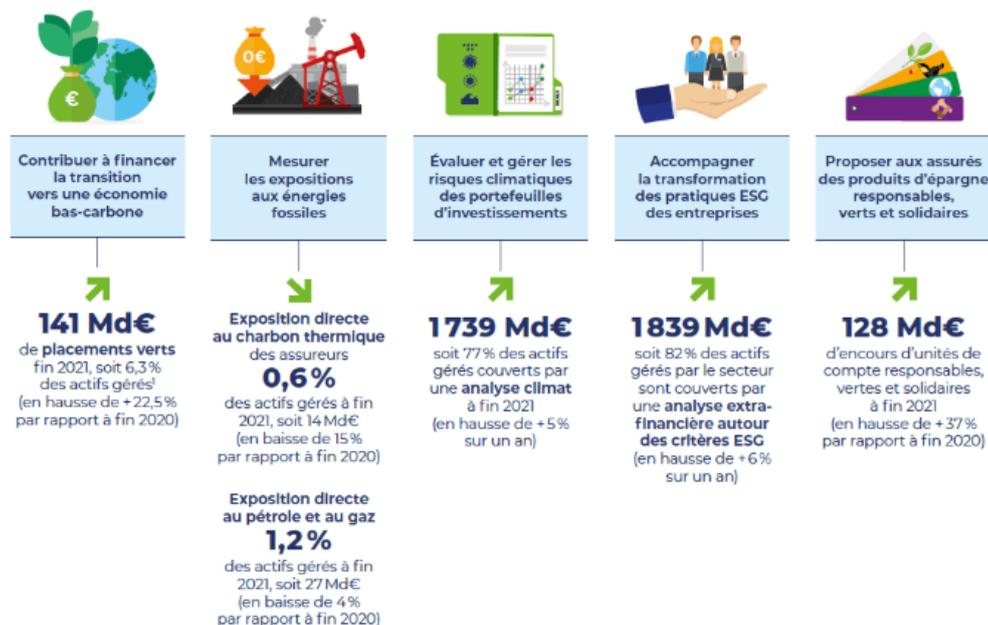


FIGURE 1.5 : Les assureurs, acteurs de la transition écologique (*France Assureurs*, 2021 [21])

1.1.3 Réponse des acteurs publics

Les catastrophes naturelles ont coûté 6,5 milliards d'euros en France en 2023 (*Géorisques, 2024* [4]). Ces coûts sont liés aux frais de réparation et de reconstruction, aux pertes d'exploitation, ou encore aux frais de relogement. Même avec la réassurance privée, les assureurs peuvent supporter des charges financières importantes, en particulier en cas de multiples événements catastrophiques. Pour les protéger de la faillite, l'État français a mis en place un système de réassurance des assureurs via la Caisse Centrale de Réassurance (CCR) dont le fonctionnement est décrit dans la partie suivante.

1.1.3.1 Mécanisme de réassurance en lien avec la CCR

La Caisse Centrale de Réassurance est une société anonyme détenue par l'État français qui propose des couvertures illimitées. Cette réassurance ne revêt aucun caractère obligatoire, mais offre la possibilité aux assureurs d'alléger leurs coûts face aux événements naturels, potentiellement dévastateurs. Le mécanisme de réassurance le plus commun est composé d'une combinaison d'un traité en *Quote-Part* (QP) et d'un traité en *Stop-Loss* (SL).

Un traité de réassurance en *Quote-Part* est un accord entre un assureur (le cédant) et un réassureur, où ces derniers partagent proportionnellement les risques et les primes. Selon les termes du traité, le réassureur accepte de couvrir un pourcentage, dit, *Quote-Part*, des sinistres en contrepartie du même pourcentage des primes de l'assureur. Par exemple, si le traité est établi comme *Quote-Part* de 50 %, le réassureur paiera 50 % des sinistres annuels et recevra 50 % des primes annuelles en échange.

Dans un traité en *Stop-Loss*, le réassureur s'engage à payer la charge annuelle de l'assureur au-delà d'un seuil prédéterminé, appelé « priorité ». Ce seuil représente le montant minimal de charge que l'assureur doit supporter sur l'année avant que le réassureur n'intervienne. Une fois que la charge dépasse ce seuil, le réassureur paie une partie de la charge jusqu'à une limite prédéfinie, appelée « portée ». Un tel traité est exprimé comme cela : Portée SL Priorité. Il existe une variante où la priorité et la portée ne sont pas de montants de charge bruts, mais des pourcentages des primes d'assurance. Un traité 20 % SL 80 % pour un total de 100k € de primes récupérées par l'assureur sur une année engendrera un paiement du réassureur de 80k € maximum (80 % de 100k €) à partir de 20k € de charge annuelle de l'assureur (20 % de 100k €).

Concernant le traité de réassurance proposé par la CCR schématisé en **Figure 1.6**, les assureurs ont la possibilité de se libérer de toutes la charge de sinistres supérieure à 200 % des primes reçues sur l'année. Petite précision nécessaire, la charge de l'assureur considérée pour appliquer le traité *Stop-Loss* est la charge retenue après application du traité en *Quote-Part*.

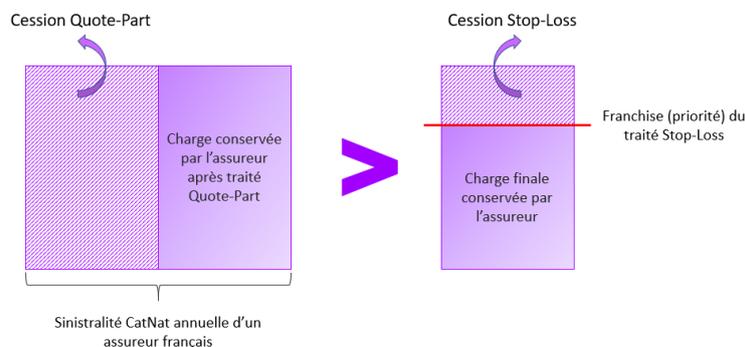


FIGURE 1.6 : Procédé de réassurance CatNat de la CCR

La réassurance CCR se présente comme un traité *Quote-Part* 50 % suivi d'un traité ∞ SL 200 %. Par exemple, lors d'une année où l'assureur affirme avoir reçu 100k € de primes CatNat et 800k € de charge, voici le mécanisme de réassurance :

- Traité *Quote-Part* : La CCR récupère 50k € de primes en contrepartie d'absorber 400k € de charge.
- Traité *Stop Loss* : la CCR absorbe 200k € de la charge sur les 400k € restants.

1.1.3.2 Fonds Barnier

La Caisse Centrale de Réassurance n'est pas la seule initiative de l'État pour faire face aux aléas climatiques et protéger les populations. Le Fonds de prévention des risques naturels majeurs (FPRNM), créé en 1995 et également appelé « fonds Barnier », bénéficie aux collectivités territoriales, aux petites entreprises, aux particuliers, aux établissements publics fonciers et aux services de l'État. Il finance les travaux visant à protéger les habitations et les locaux contre les risques climatiques. De plus, il permet aux collectivités de racheter les biens situés dans les zones à risques ou ayant subi des dommages dépassant la moitié de leur valeur. La CCR est chargée de la gestion comptable et financière du fonds Barnier pour le compte de l'État.

Jusqu'en 2021 et l'apparition de la loi Finances (*Décret n°2021-516 du 29 avril 2021* [22]), le fonds était alimenté par un prélèvement de 12 % sur la surprime CatNat des contrats d'assurance habitation et automobile qui a été présentée dans la section **1.1.2.1**. Depuis, son financement provient du budget général de l'État. En 2023, le budget accordé au fonds Barnier s'élevait environ à 200 millions d'euros (*Rapport général n°128 du Sénat, 2023* [23]). Cependant, ce fonds pourrait s'avérer insuffisant en cas de CatNat extrême entraînant des dégâts matériels et économiques considérables. La tempête Xynthia (27-28 février 2010) illustre ce risque, ayant mis en difficulté l'équilibre financier du Fonds Barnier.

L'ensemble de ce partenariat public-privé est synthétisé sur la **Figure 1.7**.

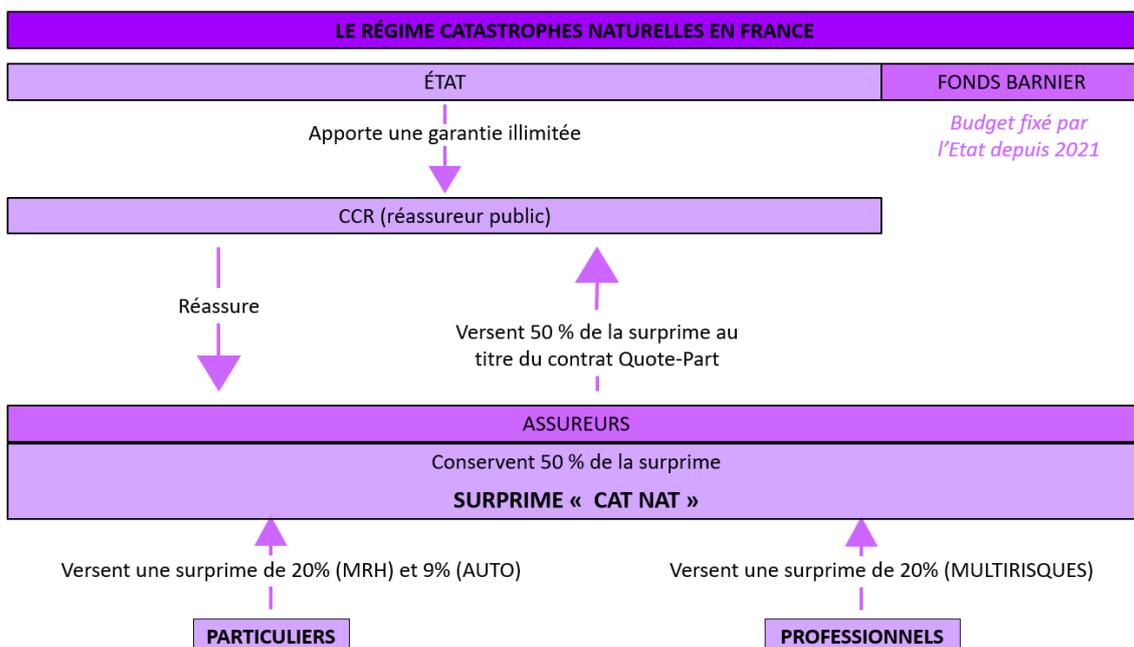


FIGURE 1.7 : Synthèse du fonctionnement du régime CatNat (après 1^{er} janvier 2025)

1.2 Présentation du péril inondation

L'inondation, définie comme « une submersion rapide ou lente d'une zone habituellement hors d'eau » (*Préfet des Pyrénées Orientales, 2023 [24]*), est un des périls climatiques pris en charge par le régime CatNat. Cet aléa est très présent en France puisqu'il s'agit du premier péril naturel en nombre de communes touchées et en montants des dégâts causés. En effet, 60 % des indemnisations accordées depuis 1982 par le régime CatNat, soit 24,8 milliards d'euros, concernent les inondations (*Géorisques, 2024 [4]*).

1.2.1 Les différents types d'inondations

Bordée par deux mers et un océan, la France métropolitaine, qui compte environ 550 000 kilomètres carrés de cours d'eau et reçoit en moyenne 500 à 2 000 millimètres de pluie par an (*Eau France, 2024 [25]*), est souvent confrontée à des inondations aux causes variées. Ces inondations se manifestent sous plusieurs formes résumées en **Figure 1.8**, chacune ayant ses propres caractéristiques et impacts.

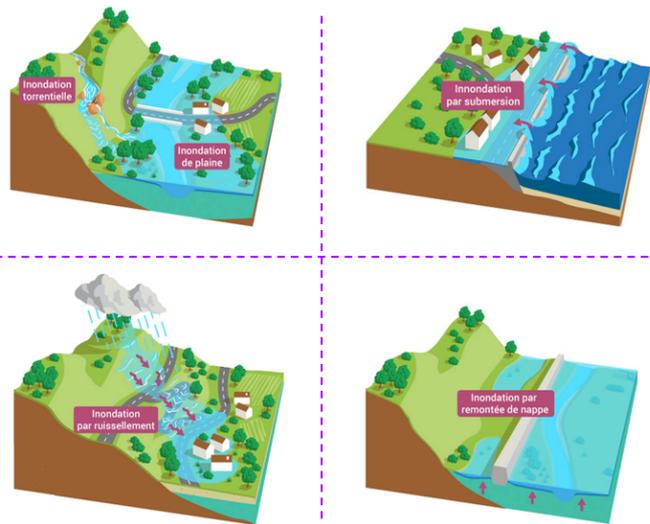


FIGURE 1.8 : Les différents types d'inondations (*Eau France, 2024 [26]*)

Inondations par ruissellement

Ce type d'inondations est provoqué par l'écoulement rapide des eaux de pluie sur des surfaces imperméables, comme les zones urbanisées ou les sols saturés, au lieu de s'infiltrer dans le sol. Ce phénomène peut être accentué par l'artificialisation des sols, la disparition des zones humides et l'insuffisance des réseaux de drainage.

Inondations par submersion marine

Elles sont provoquées par la montée des eaux océaniques, souvent liée à des phénomènes météorologiques extrêmes comme les tempêtes et les surcotes (surélévation du niveau de la mer à cause d'une diminution de la pression atmosphérique). L'élévation du niveau des mers en raison du changement climatique aggrave également ce risque dans de nombreuses régions côtières. La tempête Xynthia a par exemple récemment créé des inondations par submersion marine en Vendée et en Charente-Maritime.

Inondations par remontée de nappes

Les inondations par remontée de nappes phréatiques se produisent lorsque le niveau de la nappe souterraine monte jusqu'à atteindre la surface du sol, inondant alors les zones basses. Ce phénomène peut être provoqué par des pluies abondantes sur une longue période, entraînant une recharge excessive des nappes, ou par un arrêt soudain de pompages qui les maintenaient à un niveau plus bas.

Inondations par débordement

Les inondations par débordement, qui seront étudiées dans ce mémoire, résultent des crues soudaines des cours d'eau, généralement provoquées par des précipitations intenses ou la fonte rapide des neiges. Ces débordements peuvent être causés soit par des pluies torrentielles dont l'écoulement, accéléré par le relief, converge vers les cours d'eau, soit par des précipitations prolongées directement dans les bassins versants. Un exemple récent marquant en France est celui des crues de la Seine et de ses affluents en janvier 2018, qui ont conduit à l'évacuation de milliers de personnes en région parisienne et causé d'importants dommages matériels.

1.2.1.1 Un péril inégalement réparti en France

La majeure partie de ces inondations est causée par des aléas météorologiques, notamment des pluies intenses et/ou prolongées sur plusieurs jours. La fonte des neiges, directement liée au réchauffement climatique, favorise également leurs apparitions.

Concernant la fréquence, le risque d'inondation n'est pas uniformément réparti sur le territoire français, car il dépend fortement du climat de la région et de la présence de nombreux cours d'eau ou d'un littoral. Actuellement, 18 millions de personnes vivent dans des zones susceptibles d'être inondées par le débordement de cours d'eau, et 1,5 million d'habitants sont exposés aux phénomènes de submersion marine. La **Figure 1.9** montre que le pourtour méditerranéen, la Normandie et les Hauts-de-France sont des zones particulièrement exposées au risque d'inondation (*Géorisques, 2024* [5]).

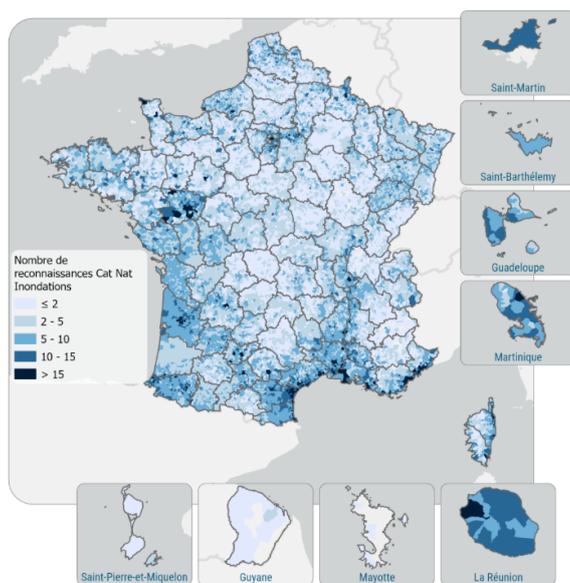


FIGURE 1.9 : Nombre de CatNat par commune entre 1995 et 2019 (*Rapport CCR, 2022* [27])

1.2.1.2 Analyse de la sinistralité sur le territoire

Une zone fréquemment sinistrée par les inondations n'est pas forcément une zone où les dommages seront les plus élevés. En effet, l'impact des inondations dépend non seulement de leur fréquence, mais aussi de la densité de population, des infrastructures présentes, de la valeur des biens touchés et des mesures de prévention mises en place.

Par exemple, une région rurale où les inondations sont courantes peut subir moins de dommages économiques et humains qu'une zone urbaine moins fréquemment touchée, mais densément peuplée et fortement urbanisée. Un exemple marquant en France est la différence entre les inondations dans la vallée de la Seine et celles sur la Côte d'Azur. La vallée de la Seine, en particulier à Paris, est moins fréquemment inondée que certaines zones côtières méditerranéennes qui sont notamment exposées au risque de submersion marine, contrairement à Paris. Cependant, lorsqu'une crue majeure se produit, comme celle de janvier 1910 à Paris, les dommages peuvent être considérables en raison de la densité de population et de la concentration de biens de grande valeur. La crue de 1910 a entraîné l'évacuation de milliers de personnes, causé des dégâts matériels importants et perturbé les infrastructures de la ville, entraînant des coûts de réparation et de reconstruction très élevés.

En revanche, la Côte d'Azur, bien que fréquemment touchée par des inondations dues à des pluies torrentielles, subit souvent des dommages moins étendus en termes de coûts économiques, en partie grâce à des mesures de prévention et à une densité de population moins importante dans les zones les plus à risque. La répartition de la sinistralité est imagée en **Figure 1.10**.

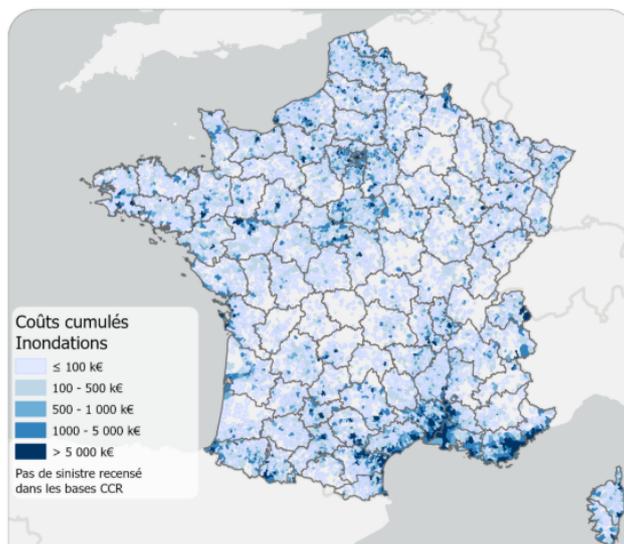


FIGURE 1.10 : Sinistralité inondations par commune entre 1995 et 2019 (*Rapport CCR, 2022* 27)

1.2.2 Focalisation sur le débordement d'un cours d'eau

Les inondations par débordement sont particulièrement menaçantes en métropole en raison de la densité du réseau hydrologique qui couvre une grande partie du territoire. Les sept grands fleuves français, que sont l'Adour, la Garonne, la Loire, la Meuse, le Rhin, le Rhône et la Seine, créés un grand risque de débordement dans tout l'hexagone. De plus, l'urbanisation massive, notamment près de ces grands cours d'eau, augmente majoritairement le risque.

Plusieurs mesures de prévention sont d'ailleurs prises à ce sujet, comme les plans de prévention des risques d'inondations (PPRI) qui viennent délimiter les zones à risques et imposent des restrictions sur certains bâtiments (type de matériau, aménagements...). Aujourd'hui, 75 % de la population est concernée par les PPRI (*Géorisques, 2024* [5]).

1.2.2.1 Crues lentes de plaine

Le premier phénomène pouvant créer des inondations par débordement est une crue lente de plaine. Cela survient lorsqu'un cours d'eau sort de son lit mineur pour rejoindre son lit moyen ou majeur. La **Figure 1.11** permet de comprendre l'évolution des différents lits.

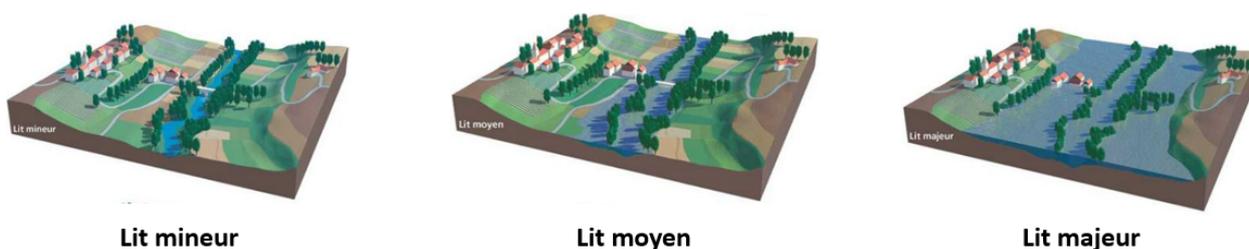


FIGURE 1.11 : Les différents lits d'un cours d'eau (*Géorisques, 2024* [28])

Des pluies prolongées et possiblement intenses sont en partie responsables de ces crues, augmentant le débit et le niveau d'eau des fleuves et rivières, qui finissent par déborder de leur lit mineur et atteignent les habitations les plus proches.

1.2.2.2 Crues rapides et torrentielles

Il est également possible d'observer des crues rapides et torrentielles. Contrairement aux crues lentes de plaine, qui se développent progressivement et persistent dans le temps, ces crues soudaines, également appelées « *flash floods* », provoquent des inondations éclair potentiellement très destructeur. Elles se produisent particulièrement dans les zones à fort relief, comme les montagnes, où les dénivelés accentuent considérablement la vitesse d'écoulement de l'eau.

1.2.2.3 Enjeux actuariels et climatiques

Ce mémoire, axé sur les inondations par débordement, se concentre spécifiquement sur les crues lentes de plaine. Il poursuit un double objectif. D'une part, il s'agit de développer un modèle d'inondation destiné à améliorer la compréhension et la gestion du risque. Ce modèle sera conçu de manière à être transposable à n'importe quelle région avec des cours d'eau majeurs, permettant ainsi une évaluation précise de l'exposition au risque pour tout portefeuille d'assurés. D'autre part, l'objectif est de nature climatique, car il consiste à analyser l'évolution du risque d'inondation à l'horizon 2050 afin d'évaluer l'impact du changement climatique. Le dérèglement climatique pourrait en effet modifier la fréquence et la sévérité des inondations dans les années à venir, rendant certaines zones potentiellement inassurables. Cette question est particulièrement pertinente pour les territoires d'outre-mer, où la vulnérabilité aux catastrophes naturelles est élevée. À la suite du passage de l'ouragan IRMA en 2017, qui a dévasté Saint-Martin, certains assureurs ont déjà réduit leur exposition dans ces régions.

Toujours concernant l'aspect climatique, le Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat (GIEC) a publié le 20 mars 2023 la synthèse de son sixième rapport d'évaluation de l'impact du changement climatique. Ce rapport prévoit une augmentation de la fréquence et de l'intensité des épisodes de pluie extrêmes. Les précipitations jouant un rôle majeur dans la survenue des crues, il semble donc pertinent de modéliser l'impact de ces variations sur les inondations par débordement.

Dans son livre blanc de 2022 (*Covéa, 2022* [29]), le groupe d'assurance mutuelle Covéa prévoit une augmentation de 110 % de la sinistralité liée aux inondations par débordement d'ici 2050. Cette hausse est attribuée à une augmentation de 50 % des débits pour les périodes de retour de 10 ans à l'horizon 2050. Cet ouvrage détaille également l'évolution des dommages futurs en France métropolitaine. Ces estimations reposent sur la projection de variables climatiques conformément aux scénarios de concentration de gaz à effet de serre (GES) fournis par le GIEC. Covéa a utilisé le scénario RCP 8.5, qui décrit un monde sans régulation des émissions de GES, entraînant une augmentation globale de la température planétaire de +5°C d'ici 2100. Un extrait des résultats est donné en **Figure 1.12**.

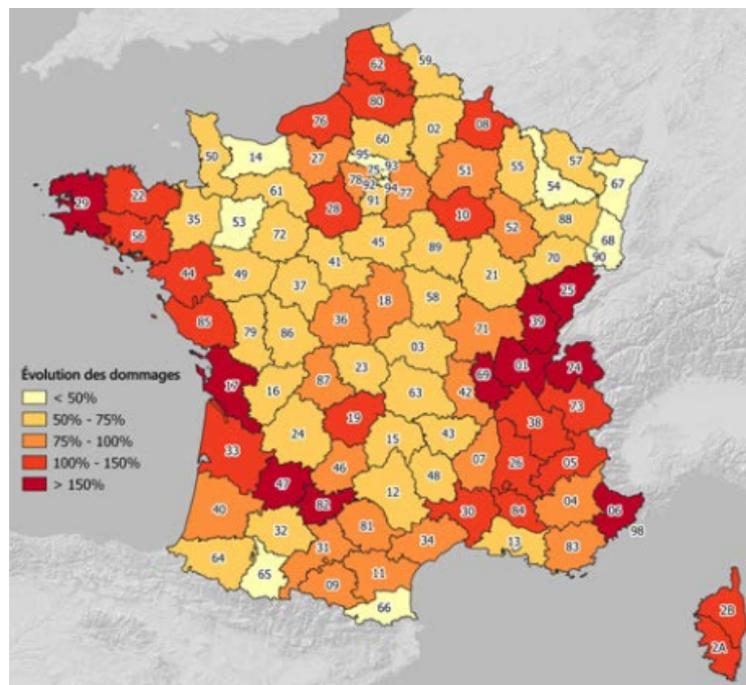


FIGURE 1.12 : Évolution de la sinistralité liée au risque de crues de plaine à horizon 2050 (*Covéa, 2022* [29])

1.2.3 Cartographie du risque

La gestion du risque d'inondation, notamment par débordement des cours d'eau, constitue une priorité majeure pour les autorités publiques, compte tenu de l'ampleur des dégâts potentiels sur les populations, les infrastructures et l'environnement. Pour répondre à cet enjeu, divers outils de cartographie ont été développés, permettant d'évaluer et de prévoir les zones à risque d'inondation. Parmi ces outils figurent les Plans de Prévention du Risque d'Inondation (PPRI), les Territoires à Risque Important d'Inondation (TRI), les Atlas des Zones Inondables (AZI), Zones Inondées par Classes de Hauteurs d'eau (ZICH) et les Enveloppes Approchées d'Inondations Potentielles (EAIP). Ces instruments sont complémentaires et permettent une approche détaillée de la gestion du risque d'inondation.

1.2.3.1 Atlas des Zones Inondables

Les Atlas des Zones Inondables (AZI), développés au début du XXI^{ème} siècle, représentent une première approche informelle pour évaluer le risque d'inondation. Ces atlas s'appuient sur des données historiques, l'analyse du comportement naturel des cours d'eau, la topographie, et parfois sur des modélisations hydrauliques. Ils jouent un rôle clé dans la sensibilisation du public aux dangers liés aux inondations et constituent une source d'informations préventives. Les AZI sont fréquemment utilisés par les services municipaux ou étatiques pour appuyer les décisions d'urbanisme, telles que l'instruction des permis de construire.

1.2.3.2 Plans de Prévention du Risque d'Inondation (PPRI)

Les Plans de Prévention du Risque d'Inondation (PPRI) sont des documents réglementaires créés dans le cadre de la politique française de gestion des risques naturels. Leur principal objectif est de protéger les personnes et les biens contre les inondations, en définissant des règles d'urbanisme strictes dans les zones à risque. Concrètement, les PPRI cartographient les zones inondables selon différents scénarios de crue et classent ces zones en fonction du niveau de danger. Par exemple, dans les zones rouges, où le risque est très élevé, les constructions nouvelles sont interdites, tandis que dans les zones bleues, où le risque est modéré, les projets immobiliers peuvent être autorisés sous conditions. En plus de fixer des règles d'aménagement du territoire, les PPRI encouragent la réduction de la vulnérabilité des constructions existantes par des mesures de protection et des plans d'évacuation.

1.2.3.3 Territoires à Risque Important d'Inondation (TRI)

Les Territoires à Risque important d'Inondation (TRI) sont une composante de la directive européenne 2007/60/CE (*Parlement Européen, 2007* [30]), visant à identifier les zones où les enjeux humains, économiques et environnementaux sont particulièrement élevés en cas d'inondation. Ces territoires sont définis en fonction de critères tels que la densité de population, la vulnérabilité des infrastructures, et les dommages potentiels liés aux crues. En France, les TRI concernent des zones comme les grandes agglomérations, les vallées fluviales, et les régions côtières exposées aux inondations (**Figure 1.13**). Aujourd'hui, 124 zones sont ainsi cartographiées en Métropole et DROM. Pour chaque TRI, un Plan de Gestion des Risques d'Inondation (PGRI) est élaboré, définissant des objectifs de prévention et des actions spécifiques pour réduire les risques, améliorer la résilience des territoires et renforcer les systèmes d'alerte. Ces mesures incluent la révision des normes d'urbanisme, la réduction de la vulnérabilité des bâtiments, et des travaux de protection des infrastructures critiques, renforçant ainsi la sécurité des habitants et la durabilité des territoires face aux inondations.

Pour une zone donnée, trois types de cartes sont mises à disposition selon la gravité de l'inondation représentée par trois scénarios distincts :

- **Scénario fréquent** : correspond à une hauteur d'eau ayant une période de retour comprise entre 10 et 30 ans.
- **Scénario moyen** : correspond à une hauteur d'eau ayant une période de retour comprise entre 100 et 300 ans.
- **Scénario rare** : correspond à une hauteur d'eau ayant une période de retour d'environ 1000 ans.



FIGURE 1.13 : Visualisation des TRI disponibles (*Géorisques, 2020* [31])

1.2.3.4 Zones Inondées par Classes de Hauteurs d'Eau (ZICH)

Les Zones Inondées par Classes de Hauteurs d'Eau (ZICH) sont des cartes permettant de visualiser les zones susceptibles d'être inondées en fonction de différentes hauteurs d'eau lors d'une crue. Ces cartes classent les zones inondées en fonction de niveaux d'eau atteints, souvent répartis en plusieurs catégories (par exemple, 0 à 0,5 m, 0,5 à 1,5 m, etc.), offrant ainsi une meilleure compréhension de la gravité potentielle des inondations dans chaque secteur. Les ZICH sont particulièrement utiles pour évaluer l'impact d'une crue sur les infrastructures, les bâtiments, et les populations, car la hauteur d'eau détermine en grande partie les dommages matériels et les risques pour la sécurité des habitants. Ces cartes sont souvent intégrées dans les Plans de Prévention des Risques d'Inondation (PPRI) et constituent un outil d'aide à la décision pour l'aménagement du territoire, en permettant d'identifier les zones à risque et de prendre des mesures adaptées pour minimiser les impacts des inondations. Quelques limites subsistent malgré tout puisque ces cartes ne prennent pas en compte la présence d'ouvrages de protection, pouvant ainsi réduire les conséquences d'une crue.

1.2.3.5 Enveloppes Approchées d'Inondations Potentielles (EAIP)

Au même titre que les éléments présentés précédemment, les Enveloppes Approchées d'Inondations Potentielles (EAIP) sont des cartes indicatives qui délimitent les zones pouvant potentiellement être inondées en cas de crue majeure. Utilisées principalement comme un outil d'alerte préliminaire, les EAIP fournissent une estimation des secteurs susceptibles d'être touchés par des inondations, sur la base de données topographiques et historiques. Elles permettent de sensibiliser les populations et les acteurs locaux aux risques d'inondation et d'orienter les premières actions de gestion du territoire en absence de cartographies plus précises. Les EAIP, bien que non réglementaires, sont souvent consultées par les collectivités et les autorités pour évaluer les risques et guider des études plus approfondies. Elles constituent une base utile pour la planification urbaine dans les zones potentiellement à risque.

1.3 Localisation spatiale : le Gardon d'Alès (Gard)

Lors de la mise en place de la structure du présent mémoire, le choix de la maille géographique d'étude a été fondamentale. La volonté initiale et idéale était de développer un modèle inondation à l'échelle nationale afin d'avoir une vision macroscopique permettant la comparaison entre départements et régions, et offrant la possibilité de comparer les résultats avec diverses études comme le livre blanc de Covéa. Cependant, après réflexion, il a semblé plus pertinent de traiter une zone précise dont les résultats seront présentés en détail, accompagnée d'une autre zone servant à illustrer la répliquabilité du modèle. Cette fine sélection permet d'apprécier plus précisément les résultats et les caractéristiques climatiques et topologiques de ces dernières. Des enjeux de puissance de calcul sont également à prendre en compte. La zone principale a été définie en ciblant tout d'abord un département intéressant à analyser pour cette étude, puis en sélectionnant une ville précise en fonction de l'historique de sinistralité et des enjeux assurantiels.

1.3.1 Critères de sélection d'un département

Le maillage de l'étude étant défini, il a fallu choisir le département sur lequel appliquer cette modélisation. Ce choix a été pris selon différents critères :

- **Une fréquence élevée d'inondations par débordement** : la volonté de sélectionner un département régulièrement touché paraît évidente, mais permet déjà d'éliminer une partie du territoire. L'analyse de la cartographie [Figure 1.9](#) permet de sélectionner quelques candidats.
- **Un département fortement dommageable** : il semble également pertinent de modéliser une zone susceptible de subir beaucoup de dégâts lors d'une inondation. Cela permet de soulever des problématiques de prévention et de gestion de l'exposition.
- **Richesse hydrologique** : un département ayant plusieurs cours d'eau de différentes tailles, qui traversent à la fois des zones rurales et urbaines permet d'enrichir la modélisation.
- **Variabilité climatique** : enfin, s'intéressant à l'impact du changement climatique sur les inondations par débordement, le choix d'un département subissant régulièrement des pluies intenses est intéressant. En effet, le dérèglement climatique devrait augmenter la sévérité de ces pluies, augmentant ainsi les chances de crues majeures.

Bien que ces critères motivent à la sélection d'un département, le Gard en l'occurrence, il faut garder en tête que le modèle doit être répliquable à d'autres zones géographiques et que la restriction est pertinente pour apprécier une modélisation plus fine et imagée.

1.3.1.1 Fréquence d'inondation élevée

Pour le choix du département, le premier critère considéré est la fréquence des inondations par débordement. La Caisse Centrale de Réassurance, qui a été présentée dans la section [1.1.3.1](#), met à disposition un portail des catastrophes naturelles en France. Il est possible d'y retrouver tous les arrêtés CatNat depuis la création du régime CatNat en 1982. Cela permet notamment de cartographier le risque d'inondation en France ([Figure 1.14](#)) et de constater que le Gard fait partie des départements les plus impactés.

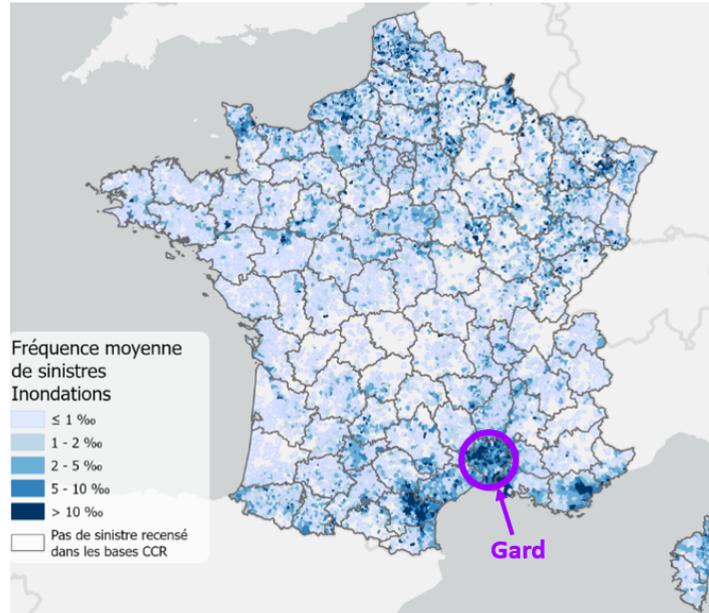


FIGURE 1.14 : Fréquence d'arrêtés CatNat entre 1982 et 2019 (*Rapport CCR, 2022* [27])

Cependant, ce graphique donne la fréquence pour le péril inondation de manière générale. Cela reste significatif pour le Gard, car c'est un département qui est exposé principalement aux inondations par débordement, mais il semble pertinent de croiser ces données avec une autre source qui s'intéresse uniquement aux inondations par débordement. Pour cela, la base de données GASPARD (*Ministère de la transition écologique, base de données GASPARD 2023* [15]) qui fournit le nombre d'arrêtés CatNat par péril a été utilisée. Après une agrégation départementale, la **Figure 1.15** montre que le Gard apparaît à la 9^{ème} position avec 2 830 arrêtés CatNat depuis 42 ans. Le rapport du nombre d'arrêtés par la superficie des départements a été analysé et confirme la place du Gard dans les 15 premiers.

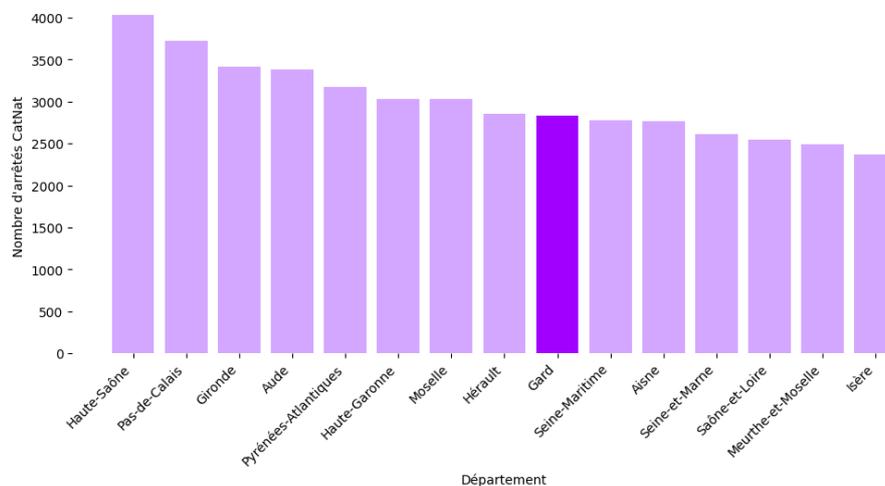


FIGURE 1.15 : Les départements subissant les plus d'inondations par débordement.

1.3.1.2 Sinistralité croissante

La [section 1.3.1.1](#) a mis en évidence que le Gard est une région particulièrement touchée par les inondations au cours des dernières années. Bien qu'une fréquence élevée de sinistres n'implique pas nécessairement des coûts de dédommagement très élevés, elle constitue tout de même un indicateur pertinent. Cependant, l'intérêt de ce mémoire réside avant tout dans l'identification de zones où les coûts liés aux inondations pourraient considérablement augmenter à l'avenir, notamment sous l'effet du changement climatique. La [Figure 1.12](#) vient appuyer cette analyse en montrant que la sinistralité dans le Gard pourrait au minimum doubler d'ici 2050, renforçant ainsi la pertinence de cette région pour l'étude de l'évolution du risque inondation.

1.3.1.3 Variabilité climatique

Le département du Gard se situe dans une région méditerranéenne caractérisée par une forte variabilité climatique et des précipitations souvent intenses. Ce climat favorise l'apparition de phénomènes spécifiques tels que les épisodes cévenols caractérisés par des pluies intenses sur une courte période, et qui seront détaillés prochainement. Ces derniers se produisent généralement à l'automne et au printemps, lorsque des masses d'air chaud et humide en provenance de la Méditerranée sont poussés vers les reliefs des Cévennes, provoquant d'importantes précipitations concentrées sur une courte période.

Ce climat présente un double intérêt dans cette étude : d'une part, il favorise la survenue d'inondations par débordement ; d'autre part, il offre une occasion d'observer l'évolution du risque d'inondation en lien avec le changement climatique.

1.3.1.4 Richesse hydrologique et topologique

Le département du Gard bénéficie d'un réseau hydraulique dense et diversifié, caractérisé par la présence de nombreux cours d'eau, rivières et fleuves. Le Rhône, l'un des plus grands fleuves d'Europe, borde d'ailleurs une partie du département. D'importants affluents sont également présents sur le territoire ainsi que des affluents importants tels que la Cèze, le Gardon, le Vistre et le Vidourle.

L'étude de ce département est pertinente en raison de la diversité de ses reliefs. Alès, encadrée par les Cévennes, offre un environnement montagneux, tandis que Nîmes présente un paysage relativement plat. Plus au sud, le Grau-du-Roi propose un cadre balnéaire distinct. Cette variété de reliefs entraîne des causes et des conséquences différentes pour les inondations dans la région, influencées par le relief et le niveau d'urbanisation.

1.3.2 Inondations historiques dans le Gard

Plus de 500 crues ont été recensées dans le département du Gard depuis le XIII^{ème} siècle. Ces inondations sont réparties inégalement sur le territoire, puisque des villes comme Alès et Nîmes ont été très touchées tandis que la partie ouest est plutôt épargnée jusqu'à aujourd'hui, comme en témoigne la [Figure 1.16](#).

La présence de reliefs variés présente un intérêt particulier, car elle permettra d'explorer des ajustements méthodologiques lors de la modélisation, afin de garantir que la méthode puisse être adaptée à tout type de terrain.

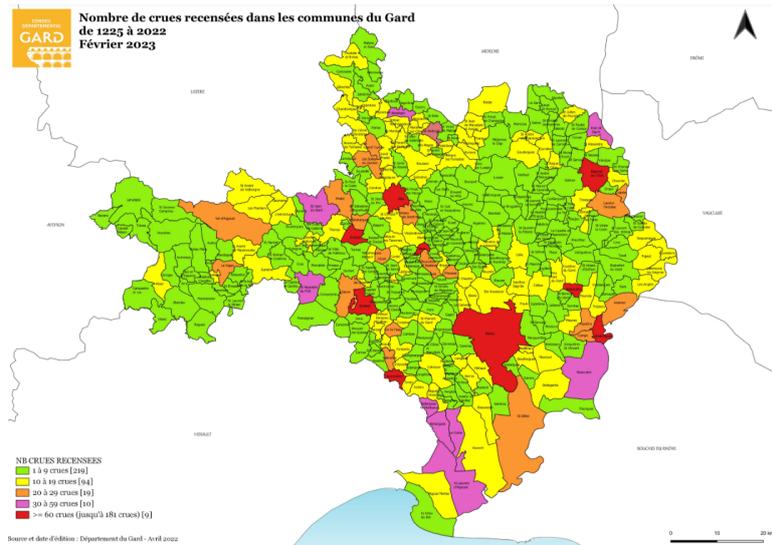


FIGURE 1.16 : Cartographie des crues du Gard (*Conseil Départemental du Gard, 2024* [32])

Les crues de septembre 2002 comptent parmi les épisodes les plus dévastateurs du département. Le 8 septembre en fin d'après-midi, des pluies intenses s'abattent sur le Gard ainsi que sur une partie du Vaucluse et de l'Ardèche. Quelques heures plus tard, la majorité des cours d'eau du département entrent en crue simultanément, provoquant des débordements destructeurs. Le bilan est lourd : 90 % des communes du Gard sont sinistrées, avec 23 décès et plus de 800 millions d'euros de dégâts (*Conseil Départemental du Gard, 2024* [32]).

Ces crues de 2002 sont la conséquence d'un épisode cévenol, expliqué en **Figure 1.17**. Comme évoqué un petit peu plus tôt dans ce mémoire, les épisodes cévenols sont des phénomènes météorologiques caractéristiques des régions du sud-est de la France, notamment dans les Cévennes. Ils se produisent principalement en automne, lorsque des masses d'air chaud et humide venant de la Méditerranée rencontrent les reliefs des Cévennes. Cette rencontre provoque de violentes précipitations orageuses, souvent intenses et localisées, qui peuvent durer plusieurs heures voire plusieurs jours. Les pluies torrentielles qui en résultent engendrent des crues soudaines et des inondations dévastatrices, causant des dommages importants aux infrastructures et aux habitations, ainsi que des risques pour la vie humaine.

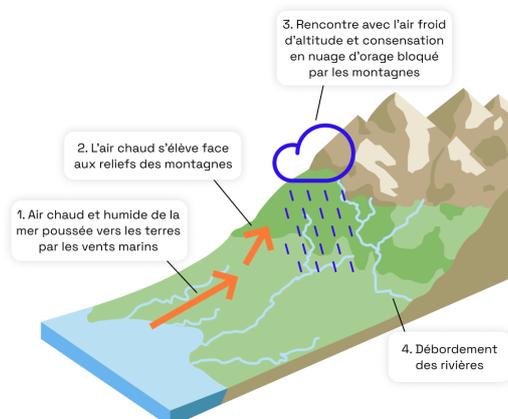


FIGURE 1.17 : Explication des épisodes cévenols (*Midi Libre, 2024* [33])

Selon la base GASPAR présentant la liste des CatNat depuis 1982, 51 % des inondations par débordement dans le département du Gard se produisent en septembre, octobre ou novembre. Ces mois sont caractéristiques de l'apparition des épisodes cévenols. Sachant que des orages cévenols peuvent se produire également en avril ou mai, même si cela est plus rare, il est possible d'affirmer que plus de la moitié des inondations par débordement du Gard est causée par des épisodes cévenols.

Par exemple, en septembre 2020, un tel épisode s'est produit entre le Gard et l'Hérault. En l'espace de quelques heures, des quantités d'eau impressionnantes ont été enregistrées, atteignant jusqu'à 718 millimètres à Valleraugue, alors que 100 millimètres étaient initialement prévus. Ces pluies intenses ont notamment causé le débordement du Gardon à Anduze. Résultat : 26 communes sinistrées, 26 millions de dégâts et 2 décès (*EPTB, 2020* [34](#)).

Pour rappel, cette présente étude cherche à cibler une ville particulière, traversée par un cours d'eau, et qui représente un intérêt climatique et assurantiel. Comme l'illustre la [Figure 1.16](#), moins d'une dizaine de villes ont subi plus de 60 crues depuis 1225. Une de ces villes sera sélectionnée. Les derniers critères de sélection sont la densité de population, la richesse économique de la zone et enfin, le plus important, la disponibilité des données hydrologiques. Le Gardon d'Alès, qui traverse la ville éponyme, a été choisi comme cours d'eau de référence pour cette étude.

1.3.3 Volonté de réplification du modèle

Bien que la décision de développer un modèle inondation spécifique à quelques zones ait été prise, il est crucial de veiller à ce que cette modélisation soit répliquable à n'importe quelle zone. En effet, des limites de temps et de puissance de calcul restreignent l'étendue de cette étude, mais il ne faut pas oublier qu'en l'absence de ces limites, la modélisation a vocation à être étendue à l'échelle nationale. Toutes les étapes de ce mémoire doivent donc être pensées de telle sorte que si toutes les conditions étaient réunies, il serait possible d'observer l'impact prospectif du changement climatique sur les inondations par débordement sur n'importe quelle zone spatiale. Pour veiller à cela, il est tout d'abord nécessaire de récupérer des données à l'échelle nationale, et non pas seulement sur les zones d'étude. De plus, le code développé devra être rapidement modulable pour l'adapter à n'importe quel département, bassin hydrologique et portefeuille d'assurés. Dans l'objectif d'illustrer la répliquabilité du modèle, il a été décidé de réaliser toutes les étapes de la modélisation à une seconde zone géographique. Cela pourra permettre également d'identifier les axes d'amélioration du modèle sur certains types de zones en analysant diverses topographies et conditions climatiques. Pour sélectionner cette zone, plusieurs critères ont été pris en compte :

- **L'impact du changement climatique** : est-il significatif dans la zone ciblée selon d'autres études ?
- **La disponibilité des données** : sont-elles accessibles, suffisantes et fiables ?
- **Les enjeux assurés** : il semble pertinent de modéliser une zone où l'exposition au risque d'inondation par débordement est importante.
- D'autres critères qui deviendront compréhensibles dans la suite du mémoire : disponibilité des TRI ou d'une courbe de tarage par exemple.

Analysant tous ces critères, l'étude du débordement de la Seine à Paris a été sélectionnée. La variation de zone géographique représente une des sensibilités importantes de notre modélisation, mais ce n'est pas le seul facteur susceptible d'être modifié. De ce fait, la dernière section de cette étude consistera à faire varier différents paramètres de la modélisation pour apprécier divers résultats.

Chapitre 2

Théorie : alignement de l'exposition et des facteurs de risque

Ce deuxième chapitre a pour objectif de développer une modélisation structurée autour de plusieurs étapes clés visant à quantifier le risque d'inondation par débordement. La première partie s'attachera à présenter la théorie des valeurs extrêmes, qui fournit les hauteurs d'eau observées à une station hydrométrique donnée, associées à différentes périodes de retour. Ensuite, un modèle d'empreinte de crue sera construit pour visualiser les zones inondables correspondant aux hauteurs d'eau caractéristiques obtenues dans la première partie. Une fois les zones à risque identifiées, l'étape suivante consistera à analyser les bâtiments situés dans ces zones, en estimant leurs caractéristiques telles que la localisation, le type, le coût de reconstruction et les sommes assurées. Enfin, le dernier volet de cette modélisation sera consacré au calcul d'une métrique servant à évaluer le risque d'inondation : la perte annuelle moyenne attendue, plus communément appelée *Average Annual Loss* (AAL) (*Asia-Pacific Disaster, 2019* [35]).

L'objectif principal de ce mémoire étant d'analyser l'impact prospectif du changement climatique sur les inondations par débordement, il sera question de comparer l'AAL 2024 avec un AAL projeté à horizon 2050. Cette fenêtre temporelle, considérée comme une vision à long terme par le GIEC et l'exercice climatique 2023 de l'ACPR notamment, a été choisie pour différentes raisons qui seront abordées dans ce chapitre. La méthodologie globale est schématisée en **Figure 2.1**

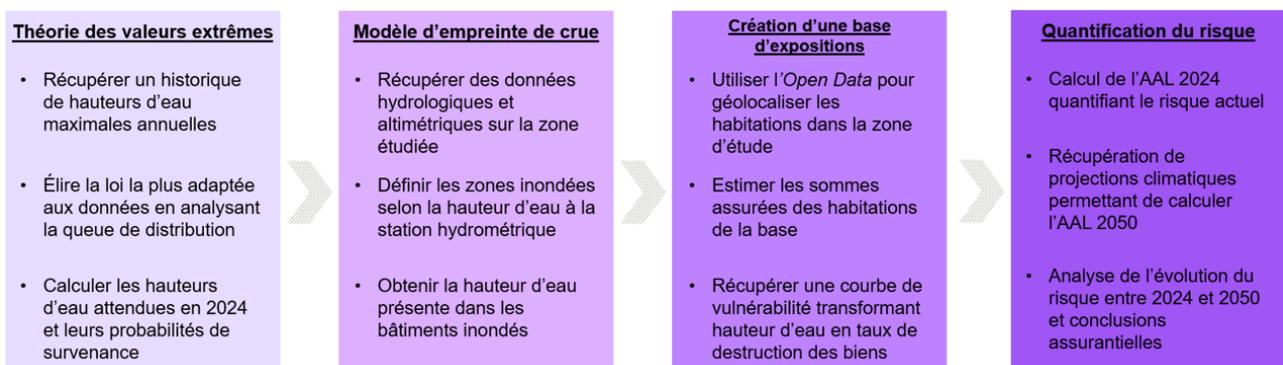


FIGURE 2.1 : Synthèse de la méthodologie globale

2.1 Analyse des périodes de retour des inondations

L'estimation des périodes de retour des inondations constitue un pilier central dans la gestion du risque climatique, en particulier pour le secteur de l'assurance (*Favre A-C, Meylan P, Musy A, 2008* [36]). Ces périodes de retour, qui indiquent la fréquence avec laquelle une inondation d'une certaine ampleur est susceptible de se produire statistiquement, fournissent une base essentielle pour l'évaluation des risques. Dans un contexte où le changement climatique amplifie l'incertitude quant à la fréquence et à l'intensité des événements extrêmes, une estimation précise des périodes de retour devient d'autant plus cruciale. Elle permet non seulement d'anticiper les sinistres potentiels, mais aussi d'élaborer des stratégies de gestion du risque plus robustes, contribuant ainsi à la résilience des systèmes assurantiels face aux bouleversements climatiques à venir. Pour estimer ces périodes de retour, la théorie des valeurs extrêmes est utilisée.

2.1.1 Présentation de la théorie des valeurs extrêmes

Le 6^{ème} et dernier rapport en date du Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat (*GIEC, 2023* [1]) indique que le changement climatique est susceptible d'augmenter la fréquence et l'intensité des inondations dans de nombreuses régions du monde. Cette augmentation est principalement liée à la hausse des précipitations extrêmes, qui sont une conséquence directe de l'intensification du cycle hydrologique due au réchauffement de l'atmosphère. De plus, les phénomènes tels que les vagues de chaleur marine et les sécheresses pourraient exacerber les effets des précipitations extrêmes en modifiant les régimes hydrologiques régionaux. Les épisodes cévenols, notamment évoqués dans le premier chapitre, sont désormais trois fois plus probables qu'ils ne l'étaient en 1950 selon une étude publiée en 2018 (*Dubuisson B, Colin J, Planton S, Ribes A, Somot S, Soubeyroux J-M, Thao S, Vautard R, 2018* [37]).

Il semble alors pertinent de s'intéresser à ces événements extrêmes susceptibles d'être de plus en plus fréquents et dévastateurs. La théorie des valeurs extrêmes (*Gumbel E-J, 1935* [38]) constitue un outil renommé pour cette problématique. Cette théorie permet de décrire le comportement statistique des valeurs situées aux extrémités des distributions, qui, dans le contexte des inondations, correspondent aux crues plus ou moins exceptionnelles. L'intérêt principal de cette théorie réside dans sa capacité à fournir des estimations fiables des probabilités d'événements extrêmes, même lorsque les données historiques sont limitées. En particulier, elle permet de calculer les périodes de retour, c'est-à-dire la fréquence à laquelle un événement d'une certaine intensité est susceptible de se produire. Ces estimations sont essentielles pour la gestion des risques et la prise de décision en matière de protection contre les inondations, surtout dans un contexte de changement climatique.

Pour bien appréhender l'intérêt de la théorie des valeurs extrêmes dans le cadre de ce mémoire, il convient de rappeler certaines propriétés de la statistique dite « classique », qui se concentre principalement sur la partie centrale d'une distribution (moyenne, médiane, variance...). Cette approche traditionnelle permet d'analyser des phénomènes courants et modérés, mais elle se révèle limitée lorsqu'il s'agit de décrire des événements rares et extrêmes, car ces derniers sont souvent sous-représentés dans les données. En se focalisant sur la tendance centrale, la statistique classique tend à minimiser l'importance des valeurs extrêmes, ce qui peut conduire à une sous-estimation du risque dans des contextes où les extrêmes sont cruciaux, comme les inondations. C'est ici que la théorie des valeurs extrêmes se distingue, en se concentrant spécifiquement sur la modélisation et la prévision de ces événements rares, apportant une compréhension plus fine des risques associés.

Théorème 1 (Loi forte des grands nombres (*Borel E, 1909 [39]*)). Soit $\{X_n\}_{n \geq 1}$ une suite de variables aléatoires indépendantes et identiquement distribuées (i.i.d.), définies sur un espace de probabilité, et ayant une espérance $\mathbb{E}[X_n] = \mu$. Alors, presque sûrement :

$$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i \xrightarrow[ps]{n \rightarrow \infty} \mu,$$

c'est-à-dire :

$$P \left(\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i = \mu \right) = 1.$$

Théorème 2 (Théorème Central Limite (*Laplace P-S, 1809 [40]*)). Soit $\{X_n\}_{n \geq 1}$ une suite de variables aléatoires indépendantes et identiquement distribuées (i.i.d.) avec une espérance $\mathbb{E}[X_n] = \mu$ et une variance finie $\text{Var}(X_n) = \sigma^2 > 0$. Si \bar{X}_n désigne la moyenne empirique des n premières variables aléatoires, alors la variable aléatoire normalisée :

$$Z_n = \frac{\sqrt{n}(\bar{X}_n - \mu)}{\sigma},$$

converge en distribution vers une loi normale standard $\mathcal{N}(0, 1)$ lorsque n tend vers l'infini, c'est-à-dire :

$$Z_n \xrightarrow{d} \mathcal{N}(0, 1).$$

Comme indiqué précédemment, ces deux théorèmes portent principalement sur la partie centrale d'une distribution. Dans cette étude, l'intérêt se portera sur les maxima d'une suite de variables aléatoires indépendantes et identiquement distribuées, en s'appuyant particulièrement sur le théorème suivant.

Théorème 3 (Théorème de Fisher-Tippett-Gnedenko (*Fisher R, Gnedenko B et Tippett L, 1928 [41]*)). Soit $\{X_n\}_{n \geq 1}$ une suite de variables aléatoires indépendantes et identiquement distribuées (i.i.d.), et soit $M_n = \max(X_1, X_2, \dots, X_n)$. S'il existe deux suites de constantes de normalisation $a_n \in \mathbb{R}$ et $b_n > 0$, alors :

$$\lim_{x \rightarrow \infty} P \left(\frac{M_n - a_n}{b_n} \leq x \right) = G_\xi(x),$$

où G_ξ est une fonction de répartition non dégénérée (ie qui n'est pas associée à une variable aléatoire constante presque sûrement) dont la loi appartient à la famille des lois de valeurs extrêmes généralisées (GEV). Le paramètre ξ s'appelle l'indice des valeurs extrêmes, indice de queue ou paramètre de forme. La forme de la fonction de répartition dépend du signe du paramètre de forme.

$$G_\xi(x) = \begin{cases} \exp \left(- \exp \left(- \frac{x-\mu}{\sigma} \right) \right) & \text{si } \xi = 0 \\ \exp \left(- \left(1 + \xi \frac{x-\mu}{\sigma} \right)^{-\frac{1}{\xi}} \right) & \text{si } \xi \neq 0. \end{cases}$$

où μ et $\sigma > 0$ sont des paramètres de localisation et d'échelle, respectivement.

Le signe du paramètre de forme permet de distinguer trois domaines d'attraction, correspondant aux différentes distributions limites possibles pour les maximums de grandes collections de variables aléatoires après normalisation.

- **Le domaine d'attraction de Weibull ($\xi < 0$)** : concerne les distributions ayant une queue bornée à droite, telles que la loi uniforme ou certaines distributions bornées. Pour ces distributions, les valeurs extrêmes sont limitées, c'est-à-dire qu'elles ne peuvent pas dépasser une certaine limite fixe.
- **Le domaine d'attraction de Gumbel ($\xi = 0$)** : associé aux distributions de variables aléatoires ayant des queues exponentiellement décroissantes, comme la loi normale ou exponentielle. Dans ce cas, les valeurs extrêmes sont modérément grandes, et la distribution limite pour les maximums, après normalisation, est la distribution de Gumbel. Cela signifie que les maximums ne sont pas infiniment grands et restent dans un intervalle borné en probabilités.
- **Le domaine d'attraction de Fréchet ($\xi > 0$)** : concerne les distributions ayant des queues lourdes. Les valeurs extrêmes dans ce cas peuvent être extrêmement grandes, et la distribution limite est la distribution de Fréchet. Ici, la probabilité de valeurs extrêmes très grandes est non négligeable, et les maximums tendent à l'infini à mesure que la taille de l'échantillon augmente.

La **Table 2.1** offre une liste non exhaustive des lois présentes dans chaque domaine d'attraction.

Domaine de Weibull	Domaine de Gumbel	Domaine de Fréchet
Uniforme	Normale	Pareto
Beta	Exponentielle	Student
InverseBurr	Gamma	Fréchet
-	Weibull	Chi-deux
-	Gumbel	Cauchy
-	Log-Normale	Log-gamma

TABLE 2.1 : Liste non exhaustive des lois appartenant à chaque domaine

Lors de l'application de la théorie des valeurs extrêmes aux maxima, l'objectif est d'identifier la loi qui correspond le mieux aux données étudiées, en tenant compte des caractéristiques propres à chaque loi mentionnée précédemment.

2.1.2 Application de la théorie à l'étude des inondations

Une fois la théorie établie, il est essentiel de comprendre comment l'appliquer à la problématique étudiée. L'objectif de cette première partie est de déterminer les hauteurs d'eau correspondant à des périodes de retour de 2, 5, 10, 20, 50, 100 et 200 ans, relevées à une station hydrométrique donnée. Ces périodes de retour sont couramment analysées pour évaluer le risque de survenance de crues exceptionnelles. Le seuil maximal de 200 ans a été retenu car il correspond à une période de retour particulièrement pertinente dans le secteur assurantiel, notamment dans le cadre du calcul du Capital de Solvabilité Requis (SCR). Ce dernier, défini par la directive Solvabilité II, impose aux assureurs de maintenir un niveau de fonds propres suffisant pour faire face à des événements rares mais potentiellement dévastateurs, comme une inondation centennale ou bicentennale. En intégrant ces périodes de retour dans l'évaluation des risques, les assureurs sont mieux préparés pour répondre aux exigences prudentielles et garantir la protection des assurés en cas de sinistre majeur.

La première étape de cette étude consiste à recueillir un historique des hauteurs d'eau journalières mesurées à la station hydrométrique située sur le cours d'eau étudié, lesquelles peuvent être considérées comme une suite de variables aléatoires indépendantes et identiquement distribuées, conformément à la théorie. Ces hauteurs d'eau sont souvent influencées par des phénomènes météorologiques locaux et spécifiques à chaque jour, rendant chaque observation relativement indépendante des précédentes, en particulier lorsque les données sont collectées à des intervalles suffisamment espacés pour minimiser les effets de dépendance, tels que les variations saisonnières ou les marées. En outre, si les données couvrent une période suffisamment longue, il peut être supposé que chaque hauteur d'eau provient d'une même distribution sous-jacente, permettant ainsi l'application de la théorie des valeurs extrême (*Société française de statistique, 2006* [42]).

2.1.2.1 Répartition des stations hydrométriques en France

Avant de récupérer les données hydrométriques d'une station, il est important de présenter le contexte global. Les stations hydrométriques jouent un rôle clé dans la surveillance des ressources en eau, mesurant en continu le niveau et le débit des cours d'eau. Elles fournissent des données essentielles pour la gestion des risques d'inondation, la prévision des crues et la gestion des sécheresses. Réparties sur tout le territoire français (**Figure 2.2**), ces stations sont principalement gérées par les services de l'État, en collaboration avec des organismes comme Vigicrues. Les données collectées sont utilisées tant pour la gestion à court terme lors d'épisodes extrêmes que pour l'élaboration de politiques à long terme. Elles alimentent également des modèles hydrologiques pour la planification des infrastructures et l'évaluation des impacts du changement climatique sur les bassins-versants.



FIGURE 2.2 : Les stations hydrométriques en France métropolitaine (*Hub Eau, 2024* [43])

2.1.2.2 Récupération des données hydrométriques

Les données de hauteurs d'eau ont été récupérées via la plateforme Hydroportail qui fournit des données sur les stations hydrométriques et pluviométriques du territoire français. La plateforme offre la possibilité d'extraire la hauteur d'eau maximale journalière, ce qui a été effectué. Concernant la profondeur de l'historique à récupérer, deux critères entrent en jeu. Tout d'abord, la plateforme établit un niveau de validation des données qui peuvent être considérées comme brutes, corrigées, pré-validées ou validées. Les données à minima pré-validées seront utilisées dans cette présente étude, car considérées comme suffisamment fiables selon les dires de la plateforme. Le deuxième critère est la prise en compte des crues historiques sur la zone d'étude. Dans le Gard par exemple, la crue de septembre 2002 a été dévastatrice et devra être prise en compte dans l'historique récupéré. Ces critères de sélection assurent d'avoir des données fiables sur lesquelles appuyer cette étude. Un historique d'une quinzaine d'années minimum sera considéré. À noter également que certaines stations hydrométriques offrent la possibilité de récupérer des données de débit, souvent convertibles en hauteur d'eau via des courbes de tarage (*Hydroportail*, 2024 [44]) qui sont disponibles sur la plateforme, et propre à chaque station.

2.1.2.3 Critères de sélection d'une loi

Les hauteurs maximales journalières étant récupérées, une vérification de la fiabilité des données est faite avant d'extraire les maximums annuels sur l'historique. La théorie des valeurs extrêmes sera appliquée sur ces maximums. La première étape est d'ajuster une loi dite GEV (*Generalized Extreme Value*) (cf. **théorème 3**) afin d'analyser le paramètre de forme qui est censé donner une indication sur le domaine d'attraction à retenir. Cependant, il est possible que la valeur de ce paramètre soit proche de zéro, auquel cas il est difficile de trancher entre les trois domaines d'attraction présentés en section **2.1.1**. Afin de choisir la loi la plus adaptée aux données, différents critères de sélection de lois seront appliqués.

Pour chacune des lois, les critères d'information d'Akaike (AIC) et Bayésien (BIC) sont analysés. Ce sont des outils statistiques utilisés pour évaluer la qualité des modèles tout en pénalisant la complexité de ces derniers. Leur objectif est de trouver un équilibre entre l'ajustement du modèle aux données et sa simplicité.

Le critère AIC se définit comme suivant.

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

où \hat{L} est la valeur maximale de la vraisemblance du modèle, et k est le nombre de paramètres dans le modèle. L'AIC cherche à minimiser l'erreur d'estimation en ajoutant une pénalité pour les modèles avec un grand nombre de paramètres, favorisant ainsi les modèles plus simples.

Le critère BIC est également défini.

$$\text{BIC} = k \ln(n) - 2\ln(\hat{L}),$$

où n est la taille de l'échantillon, \hat{L} est la vraisemblance maximale, et k est le nombre de paramètres du modèle. Le BIC, tout comme l'AIC, pénalise les modèles complexes, mais il introduit une pénalisation plus forte pour les modèles avec un grand nombre de paramètres.

En pratique, ces critères sont utilisés pour comparer plusieurs modèles : le modèle avec le plus petit AIC ou BIC est préféré.

Pour finir, le test statistique non paramétrique de Kolmogorov-Smirnov est utilisé. Ce test compare une distribution observée à une distribution théorique. Il permet de déterminer si les échantillons proviennent de la même distribution, en mesurant l'écart maximal entre leurs fonctions de répartition cumulée. Ce test est particulièrement utile en raison de sa flexibilité, car il ne suppose pas que les données suivent une distribution particulière. Ce test est défini mathématiquement de la manière suivante.

Soit $F_n(x)$ la fonction de répartition empirique de l'échantillon x_1, x_2, \dots, x_n de taille n .

$$F_n(x) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \mathbf{1}_{\{x_i \leq x\}},$$

où $\mathbf{1}_{\{A\}}$ est l'indicateur de l'événement A .

Le test de Kolmogorov-Smirnov calcule la statistique suivante.

$$D_n = \sup_x |F_n(x) - F(x)|,$$

où $F(x)$ est la fonction de répartition théorique.

Le test compare D_n à une valeur critique issue de la distribution de Kolmogorov-Smirnov. Si D_n est supérieur à cette valeur critique, l'hypothèse nulle selon laquelle l'échantillon suit la distribution $F(x)$ est rejetée.

2.1.3 Obtention des périodes de retour des hauteurs d'eau

La loi issue de la théorie des valeurs extrêmes étant élue, elle peut être utilisée afin d'obtenir les hauteurs d'eau associées aux périodes de retour 2, 5, 10, 20, 50, 100 et 200 ans. L'analyse des quantiles permet de réaliser cette étape. Dans le cas où la loi GEV apparaît comme étant la plus adaptée aux données, voici les étapes réalisées.

La fonction de répartition (CDF) de la loi GEV est connue.

$$F(x) = \exp \left(- \left[1 + \xi \left(\frac{x - \mu}{\sigma} \right) \right]^{-\frac{1}{\xi}} \right),$$

où μ est le paramètre de localisation, σ le paramètre d'échelle, et ξ le paramètre de forme (non nul ici). Pour que la fonction soit bien définie, il est nécessaire de vérifier l'hypothèse ci-dessous.

$$1 + \xi \left(\frac{x - \mu}{\sigma} \right) > 0.$$

Pour une période de retour de T années, la probabilité de dépassement est $p = \frac{1}{T}$. Le quantile x_T correspondant, qui représente la hauteur d'eau associée à une période de retour de T , est obtenu en résolvant l'équation suivante.

$$F(x_T) = 1 - p = 1 - \frac{1}{T}.$$

Il suffit alors d'inverser la fonction de répartition pour trouver le quantile x_T .

$$x_T = \mu + \frac{\sigma}{\xi} \left(\left(-\ln \left(1 - \frac{1}{T} \right) \right)^{-\xi} - 1 \right).$$

Cette formule permet de calculer les hauteurs d'eau associées à des périodes de retour spécifiques. En remplaçant T par les valeurs 2, 5, 10, 20, 50, 100 et 200 ans, les quantiles correspondant à ces périodes de retour sont obtenus, c'est-à-dire les niveaux d'eau pouvant être dépassés en moyenne une fois tous les T ans.

La démarche a été présentée avec l'utilisation de la loi GEV. Le procédé serait similaire pour toute autre loi des valeurs extrêmes, ayant sa propre fonction de répartition adaptée aux données analysées.

2.2 Développement d'un modèle d'empreinte de crue

La première partie a rendu possible la détermination des hauteurs d'eau associées à différentes périodes de retour, pour toute station hydrométrique dont les données ont été extraites via la plateforme Hydroportail. L'étape suivante consiste à développer un modèle capable d'identifier les zones potentiellement inondables en fonction de ces hauteurs d'eau. Il s'agit de concevoir une méthode qui, à partir d'une hauteur d'eau mesurée à la station hydrométrique, génère l'empreinte de la crue susceptible de se produire.

Après avoir récupéré sept hauteurs d'eau correspondant à des périodes de retour distinctes, ce modèle vise à générer sept empreintes de crue. Une fois ces empreintes établies, leurs conséquences économiques et assurantielles seront analysées dans la section suivante, conduisant au calcul de l'AAL.

2.2.1 Présentation des données utilisées

Pour construire un tel modèle, deux types de données sont essentiels : les données hydrologiques et les données altimétriques. Les données hydrologiques, qui incluent les niveaux d'eau ou les débits, permettent de comprendre le comportement de la rivière en période normale et lors d'épisodes de crue. Quant aux données altimétriques, elles sont cruciales pour représenter avec précision la topographie du terrain environnant. Elles fournissent des informations sur les variations de hauteur du sol, la pente et la structure des vallées, des éléments déterminants pour modéliser les écoulements et identifier les zones à risque d'inondation.

2.2.1.1 Données hydrologiques

La première étape consiste à récupérer les données des rivières dont les inondations liées à son débordement veulent être modélisées. Toute la méthodologie du mémoire visant à être répliquable, des données à l'échelle nationale sont récupérées (**Figure 2.3**). La base de données Carthage (CARtopographie THématique des AGences de l'eau et du ministère chargé de l'environnement) a été utilisée. C'est une base de données géographiques de référence en France, qui recense et cartographie l'ensemble des cours d'eau, plans d'eau, bassins versants et autres éléments hydrologiques du territoire. Elle est régulièrement mise à jour et est utilisée pour la gestion de l'eau, la planification environnementale et l'évaluation des risques naturels, tels que les inondations.

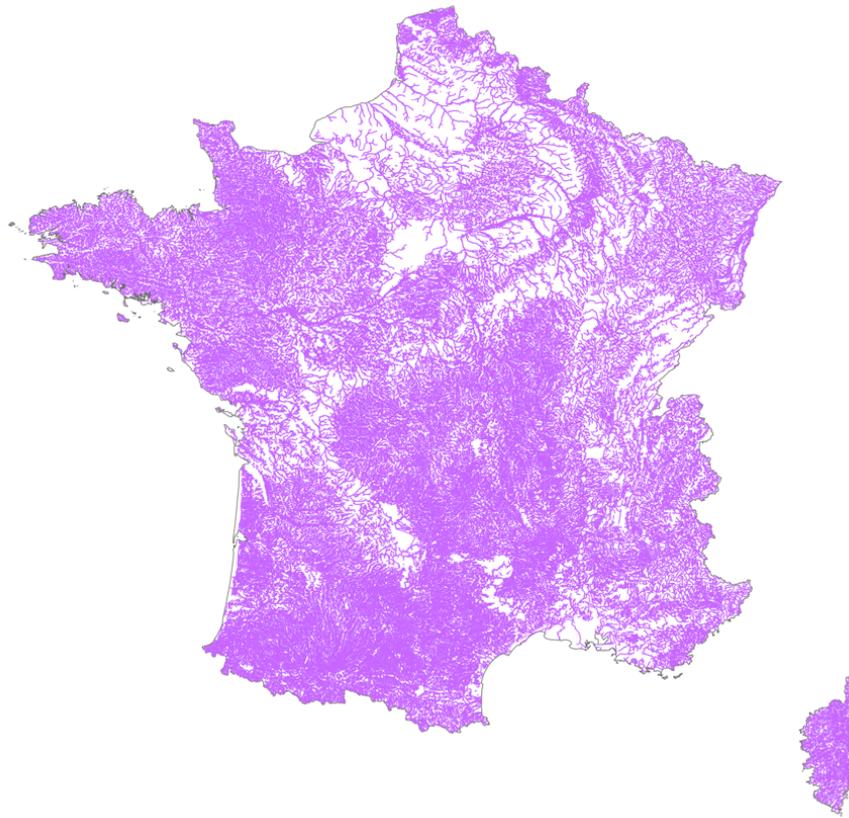


FIGURE 2.3 : Cours d'eau en France métropolitaine (*Data Gouv, BD Carthage, 2017* [45])

Cette base permet de récupérer plusieurs informations sur les cours d'eau en France métropolitaine, présentées en **Table 2.2**, comme la localisation, le nom et la longueur du cours d'eau.

Nom de la variable	Explications
Geometry	Permet de géolocaliser le cours d'eau grâce à une suite de coordonnées (longitude, latitude, altitude).
CdEntiteHy	Code du secteur hydrologique du cours d'eau.
NomEntiteH	Nom du cours d'eau
Classe	Hierarchie décroissante entre les cours d'eau, numérotés de 1 (longueur > 100km) à 6 (longueur < 5km).

TABLE 2.2 : Liste des variables récupérées dans la base Carthage

2.2.1.2 Données altimétriques

La seconde variété de données nécessaire au développement du modèle d'empreinte de crue est l'acquisition d'un modèle numérique de terrain, qui sera appelé MNT dès à présent, et qui permet d'obtenir l'altitude de n'importe quelle zone en France. Cette étape est primordiale, car le modèle qui sera mis en place estime la possibilité qu'un bâtiment soit inondé en analysant la différence entre l'altitude de ce bâtiment et l'altitude de la rivière augmentée de la hauteur d'eau mise en input. Il existe différents modèles numériques de terrain disponibles en *Open Data* qui sont tous fournis par l'Institut national de l'information géographique et forestière (IGN) (*IGN, 2024* [46]).

Ces modèles sont en partie obtenus grâce à la technologie Lidar (*Light Detection And Ranging*) qui est une méthode de télédétection utilisant des faisceaux laser pour mesurer les distances entre l'aéronef portant la technologie et la surface terrestre. Le Lidar permet d'obtenir des données d'altitude très précises en mesurant le temps de retour du signal laser après avoir frappé la surface du sol. Les MNT proposés par l'IGN se distinguent par leur précision :

- **RGE ALTI 1m** : ce MNT est le plus précis disponible gratuitement. Il découpe le territoire en pixel de 1 mètre par 1 mètre dont chacun se voit attribuer une altitude.
- **RGE ALTI 5m** : le territoire est cette fois découpé en pixel de 5 mètres par 5 mètres.
- **BD ALTI 25m** : le territoire est cette fois découpé en pixel de 25 mètres par 25 mètres.

En réalisant un compromis entre volumétrie des données et précision de la modélisation, le modèle numérique de terrain sélectionné est celui ayant une résolution de 5 mètres (**Figure 2.4**).

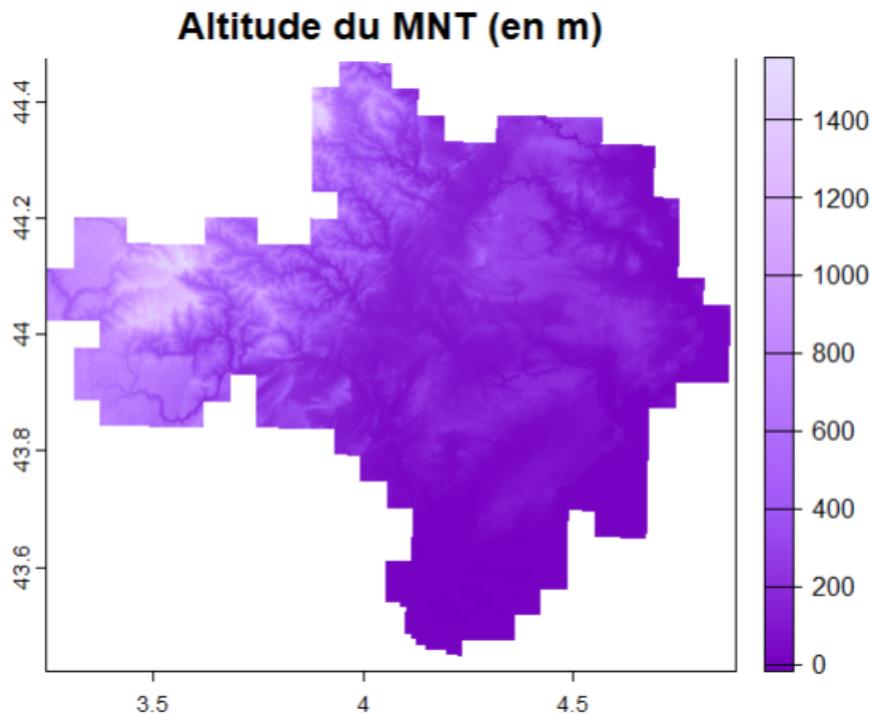


FIGURE 2.4 : MNT du Gard, département 30 (RGE ALTI 5m **46**).

2.2.2 Définition de la modélisation mise en place

Comme évoqué précédemment, le modèle se base uniquement sur la différence d'altitude entre la rivière et les bâtiments exposés à une possible inondation, d'où la récupération des données présentées. Un bâtiment sera considéré comme inondé si son altitude est inférieure à l'altitude de la rivière augmentée de la hauteur d'eau relevée à la station hydrométrique ciblée. Il faudra cependant prêter attention à définir correctement la partie « altitude de la rivière augmentée de la hauteur d'eau relevée à la station hydrométrique ciblée ». En effet, il ne suffit pas d'ajouter la hauteur d'eau définie dans la partie précédente à l'altitude de la rivière issue du MNT car chaque station hydrométrique possède son propre système de relevé hydrométrique. La **Figure 2.5** pour preuve, l'échelle de mesure ne possède pas forcément son « zéro de l'échelle » exactement à l'altitude de la station définie dans le MNT.

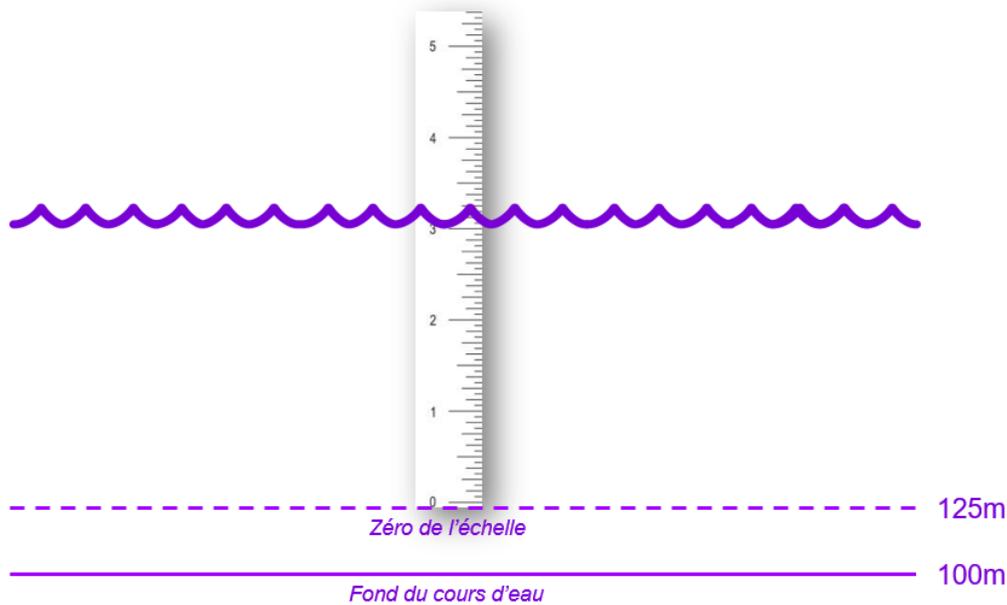


FIGURE 2.5 : Illustration du fonctionnement d'un relevé de hauteur d'eau

Sur cette illustration, en considérant que la hauteur d'eau relevée à l'échelle est de 3.2 mètres, un bâtiment est considéré comme inondé si son altitude dans le MNT est inférieure à l'altitude du zéro de l'échelle (125m ici) augmentée de la hauteur d'eau relevée, donc inférieure à 128.2m. De manière plus globale, la hauteur d'eau dans un bâtiment inondé sera définie via la formule générale (2.1).

$$HE^{(1)} \text{ habitation} = |\text{Altitude zéro de l'échelle} + HE \text{ relevée} - \text{Altitude habitation}|. \quad (2.1)$$

Reste à savoir comment les zones inondées en fonction de la hauteur relevée à la station hydrométrique sont obtenues. Pour rappel, toute la modélisation se doit d'être répliquable, le code développé doit être applicable à n'importe quel type de rivière, située n'importe où en France métropolitaine, que cela soit en plaine ou en montagne. Pour veiller à tout cela, le logiciel SAGA GIS[®] a été utilisé. Il permet de transformer le modèle numérique de terrain en fonction de la localisation de la rivière et du terrain potentiellement en relief qui l'entoure.

2.2.2.1 Utilisation du logiciel SAGA GIS[®]

SAGA GIS[®] (*System for Automated Geoscientific Analyses*) est un logiciel libre et *Open Source* spécialisé dans l'analyse géographique et dans la modélisation spatiale. Ce logiciel est particulièrement adapté à la manipulation, à l'analyse et à la visualisation de données géographiques, avec un accent sur le traitement des modèles numériques de terrain. Dans le cadre de cette étude, SAGA GIS[®] est utilisé pour transformer un MNT afin qu'il soit compatible avec la modélisation des inondations par débordement. Pour ce faire, deux modules spécifiques sont employés, chacun jouant un rôle crucial dans la préparation des données. L'objectif principal est de modifier le MNT de manière à ce que l'altitude des pixels composant la rivière soit ramenée à une valeur nulle, tandis que l'altitude des autres pixels reflète la différence d'altitude par rapport à l'endroit de la rivière le plus proche.

⁽¹⁾ HE = Hauteur d'Eau

Module *shapes to grid*

Le premier module (*SAGA GIS Documentation*, 2024 [47]) utilisé se trouve dans la sous-section *Gridding* de la section *Grid*. Ce module demande en entrée un fichier *Shapefile* de la rivière. Un fichier *Shapefile* est un format de données géospatiales largement utilisé dans les systèmes d'information géographique (SIG). Il permet de stocker et de représenter des objets géographiques sous forme vectorielle, tels que des points, des lignes et des polygones, qui sont utilisés pour modéliser des entités géographiques comme des routes, des rivières ou des limites administratives. Ce type de données est récupéré via l'extraction des informations présentes dans la base de données Carthage présentée précédemment. Le module va alors transformer le fichier *Shapefile* en une grille de pixels réguliers, aussi appelée *raster*. Cette conversion est essentielle, car elle permet d'identifier les pixels de rivière et de connaître les altitudes associées.

Module *Vertical Distance to Channel Network*

Ce module (*SAGA GIS Documentation*, 2024 [48]) disponible dans la sous-section *Channels* de la section *Terrain Analysis* prend en entrée le MNT d'origine ainsi que le *raster* de la rivière produit précédemment. Ce module réalise deux opérations principales :

- **1^{ère} étape** : commence par interpoler l'altitude du niveau de base de la rivière, c'est-à-dire qu'il crée une référence d'altitude pour le lit de la rivière.
- **2^{ème} étape** : il soustrait ensuite ce niveau de base aux altitudes du MNT original. Le résultat est un MNT modifié où l'altitude de chaque pixel de la rivière est nulle, et où chaque pixel du terrain représente la différence de hauteur par rapport au point le plus proche de la rivière.

La sortie de ce module est un MNT où l'altitude des pixels de rivière est nulle et l'altitude des pixels de terrain correspond à la distance verticale entre ce pixel de terrain et le pixel de rivière le plus proche.

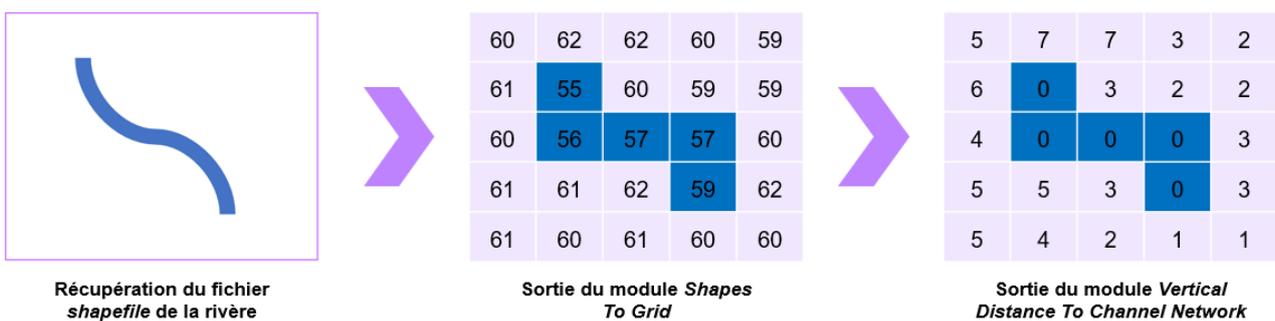


FIGURE 2.6 : Illustration de l'utilisation de SAGA GIS[®]

Les étapes décrites en **Figure 2.6** sont fondamentales dans l'étude des inondations par débordement car elles permettent de simplifier la **formule (2.1)**. En effet, l'altitude des pixels de la rivière ayant été mise à zéro, la hauteur d'eau présente dans un bâtiment sera obtenu via la formule (2.2).

$$HE_{\text{habitation}} = |HE_{\text{relevée à la station}} - \text{Altitude}_{\text{habitation}}|. \quad (2.2)$$

2.2.2.2 Retraitement des zones inondées non connexes

Malgré ces différents modules visant à obtenir une méthode cohérente et répliquable à n'importe quelle rivière, le modèle d'empreinte de crue reste malgré tout simpliste par rapport à la complexité hydrologique que peut représenter l'inondation d'une zone urbaine ou rurale. Beaucoup de paramètres devraient être pris en compte comme la qualité d'absorption du sol, la présence d'ouvrages de protection ou encore le type de sol ; là où le modèle développé s'arrête à une simple mais cohérente analyse des altitudes. Il peut alors ressortir de ce modèle des zones considérées comme inondées mais qui ne devraient pas l'être, simplement car elles sont dans une « cuve » comme le montre la **Figure 2.7**, donc à une altitude possiblement inférieure à celle de la rivière. Un dernier retraitement a donc été effectué, en supprimant les « fausses » zones inondées qui ne sont à aucun moment reliées à la rivière par un chemin d'eau.

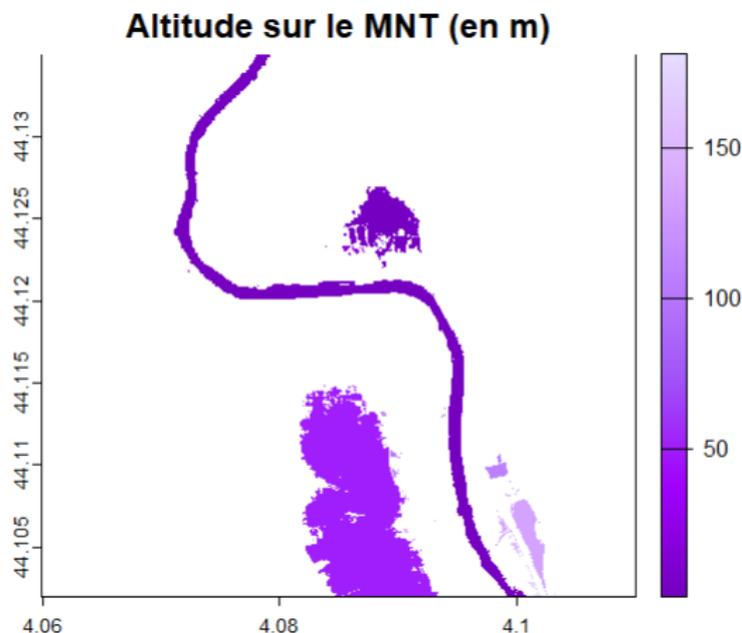


FIGURE 2.7 : Exemple de l'intérêt du retraitement sur une potentielle inondation dans la ville d'Alès

Cette carte d'empreinte de crue issue de la modélisation pour une hauteur d'eau de 3,6 mètres relevée à la station du Gardon d'Alès reste provisoire. Elle indique toutes les zones inondées par cette hauteur d'eau. La rivière, bien sûr, apparaît immergée et est facilement reconnaissable par sa « forme en S ». Cependant, certaines zones éloignées de la rivière sont également représentées comme submergées, ce qui est peu plausible. Aucune voie d'écoulement ne relie ces zones à la rivière, ce qui pourrait justifier leur immersion. Cela s'explique par le fait que ces parcelles se trouvent dans des « cuves » dont l'altitude est inférieure à celle du niveau de l'eau dans la rivière. Ces zones correspondent à des erreurs de modélisation et doivent être retirées : c'est l'étape finale du retraitement de ce modèle d'empreinte de crue.

Finalement, cette succession d'étapes, caractérisées par les modules de SAGA GIS® et le retraitement des zones non connexes, permet d'aboutir à une empreinte de crue en fonction de la hauteur d'eau relevée à la station hydrométrique et mis en input du modèle. Pour rappel, 7 hauteurs d'eau associées à 7 périodes de retour distinctes sont obtenues à l'issue de la première partie, et cette présente partie permet d'obtenir l'empreinte de crue pour chacune de ces hauteurs d'eau.

2.2.3 Validation des empreintes à l'aide des cartes du TRI

Une fois les empreintes obtenues, ces dernières doivent être validées. La visualisation des zones potentiellement inondables est un enjeu majeur pour le gouvernement et les experts hydrologiques, notamment avec le changement climatique bien présent aujourd'hui et qui a un impact sur les inondations par débordement comme il sera expliqué dans la suite de ce mémoire. De ce fait, il existe plusieurs cartes disponibles en ligne qui permettent de visualiser les zones qui pourraient être inondées à cause d'une certaine hauteur d'eau dans une rivière. Ces cartes ont été présentées dans la [section 1.2.3](#). Parmi ces dernières, deux types de cartes peuvent être utilisés pour valider le modèle d'empreinte de crue : les cartes des Territoires à Risque important d'Inondation (TRI) et les cartes des Zones Inondées par Classe de Hauteur d'eau (ZICH).

Pour une question de disponibilité des données, ce sont les cartes du TRI qui seront utilisées pour valider le modèle d'empreinte de crue. Ces cartes sont disponibles pour 124 zones différentes en Métropole et DROM. Elles ciblent des zones où le risque est le plus important en termes de population et d'infrastructures. Pour chaque zone présente dans le TRI, trois cartes sont mises à disposition selon la gravité de l'inondation représentée par trois scénarios distincts :

- **Scénario fréquent** : correspond à une hauteur d'eau ayant une période de retour comprise entre 10 et 30 ans.
- **Scénario moyen** : correspond à une hauteur d'eau ayant une période de retour comprise entre 100 et 300 ans.
- **Scénario extrême** : correspond à une hauteur d'eau ayant une période de retour d'environ 1000 ans.

Ces cartes sont particulièrement intéressantes puisqu'elles vont permettre, d'une part de valider la première partie sur le calcul des hauteurs d'eau associées à différentes périodes de retour, et d'autre part de valider le modèle d'empreinte de crue. En effet, si le scénario moyen du TRI indique une hauteur d'eau de x mètres correspondant à une période de retour entre 10 et 30 ans, il faudra alors vérifier que la première partie donne effectivement une hauteur de x mètres pour cette période de retour. De plus, il faudra également vérifier que l'empreinte obtenue pour un input de x mètres d'eau correspond à l'empreinte fournie par le TRI. Les cartes du TRI ne sont pas disponibles pour toutes les zones de France donc il a été décidé de présenter dans ce mémoire l'étude de villes dont elles existent.

Une fois les cartes du TRI récupérées, des métriques de validation seront appliquées pour évaluer la performance du modèle d'empreinte de crue. Trois métriques ont été sélectionnées : *Recall*, *Precision* et *F1-score*. Avant leur calcul, un prétraitement des cartes du TRI est nécessaire. Ces dernières, disponibles en Open Data (*Data Gouv*, 2024 [31](#)) sous format *Shapefile*, doivent être transformées en *raster*. Concrètement, cela consiste à découper les cartes en pixels de 5 mètres de résolution, afin de les harmoniser avec la sortie du modèle d'empreinte de crue, qui utilise un MNT de résolution identique. Une fois que les cartes du modèle et du TRI ont le même format, il devient possible de comparer les pixels inondés ou non, et d'établir une métrique de comparaison entre ces cartes.

Pour évaluer la performance du modèle dans l'identification des pixels réellement inondés, la métrique *Recall* est employée et doit être maximisée. Elle est calculée en prenant le ratio entre le nombre de vrais positifs (les pixels correctement identifiés comme inondés) et la somme des vrais positifs et des faux négatifs (pixels réellement inondés mais que le modèle n'a pas détectés comme tels).

$$Recall = \frac{\text{Vrais Positifs}}{\text{Vrais Positifs} + \text{Faux Négatifs}}$$

Afin de mesurer la capacité du modèle à éviter les erreurs de détection, la métrique *Precision* est calculée et doit être la plus élevée possible. Elle est définie comme le ratio entre le nombre de vrais positifs (les pixels correctement identifiés comme inondés) et la somme des vrais positifs et des faux positifs (les pixels identifiés comme inondés alors qu'ils ne le sont pas).

$$Precision = \frac{\text{Vrais positifs}}{\text{Vrais positifs} + \text{Faux positifs}}$$

Enfin, une dernière métrique combinant les deux précédentes est analysée : le *F1-score*. Il permet de donner une seule valeur qui résume la capacité du modèle à détecter les pixels inondés correctement, en équilibrant les deux types d'erreurs (faux positifs et faux négatifs). Un F1-score proche de 1 indique une bonne performance, tandis qu'un score proche de 0 suggère que le modèle a des difficultés dans l'identification des pixels inondés.

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

2.3 Création d'une base d'expositions MRH à l'aide de l'*Open Data*

Les deux premières parties ont permis d'étudier le risque d'inondation en termes de périodes de retour, et les étapes qui viennent d'être évoquées permettent d'obtenir des empreintes de crue fiables en fonction de la hauteur relevée à une station hydrométrique en France. Sachant cela, l'objectif à présent est d'analyser les pertes assurantielles liées à chaque empreinte de crue.

En l'absence de portefeuille d'assurance pour ce mémoire, il a fallu composer avec des données libres d'accès afin de créer une base d'expositions (d'habitations) présentes dans la zone à risque.

2.3.1 Présentation des données récupérées

La première étape du développement de cette base d'expositions est de récupérer diverses informations sur les habitations présentes dans la zone d'étude. Encore une fois, l'objectif de cette étape est de développer une méthode applicable à n'importe quelle zone géographique en France, en gardant évidemment en tête qu'en présence d'un portefeuille d'assurance, cette étape consisterait uniquement à récupérer les informations de la base expositions du portefeuille. Un tel portefeuille permettrait d'obtenir plusieurs caractéristiques des expositions : localisation, superficie, nombre de pièces, année de construction, sommes assurées, franchises, etc.

L'objectif de cette partie est donc de trouver des bases de données *Open Source* qui permettent d'obtenir ce type d'informations, et de construire *in fine* une base d'expositions, pour n'importe quelle zone en France. Pour cela, deux bases de données sont utilisées : la base des DPE (Diagnostic de Performance Énergétique) (*Data Govv*, 2024 [49]) et la base DVF+ (Demande de Valeurs Foncières) (*CEREMA*, 2024 [50]). Ces deux bases disponibles librement vont respectivement permettre de connaître la superficie et d'estimer le prix de chaque bien.

2.3.2 Acquisition des expositions (base DPE)

Le Diagnostic de Performance Énergétique (DPE), introduit en France en 2006, est un document obligatoire qui évalue la performance énergétique d'un bâtiment ou d'un logement. Il doit être réalisé lors de la mise en vente ou en location d'un bien immobilier, ainsi que dans le cadre de certains travaux de rénovation.

Le DPE a été réformé le 1^{er} juillet 2021. Cette réforme a rendu le DPE juridiquement opposable, c'est-à-dire que les informations qu'il contient peuvent être utilisées en cas de litige entre un acheteur ou locataire et un propriétaire, notamment en ce qui concerne la performance énergétique réelle du bien. De plus, le calcul du DPE a été uniformisé et amélioré pour être plus fiable et précis, intégrant désormais des critères comme l'isolation, le système de chauffage, la ventilation, et les caractéristiques des matériaux. Concernant la durée de validité des DPE, elle est de 10 ans pour les DPE réalisés après le 1^{er} juillet 2021, ceux réalisés avant le 1^{er} juillet 2021 sont valables jusqu'au 31 décembre 2024, et enfin ceux réalisés avant le 31 décembre 2017 sont valables jusqu'au 31 décembre 2022.

En 2020, l'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie (ADEME) a mis à disposition les données des DPE sur différents portails en ligne. Trois bases différentes existent aujourd'hui : une contenant les DPE réalisés avant juillet 2021, une contenant les DPE faits sur les logements neufs depuis juillet 2021, et une dernière contenant les DPE qui ont dû être refaits sur les logements existants. Après fusion de ces trois bases, la base fusionnée sera explorée en analysant notamment les différentes variables pour savoir celles qui peuvent être utiles. Parmi toutes les variables disponibles, seules quelques-unes sont retenues :

- La localisation du bien caractérisée par une paire de coordonnées (longitude, latitude).
- Le type de bien (maison, appartement, immeuble, commerce, etc.).
- La superficie du bien (en m²).
- Le nombre d'appartements si le bien est un immeuble.

La base de données globale étant à présent filtrée, elle doit être retraitée afin de construire la base d'expositions.

2.3.2.1 Retraitement des appartements

Pour les biens identifiés comme des « appartements » dans la base des DPE, l'information relative au numéro de l'étage est souvent manquante. Par conséquent, il a été décidé que, pour plusieurs appartements partageant les mêmes coordonnées géographiques (car situés dans le même immeuble), un seul serait conservé et supposé être au rez-de-chaussée. Cette hypothèse stipule que seuls les appartements situés au rez-de-chaussée peuvent être inondés. Bien qu'il s'agisse d'une hypothèse forte, elle permet de pallier l'absence de données sur l'étage.

2.3.2.2 Retraitement des immeubles

Pour les biens classés comme « immeubles » dans la base, l'information concernant la superficie de chaque appartement individuel n'est pas disponible. En revanche, le nombre d'appartements et la superficie totale de l'immeuble sont connus. Il a donc été décidé de conserver la localisation de l'immeuble, mais de le représenter sous la forme d'un unique appartement situé au rez-de-chaussée, avec une superficie égale à la superficie totale de l'immeuble divisée par le nombre d'appartements qu'il contient.

2.3.2.3 Retraitement des maisons

Concernant les biens considérés comme « maison », peu de retraitements ont été nécessaires. En effet, seules les maisons dont la superficie ou la localisation n'était pas connue ont été supprimées. À noter que pour les maisons, au même titre que pour les appartements et les immeubles, plusieurs lignes dans la base peuvent être liées au même bien, simplement parce que plusieurs DPE ont été réalisés depuis 2013. Pour veiller à l'unicité de chaque bien, il a été décidé de conserver uniquement la ligne concernant le DPE le plus récent, car des agrandissements faisant varier la superficie ont pu être réalisés ces dernières années.

Il convient de souligner que dans le cadre d'un portefeuille d'assurance, de tels retraitements seraient inutiles, car les informations sur les expositions seraient bien plus détaillées que celles obtenues via l'*Open Data*. En ce qui concerne l'hypothèse formulée sur les appartements, qui suppose que seuls ceux du rez-de-chaussée peuvent être inondés, un portefeuille fournirait les informations relatives à l'étage, permettant ainsi d'écarter cette hypothèse.

2.3.3 Estimation des valeurs foncières (base DVF+)

Les Demandes de Valeur Foncière (DVF) sont des documents administratifs en France qui permettent de consulter les informations sur les transactions immobilières réalisées au cours des cinq dernières années. Introduites en avril 2019 dans le cadre de l'ouverture des données publiques, les DVF sont gérées par la Direction Générale des Finances Publiques (DGFIP).

Elles donnent accès à des données détaillées sur les ventes de biens immobiliers, incluant le prix, la nature du bien, sa localisation et la date de la transaction. Les demandes de valeurs foncières sont faites dans le cadre d'estimations immobilières, de vente, ou de travaux d'urbanisme, et permettent d'obtenir des références précises pour orienter les décisions en matière immobilière.

Depuis mai 2019, la Direction générale de l'Aménagement, du Logement et de la Nature (DGALN) et le Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement (CEREMA) mettent à disposition les données des DVF à travers une base libre d'accès nommée DVF+. Les informations récupérables sont similaires à celles des DPE, à savoir la localisation, le type de bien, la superficie, mais également la valeur foncière du bien.

Les retraitements réalisés sur cette base sont sensiblement les mêmes que ceux réalisés sur la base des DPE, à une exception près. En effet, toutes les valeurs foncières répertoriées dans la base DVF+ ont été transformées en « *AS-IF 2024* », c'est-à-dire qu'elles ont été réévaluées pour refléter le marché de l'immobilier français en 2024. Cette réévaluation est indexée sur l'indice des coûts de construction de la Fédération Française du Bâtiment (ICC FFB) (*Fédération Française du Bâtiment, 2024* [51]).

Cet indicateur économique clé est utilisé pour mesurer l'évolution des coûts dans le secteur de la construction en France. Il prend en compte divers facteurs tels que les coûts des matériaux, de la main-d'œuvre, des équipements et des services associés à la construction. C'est un indice trimestriel, de base 1 au 1^{er} janvier 1941, date de son lancement.

Cet indice est un indicateur crucial pour le secteur de l'assurance habitation. Il permet de réviser annuellement les primes d'assurance en fonction de l'évolution des coûts de réparation des sinistres. Cet ajustement se fait à chaque date d'anniversaire du contrat, recalculant ainsi la cotisation annuelle de l'assuré. L'application de l'indice affecte principalement le montant des primes d'assurance, mais son influence s'étend également aux franchises et aux plafonds d'indemnisation, selon les spécificités du contrat.

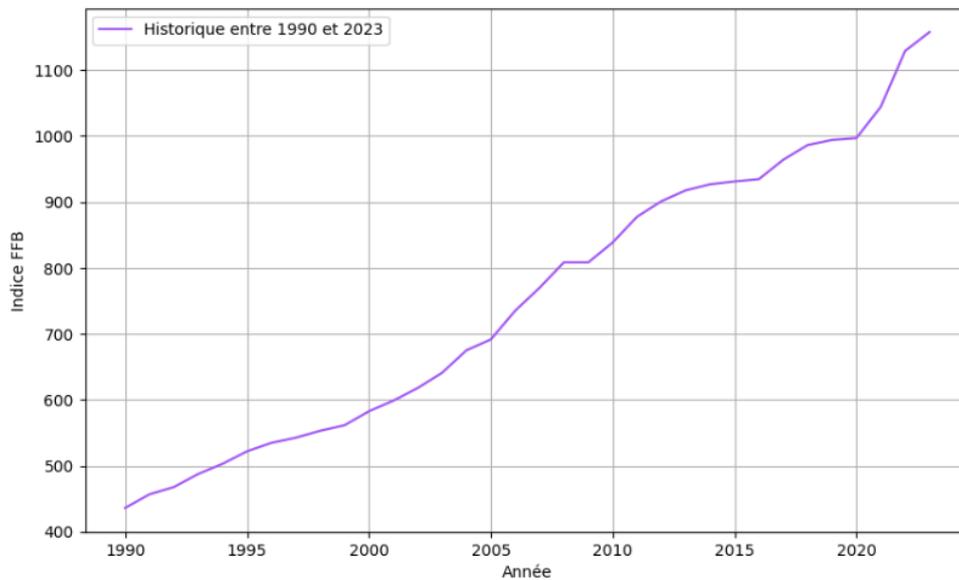


FIGURE 2.8 : Évolution du ICC FFB depuis 1990 (*Fédération Française du Bâtiment, 2024 [51]*)

La trajectoire illustrée en **Figure 2.8** peut alors être utilisée pour ajuster la valeur foncière de chaque bien en 2024. Par exemple, soit P_{2017} la valeur foncière d'un bien entré dans la base DVF+ en 2017 (car vendu ou loué cette année là). Cette valeur est modifiée en P_{2024} afin de tenir compte de la possible augmentation du prix de ce bien.

$$P_{2024} = P_{2017} \times \frac{ICC_{2024}}{ICC_{2017}}. \quad (2.3)$$

Par ailleurs, la base DVF+ s'avère moins fournie que la base DPE car elle est plus récente, ce qui signifie qu'il y a plus d'expositions dans la base DPE que dans la base DVF+. Pour ne pas perdre d'informations, il a été décidé d'utiliser la base DVF+ afin de calculer le prix au m² par type de bien et par commune dans la zone d'étude. Cela permettra ensuite de récupérer tous les biens de la base DPE et d'estimer leur prix via la formule suivante.

$$\text{Prix estimé du bien} = \text{Superficie} \times \text{Prix au m}^2. \quad (2.4)$$

À la fin de ces étapes, une base d'expositions est construite, comportant la localisation du bien, son type (appartement ou maison), sa superficie et son prix comme le montre la **Figure 2.9**.

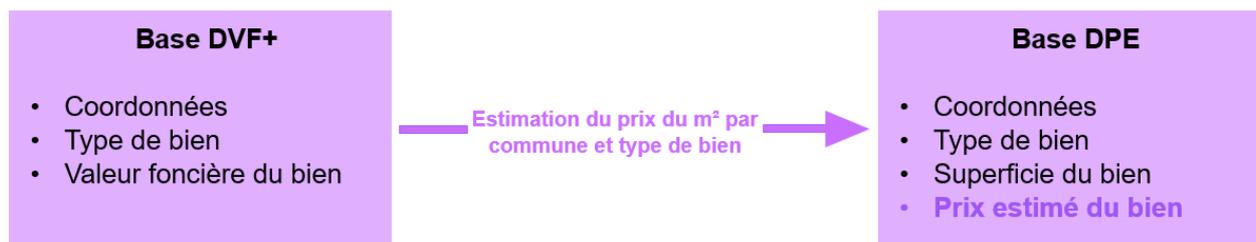


FIGURE 2.9 : Synthèse de l'utilisation des bases DPE et DVF+

La prochaine étape consistera à estimer les sommes assurées et obtenir une courbe de vulnérabilité permettant de connaître le taux de destruction du bien en fonction de la hauteur d'eau présente dans ce bien.

2.3.4 Calcul des sommes assurées

Concernant les sommes assurées au titre des contrats MRH, les sommes assurées du contenu et du bâti sont distinguées.

- **La somme assurée du bâti** représente la valeur estimée de reconstruction ou de réparation du bâtiment en cas de sinistre, une inondation dans notre cas. Elle couvre les dommages matériels subis par les structures physiques de l'habitation, y compris les murs, toitures, fenêtres, et autres éléments fixes. En pratique, cette somme dépend de plusieurs facteurs : superficie, année de construction, type de construction, matériaux utilisés, présence d'ouvrage de protection, etc.
- **La somme assurée du contenu** correspond à la valeur des biens mobiliers et des objets personnels présents dans l'habitation. Elle couvre les dommages ou la perte des meubles, appareils électroniques, vêtements, objets de valeur, et autres effets personnels en cas de sinistre. Cette somme est estimée en fonction de la valeur de remplacement des biens à neuf ou d'occasion, permettant ainsi au propriétaire ou au locataire de racheter des biens équivalents en cas de perte ou de détérioration.

Pour estimer la somme assurée du bâti, l'hypothèse suivante a été prise.

$$\text{Somme assurée bâti} = \text{Prix estimé du bien via DPE-DVF+}. \quad (2.5)$$

Concernant l'estimation des sommes assurées du contenu, deux bases de données ont été utilisées.

- Une base détenue en interne et confidentielle. Cette base s'apparente à un portefeuille fictif d'expositions réparties en France censées représenter la réalité du marché. Plusieurs milliers d'expositions composent cette base, fournissant des informations sur la somme assurée du contenu, la somme assuré du bâti, le type d'exposition et la commune dans laquelle l'habitation se situe.
- La base carroyée de l'INSEE nommée « Revenus, pauvreté et niveau de vie - carreaux de 200 m² ».

Les données contenues dans la base interne ne concernent pas toutes les communes en France, qui sont au nombre de 34 805 en métropole. Cette base pourrait s'avérer insuffisante pour l'estimation de la somme assurée du contenu, obligeant ainsi à l'enrichir via une autre base disponible en *Open Data* : la base carroyée de l'INSEE nommée « Revenus, pauvreté et niveau de vie » (INSEE, 2019 [52]).

Le carroyage est une technique de quadrillage consistant à découper le territoire en carreaux pour y diffuser de l'information statistique à un niveau faiblement agrégé. Via cette base, l'INSEE fournit des informations socio-économiques sur près de 30 millions de ménages. Ces données sont récupérables pour un découpage en carreaux d'1km ou de 200m. Pour des raisons de volumétrie de données et de temps de calcul, la base en carreaux de 1km est conservée. Seulement quelques variables, répertoriées en **Table 2.3**, sont intéressantes pour cette étude.

Nom de la variable	Explications
lcog_geo	Code officiel géographique au 1er janvier 2020 de la ou des commune(s) dans laquelle (lesquelles) se trouve le carreau
ind	Nombre d'individus dans le carreau
men	Nombre de ménages (habitation) dans le carreau
ind_snv	Somme des niveaux de vie winsorisés ⁽¹⁾ des individus du carreau
men_surf	Somme de la surface des logements du carreau
men_mais	Nombre de ménages en maison

TABLE 2.3 : Liste des variables récupérées dans la base carroyée de l'INSEE

1^{er} cas : la commune ciblée est dans la base interne

Dans ce premier cas, l'étude s'intéresse au risque d'inondation d'une ou plusieurs communes présentes dans la base interne. L'estimation de la somme assurée du contenu est alors immédiate.

En effet, il suffit de récupérer les lignes concernant ces communes, et de calculer pour chaque exposition le poids de la somme assurée du contenu par rapport à celle du bâti.

$$\text{Ratio des sommes assurées} = \frac{\text{Somme assurée du contenu}}{\text{Somme assurée du bâti}}. \quad (2.6)$$

Ce ratio est calculé sur chaque exposition de la commune et permet d'établir le ratio moyen par type d'habitation dans la commune, pondéré par la distance de la somme assurée du contenu de l'exposition à la somme assurée du contenu moyenne.

* (1) « *winsoriser* » fait référence à une technique statistique utilisée pour limiter l'influence des valeurs extrêmes (ou outliers) dans un ensemble de données. *Winsoriser* une distribution permet de remplacer les valeurs extrêmes au-delà de certains percentiles (par exemple, les 1 % des plus petites et des plus grandes valeurs) par des valeurs plus proches des limites acceptables, généralement celles des percentiles spécifiés

$$\left(\frac{\text{Somme assurée Contenu}}{\text{Somme assurée Bâti}} \right)_i \text{ pour un type de bien } i = \frac{\sum_{k=1}^{n_i} w_k \cdot \frac{\text{Somme assurée Contenu}_k}{\text{Somme assurée Bâti}_k}}{\sum_{k=1}^{n_i} w_k}, \quad (2.7)$$

$$\text{où } w_k = \frac{1}{|\text{Somme assurée Contenu}_k - \text{Somme assurée Contenu}_i| + \epsilon}.$$

2^{ème} cas : la commune ciblée n'est pas dans la base interne

C'est dans ce cas précis que la base carroyée de l'INSEE se montre utile. En effet, après avoir agrégé la base par commune en sommant le niveau de vie et le nombre d'individus des carreaux des communes, le niveau de vie moyen par habitant de la commune est calculé.

$$\text{Niveau de vie moyen par habitant de la commune} = \frac{\text{Niveau de vie de la commune}}{\text{Nombre d'habitants de la commune}}. \quad (2.8)$$

Il suffit ensuite de trouver la commune qui a le niveau de vie moyen par habitant le plus proche de la commune ciblée dans l'étude, en veillant à ce qu'il y ait une ligne pour chaque type d'habitation dans cette commune. Cela étant fait, le calcul du 1^{er} cas est réalisé à nouveau afin d'obtenir le ratio des sommes assurées pour un appartement et pour une maison.

À cette étape, peu importe le cas de figure, le ratio de sommes assurées par type de bien est connu. Connaissant la somme assurée du bâti qui a été estimée dans la section précédente, l'estimation de la somme assurée du contenu est réalisée via la formule suivante, déclinable par type de bien.

$$\text{Somme assurée du contenu} = \text{Ratio des sommes assurées} \times \text{Somme assurée du bâti}. \quad (2.9)$$

2.3.5 Quantification de la vulnérabilité des habitations

À cette étape de la modélisation, une empreinte de crue d'une certaine hauteur dont la période de retour est connue peut être obtenue, et les caractéristiques des biens présents dans l'empreinte sont à présent connus. Il ne reste alors plus qu'à calculer les pertes assurantielles associées à chaque empreinte.

Pour cela, il faut convertir la hauteur d'eau présente dans le bâtiment (obtenue via l'**équation 2.2**) en une perte pour chaque habitation, caractérisée par un taux de destruction de cette dernière. En possession d'un portefeuille d'assurance, cette étape consisterait à analyser l'historique des sinistres avec les montants indemnisés afin d'obtenir la courbe de vulnérabilité, faisant le lien entre hauteur d'eau et pertes. Il serait alors possible d'obtenir un taux de destruction moyen par type de bien, selon une hauteur d'eau donnée via la formule 2.10 suivante.

$$\text{Taux de destruction} = \frac{\text{Coût du sinistre}}{\text{Sommes assurées de l'habitation}}. \quad (2.10)$$

Ce taux de destruction est dépendant du coût du sinistre qui lui-même est dépendant de plusieurs facteurs : hauteur d'eau dans le bâtiment, caractéristiques de l'habitation (année de construction, type de matériaux...), temps d'immersion, vitesse du courant ou encore qualité de l'eau (présence de polluants, de particules argileuses...). Ces trois facteurs sont les principaux facteurs d'influence du coût de sinistre.

Concernant la hauteur d'eau, les dégâts causés par cette dernière ne sont pas linéaires mais évoluent souvent par paliers. Le premier concerne le niveau des plinthes où le revêtement au sol sera impacté. Le second niveau se situe au niveau du bas de la fenêtre, environ à un mètre de hauteur, impactant composants électriques et composants muraux. Le niveau du plafond est également un palier significatif puisqu'à cette hauteur, l'entièreté de la pièce serait détruite, y compris toutes les lumières au plafond. Les paliers suivants concernent les possibles étages présents dans l'habitation. Les études s'intéressant aux courbes de vulnérabilité, comme celle qui sera évoquée juste après, estiment qu'un bâtiment est totalement détruit à partir de 5 ou 6 mètres de hauteur d'eau dans l'habitat.

Pour les autres facteurs cités précédemment, ils sont très dépendants du sinistre subi par l'habitation. De ce fait, les différentes courbes de vulnérabilité disponibles en *Open Data* fournissent des taux de destruction uniquement en fonction de la hauteur d'eau. C'est notamment le cas de l'étude de l'*European Commission JRC (Joint Research Center)* datant d'avril 2017 nommé *Global flood depth-damage functions database (European Commission, 2017 [53])*. L'étude propose différentes courbes de vulnérabilité pour plusieurs régions du monde. De cette base de données a été récupéré un ensemble discret de points, présentés en **Table 2.4**, donnant la relation entre la hauteur d'eau et le taux de destruction causé par cette hauteur d'eau, pour une habitation située en Europe.

Hauteur d'eau dans le bâti (en m)	Taux de destruction (en %)
0	0
0.5	25
1	40
1.5	50
2	60
3	75
4	85
5	95
6	100

TABLE 2.4 : Estimation du taux de destruction selon la hauteur d'eau (*JRC, 2017 [53]*)

Pour obtenir une courbe de vulnérabilité en fonction de ces différents points, une interpolation linéaire a été réalisée. Milliman, dans son étude du risque d'inondation, présentée dans l'article *Flood risk modelling in Europe (Milliman, 2024 [54])* publiée en 2024, a également utilisé la courbe du JRC et l'interpolation réalisée était linéaire, ce qui conforte ce choix. Finalement, la courbe de vulnérabilité en **Figure 2.10** est obtenue.

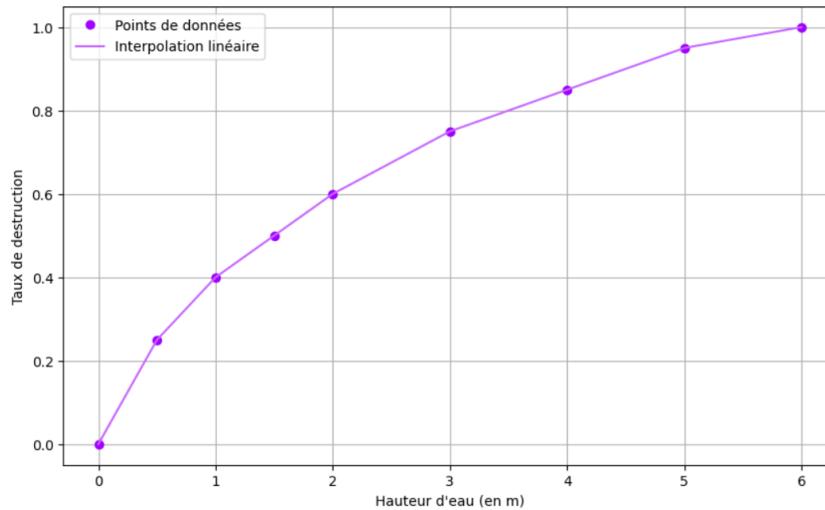


FIGURE 2.10 : Courbe de vulnérabilité issue du JRC

Cette courbe illustre parfaitement le phénomène de paliers évoqués précédemment. Une forte augmentation du taux de destruction entre quelques centimètres et 3 mètres de hauteur d'eau, représentation les premiers paliers jusqu'au plafond. Le taux évolue ensuite légèrement plus lentement, avec la destruction des étages jusqu'au toit. L'étude stipule notamment que 6 mètres d'eau dans un bâtiment le détruit entièrement. Cela semble cohérent car cette hauteur d'eau inonderait les deux premiers étages ainsi que la toiture et les combles, pour une maison notamment. La plupart des maisons ayant un seul étage en plus du rez-de-chaussée, il est alors cohérent qu'une hauteur de 6 mètres détruise totalement le bien. Il semble enfin de préciser que les caves, bien qu'elles peuvent être inondées, sont écartées dans cette étude par manque de données.

2.4 Quantification du risque actuel et prospectif

2.4.1 Définition de l'AAL et calcul de cette métrique en 2024

La succession des étapes évoquées précédemment a permis, à partir d'un historique de hauteurs d'eau à une quelconque station hydrométrique, de connaître les pertes associées à des crues de période de retour de 2, 5, 10, 20, 50, 100 et 200 ans. L'objectif à présent est de définir une métrique permettant de caractériser le risque d'inondation dans la zone ciblée. Cette métrique, comme évoquée en début de ce second chapitre, est l'*Average Annual Loss* (AAL). C'est une mesure actuarielle utilisée pour estimer la perte financière moyenne attendue par an due à un risque spécifique, tel qu'une catastrophe naturelle. Elle est calculé en intégrant les probabilités de survenance d'événements de différentes intensités et les pertes associées à chaque niveau de gravité.

Les différentes étapes décrites dans ce mémoire mènent au calcul de l'AAL⁽¹⁾. En particulier, l'analyse des périodes de retour dans la première partie permet d'estimer la probabilité qu'une crue d'une certaine intensité survienne au cours de l'année suivante. Par exemple, une crue de période de retour 2 ans (respectivement 10 ans) aura statistiquement 50 % de chance d'arriver dans l'année à venir (respectivement 10 %). La formule générale suivante permet de connaître la probabilité d'occurrence de chaque crue.

⁽¹⁾ A noter que l'AAL utilisé ici ne correspond pas strictement à sa définition mathématique, qui repose sur une moyenne des pertes sur l'ensemble de la distribution statistique, mais à une moyenne calculée sur 7 points.

$$\text{Probabilité de survenance} = \frac{1}{\text{Période de retour}}. \quad (2.11)$$

Les parties précédentes de ce présent chapitre ont facilité l'association d'une perte assurantielle à chaque crue, notamment par le calcul des sommes assurées des expositions. Connaissant la probabilité d'une crue et son coût hypothétique, il est possible d'obtenir l'AAL via la formule suivante.

$$\text{AAL} = \sum_{i=1}^7 \text{probabilité inondation}_i \times \text{pertes assurantielles}_i.$$

où i représente une période de retour pouvant être de 2, 5, 10, 20, 50, 100 ou 200 ans.

Avec la définition et l'importance de cette métrique établies, il est désormais possible de rassembler toutes les étapes de la modélisation pour parvenir au calcul de l'AAL 2024. Toutefois, l'objectif de ce mémoire est d'analyser l'impact du changement climatique sur les inondations par débordement. Ainsi, une comparaison entre l'AAL actuel et un AAL projeté à l'horizon 2050 sera effectuée.

2.4.2 Vision prospective : les scénarios climatiques du GIEC

2.4.2.1 Mise en place des scénarios

Maintenant que la méthode de calcul de l'AAL est définie, l'objectif est de comparer le risque actuel, représenté par l'AAL 2024, avec un risque futur afin d'évaluer l'impact potentiel du changement climatique sur ce risque. Il est donc nécessaire de définir et de justifier l'horizon de projection, ainsi que les hypothèses climatiques considérées.

Lorsque la question du climat futur est abordée, il est fréquent de se référer aux travaux réalisés par le Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat (GIEC). Fondée en 1988 par l'Organisation Météorologique Mondiale (OMM) et le Programme des Nations Unies pour l'Environnement (PNUE), cette organisation internationale a pour mission d'évaluer de manière exhaustive et transparente les données scientifiques, techniques et socio-économiques relatives au changement climatique. Elle se penche également sur ses impacts ainsi que sur les options d'atténuation et d'adaptation.

Les activités du GIEC se concentrent principalement sur la publication de rapports d'évaluation périodiques, généralement tous les 6 ou 7 ans, qui synthétisent l'état des connaissances actuelles sur le climat. Ces papiers, élaborés par des milliers de scientifiques à l'échelle mondiale, sont considérés comme des références dans le domaine. Ces rapports, dont le 6^{ème} et dernier date de 2023, présentent différents scénarios climatiques. Ce sont des trajectoires hypothétiques utilisées pour modéliser les futurs niveaux de gaz à effet de serre (GES) et leurs impacts sur le climat mondial. Ces scénarios sont élaborés en fonction de différentes hypothèses sur les politiques économiques, technologiques, énergétiques et environnementales. Ils permettent de simuler l'évolution des concentrations de GES dans l'atmosphère et d'en déduire les conséquences possibles sur la température globale, les régimes climatiques et les événements extrêmes.

Le dernier rapport présente une évolution majeure par rapport aux autres, puisque de nouveaux scénarios climatiques, les *Shared Socioeconomic Pathways* (SSP), sont définis. Ils précisent entre autres les anciens scénarios connus sous le nom de *Representative Concentration Pathways* (RCP).

Ces deux types de scénarios sont intimement liés et cela se perçoit avec la nomenclature des scénarios SSP expliquée en **Figure 2.11**.

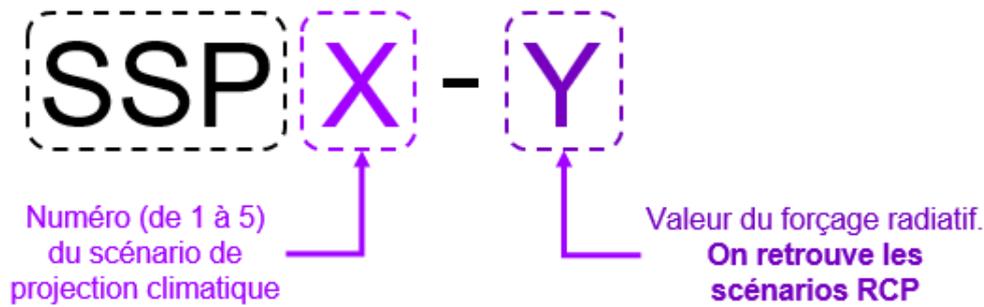


FIGURE 2.11 : Lien entre les scénarios RCP et SSP (*Carbone4, 2024* [55])

2.4.2.2 Scénarios RCP

Ces trajectoires prospectives sont basées sur le niveau de forçage radiatif prévu à l'horizon 2100. Elles couvrent une gamme de forçages radiatifs (2.6, 4.5, 6.0 et 8.0 W/m²) et représentent différentes tendances possibles de concentration des gaz à effet de serre jusqu'en 2100. Un scénario d'atténuation (RCP 2.6) est défini, deux trajectoires de stabilisation moyenne (RCP 4.5 et RCP 6.0), ainsi qu'un scénario d'émissions très élevées (RCP 8.5).

- **RCP 2.6** : le plus ambitieux, ce scénario représente une trajectoire où des mesures fortes et immédiates sont mises en place pour réduire les émissions de gaz à effet de serre, limitant le forçage radiatif à environ 2,6 W/m² d'ici 2100. Il vise à maintenir le réchauffement climatique bien en dessous de 2°C par rapport aux niveaux préindustriels, en misant sur un mélange d'énergies renouvelables, d'efficacité énergétique et de technologies de capture et de stockage du carbone (CSC).
- **RCP 4.5** : un modèle intermédiaire qui envisage des efforts modérés pour réduire les émissions de GES. Dans cette projection, le forçage radiatif est stabilisé à environ 4,5 W/m² d'ici 2100, correspondant à un réchauffement global modéré. Il repose sur des politiques climatiques qui limitent les émissions, sans atteindre les réductions drastiques du scénario RCP 2.6. Le RCP 4.5 suppose un mix énergétique diversifié, incluant une part croissante d'énergies renouvelables et une réduction progressive de la dépendance aux combustibles fossiles.
- **RCP 6.0** : un autre modèle intermédiaire qui projette une stabilisation du forçage radiatif à environ 6,0 W/m² d'ici 2100. Il repose sur une croissance économique continue et une transition énergétique modérée, où l'utilisation des combustibles fossiles diminue lentement et les énergies renouvelables ainsi que l'efficacité énergétique se développent à un rythme modéré. Ce scénario reflète un monde où les politiques climatiques sont mises en œuvre, mais où les réductions d'émissions sont moins agressives, entraînant un réchauffement climatique plus important que dans les scénarios RCP 2.6 ou RCP 4.5.
- **RCP 8.5** : le scénario le plus pessimiste, représentant une trajectoire où les émissions de gaz à effet de serre continuent d'augmenter sans restrictions significatives. Il projette un forçage radiatif de 8,5 W/m² d'ici 2100, entraînant un réchauffement climatique important. Le RCP 8.5 reflète un monde où la dépendance aux combustibles fossiles reste forte, où la croissance économique est priorisée sur les préoccupations environnementales, et où les efforts pour limiter les émissions sont faibles ou inexistantes.

2.4.2.3 Scénarios SSP

Dans son dernier rapport, le GIEC définit de nouveaux scénarios climatiques, les scénarios SSP. Tout comme les RCP, les SSP convertissent les émissions de gaz à effet de serre en concentrations atmosphériques de gaz à effet de serre, et donc en réchauffement futur et paramètres climatiques associés. L'obtention des différents scénarios est détaillée en **Figure 2.12**.

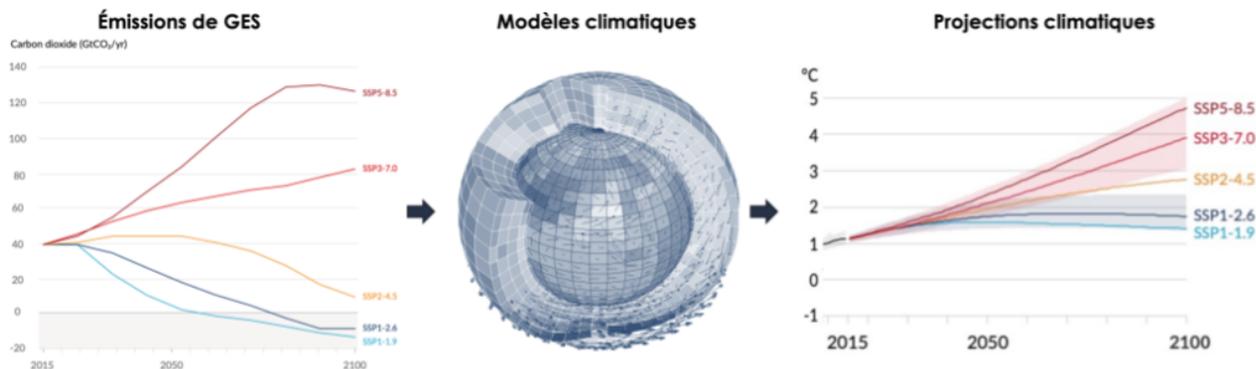


FIGURE 2.12 : Illustration des étapes de création des projections climatiques (*Carbone4, 2024* [55])

Cependant, les scénarios SSP sont davantage représentatifs de la réalité que les scénarios RCP. En effet, ils prennent en compte les forces socio-économiques qui influencent les émissions de gaz à effet de serre, offrant ainsi une vision plus complète et nuancée des futurs possibles en intégrant des dimensions critiques du développement humain qui étaient absentes des scénarios RCP. Comme l'illustre le schéma ci-dessus, 5 scénarios SSP ont été définis.

- **Les scénarios SSP1 et SSP5** offrent des perspectives globalement positives pour le progrès humain, en prenant en compte les défis d'adaptation. Le SSP1 envisage une transition vers des pratiques plus durables, en mettant l'accent sur le bien-être humain plutôt que sur la croissance économique. Quant au SSP5, il parvient à traiter efficacement les problématiques environnementales, mais reste fortement tributaire des énergies fossiles pour soutenir le développement économique.
- **Les scénarios SSP3 et SSP4** présentent des perspectives plus préoccupantes, caractérisées par des niveaux réduits d'investissements dans l'éducation et la santé, une forte croissance démographique et une accentuation des inégalités. Le SSP3 met l'accent sur la sécurité régionale, souvent au détriment de la coopération internationale, tandis que le SSP4 est marqué par des disparités économiques importantes tant à l'intérieur qu'entre les pays. Ces conditions rendent les sociétés décrites dans ces scénarios particulièrement susceptibles aux impacts du changement climatique.
- **Le scénario SSP2** envisage une trajectoire intermédiaire dans laquelle les tendances globales se poursuivent, avec notamment des systèmes environnementaux qui sont confrontés à une dégradation.

2.4.3 Choix de l'horizon de projection et du scénario climatique

2.4.3.1 Une vision long terme : l'horizon 2050

Concernant la période prospective à analyser, les recommandations du dernier exercice climatique de l'ACPR (ACPR, 2023 [3]) ont été considérées. Il est notamment mentionné dans le rapport de ce dernier exercice que l'étude « porte sur un horizon de long terme avec une fin de période au 31 décembre 2050, cohérent avec l'horizon de matérialisation du risque de transition et de renforcement tendanciel des risques physiques, selon une cible d'un réchauffement maintenu en dessous de 2°C ».

L'ACPR, responsable de la surveillance de l'activité des assurances en France, constitue une référence d'autorité. L'horizon de projection est donc fixé à 2050, ce qui est pertinent pour cette étude, car il permet d'analyser l'impact potentiel du changement climatique sur une période suffisamment lointaine, tout en restant assez proche pour susciter l'intérêt des assureurs.

Ce choix d'horizon est également justifié par la disponibilité des données climatiques. Pour le calcul de l'AAL en 2050, il a été nécessaire de récupérer un jeu de données climatiques afin d'estimer les hauteurs d'eau attendues à cette date. Le jeu sélectionné propose trois périodes prospectives : 2011-2040, 2041-2070 et 2071-2100. L'année 2050, située au cœur de la période 2041-2070, s'avère ainsi particulièrement pertinente.

2.4.3.2 Scénario climatique retenu

Le jeu de données climatiques propose 3 scénarios différents : le RCP 2.6, RCP 4.5 et RCP 8.5. Bien qu'il aurait été très intéressant d'utiliser des données prenant en compte les scénarios SSP, il a fallu composer avec la disponibilité des données en lien avec le sujet de ce mémoire.

Dans le dernier exercice climatique de l'ACPR, deux scénarios sont évoqués : le RCP 4.5 et le RCP 8.5. Cependant, il est mentionné que pour les risques de catastrophes naturelles, pour une vision à long terme, « le scénario considéré devra être proche du scénario RCP 4.5 du GIEC ». Le scénario RCP 4.5 est donc sélectionné, d'autant plus que le rapport stipule également que « le RCP 8.5 est sujet à controverses quant à son caractère atteignable, notamment en raison des hypothèses relatives à l'évolution de l'utilisation des énergies fossiles sur lesquels il s'appuie ».

2.4.4 Projection du risque en 2050 : utilisation d'un jeu de données climatiques

Comme mentionné précédemment, des données de projections climatiques sont nécessaires afin d'estimer les hauteurs d'eau que pourraient accueillir les rivières françaises en 2050, qui permettront notamment d'aboutir au calcul de l'AAL 2050. Le jeu de données utilisé dans ce mémoire est issu d'une collaboration entre le *Swedish Meteorological and Hydrological Institute* (SMHI) et le programme européen Copernicus (*European Commission, 2024* [56]). Cette collaboration a pour but d'analyser l'impact du changement climatique sur les rivières en utilisant plusieurs simulations régionales climatiques EURO-CORDEX couplées à différents modèles hydrologiques.

Cet assemblage de modèles de simulations permet d'obtenir un ensemble d'indicateurs d'impact climatique (ICC) pour la période 1971-2100, en considérant le scénario RCP 4.5. Avant de s'intéresser à l'indicateur retenu dans l'étude de ce mémoire, expliquons synthétiquement comment ces indicateurs sont obtenus.

2.4.4.1 Présentation des simulations EURO-CORDEX

Créé en 2009, le programme EURO-CORDEX est la branche européenne du projet international CORDEX qui vise à organiser et à coordonner un cadre international de production de projections climatiques régionales pour toutes les régions continentales du globe. EURO-CORDEX utilise des modèles climatiques régionaux (RCM) pour affiner les projections obtenues par des modèles globaux (GCM). Un GCM est un modèle numérique qui représente l'ensemble du système climatique de la Terre. Il utilise des équations mathématiques pour simuler les interactions entre l'atmosphère, les océans, les glaces, et la surface terrestre. Le GCM divise la Terre en une grille tridimensionnelle (longitude, latitude, altitude), avec des cellules qui couvrent à la fois la surface terrestre et l'atmosphère. Chaque cellule de la grille est responsable de calculer les conditions climatiques pour une petite portion de la Terre. Une succession d'étapes de descente d'échelle, présentés en **Figure 2.13**, permet d'obtenir des simulations à résolution d'environ 12.5km.

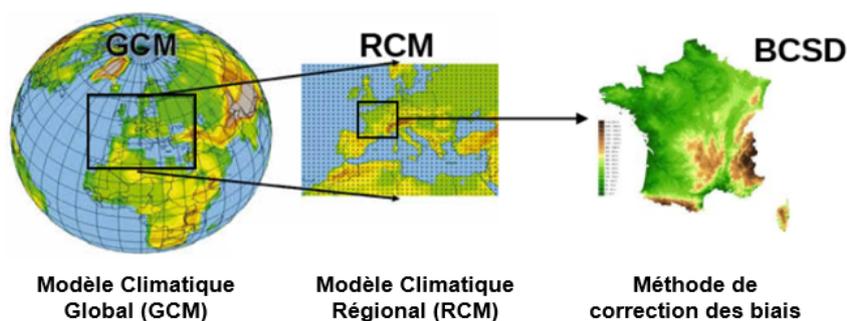


FIGURE 2.13 : Descente d'échelle du modèle global à l'échelle nationale (source : DRIAS)

Les paramètres climatiques (précipitations, température, vent, évapotranspiration...) des simulations EURO-CORDEX, dont certains sont corrigés de leur biais en ayant été ajustés à l'ensemble de données de référence EFAS-Meteo, sont ensuite injectés dans les différents modèles hydrologiques afin d'estimer des indicateurs hydrologiques, tels que les débits moyens par mois, l'humidité des sols et les débits de pointe.

Dans l'étude proposant le jeu de données, 3 GCM et 4 RCM ont été utilisés. Comme l'illustre la **Figure 2.13**, après avoir sélectionné un GCM, un RCM permettant de faire la descente d'échelle doit être choisi. Une fois le couple (GCM, RCM) défini, des données sur les conditions climatiques régionales sont obtenues et peuvent ensuite être introduites dans un modèle hydrologique visant à fournir à la fin un indicateur d'impact climatique sur l'eau. En résumé, les données issues de chaque couple sélectionné seront utilisées comme entrées de chacun des modèles hydrologiques disponibles et présentés ci-dessous.

2.4.4.2 Modèles hydrologiques

Le premier modèle mis à disposition dans l'étude climatique est le E-HYPE, basé sur le modèle hydrologique HYPE. Ce dernier simule le cycle de l'eau et la qualité de l'eau en Europe. Il intègre des processus hydrologiques et de gestion des terres, avec des paramètres spécifiques selon les types de sol et d'utilisation des terres. Configuré pour une région paneuropéenne, E-HYPE couvre 8,8 millions de km² d'eau découpés en 35 408 bassins-versant dont 2 473 en France métropolitaine, et utilise des données sur la température et les précipitations pour ses simulations.

Le modèle E-HYPE se décompose en deux variantes. Il y a d'une part le multi-modèle E-HYPEcatch qui donne des ICC pour chaque bassin-versant, selon 8 modèles différents, donnant ainsi 8 valeurs différentes par ICC et bassin-versant. D'autre part, il y a un modèle unique nommé E-HYPEgrid, qui fournit cette fois des ICC selon une grille de résolution 5km à l'échelle européenne.

Enfin, le modèle de capacité d'infiltration variable (VIC) est proposé. C'est un modèle hydrologique semi-distribué à macro-échelle et qui constitue les fondamentaux du modèle VIC-WUR qui est proposé dans le jeu de données climatiques. Il prend en entrée des données comme la température, les précipitations, le rayonnement solaire, le rayonnement thermique ou encore la vitesse du vent, à un pas de temps de 6 heures. De ces entrées ressortent différents ICC à une maille de 5km par 5km, comme E-HYPEgrid.

2.4.4.3 Indicateurs d'impact climatique

Ces différents GCM, RCM et modèles hydrologiques proposés dans le jeu de données climatiques orchestré par le SMHI et Copernicus permettent d'obtenir divers indicateurs d'impact climatique présentés en **Table 2.5**. Ces derniers concernent les débits des rivières, l'humidité de l'air, les températures des bassins-versants ou encore la récurrence des inondations.

Nom	Unité	Description
Récurrence des inondations	m^3/s	Valeurs de retour du débit fluvial maximal annuel. Les données sont fournies sous forme de périodes de retour de 2, 5, 10 et 50 ans du débit fluvial maximal quotidien annuel. Pour les périodes futures, l'indicateur est donné sous forme de variation relative par rapport à la période de référence (1971-2000)
Débit maximal de la rivière	m^3/s	Le débit maximal d'un cours d'eau est calculé comme le débit maximal journalier moyen annuel sur une période de 30 ans. Pour les périodes futures, l'indicateur est donné sous forme d'évolution relative par rapport à la période de référence (1971-2000)
Température de l'eau dans les bassins versants	°C	La température de l'eau est la température simulée de l'eau dans un bassin versant. L'indicateur est calculé comme la valeur annuelle moyenne de la température de l'eau sur une période de 30 ans. Pour les périodes futures, l'indicateur est donné sous forme de variation absolue par rapport à la période de référence (1971-2000)
Humidité réelle	mm/mois	L'humidité réelle est calculée comme la moyenne mensuelle des précipitations moins l'évapotranspiration réelle sur une période de 30 ans. Pour les périodes futures, l'indicateur est donné sous forme de variation absolue par rapport à la période de référence (1971-2000)

TABLE 2.5 : Liste non exhaustive des ICC proposés sur l'eau.

L'indicateur retenu pour ce mémoire est celui sur la « récurrence des inondations », pour plusieurs raisons :

- Cet indicateur s'intéresse au débit fluvial, intimement lié à la hauteur d'eau des différentes rivières considérées depuis le début de cette étude. De plus, cet ICC s'intéresse au débit fluvial maximal annuel, comme c'est le cas dans la première partie de ce chapitre, afin d'utiliser la théorie des valeurs extrêmes.
- Cet indicateur propose de connaître l'évolution des débits pour une période de retour fixe, selon différents horizons prospectifs. Parmi ces horizons, se trouve la période 2041-2070 qui sera utilisée pour obtenir l'AAL 2050, qui se trouve au centre de cette fenêtre temporelle. L'évolution future est donnée sous forme de variation relative par rapport à une période de référence qui est caractérisée par la période historique sur laquelle les hauteurs d'eau ont été récupérées. Il sera alors possible d'obtenir les débits de période de retour de 2, 5, 10 et 50 ans par bassin-versant en France.

2.4.4.4 Extraction de l'indicateur ciblé

Lors de l'extraction des données, un GCM, un RCM et un modèle hydrologique doivent être sélectionnés pour obtenir l'ICC retenu. Afin d'avoir les résultats les plus variés et représentatifs de la réalité, l'indicateur a été extrait pour toutes les combinaisons GCM-RCM-Modèle hydrologique aboutissant à l'ICC. Aucun poids particulier ne sera donné à une combinaison particulière pour éviter un quelconque biais. Au final, huit combinaisons différentes du couple (GCM, RCM) pouvant être associées à 3 différents modèles hydrologiques sont considérées. Concernant les couples (GCM, RCM), chacun est relié à un code représentant les paramètres et conditions initiales introduits dans les modèles climatiques. Un couple peut donc apparaître deux fois, en ayant deux entrées différentes, comme le montre la **Figure 2.14**.

GCM	RCM	Code
HadGEM2-ES	RACMO22E	r1i1p1
HadGEM2-ES	RCA4	r1i1p1
MPI-ESM-LR	CSC-REMO2009	r1i1p1
MPI-ESM-LR	CSC-REMO2009	r2i1p1
MPI-ESM-LR	RCA4	r1i1p1
EC-EARTH	CCLM4-8-17	r12i1p1
EC-EARTH	RACMO22E	r12i1p1
EC-EARTH	RCA4	r12i1p1



Modèles hydrologiques
E-HYPEcatch
E-HYPEgrid
VIC-WUR

FIGURE 2.14 : Choix des modèles climatiques et hydrologiques

Comme évoqué dans la [section 2.4.4.2](#), le modèle E-HYPEcatch est lui-même décomposé en 8 sous-modèles. Cela signifie qu'un couple (GCM, RCM) combiné avec le modèle E-HYPEcatch donnera 8 valeurs différentes pour l'indicateur « récurrence des inondations ».

2.4.4.5 Visualisation des données climatiques

Le cadre étant fixé, l'extraction des résultats est réalisée afin de les visualiser. Pour rappel, l'indicateur d'impact climatique donne le pourcentage d'augmentation des débits des crues de période de retour de 2, 5, 10 et 50 ans à horizon 2050. Bien que les données fournies soient à l'échelle européenne, uniquement les données du territoire français sont conservées.

Précision importante pour la visualisation des résultats : E-HYPEcatch donne des résultats par sous-bassins versants tandis que E-HYPEgrid et VIC-WUR donnent des résultats par grille de résolution 5km. Il a donc été décidé de représenter les résultats à la maille la plus large, à savoir par sous-bassin versant. Pour les sorties des combinaisons utilisant le modèle E-HYPEcatch, les 8 valeurs obtenues par sous-bassin versant sont conservées. En revanche, pour les sorties des modèles E-HYPEgrid et VIC-WUR, une recherche des points situés dans chaque sous-bassin versant est effectuée et les valeurs liées à ces points sont gardées en mémoire. Enfin, la moyenne de tous les résultats liés à chaque sous-bassin est réalisée afin d'obtenir l'indicateur final. Cela étant fait, il est maintenant possible d'obtenir une visualisation de notre indicateur par sous-bassin versant.

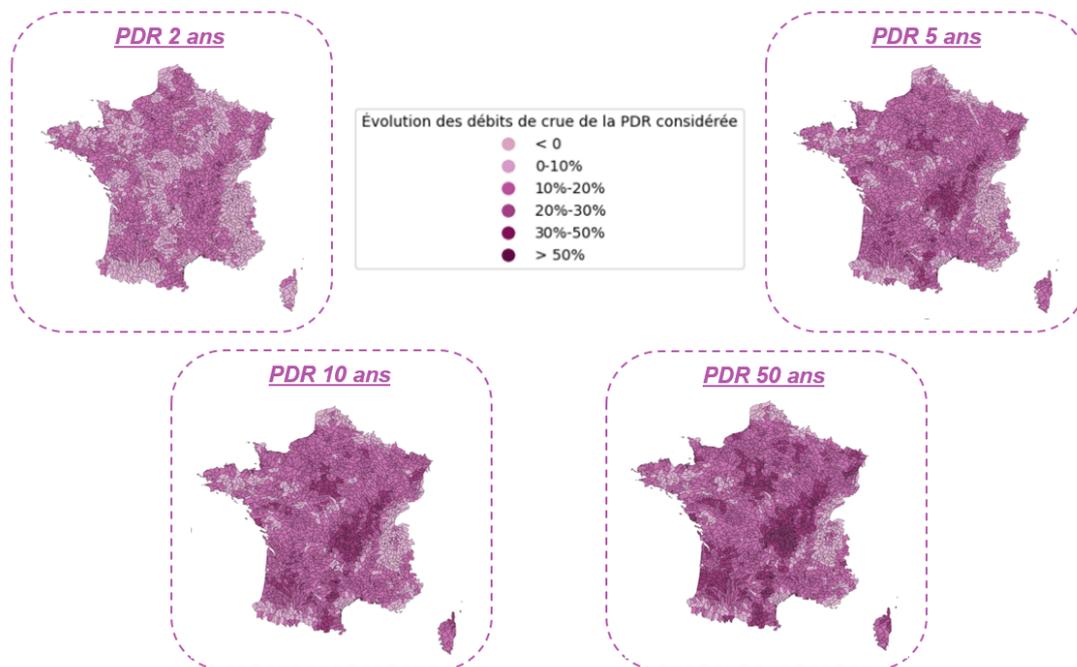


FIGURE 2.15 : Résultats des projections de débits à horizon 2050.

Ces graphiques en [Figure 2.15](#) illustrent globalement l'impact du changement climatiques sur les inondations par débordement à horizon 2050. Les données présentées concernent le scénario RCP 4.5. Sans faire de conclusions précises, il est possible d'identifier les zones dont une nette augmentation des débits est à craindre comme autour du Massif Central, dans le bassin-versant du Rhin ou encore dans le sud près de Perpignan.

*PDR = période de retour

Les résultats de ces projections climatiques étant issues d'un multi-modèle, il semble pertinent de créer un indicateur de robustesse de ces projections par bassin-versant. Pour évaluer cela, le rapport « Moyenne / Écart-type » a été utilisé et calculé sur les 24 valeurs distinctes obtenues par bassin-versant via la combinaison des 8 modèles climatiques et des 3 modèles hydrologiques. L'indicateur de robustesse est ainsi découpé en quatre intervalles illustrant le niveau de robustesse du plus faible au plus élevé :

- **Robustesse très forte** : lorsque l'indicateur a une valeur supérieure à 2.
- **Robustesse forte** : lorsque l'indicateur a une valeur comprise entre 1.5 et 2.
- **Robustesse moyenne** : lorsque l'indicateur a une valeur comprise entre 1 et 1.5.
- **Robustesse faible** : lorsque l'indicateur a une valeur inférieure à 1.

Ce découpage permet d'obtenir des cartes illustrant l'indicateur de robustesse selon les différentes périodes de retour.

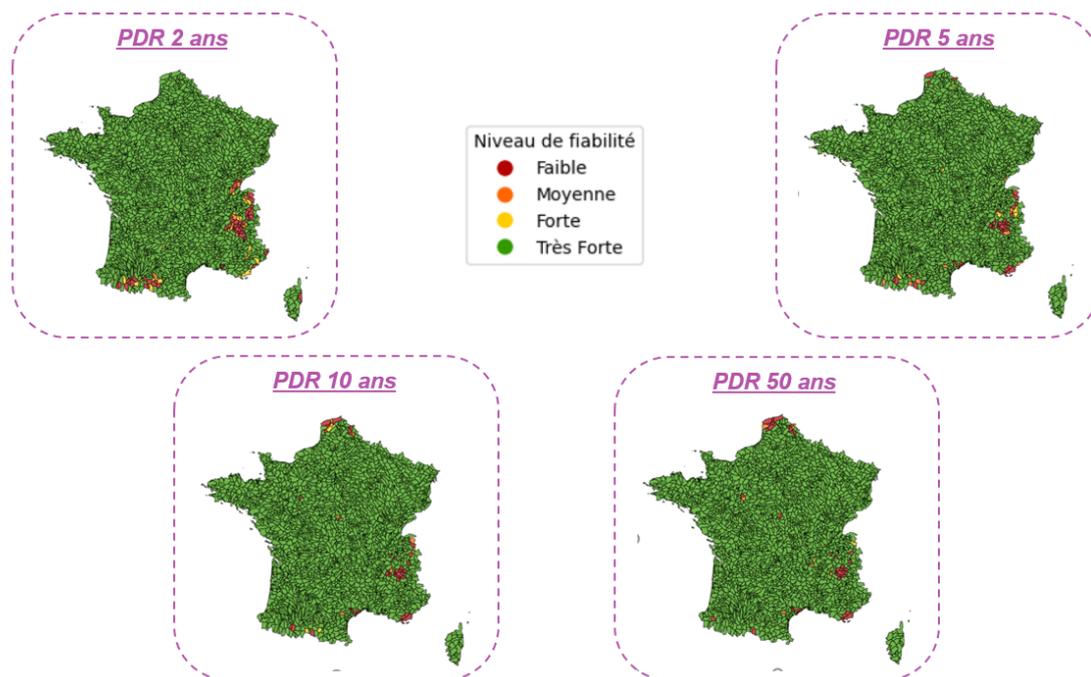


FIGURE 2.16 : Résultats des indicateurs de robustesse des projections de débits à horizon 2050.

La **Figure 2.16** permet de constater que l'utilisation de plusieurs modèles ne compromet pas les résultats, puisque la majeure partie de ces derniers sont considérés comme robustes. La faible robustesse de quelques zones en France provient d'un manque de données dans le bassin-versant ou d'une incertitude entre les différents modèles.

2.4.5 Extrapolation des données prospectives

Comme cela a été présenté, le jeu de données permet d'obtenir l'évolution des débits à horizon 2050, pour un scénario RCP donné, pour des périodes de retour de 2, 5, 10 et 50 ans.

Cependant, la première partie de ce chapitre utilisait la théorie des valeurs extrêmes afin d'obtenir les hauteurs d'eau associées aux périodes de retour de 2, 5, 10, 20, 50, 100 et 200 ans. Deux aspects ne correspondent pas entre cette première partie et les résultats du jeu de données climatiques :

- **L'obtention de débits au lieu de hauteurs d'eau** : la partie sur la théorie des valeurs extrêmes permettait d'obtenir les hauteurs d'eau associées à différentes périodes de retour. Or, des projections climatiques résultent une évolution du débit à horizon 2050. Une courbe de tarage pour faire le lien entre débit et hauteur d'eau va alors être utilisée.
- **L'absence certaines périodes de retour** : les données de projections climatiques ne permettent pas d'obtenir l'évolution des débits à horizon 2050 pour des crues de période de retour de 20, 100 et 200 ans. Pour palier cela, la relation linéaire existant entre les hauteurs d'eau et le logarithme de la période de retour associée est considérée.

2.4.5.1 Conversion des débits en hauteurs d'eau

En hydrologie, la hauteur d'eau et le débit sont les deux principales grandeurs physiques analysées dans des études liées aux inondations par débordement. Il existe une relation étroite entre ces deux grandeurs qui est souvent représentée à l'aide d'une courbe de tarage. Cette courbe illustre la relation débit-hauteur d'eau d'un point spécifique d'une rivière ou d'un canal. Ce type de courbe est disponible sur la plateforme Hydroportail, qui est utilisée pour récupérer les historiques de hauteur d'eau dans la première étape de la modélisation. La plateforme précise la définition d'une courbe de tarage : « loi de correspondance monotone, croissante et univoque entre le débit et la hauteur pour une station hydrométrique donnée. Elle n'est pas transposable dans l'espace, et une station peut comporter plusieurs courbes de tarage. » Un exemple de courbe de tarage est donné en **Figure 2.17**.

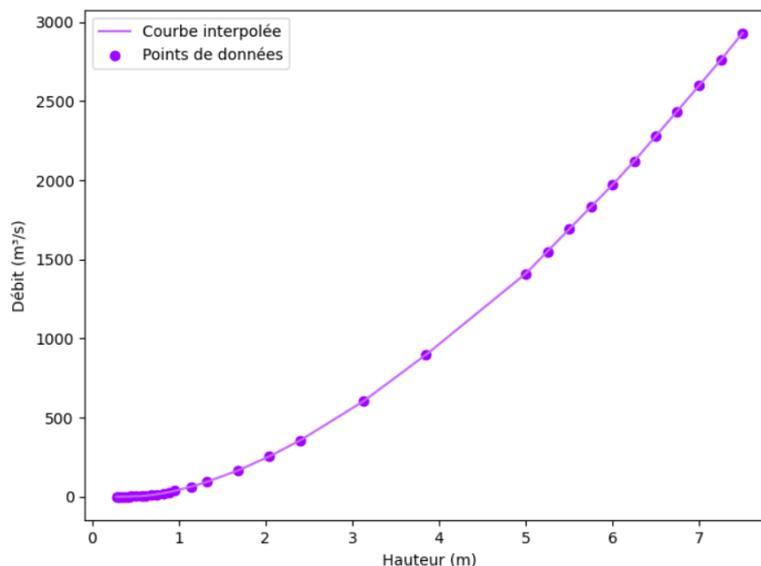


FIGURE 2.17 : Exemple d'une courbe de tarage (*Hydroportail, 2024* [44](#))

Cette courbe sera donc utilisée pour convertir les débits en hauteurs d'eau, et inversement.

2.4.5.2 Obtention des périodes de retour manquantes

Parmi les lois présentées dans la [section 2.1.1](#), une particularité commune ressort : la relation linéaire entre les hauteurs d'eau et le logarithme de la période de retour calculée grâce aux quantiles de la loi (*Gumbel E-J, 1954* [\[57\]](#)). Pour illustrer cela, l'étude de la théorie des valeurs extrêmes sur les relevés de hauteurs d'eau de la station hydrométrique du Gardon d'Alès a été réalisée. La loi sélectionnée grâce à l'historique des hauteurs d'eau a permis d'obtenir les hauteurs associées à différentes périodes de retour. En connaissant ces différentes hauteurs ainsi que leur probabilité de survenance, il est possible de vérifier visuellement la relation linéaire évoquée, comme en témoigne la [Figure 2.18](#).

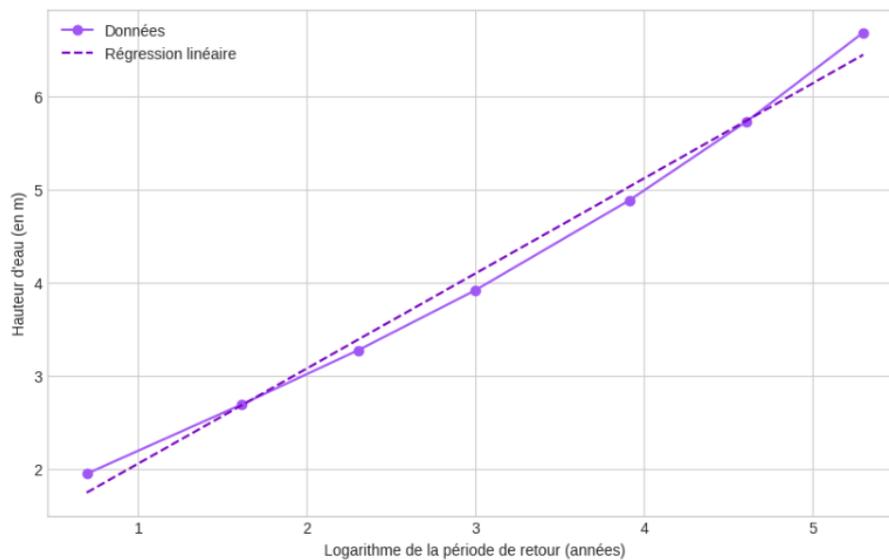


FIGURE 2.18 : Relation linéaire entre les hauteurs et le logarithme des périodes de retour

Les paramètres de la régression linéaire sont récupérés, à savoir le coefficient de pente et l'ordonnée à l'origine. Connaissant ces deux paramètres, il est alors tout à fait possible de connaître le débit associé à n'importe quelle période de retour. C'est précisément l'intérêt de cette particularité, car elle permet d'obtenir les hauteurs d'eau liés aux périodes de retour qui ne sont pas renseignées dans les résultats des projections climatiques, à savoir les périodes de retour de 20, 100 et 200 ans.

En couplant les informations liées à la relation linéaire évoquée ci-dessus, celles de la courbe de tarage et le pourcentage d'évolution des débits obtenus via le jeu de données climatiques, le calcul de l'AAL 2050 est alors envisageable.

2.4.6 Quantification du risque en 2050

2.4.6.1 Impact du changement climatique : évolution de l'AAL

L'obtention des hauteurs d'eau de différentes périodes de retour à horizon 2050 permet de calculer l'AAL 2050, via la même méthode que celle évoquée dans la [section 2.4.1](#) pour l'AAL 2024. Deux aspects pourront alors être constatés : le glissement des périodes de retour entre aujourd'hui et 2050, ainsi que l'évolution de la sinistralité à horizon 2050.

En effet, lors de l'étude de la théorie des valeurs extrêmes nécessaire au calcul de l'AAL 2024, une hauteur d'eau considérée comme ayant une période de retour 50 ans pourrait être de x mètres. Les projections climatiques et l'obtention des hauteurs d'eau à horizon 2050 pourraient montrer qu'à cet horizon, x mètres d'eau correspondrait à une période de retour de 10 ans. Le constat serait alors le suivant : le changement climatique a augmenté le risque d'inondation par débordement car une crue considérée aujourd'hui comme cinquantennale pourrait devenir décennale en 2050. Cela témoigne de l'augmentation de la fréquence des événements rares, en l'occurrence un événement censé arriver statistiquement tous les 50 ans selon les informations actuelles.

Le deuxième intérêt de calculer l'AAL 2050 est d'observer l'évolution de la sinistralité liée aux inondations par débordement. En effet, pour rappel, l'AAL mesure la perte annuelle moyenne attendue. En comparant cette métrique actuellement et en 2050, il est possible de rapidement constater comment les pertes estimées ont évolué.

$$\text{Variation de la sinistralité (en \%)} = \frac{\text{AAL 2050} - \text{AAL 2024}}{\text{AAL 2024}}. \quad (2.12)$$

Toute la démarche présentée précédemment analyse l'impact du changement climatique « toutes choses égales par ailleurs ». En effet, aucune variation de la situation politique, économique et démographique n'a été prise en compte. Afin d'aller plus loin dans ce mémoire et d'apprécier différents résultats, il semble pertinent de considérer ces différents facteurs car l'assurance d'aujourd'hui ne reflète pas celle de demain.

2.4.6.2 Variation de la situation économique

Le facteur le plus important est la différence de contexte économique entre aujourd'hui et un horizon prospectif, en l'occurrence 2050. Dans le contexte de ce mémoire, la situation économique va particulièrement impacter les sommes assurées du bâti et du contenu.

Évolution de la somme assurée du contenu

Concernant la somme assurée du contenu, son évolution sera indexée sur l'inflation générale. En effet, le contenu, principalement caractérisé par les meubles, la décoration ou encore les appareils électroménagers, est grandement dépendant des prix indexés sur l'inflation. Plusieurs études économiques et actuarielles proposent des projections de l'inflation dans plusieurs zones mondiales, notamment celles du *Network of Central Banks and Supervisors for Greening the Financial System* (NGFS). Le NGFS est une coalition internationale de banques centrales et de superviseurs financiers créée en 2017. Son objectif principal est de renforcer la résilience du système financier face aux risques liés au changement climatique et de soutenir la transition vers une économie bas-carbone.

Les scénarios climatiques proposés par le NGFS (*Network of Central Banks and Supervisors for Greening the Financial System, 2023* [58]) sont des outils essentiels pour projeter plusieurs facteurs économiques, y compris l'inflation. Trois de ces scénarios à long terme sont notamment utilisés dans le dernier exercice climatique de l'ACPR (*ACPR, 2023* [3]) pour analyser le risque à horizon 2050 : un scénario central (*Baseline*), un scénario de transition ordonnée (*Below 2°C*) et un autre de transition désordonnée (*Delayed Transition*). Le scénario *Baseline* est un scénario fictif où l'économie ne serait exposée ni au risque physique ni au risque de transition, et qui ne donne donc lieu à aucune politique climatique (hors taxes carbone déjà mises en place en 2020).

En opposition à cela, les scénarios *Below 2°C* et *Delayed Transition* de la phase III du NGFS, tiennent compte des engagements nationaux pris lors de la COP26 et des avancées technologiques dans les énergies renouvelables. Ils diffèrent principalement par leur exposition au risque de transition, avec le scénario *Delayed Transition* caractérisé par des actions plus tardives et désordonnées, entraînant une brusque augmentation du prix carbone en 2035.

Le scénario *Delayed Transition*, recommandé dans le dernier exercice climatique de l'ACPR, est retenu pour cette analyse. Il s'aligne avec le scénario RCP 4.5, considéré comme le plus probable dans un futur proche, et constitue une base pertinente pour projeter l'évolution de la sinistralité climatique. Sa trajectoire est présentée en **Figure 2.19**.

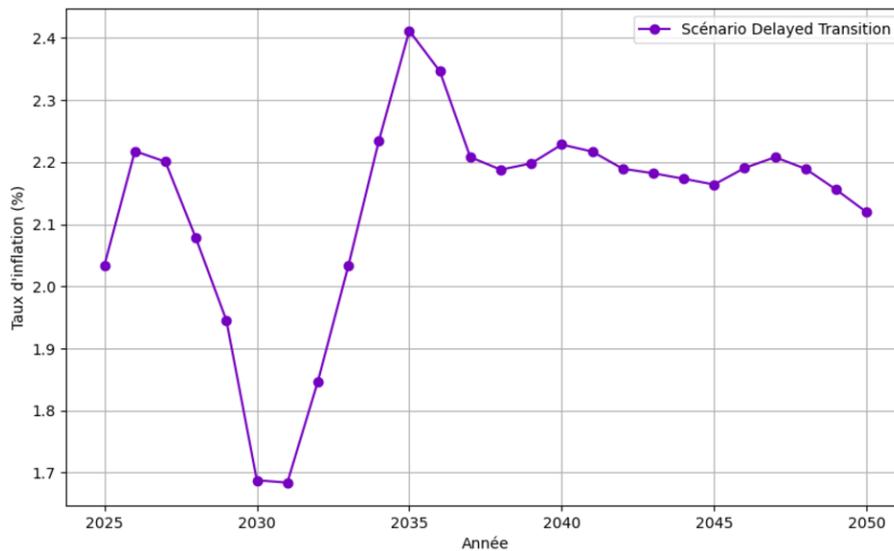


FIGURE 2.19 : Projection de l'inflation en France selon le scénario *Delayed Transition*

Pour estimer la somme assurée du contenu d'une habitation en 2050, ces projections du taux d'inflation sont utilisées. Le traitement des bases DPE et DVF+ a permis de connaître la somme assurée du contenu de chaque habitation de la base d'expositions en 2024. Cette somme peut alors être ajustée en fonction de l'indice d'inflation cumulée pour chaque année. L'indice d'inflation cumulé pour une année n est calculé en multipliant les facteurs d'inflation annuels depuis l'année d'après celle de base (2025) jusqu'à l'année n .

$$\text{Indice d'inflation cumulé en 2050} = \prod_{i=2025}^{2050} (1 + \text{taux_inflation}_i). \quad (2.13)$$

La somme assurée (SA) du contenu en 2050 peut donc être calculée.

$$\text{SA du contenu en 2050} = \text{SA du contenu en 2024} \times \text{Indice d'inflation cumulé en 2050}. \quad (2.14)$$

Ce calcul, qui peut être réalisé pour n'importe quelle année dont la projection du taux d'inflation est connue, permet de prendre en compte l'évolution des coûts liés à l'inflation et d'obtenir une estimation précise de la somme assurée du contenu pour les années futures.

Évolution de la somme assurée du bâti

Concernant la somme assurée du bâti, il a été décidé d'indexer son évolution sur l'indice des coûts de construction de la Fédération Française du Bâtiment (ICC FFB). Cet indice, détaillé dans la [section 2.3.3](#), possède un historique profond disponible en *Open Data* (*Fédération Française du Bâtiment, 2024* [\[51\]](#)).

Cependant, aucune projection de cet indice n'est disponible en ligne. Il sera donc considéré que l'évolution globale passée reflète celle à venir. Une régression linéaire est alors réalisée sur la période 1990-2023 afin de capter la tendance historique de l'indice. Cette tendance sera alors prolongée pour estimer l'indice entre 2024 et 2050, offrant alors une référence pour estimer les sommes assurées du bâti à ces mêmes dates.

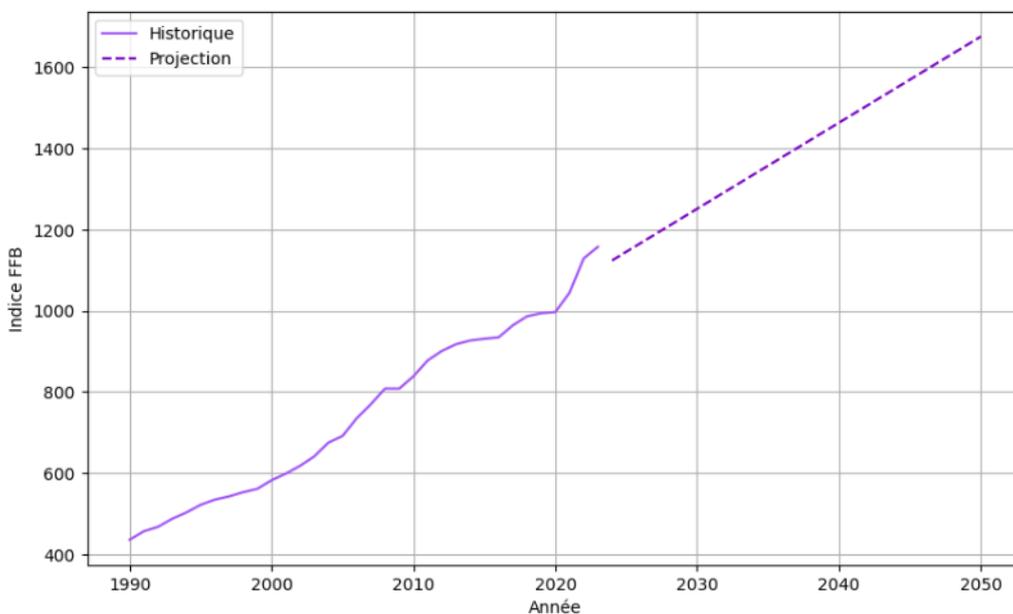


FIGURE 2.20 : Régression linéaire sur l'historique pour projeter l'indice

La régression linéaire réalisée, il suffit d'utiliser le coefficient directeur de la droite pour prolonger la courbe jusqu'en 2050, comme en [Figure 2.20](#). Cela a permis de connaître la valeur de l'indice à cette date servant à estimer les futures sommes assurées du bâti de la base d'expositions ([Table 2.6](#)).

Valeur de l'indice en 2024	Valeur de l'indice en 2050
1 124.202	1 676.090

TABLE 2.6 : Valeur du FFB ICC aux dates clés de l'étude

Soit I_{2024} (respectivement I_{2050}) l'indice ICC FFB en 2024 (respectivement en 2050).

$$\text{Somme assurée du bâti 2050} = \text{Somme assurée du bâti 2024} \times \frac{I_{2050}}{I_{2024}}. \quad (2.15)$$

2.4.6.3 Variation de la situation démographique

À horizon 2050, le changement climatique pourrait entraîner des mouvements de population significatifs en raison de ses impacts prévisibles sur l'environnement et la société. L'augmentation des températures, les phénomènes météorologiques extrêmes, et l'élévation du niveau de la mer sont des facteurs clé qui pourraient forcer des migrations massives.

Ces mouvements de population engendrés par le changement climatique auront plusieurs répercussions pour les assureurs. Ils devront probablement ajuster leurs modèles de tarification en fonction des variations de la demande de contrats d'assurance, directement influencées par le déplacement des populations. Certaines zones pourraient devenir particulièrement risquées à assurer, posant ainsi des défis liés à la inassurabilité. Il semble donc pertinent d'intégrer l'évolution démographique dans l'analyse prospective des risques climatiques.

Considérant cela, la base de données « Projections de population 2018-2070 pour les départements et les régions » fournie par l'INSEE a été récupérée (INSEE, 2024 [59]). Les projections de cette base sont fondées sur le modèle Omphale 2022 de l'INSEE qui projette la population en utilisant les données de 2018 sur le sexe et l'âge. Il calcule les projections pour des zones de plus de 50 000 habitants en tenant compte des quotients d'émigration, de fécondité et de mortalité.

Plusieurs scénarios permettant de projeter sont proposés. Le scénario central, qui sera conservé dans la suite, suppose une fécondité stable à 1,8 et des espérances de vie atteignant 87,5 ans pour les hommes et 90 ans pour les femmes en 2070, avec un solde migratoire de 70 000 personnes par an. Des variantes explorent des hypothèses de fécondité, mortalité, et migrations différentes, influençant les projections de population, comme les scénarios « population jeune » et « population âgée » qui combinent des hypothèses extrêmes sur ces variables.

Ces données fournissent le nombre d'habitants (en milliers de personnes) estimé par département et par année de projection jusqu'en 2070. De ces informations, une estimation de l'évolution de la population sur la période 2024-2050 a pu être réalisée en **Figure 2.21**.

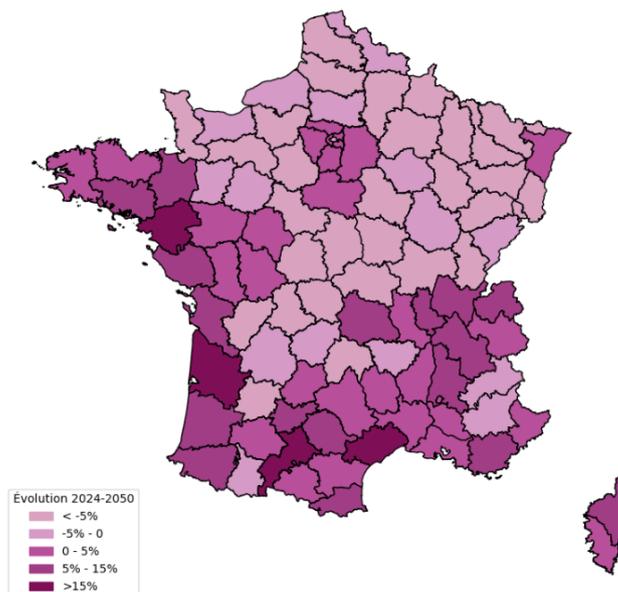


FIGURE 2.21 : Visualisation de l'évolution de la situation démographique (INSEE, 2024 [59]).

L'analyse de ces résultats, qui ne peuvent être obtenus à une échelle géographique plus détaillée, met en évidence la difficulté d'intégrer de manière pertinente l'évolution démographique dans l'étude actuarielle.

En effet, la première limite vient du fait que le pourcentage d'évolution soit obtenu à une maille départementale, tandis que notre étude porte sur une ou plusieurs communes précises. Selon ces données, **2.12 %** d'augmentation du nombre d'habitants dans le Gard est attendue en 2050 par rapport à 2024. L'étude principale portant sur la commune d'Alès, il serait envisageable d'attribuer à Alès un pourcentage d'évolution démographique proportionnelle à son poids dans la démographie du Gard, mais cela s'avérerait trop approximatif pour être pertinent.

Même si l'information était disponible à l'échelle communale, comment pourrait-on traduire ce chiffre en une évolution de notre base d'expositions ? Avec une moyenne de 2,16 personnes par foyer en France (*INSEE, 2019* [52]), l'idée initiale était d'utiliser cette donnée pour ajuster le nombre d'habitations dans la base d'expositions. Cependant, il serait nécessaire de définir une méthode cohérente pour ajouter ou retirer des expositions, et cela semble à nouveau trop subjectif pour être considéré comme pertinent dans cette étude.

Pour ces raisons, l'évolution démographique à horizon 2050 ne sera pas prise en compte dans ce mémoire, à l'inverse de l'évolution du contexte économique.

2.5 Perspective de la modélisation en contexte opérationnel

L'ensemble de la méthodologie développée dans ce mémoire s'inscrit dans un cadre opérationnel et prospectif visant à analyser l'impact du changement climatique sur les inondations par débordement. Cette approche pourrait permettre aux assureurs non seulement de quantifier les risques à horizon 2050, comme préconisé par l'ACPR dans son exercice climatique (*ACPR, 2023* [3]), mais aussi de se conformer aux exigences du processus d'auto-évaluation des risques et de la solvabilité (ORSA), dans le cadre du pilier 2 de Solvabilité II. L'ORSA ayant une vision court terme, environ jusqu'à 5 ans, il convient toutefois de noter que la présente étude analysant le risque à horizon 2050 permet simplement de donner des indications sur les risques à intégrer et discuter dans l'ORSA.

C'est dans ce contexte d'évolution climatique et assurantiel que ce mémoire a été défini. Il semble nécessaire de pouvoir tirer des conclusions sur la posture que pourrait adopter un organisme d'assurance en capitalisant sur les résultats obtenus. En effet, les résultats de la modélisation permettent de constater d'une part l'impact du changement climatique sur la fréquence et la sévérité des inondations par débordement comme présenté auparavant, et d'autre part, permettent d'identifier des solutions d'adaptation face à l'augmentation anticipée de la sinistralité, imposant aux assureurs de prendre diverses décisions pour le pilotage de leurs produits d'assurance habitations (MRH).

2.5.1 Souscription

Dans le cadre de l'ORSA, l'ajustement de la politique de souscription face à l'augmentation de la sinistralité liée aux inondations devient une priorité stratégique. Comment les assureurs peuvent-ils adapter leurs pratiques de souscription pour faire face à cette hausse des sinistres due au changement climatique, en particulier concernant le risque d'inondation par débordement ?

Les contrats d'assurance habitation, souvent considérés comme des produits d'appel attractifs, présentent un défi structurel lié à leur rentabilité. La fréquence et la sévérité accrues des sinistres pourraient rapidement dégrader le ratio sinistres à primes (S/P), questionnant la solvabilité des assureurs.

Un des leviers consisterait à sélectionner méticuleusement les risques à intégrer comme affaires nouvelles, sous-entendu à limiter la souscription dans les zones jugées trop risquées. Cette approche pose cependant la question de l'inassurabilité. Toutefois, cette stratégie est aux antipodes du rôle sociétal que doit jouer un organisme d'assurance et qui plus est comporte des risques commerciaux et de mauvaises réputations. Renoncer à certains contrats dans les zones à risque pourrait entraîner une perte d'opportunités d'affaires sur d'autres segments d'assurance si les assurés choisissent un concurrent pour couvrir l'ensemble de leurs besoins. Une étude pourrait alors être conduite sur la valeur client segmentée localement par géographie à risque afin d'accompagner le pilotage de la stratégie de souscription à adopter et *in fine*, argumenter de la décision de désengagement. Finalement, la ferme décision de ne pas souscrire dans certaines zones doit être soigneusement évaluée à la lumière de cette double matérialité : la maîtrise du risque et la conservation de la clientèle.

Par ailleurs, le rapport Langreny (*Thierry Langreny, Gonéri Le Cozannet, Myriam Merad, 2024* [20]), remis le 2 avril 2024 à Bruno Le Maire et Christophe Béchu, précise les stratégies envisagées pour justement limiter cette sélection des risques par les assureurs, amenant ainsi un déséquilibre des marges techniques. Une des solutions envisagées dans le rapport consiste à introduire un prélèvement additionnelle sur la surprime CatNat. L'idée derrière est de créer un système de « bonus-malus fiscal » qui verrait les zones à risques élevés obtenir un prélèvement supplémentaire de 0 % contre un prélèvement augmenté de 30 % à 50 % pour les zones à faibles risques. L'objectif final étant de surveiller l'engagement des assureurs dans les zones à risque et garantir l'accessibilité du régime d'assurance contre les catastrophes naturelles.

2.5.2 Tarification

La gestion des ajustements tarifaires dans un contexte de sinistralité accrue doit également s'inscrire dans le cadre de l'ORSA, qui impose une évaluation continue de l'adéquation des primes au regard des risques encourus. Les réformes du régime CatNat, notamment l'augmentation prévue de la surprime à partir de janvier 2025, apportent un soutien partiel aux assureurs pour compenser la hausse attendue de la sinistralité, sous réserve de la reconnaissance de catastrophe naturelle par la CCR. Par ailleurs, un mécanisme de réévaluation automatique de la surprime est à l'étude, offrant ainsi une réponse aux impacts financiers futurs liés aux catastrophes naturelles. Cependant, se reposer uniquement sur cette majoration pourrait s'avérer insuffisant. Les assureurs doivent envisager des ajustements tarifaires indépendants du cadre CatNat, d'autant que les critères de reconnaissance des catastrophes naturelles pourraient être renforcés, augmentant la proportion des sinistres non pris en charge par la CCR. En conséquence, les hausses prévues de la surprime CatNat entraîneront naturellement une augmentation des primes pour maintenir le même niveau de recouvrement que précédemment.

Les options tarifaires doivent donc être élaborées en fonction des spécificités locales du risque. L'augmentation des primes dans les zones à risque élevé pourrait être une option. Alternativement, une hausse généralisée mais modérée, exploitant le principe de mutualisation, pourrait permettre de répartir le fardeau tarifaire que représentent les évolutions climatiques tout en évitant une érosion trop importante de la base de clients. Ces ajustements doivent concilier les impératifs de solvabilité à long terme et le respect des objectifs prévisionnels des ratios S/P fixés chaque année.

Enfin, une tarification plus avantageuse pourrait être attribuée aux habitations présentant des systèmes de protection contre les risques CatNat comme l'utilisation de matériaux résistants.

2.5.3 Provisionnement

Concernant les enjeux que peuvent soulever les résultats de ce présent mémoire, il semble important de mentionner les problématiques liées au provisionnement. L'horizon 2050 semble être à trop long terme pour qu'un organisme d'assurance puisse prendre des décisions aujourd'hui sur l'augmentation du risque dans 25 ans. En effet, l'évolution de la sinistralité sera naturellement compensée par des décisions prises en termes de tarification ou de souscription qui sont des leviers à court terme. La diminution des garanties offertes par les assureurs, ou l'augmentation des primes des contrats semble plus judicieuse qu'une augmentation actuelle des provisions liées aux catastrophes naturelles.

De plus, toute variation des provisions entraîne une série de répercussions significatives pour l'assureur, nécessitant des ajustements complexes tant au niveau de la gestion des capitaux que de la stratégie de solvabilité, tout en impactant directement les résultats comptables et les ratios de performance.

Cependant, la présente étude menée pour analyser l'évolution du risque en 2050 est également utile pour analyser la sinistralité attendue l'année prochaine connaissant les informations connues jusqu'à aujourd'hui. Dans cette optique, la méthodologie déployée permet de connaître le montant à provisionner au titre des inondations par débordement d'un cours d'eau précis, en rappelant que la modélisation est répliquable.

2.5.4 Conclusions sur l'intérêt assurantiel de cette étude

La méthodologie développée dans ce mémoire offre aux assureurs une vision prospective des impacts climatiques à l'horizon 2050, en particulier sur les inondations par débordement. Au-delà des constats sur l'évolution de la fréquence et de la gravité des sinistres, cette approche permet d'envisager des adaptations stratégiques concrètes en matière de souscription, de tarification et de provisionnement. L'intégration de ces résultats dans le processus ORSA renforce leur pertinence opérationnelle, en contribuant à une meilleure maîtrise des risques à long terme et en garantissant une adéquation continue entre les risques couverts et les ressources financières mobilisées. En définitive, cette étude démontre la nécessité pour les assureurs d'adopter une approche proactive face aux risques climatiques, tout en intégrant les enjeux de solvabilité et les objectifs de rentabilité.

Chapitre 3

Application : implémentation et analyse des résultats

La modélisation présentée dans le chapitre précédent peut à présent être appliquée. Comme expliqué au début de ce présent mémoire, les résultats seront détaillés pour l'étude du risque d'inondation à Alès, dont le choix est justifié dans le premier chapitre. Des sensibilités à ces résultats seront présentées en fin de ce chapitre afin d'obtenir d'autres conclusions, sur une nouvelle zone spatiale notamment. Tout au long de ce chapitre, les résultats illustrés permettront d'identifier les limites de la modélisation et les différents axes d'amélioration. L'étude hydrologique que représentent les inondations est un sujet très complexe qui oblige à prendre plusieurs hypothèses pour établir une méthodologie quantifiant le risque d'inondation. Ces hypothèses seront examinées en détail, avec une attention particulière portée à ce qui aurait pu être amélioré dans le modèle avec davantage de temps et de ressources.

La première partie sera consacrée aux résultats issus de la théorie des valeurs extrêmes, permettant d'obtenir les hauteurs d'eau et les probabilités associées attendues en 2024. Une seconde partie sera dédiée à l'obtention des empreintes de crue résultantes des différentes hauteurs d'eau trouvées en première partie. L'objectif étant de savoir si une hauteur d'eau va engendrer une inondation dans la ville d'Alès. Ces empreintes seront validées par les cartes du TRI. Une fois les empreintes définies, l'objectif sera d'estimer les pertes assurantielles associées à chacune d'entre elles afin de quantifier le risque d'inondation pour un assureur, qui doit provisionner au titre de ses contrats MRH. Cette évaluation du risque comportera une analyse actuelle (vision 2024) et prospective (vision 2050), permettant d'examiner l'impact potentiel du changement climatique sur les inondations par débordement. Enfin, les sensibilités et les limites du modèle seront discutées, avec notamment l'intégration de l'évolution du contexte économique, ainsi qu'une présentation des résultats sur une seconde zone.

3.1 Modélisation de la théorie des valeurs extrêmes

Pour appliquer la théorie des valeurs extrêmes à l'analyse du risque d'inondation à Alès, la première étape consiste à récupérer les données hydrométriques du Gardon d'Alès, le cours d'eau qui traverse la ville ciblée. L'étude de ces données permettra d'obtenir les hauteurs d'eau attendues en 2024 ainsi que les probabilités qui y sont liées. Ces hauteurs, caractérisées par des périodes de retour, seront validées par des informations issues des cartes du TRI.

3.1.1 Récupération et retraitement des données sur Alès

Comme cela a été évoqué dans le second chapitre, les données hydrologiques sont récupérées sur la plateforme Hydroportail. Les hauteurs maximales journalières, présentées en **Figure 3.1**, sont ainsi obtenues pour la période historique du 01/01/2000 au 31/12/2023. Le choix de cette période temporelle est justifiable selon deux critères :

- **Données fiables** : toutes les données journalières sur cette période sont considérées comme validées ou pré-validées sur la plateforme. Bien que de courtes périodes discontinues de quelques jours soient présentes, cela n'a pas d'impact significatif sur l'étude, comme cela sera expliqué dans la suite.
- **Considération des crues majeures** : trois crues majeures survenues sur le Gardon d'Alès, le cours d'eau analysé, datent de 2002, 2008 et 2015. La sélection de données entre 2000 et 2023 permet d'obtenir un historique assez profond qui prend en compte les crues majeures survenues dans la zone. Le fait de ne pas considérer ces crues aurait amplement sous-estimé les hauteurs d'eau attendues en 2024.

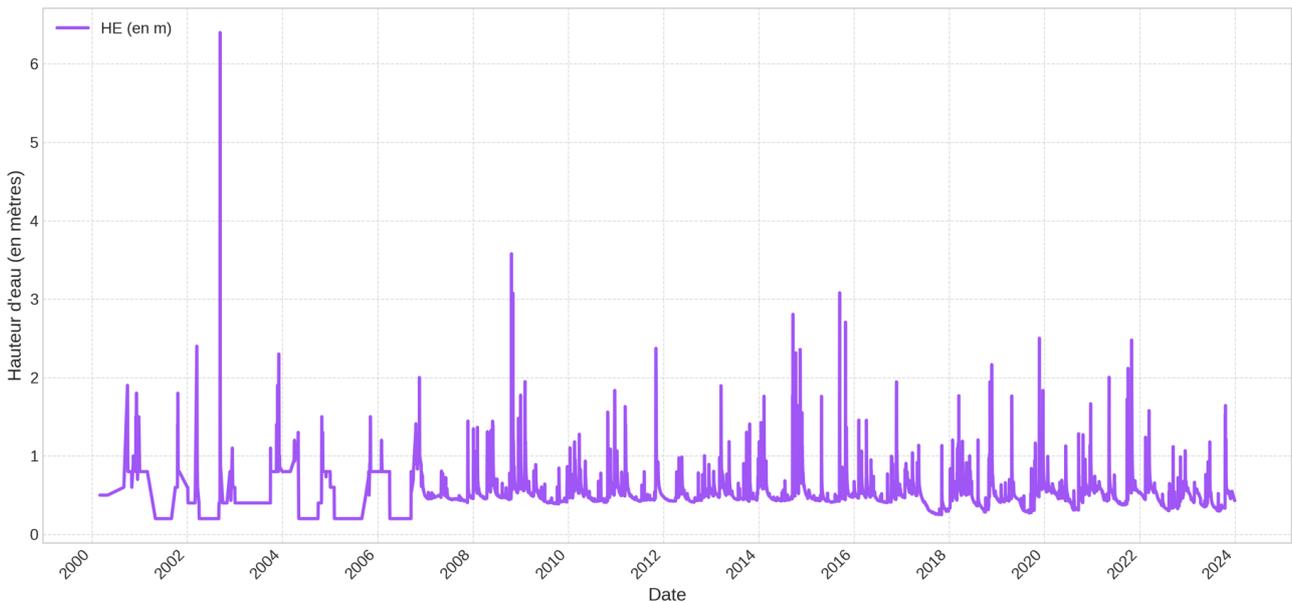


FIGURE 3.1 : Hauteurs d'eau maximales journalières entre 2000 et 2023 à la station

Plusieurs commentaires peuvent être faits sur ce graphique. Tout d'abord, les trois crues majeures évoquées précédemment sont identifiables, et sont toutes parues en fin d'année qui est la période des pluies dites cévenoles. Les données entre 2007 et 2023 sont continues et ne demandent pas une analyse plus précise des valeurs.

En revanche, la période 2000-2007 semble présenter quelques discontinuités, identifiables par des hauteurs d'eau constantes sur quelques jours consécutifs comme le montre la **Figure 3.2**. Cela vient notamment du fait que ces données soient considérées comme pré-validées et non validées sur la plateforme. Afin de s'assurer de la fiabilité des données qui seront utilisées dans la suite de ce mémoire, une analyse détaillée des données apparaît alors nécessaire.

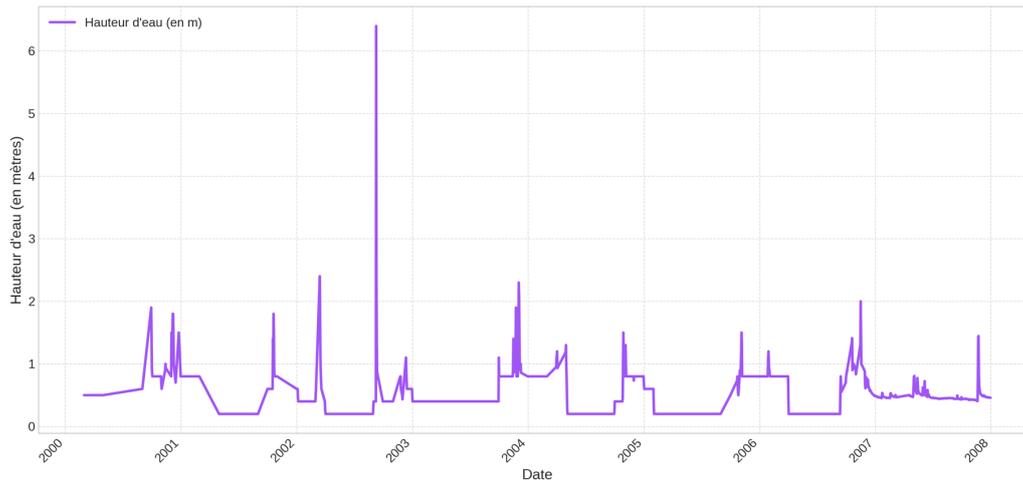


FIGURE 3.2 : Zoom sur les hauteurs d'eau entre 2000 et 2007

En analysant ce graphique plus en détail, une remarque peut-être faite : les données continues, soit considérées comme non douteuses, se situent pour chaque année sur les quatre derniers mois. En ciblant uniquement la période 2008-2023, il en ressort que 75 % des maximums annuels surviennent après le 1^{er} septembre.

La plateforme Hydroportail mentionne également sur la fiche explicative de la station hydrométrique ciblée ici que, « les données avant 2007 sont issues des relevés mensuels des observateurs de crues. [...] Seuls les forts débits sont concernés par ces travaux ».

Sachant cela, et comprenant bien que cette étude s'intéresse uniquement aux maximums annuels, la conclusion est que les données récupérées sur la période 2000-2023 sont fiables. En effet, même sur une période présentant des données discontinues et seulement pré-validées par la plateforme, les justifications précédentes permettent d'affirmer que les données sur les maximums annuels sont fiables.

3.1.2 Sélection de la loi optimale

Les maximums annuels sont ainsi extraits entre 2000 et 2023, et sont assurément fiables.

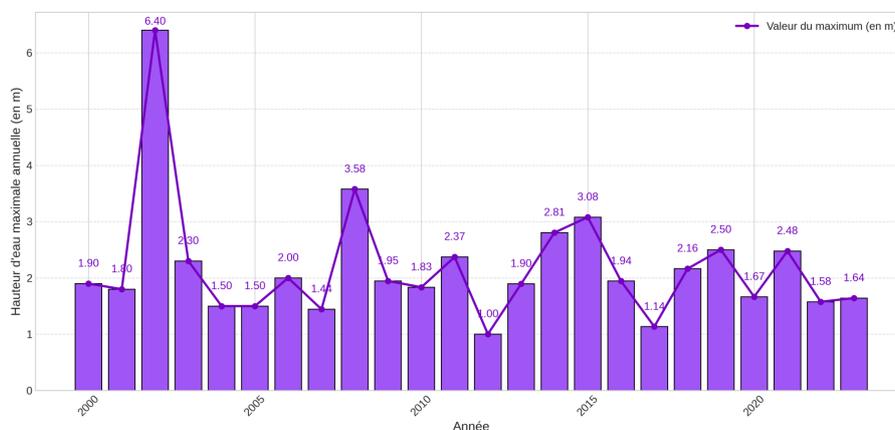


FIGURE 3.3 : Hauteurs d'eau maximales annuelles entre 2000 et 2023

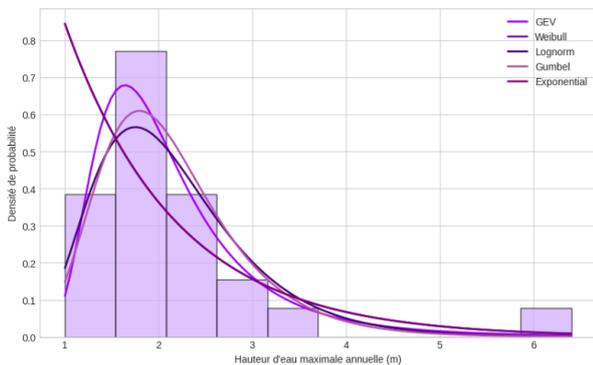
Ces maximums présentés en **Figure 3.3** se comportent à présent comme la suite de variables aléatoires indépendantes et identiquement distribuées évoquée dans la théorie du second chapitre de ce présent mémoire. La théorie des valeurs extrêmes est appliquée sur ces maximums.

La première étape consiste à trouver la loi, en accord avec la théorie des valeurs extrêmes, qui s’ajuste le mieux aux données. Pour cela, la loi GEV est tout d’abord ajustée afin d’obtenir les paramètres optimaux de la **Table 3.1**.

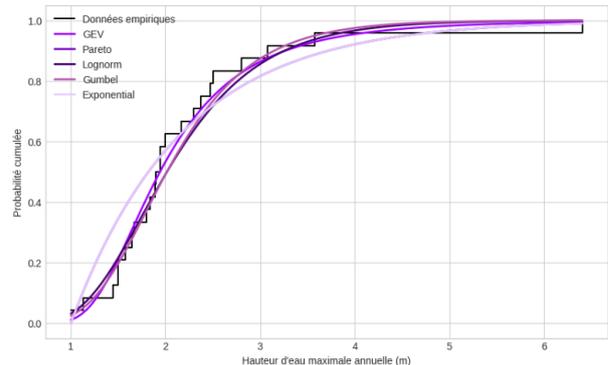
<i>Shape</i> (ξ)	<i>Location</i> (μ)	<i>Scale</i> (σ)
- 0.185	1.736	0.550

TABLE 3.1 : Paramètres ajustés de la loi GEV

La théorie présentée dans le chapitre précédent stipule que loi optimale se situe dans le domaine d’attraction de Weibull car le paramètre ξ est négatif. Cependant, étant relativement proche de 0 (- 0.185), et sachant que la loi de Gumbel apparaît souvent comme pertinente dans les études hydrologiques (*Société française de statistique, 2006* [42]), il semble prudent de tester quelques lois du domaine d’attraction de Gumbel, notamment la loi de Weibull ou de Gumbel.



(a) Ajustement sur l’histogramme



(b) Ajustement sur la fonction de répartition cumulée

FIGURE 3.4 : Visualisation de l’ajustement de différentes lois

Si l’étude des graphiques présents sur la **Figure 3.4** permet d’éliminer certaines lois rapidement, des critères de sélection plus précis sont réalisés (AIC, BIC, QQ-plot, test de Kolmogorov-Smirnov) afin de sélectionner la loi la plus adéquat. Les résultats sont présentés dans la **Table 3.2**.

Loi / Métrique	AIC	BIC	Statistique du test de K-S
GEV	58.045	61.579	0.093
Gumbel	58.763	61.119	0.135

TABLE 3.2 : Résultats des métriques d’ajustement sur les lois GEV et Gumbel

Pour rappel, plus l'AIC, le BIC et la statistique de test de Kolmogorov-Smirnov d'une loi est faible, meilleure est cette loi. Dans cette étude, deux lois se distinguent par leurs bonnes performances : la loi de Gumbel et la loi GEV ajustée avec les paramètres optimaux.

La loi GEV sera retenue ici car son AIC est le plus faible, tout comme sa statistique du test de Kolmogorov-Smirnov. Le BIC annonce la loi de Gumbel comme la plus performante, mais cela vient simplement du fait que cet indicateur pénalise les modèles avec beaucoup de paramètres et que la loi GEV possède un paramètre de plus que la loi de Gumbel (trois paramètres pour la loi GEV contre deux pour la Gumbel).

Suite au choix de la loi, le calcul des hauteurs d'eau liées aux périodes de retour de 2, 5, 10, 20, 50, 100 et 200 ans va pouvoir être réalisé. Ce sont les quantiles de la loi GEV qui permettent d'obtenir en **Table 3.3** la valeur des hauteurs d'eau ayant ces périodes de retour.

Période de retour (en années)	Hauteur d'eau (en mètres)
2	1.95
5	2.69
10	3.27
20	3.92
50	4.89
100	5.73
200	6.69

TABLE 3.3 : Estimation des hauteurs d'eau 2024 après application de la théorie des valeurs extrêmes

3.1.3 Validation des hauteurs d'eau obtenues à l'aide du TRI

Le travail sur les quantiles de la loi sélectionnée a permis d'obtenir une estimation des hauteurs d'eau liées aux périodes de retour 2, 5, 10, 20, 50, 100 et 200 ans. Il semble à présent judicieux de valider ces résultats. Pour cela, les informations présentes dans les études faites par les experts de Territoires à Risque Important d'inondation (TRI) vont être utilisées.

Comme évoqué dans les chapitres précédents, les États européens doivent identifier leurs territoires à risque important d'inondation. En vue de cet objectif, de nombreuses études hydrologiques, topographiques et économiques sont réalisées sur ces territoires, délivrant ainsi énormément d'informations sur les inondations dans ces zones. La cartographie du risque est donnée selon trois scénarios qui estiment l'empreinte de crue et les pertes liées pour des inondations environ décennales, centennales ou millénales. Il est alors possible de récupérer, via les données liées aux cartes, des hauteurs d'eau associées à différentes périodes de retour qui vont permettre de valider la partie sur la théorie des valeurs extrêmes. Les résultats sont affichés dans la **Table 3.4**

Période de retour (en années)	Hauteur d'eau TRI (en mètres)	Hauteur d'eau modèle (en mètres)
[10 ; 30]	3.6	[3.27 ; 4.33]
[100 ; 300]	6.4	[5.73 ; 7.30]
1000	7.3	9.44

TABLE 3.4 : Données du TRI d'Alès (*DREAL, 2013* [60]) comparées aux données modélisées.

Ces résultats permettent de constater que les données obtenues via la théorie des valeurs extrêmes sont globalement en accord avec les données fournies par le TRI, à l'exception de la hauteur d'eau de période de retour 1000 ans. En effet, le modèle sous-estime légèrement les hauteurs d'eau vraiment extrêmes car il est assez difficile de prédire correctement l'extrémité de la queue de distribution de la loi. Cette erreur sur des hauteurs d'eau ayant une période de retour supérieure à 300 ans n'impactera pas ce mémoire puisque les hauteurs d'eau de période de retour de 200 ans maximum sont conservées.

3.1.4 Limites du modèle

Le modèle présenté pour estimer les hauteurs d'eau attendues en 2024 et leur probabilité de survenance possède une limite principale : la profondeur de l'historique de données. En effet, la plage historique récupérée sur laquelle la théorie des valeurs extrêmes est appliquée contient seulement 24 points. Cette « faible » profondeur d'historique, guidée par un compromis entre fiabilité des données et prise en compte des crues majeures, n'est pas totalement représentative de la réalité. Cet historique ne prend par exemple pas en compte la crue de 1958 qui a fait beaucoup de dégâts sur Alès (*Sud Alésa*, 2020 [61]). Cette perte d'informations pourrait justifier l'erreur de prédiction sur la hauteur d'eau millénaire.

Par ailleurs, ce modèle ne prend pas en compte l'état hydrique du sol avant un événement de crue. Or, un même épisode de précipitations peut avoir un impact différent selon que le sol est sec, légèrement humide ou saturé en eau, ce qui influence significativement le ruissellement et donc les hauteurs d'eau atteintes. L'intensité des inondations dépend ainsi des épisodes de pluie précédents, un facteur qui n'est pas directement intégré dans l'approche retenue.

3.2 Cartographie du risque dans la ville d'Alès

L'étape précédente a permis de connaître les hauteurs d'eau attendues en 2024 à la station hydrométrique du Gardon d'Alès à Alès, avec les probabilités de survenance qui y sont liées. L'idée à présent est de savoir si ces hauteurs d'eau vont créer une inondation, et si oui, d'obtenir la perte assurantielle associée. Afin d'obtenir ces informations, un modèle d'empreinte de crue a été développé, traduisant une hauteur d'eau en cartographie des zones inondées par cette hauteur d'eau.

3.2.1 Récupération des données hydrologiques et altimétriques

Plusieurs données sont nécessaires à la mise en place du modèle d'empreinte de crue, notamment un modèle numérique de terrain et la localisation du cours d'eau analysé.

3.2.1.1 Données hydrologiques

La première étape consiste à récupérer des informations sur le Gardon d'Alès, le cours d'eau qui traverse la ville d'Alès et qui est susceptible de créer des inondations en cas de débordement. Les informations proviennent de la base de données Carthage et permettent de connaître la taille du cours d'eau et sa localisation géographique.

Un *GeoDataframe* est ainsi récupéré. Un *GeoDataframe* est une structure de données utilisée en géomatique (analyse spatiale) qui combine des informations géographiques avec des données tabulaires. L'information géographique du cours d'eau est indiquée via une variable de type « *geometry* ».

Ces géométries peuvent être des points, des lignes ou des polygones, et elles définissent la forme et la position des objets dans l'espace. Le tracé du Gardon d'Alès est visualisé en **Figure 3.5**

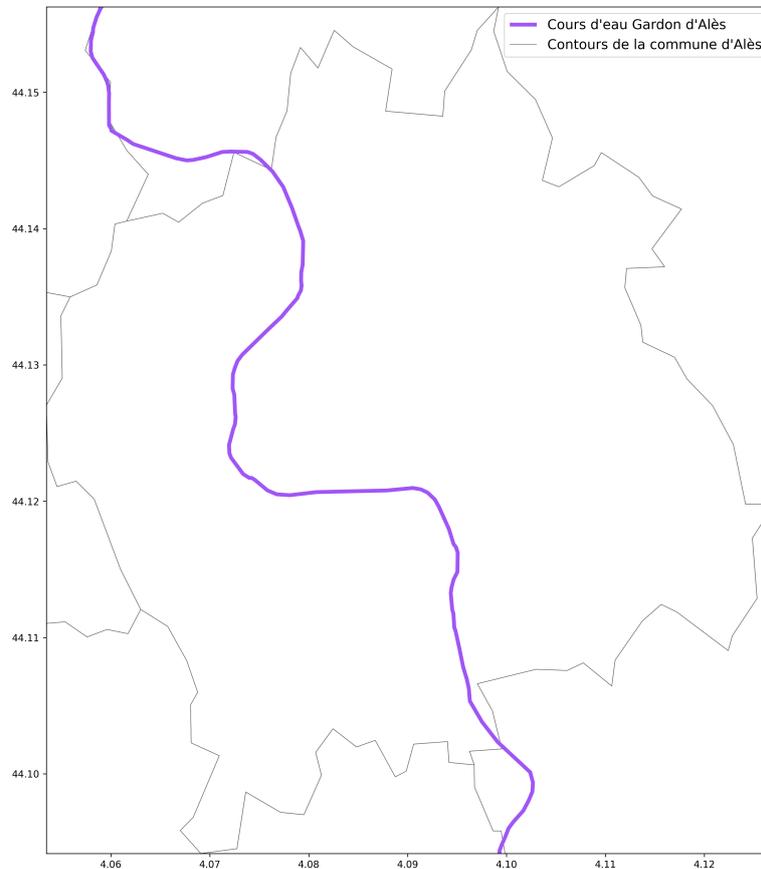


FIGURE 3.5 : Visualisation spatiale du Gardon D'Alès

3.2.1.2 Données altimétriques

Concernant le modèle numérique de terrain (MNT), les données du catalogue RGE Alti 5m ont été récupérées. Cela permet d'obtenir un modèle donnant l'altitude de chaque zone en France à une résolution de 5 mètres par 5 mètres. Après avoir filtré le MNT pour conserver les données liées au département du Gard (30), la ville d'Alès a été ciblée.

Le retraitement du MNT a ensuite été réalisé comme présenté dans le second chapitre, en utilisant les deux modules du logiciel SAGA GIS et en retraitant les zones non-connexes. Cela permet d'obtenir un MNT où l'altitude des pixels du Gardon d'Alès est nulle et l'altitude de chaque pixel de terrain correspond à la différence d'altitude entre ce pixel et le pixel le plus proche du Gardon d'Alès. Ce retraitement facilite la mise en place du modèle d'empreinte de crue car il transforme le MNT en vue d'une utilisation pour cartographier les inondations par débordement.

Le MNT à présent retraité, il est possible de visualiser en **Figure 3.6** les différentes altitudes présentes autour de la rivière pour identifier rapidement les zones considérées comme étant à risque face aux inondations.

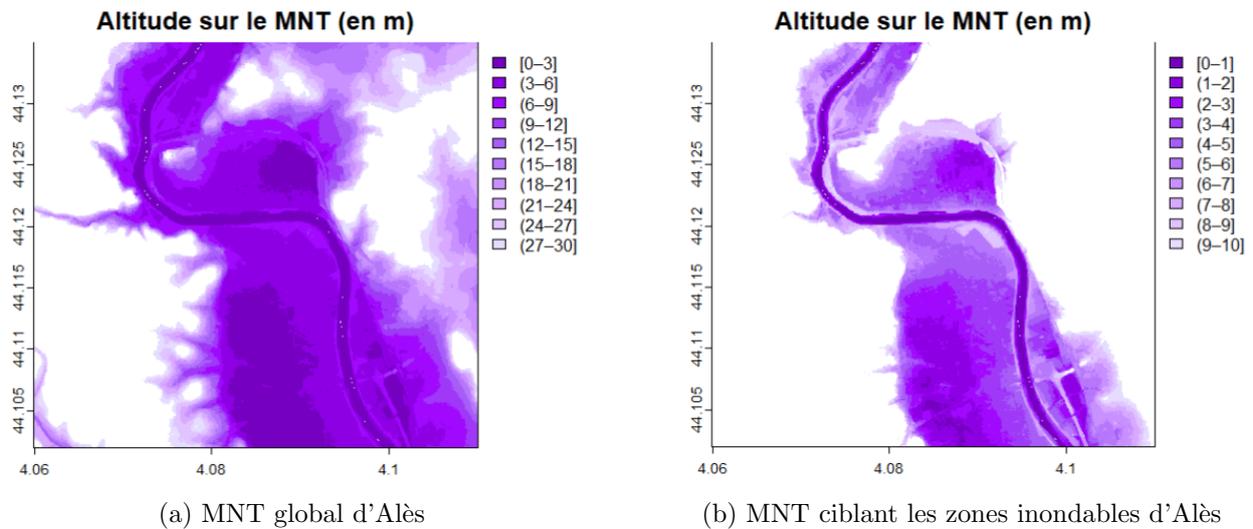


FIGURE 3.6 : Visualisation du modèle numérique de terrain (MNT) d'Alès

Ces graphiques, donnant l'altitude de la zone à une résolution de 5 mètres, facilitent l'authentification des zones potentiellement inondables pour une hauteur d'eau relevée dans le Gardon d'Alès jusqu'à 10 mètres (**Figure 3.6 (b)**).

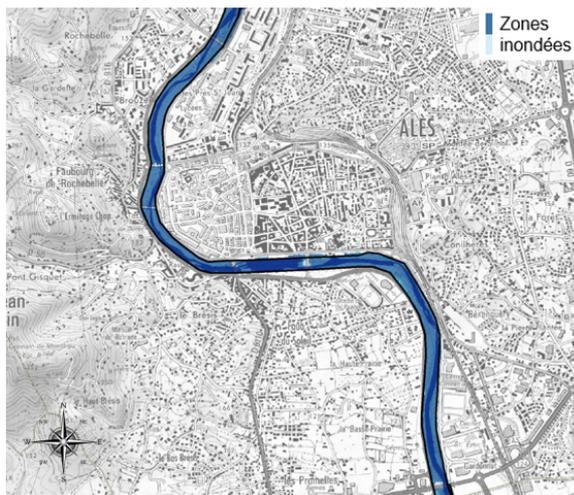
Ces cartes permettent également de constater l'intérêt de l'utilisation des deux modules de SAGA GIS[®]. En effet, l'altitude de la rivière, de l'amont à l'aval, est belle est bien nulle. Cela a deux intérêts :

- Permet de visualiser rapidement les zones inondables, à savoir celles qui ont une altitude faible signifiant une certaine proximité avec la rivière. Ce n'est cependant qu'une première indication puisqu'une zone très éloignée de la rivière peut avoir la même altitude que cette dernière, sans pour autant être à risque.
- C'est également un moyen de préparer le modèle d'empreinte de crue qui sera présenté juste après. En effet, ce modèle prend en entrée une hauteur d'eau et délivre les zones inondées par cette hauteur. En ayant une altitude constante et nulle tout au long de la rivière, il suffit alors d'augmenter l'altitude de cette dernière de la hauteur d'eau voulue en input, et comparer les altitudes des pixels de terrain avec l'altitude ajustée de la rivière.
- Permet également de remarquer les ouvrages de protection contre les inondations par débordement présents dans la zone. En effet, la **Figure 3.6 (b)** indique la présence de digues, prévenant d'une inondation certaine en cas de montée des eaux.

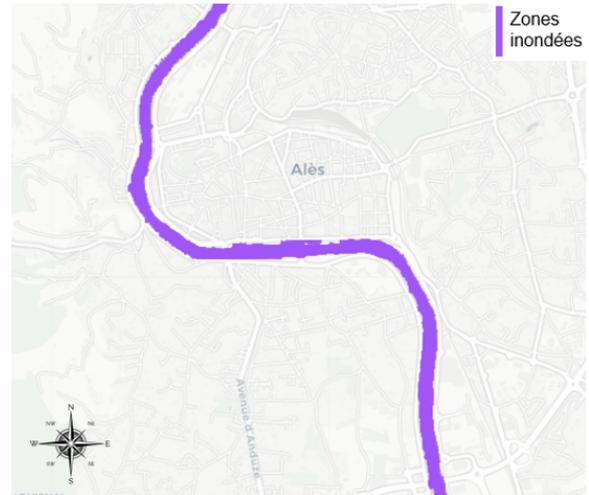
3.2.2 Résultats et validation des empreintes de crue à l'aide des cartes du TRI

Les données sur Alès étant à présent récupérées et retraitées, le modèle d'empreinte de crue peut être utilisé. Sept hauteurs d'eau différentes ont été obtenues grâce à la théorie des valeurs extrêmes, avec les probabilités de survenance de chacune. L'idée à présent est de savoir si ces hauteurs d'eau vont inonder la ville, d'où la mise en place du modèle d'empreinte de crue.

L'objectif est d'obtenir sept empreintes différentes, correspondant aux sept hauteurs d'eau définies. Avant de visualiser les résultats, il faut s'assurer que le modèle d'empreinte de crue est cohérent. Pour cela, les empreintes obtenues seront comparées avec les cartes du TRI, définies selon trois hauteurs d'eau mentionnées dans la [table 3.4](#).

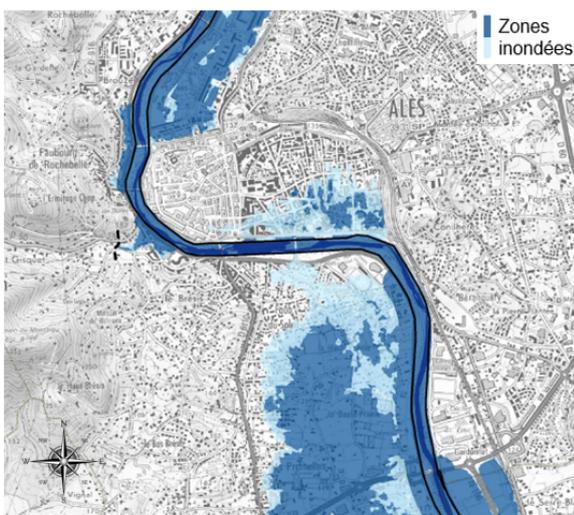


(a) Empreinte du TRI - Scénario fréquent

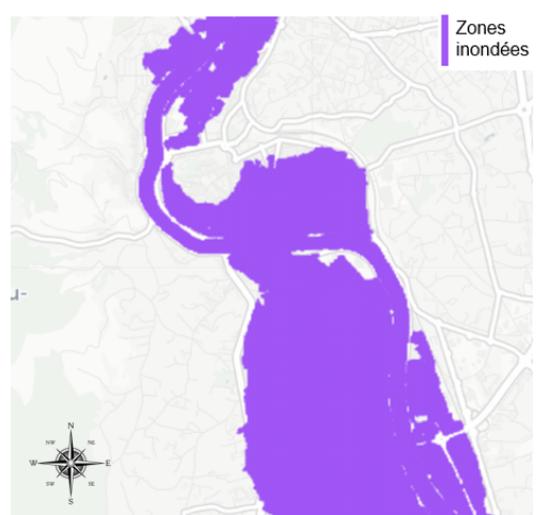


(b) Empreinte modélisation - HE = 3.6m

FIGURE 3.7 : Validation de la modélisation à l'aide du scénario fréquent du TRI

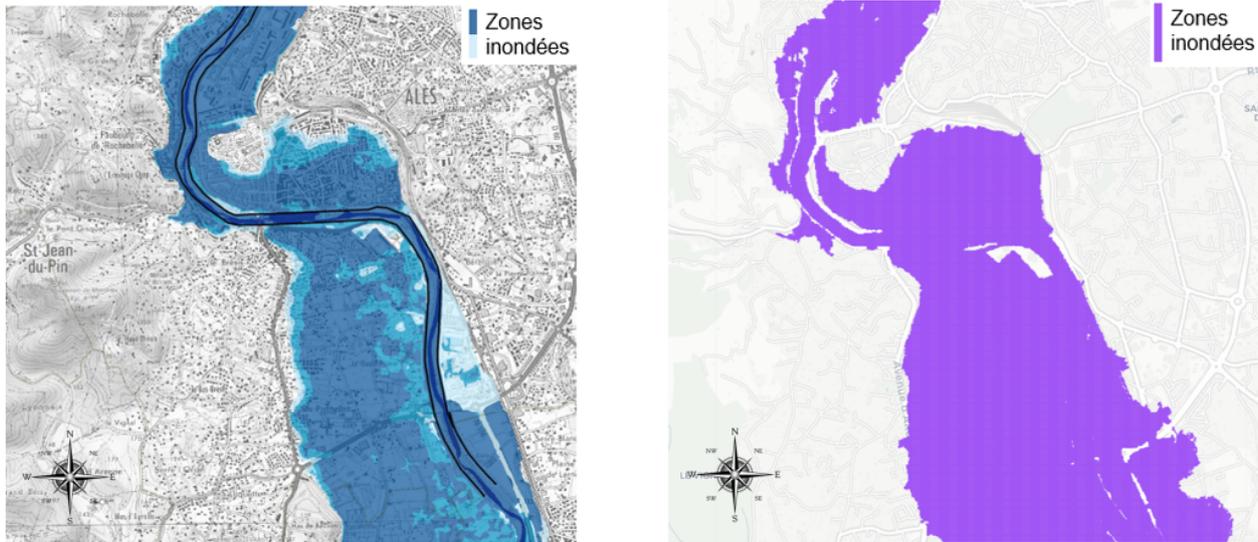


(a) Empreinte du TRI - Scénario moyen



(b) Empreinte modélisation - HE = 6.4m

FIGURE 3.8 : Validation de la modélisation à l'aide du scénario moyen du TRI



(a) Empreinte du TRI - Scénario extrême

(b) Empreinte modélisation - HE = 7.3m

FIGURE 3.9 : Validation de la modélisation à l'aide du scénario extrême du TRI

Les cartes ([Figure 3.7](#), [Figure 3.8](#), [Figure 3.9](#)) produites par le modèle d'empreinte de crue présentent une correspondance visuelle globalement satisfaisante avec les cartes du TRI pour une même hauteur d'eau. Cependant, une simple validation visuelle reste insuffisante. Les métriques décrites dans la [section 2.2.3](#) offrent une évaluation quantitative plus rigoureuse. En convertissant les cartes du TRI en raster de 5 mètres de résolution, il devient possible de calculer ces métriques de manière précise et efficace. Les résultats sont présentés dans la [Table 3.5](#) suivante.

Métrique / Scénario TRI	Fréquent	Moyen	Extrême
<i>Recall</i>	0.88	NA	0.98
<i>Precision</i>	0.99	NA	0.91
<i>F1-score</i>	0.93	NA	0.95

TABLE 3.5 : Résultats des métriques validant le modèle d'empreinte de crue

La carte du TRI associée au scénario moyen n'étant pas disponible en *Open Data*, une validation quantitative du modèle pour ce scénario n'a pas pu être réalisée. Toutefois, les évaluations effectuées pour les scénarios fréquent et rare montrent des performances satisfaisantes. En particulier, avec des *F1-scores* supérieurs à 0.90, le modèle d'empreinte de crue développé peut être considéré comme fiable.

3.2.3 Conclusion sur le risque actuel et limites du modèle

Le modèle d'empreinte de crue à présent validé, il peut être utilisé pour déterminer les zones inondées par les 7 hauteurs d'eau définies dans la [Table 3.3](#). Les différentes empreintes sont disponibles en annexes. Il est maintenant possible de visualiser en [Table 3.6](#) jusqu'à quelle hauteur d'eau les habitants sont exemptés d'une inondation.

Période de retour	Hauteur d'eau	Expositions touchées ?
2	1.95	Non
5	2.69	Non
10	3.27	Non
20	3.92	Non
50	4.89	Oui
100	5.73	Oui
200	6.69	Oui

TABLE 3.6 : Analyse du risque actuel d'inondation par débordement

Plusieurs observations peuvent être faites à partir de ces résultats. Tout d'abord, la commune d'Alès semble peu exposée aujourd'hui, une crue de période de retour 20 ans n'engendrant aucun dégât. Cela s'explique par les mesures de protection mises en place après les inondations dévastatrices de 2002, notamment l'installation de digues. La comparaison avec les cartes du TRI révèle cependant certaines limites du modèle : il tend à surestimer la zone inondée, comme observé dans le scénario moyen.

Toutefois, les zones inondées sont ici déterminées uniquement par la différence d'altitude entre les zones urbaines et la rivière, alors que les cartes du TRI intègrent d'autres facteurs comme la qualité du sol ou la végétation. Il convient également de noter que le modèle ne prend pas en compte la dynamique temporelle des inondations, or un débordement survenant peu après un premier événement pourrait avoir un impact financier accru, les expositions assurables ne se reconstituant pas immédiatement.

3.3 Caractéristiques des habitations exposées au risque

Le modèle d'empreinte de crue, après sa définition et validation, permet de cartographier les zones inondées en fonction des hauteurs d'eau mesurées à la station hydrométrique du Gardon d'Alès. L'étape suivante consiste à estimer les pertes assurantielles associées à ces différentes empreintes. En effet, chaque habitation située dans une zone inondée se voit exposée à une quantité d'eau déterminée par le pixel correspondant à sa localisation. Cette eau entraîne des dommages au bâti et au contenu, générant ainsi des pertes couvertes par les garanties des contrats MRH, les sommes assurées étant celles considérées dans le cadre de cette étude. En l'absence de portefeuille d'assureur, il a fallu composer avec des données libres d'accès pour composer une base d'habitations dans la zone d'étude d'Alès.

3.3.1 Localisation des expositions (base DPE)

Les premières données utilisées sont celles liées aux DPE, qui ont été présentés en détail dans le chapitre précédent. Ces données permettent d'obtenir une liste d'habitations à Alès.

Trois bases de données ont été collectées : la première regroupant les informations sur les diagnostics de performance énergétique (DPE) avant 2021, la deuxième sur ceux effectués après 2021 sur les logements anciens, et la troisième concernant les DPE réalisés après 2021 sur les logements neufs. Ces bases comptent plusieurs millions de lignes et des centaines de variables couvrant l'ensemble des DPE au niveau national. Avant l'extraction des données au format CSV depuis la plateforme dédiée (*Data Gouv, 2024* [49]), un filtre a été appliqué pour ne conserver que les variables pertinentes relatives à la commune d'Alès et présentées en **Table 3.7**.

Nom	Description
Coordonnée_cartographique_X_(BAN)	Longitude en coordonnées Lambert 93
Coordonnée_cartographique_Y_(BAN)	Latitude en coordonnées Lambert 93
Date_établissement_DPE	Date de réalisation du DPE
Type_bâtiment	Permet de spécifier le type du bâtiment sur lequel le DPE a été effectué
Surface_habitable_logement	Donne la surface du logement pour tous les types de bâtiment excepté les immeubles
N°_étage_appartement	Renseigne sur le numéro de l'étage pour les appartements, ou précise « RDC » pour rez-de-chaussée
Surface_habitable_immeuble	Information sur la surface de l'immeuble
Nombre_appartement	Renseigne sur le nombre d'appartements présents dans un immeuble

TABLE 3.7 : Liste des variables récupérées dans la base des DPE

Les données récupérées, la première étape consiste à créer une variable **POINT** qui permet de géolocaliser les bâtiments en tant qu'« objets » géographiques. Cela facilite l'analyse spatiale, telle que la visualisation des bâtiments sur une carte, le calcul de distances, l'intégration avec d'autres données géographiques, et l'exécution de requêtes géospatiales pour mieux comprendre la répartition spatiale des données. La variable utilise le couple de variables (longitude, latitude) pour créer un point géographique. Plusieurs retraitements sont ensuite réalisés.

- Suppression de toutes les lignes dont le type de bâtiment n'est pas « immeuble », « appartement » ou « maison ». L'étude vise à créer une base d'expositions pouvant s'apparenter à un portefeuille MRH de particuliers, les lignes qui concernent les commerces ou les logements sociaux ont donc été ôtées.
- Suppression des habitations en doublon. En effet, une seule et même habitation a pu réaliser plusieurs DPE, créant ainsi plusieurs lignes dans la base. L'unicité des habitations est assurée en conservant la ligne avec la date de réalisation du DPE la plus récente. Cette étape a permis de **réduire de 54 % la base de données**.
- Chaque immeuble de la base est transformé en un appartement au rez-de-chaussée. La superficie de ce nouvel appartement est obtenue en divisant la surface de l'immeuble par le nombre d'appartements dans cet immeuble.
- Les habitations dont la superficie est strictement inférieure à 9 m² ont été supprimées en respect de la réglementation française (*Service Public, 2024* [62]).

Après tous ces retraitements, un ensemble d'expositions situées dans la commune d'Alès est obtenu. Ce dernier est ainsi composé de 2 833 maisons (soit 52 % de la base) et de 2 594 appartements. Il est à présent possible de visualiser en **Figure 3.10** ces expositions grâce à la variable **POINT** définie précédemment.

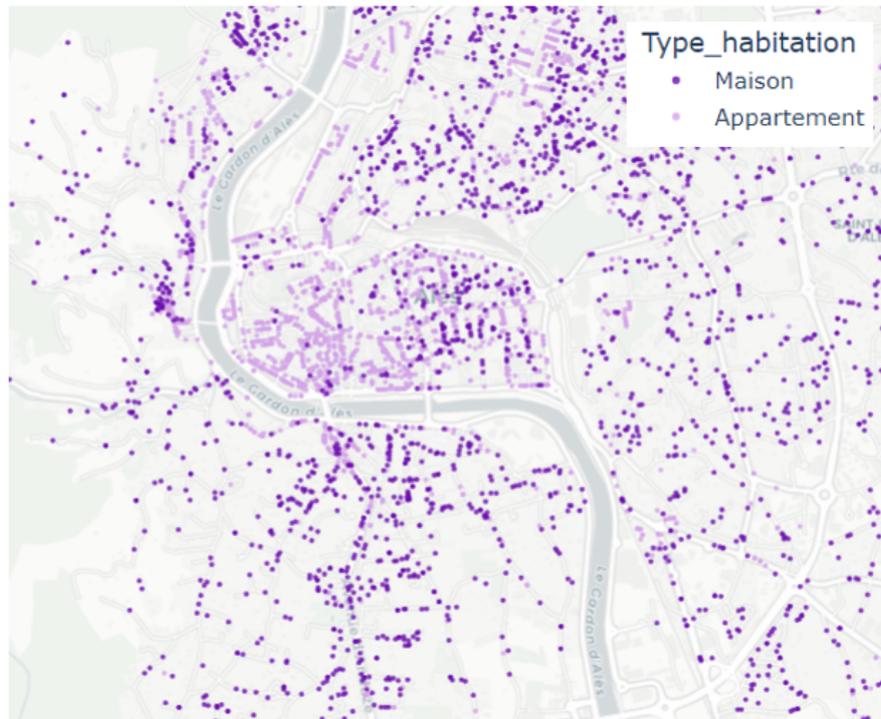
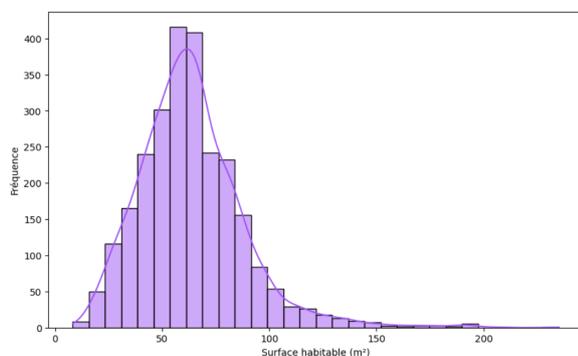
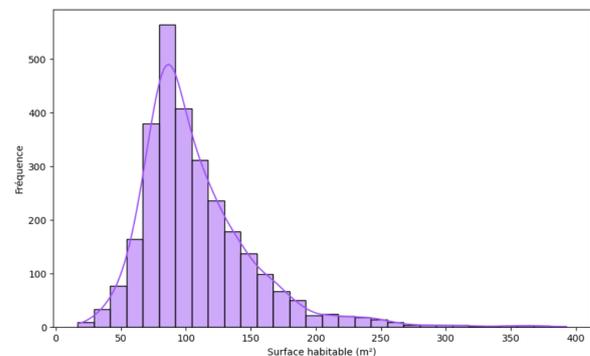


FIGURE 3.10 : Visualisation des expositions obtenues via la base des DPE

À cette étape, les informations récupérées sur les expositions concernent uniquement le type de bien, sa localisation et la superficie associée. Quelques statistiques peuvent ainsi être observées sur ces variables, avec notamment la distribution de la superficie selon le type de bien (**Figure 3.11**).



(a) Distribution de la superficie des appartements



(b) Distribution de la superficie des maisons

FIGURE 3.11 : Analyse de la distribution des surfaces par type de bien

3.3.2 Estimation du prix au m² à Alès (base DVF+)

La base d'expositions caractérisées par une localisation, un type (maison ou appartement) et une superficie, a été définie. Le prochain objectif consiste à estimer le prix de chacune des habitations, qui sera apparenté à la somme assurée du bâti du contrat. Pour estimer cela, la base DVF+ a été traitée afin d'estimer le prix au m² par commune et par type de bien.

La base DVF+ renseigne la valeur foncière de nombreuses habitations en France, mais s'avère moins volumineuse que la base des DPE. De ce fait, cette base est uniquement utilisée pour calculer un prix au m² qui pourra être couplé avec les résultats du traitement de la base DPE en utilisant la superficie des expositions obtenues.

Au même titre que la base des DPE, la base DVF+ propose de nombreuses informations sur les expositions. Des centaines de variables sur la localisation, le type de bien, le nombre de pièces, l'année de construction ou encore sur la valeur foncière sont proposées. Parmi ces variables, seulement quelques-unes sont conservées et présentées dans la **Table 3.8**.

Nom	Description
datemut	Date à laquelle l'estimation de la valeur foncière a été réalisée
l.codinsee	Renseigne le code INSEE de l'exposition
valeurfonc	Estimation de la valeur foncière du bien
sbati	Renseigne sur la surface du bien considéré
libtypbien	Donne le type du bien considéré (maison, appartement, dépendance, terrain...)
geometry	Renseigne sur la localisation du bien avec un objet de type MULTIPOLYGON permettant de visualiser spatialement le bien

TABLE 3.8 : Liste des variables récupérées dans la base des DVF+

Avant d'être exportées, ces variables sont filtrées afin de réduire la taille de la base et de récupérer uniquement les informations sur le département du Gard (30). Après ce filtre, 177 427 lignes sont extraites, en conservant uniquement les variables présentées ci-dessus, et peuvent être retraitées. Voici les retraitements majeurs réalisés sur la base :

- Suppression de toutes les lignes dont la valeur foncière n'est pas renseignée ou considérée comme aberrante (égale à 10 € par exemple pour une maison de 150 m²). Cette étape a engendré la suppression de 198 lignes (soit 0,1 % de la base).
- Filtration selon le type de bien. En effet, uniquement les lignes concernant les maisons et les appartements sont conservées. En découle une suppression de 40 % de la base résultante, car beaucoup de lignes concernent des terrains viticoles ou forestiers.
- Suppression des expositions en doublon en conservant uniquement la ligne avec la date d'estimation de la valeur foncière la plus récente. Encore une fois, 40 % de la base résultante est conservée.
- Actualisation des valeurs foncières de chaque habitation en utilisant l'indicateur des coûts de construction fourni par la Fédération Française du Bâtiment.

Ces quelques retraitements ont été réalisés sur la base concernant l'ensemble des expositions du Gard. L'étude portant sur Alès, un filtre est réalisé sur la variable l.codinsee afin de conserver uniquement les lignes sur la commune d'Alès (Code Insee 30 007). La base finale est ainsi composée de 2 483 lignes, toutes concernant la commune ciblée qui permettront de calculer le prix au m² dans cette dernière. La distribution des valeurs foncières est présentée en **Figure 3.12**.

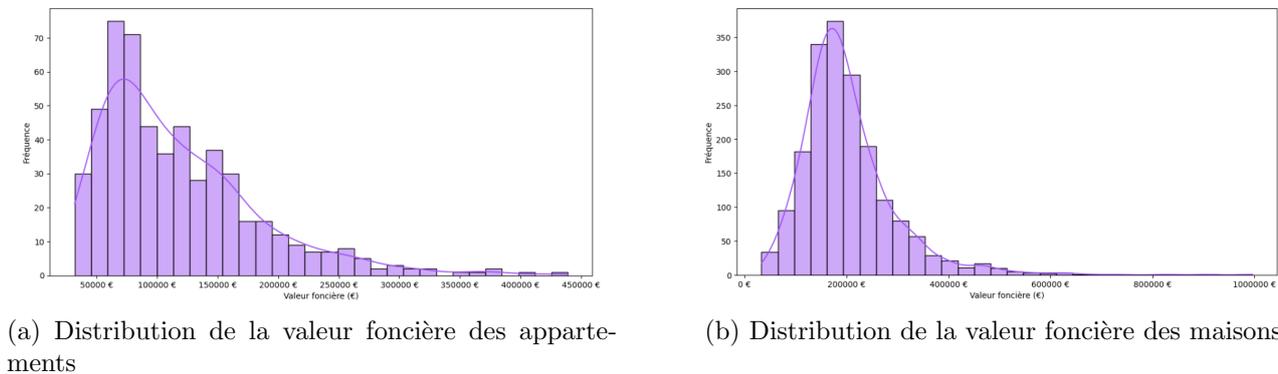


FIGURE 3.12 : Analyse de la distribution des valeurs foncières par type de bien

Les informations sur les valeurs foncières des biens permettent de calculer le prix au m² dans la commune d'Alès pour un appartement ou une maison via la formule suivante.

$$\text{Prix moyen au m}^2 \text{ pour un type de bien } i = \frac{1}{n_i} \sum_{k=1}^{n_i} \frac{\text{Valeur Foncière}_k}{\text{Superficie}_k}, \quad (3.1)$$

où n_i est le nombre de biens de type i . Le traitement de la base DVF+ aboutit aux résultats suivants.

Type de bien	Prix au m ² estimé
Maison	2 116 €
Appartement	1 423 €

TABLE 3.9 : Estimation du prix au m² par type de bien à Alès

3.3.3 Calcul du prix des habitations

Avant de visualiser les résultats finaux sur la base d'expositions obtenue, il semble important de valider les estimations du prix au m². Pour cela, certains sites réputés pour fournir ce type d'informations sont retenus (*SeLoger.com*, 2024 [63] et *MeilleursAgents.com*, 2024 [64]).

Type de bien	Site 1	Site 2
Maison	2 179 €	2 121 €
Appartement	1 592 €	1 603 €

TABLE 3.10 : Prix au m² moyen estimés par deux sites marchands

Les résultats de la modélisation (Table 3.9) présentent une erreur relative moyenne de **10.8 %** sur les appartements et de **1.3 %** sur les maisons, par rapport aux estimations des deux sites (Table 3.10). La principale raison de cet écart est que toutes les habitations de la commune d'Alès ne sont pas présentes dans la base finale après traitement des bases DPE et DVF+. L'estimation des prix au m² par type de bien a donc été réalisée sur un échantillon d'habitations, contrairement aux sites marchands qui prennent en compte toutes les expositions de la zone, notamment les plus récentes.

3.3.4 Estimation des sommes assurées

La base d'expositions est maintenant créée et chacune des habitations de cette dernière est caractérisée par une localisation, un type et un prix estimé. Il ne reste plus qu'à estimer les sommes assurées (contenu et bâti) de ces expositions pour disposer d'une base complète permettant de quantifier le risque d'inondation.

3.3.4.1 Sommes assurées - Bâti

Pour rappel, la somme assurée du bâti représente la valeur estimée de reconstruction ou de réparation du bâtiment en cas de sinistre, une inondation dans notre cas. Elle couvre les dommages matériels subis par les structures physiques de l'habitation, y compris les murs, toitures, fenêtres, et autres éléments fixes. En pratique, cette somme dépend de plusieurs facteurs : superficie, année de construction, type de construction, matériaux utilisés, présence d'ouvrage de protection, etc.

Dans cette étude, la somme assurée du bâti sera caractérisée par le prix de l'exposition calculé via les bases DPE et DVF+.

$$\text{Somme assurée bâti} = \text{Superficie} \times \text{Prix au m}^2. \quad (3.2)$$

À l'aide du traitement des bases DPE et DVF+ présenté dans la section précédente, la somme assurée du bâti de chacune de nos expositions peut être calculée et présentée en **Figure 3.13**.

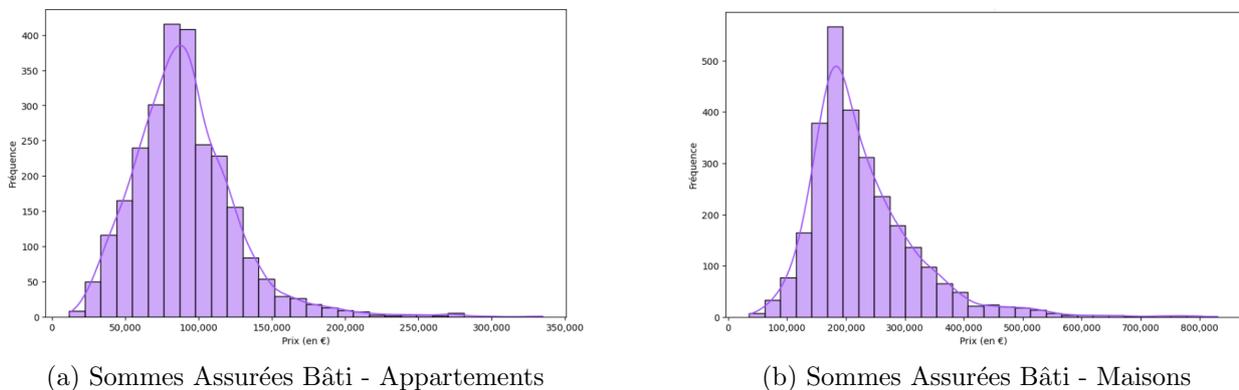


FIGURE 3.13 : Analyse de la distribution des sommes assurées du bâti de notre base

La moyenne des sommes assurées du bâti est de 90 546 € pour les appartements et de 228 239 € pour les maisons.

3.3.4.2 Sommes assurées - Contenu

Pour rappel, la somme assurée du contenu correspond à la valeur des biens mobiliers et des objets personnels présents dans l'habitation. Elle couvre les dommages ou la perte des meubles, appareils électroniques, vêtements, objets de valeur, et autres effets personnels en cas de sinistre. Cette somme est estimée en fonction de la valeur de remplacement des biens à neuf ou d'occasion, permettant ainsi au propriétaire ou au locataire de racheter des biens équivalents en cas de perte ou de détérioration.

La méthodologie utilisée pour estimer les sommes assurées du contenu est détaillée dans le chapitre précédent, uniquement les résultats vont alors être présentés. Concernant la commune d'Alès, zone d'étude de la modélisation, la problématique de l'estimation de la somme assurée du contenu est reliée au 1^{er} cas d'étude de la méthodologie présentée en **section 2.3.4**. En effet, plusieurs lignes de la base interne contiennent des informations sur des expositions de cette commune. Le ratio de sommes assurées a pu être calculé afin d'estimer la proportion de la somme assurée du contenu par rapport à celle du bâti, une donnée déjà estimée.

Type de bien	Ratio moyen des sommes assurées (en %)
Maison	3.6
Appartement	15.2

TABLE 3.11 : Ratio moyen des sommes assurées par type d'habitation à Alès

Les résultats de la **Table 3.11** fournissent la dernière information nécessaire à la construction de la base d'exposition finale, à savoir la somme assurée du contenu. En utilisant les ratios de sommes assurées présentés ci-dessus ainsi que la moyenne des sommes assurées du bâti déterminée précédemment pour chaque type de bien, la somme assurée moyenne du contenu est estimée à 13 797 € pour les appartements et à 8 312 € pour les maisons. Les distributions sont affichées en **Figure 3.14**

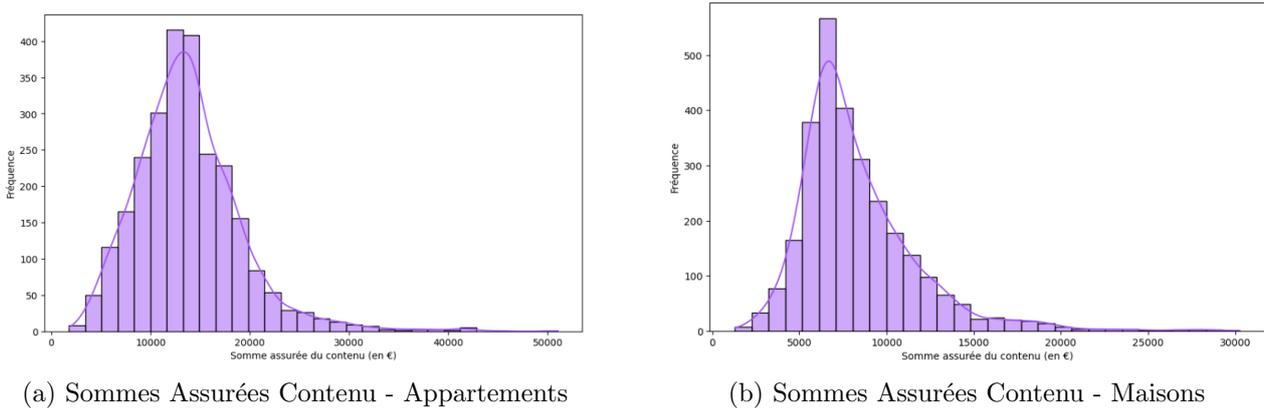


FIGURE 3.14 : Analyse de la distribution des sommes assurées du contenu de la base

3.4 Analyse de l'impact du changement climatique

À cette étape de la modélisation, toutes les informations utiles sur chaque exposition sont connues. Le modèle d'empreinte de crue est validé et permet de connaître les zones inondées pour une certaine hauteur d'eau relevée à la station hydrométrique d'Alès, en spécifiant la quantité d'eau présente dans chaque habitation située dans la zone inondée. Tous les éléments sont alors réunis pour analyser l'impact du changement climatique en comparant le risque en 2024 et en 2050.

3.4.1 Quantification du risque en 2024

Le calcul de l'AAL passe avant tout par l'expression de la perte assurantielle associée à chacune des sept empreintes de crue modélisées en 2024. Pour chaque empreinte, il est possible de connaître la liste des habitations inondées, ainsi que la quantité d'eau présente dans le bâtiment. Ces informations

permettent de calculer, pour chaque habitation, la perte assurantielle liée en utilisant la courbe de vulnérabilité présentée en [section 2.3.5](#).

Cette courbe estime le taux de destruction (du contenu et du bâti) selon une hauteur d'eau dans le bâtiment. Ce taux est appliqué aux sommes assurées estimées dans les parties précédentes. Il ne reste plus qu'à faire la somme des pertes pour chaque habitation touchée par une crue pour connaître la perte assurantielle liée à cette dernière. La [Table 3.12](#) est ainsi obtenue.

Période de retour (années)	Hauteur d'eau (mètres)	Nombre d'expositions touchées	Pertes assurantielles (euros)
2	1.95	0	0
5	2.69	0	0
10	3.27	0	0
20	3.92	0	0
50	4.89	259	25 963 086
100	5.73	1 246	87 757 923
200	6.69	1 476	129 447 332

TABLE 3.12 : Estimation des pertes associées à chaque crue en 2024

Le montant des pertes à présent connu, les résultats de la théorie des valeurs extrêmes sont utilisés pour obtenir la perte probable attendue en 2024, caractérisée par l'AAL 2024. En effet, la probabilité de survenance de chaque crue est connue via la période de retour de chacune. Pour rappel, une inondation ayant une période de retour de 10 ans a statistiquement 10 % de chance de se produire dans l'année à venir (sachant que la période historique retenue est 2000-2023).

Connaissant ces informations, le calcul de l'AAL 2024 est immédiat et est donné en [Table 3.13](#).

Période de retour (années)	Hauteur d'eau (mètres)	Pertes assurantielles (euros)	Contribution à l'AAL 2024 (euros)
2	1.95	0	0
5	2.69	0	0
10	3.27	0	0
20	3.92	0	0
50	4.89	25 963 086	519 262
100	5.73	87 757 923	877 579
200	6.69	129 447 332	647 237
Total			2 044 078

TABLE 3.13 : Obtention de l'AAL 2024

Les valeurs de la colonne « Contribution à l'AAL 2024 » sont obtenues via la formule suivante.

$$\text{Contribution AAL 2024} = \frac{\text{Pertes assurantielles}}{\text{Période de retour}}. \quad (3.3)$$

La sinistralité attendue en 2024 liée aux inondations par débordement dans la commune d'Alès est de **2 044 078 €**.

3.4.2 Quantification du risque en 2050

Le risque d'inondation par débordement a été analysé pour l'année à venir, et l'utilisation d'une base d'expositions à Alès a permis de quantifier ce risque via le calcul de l'AAL. L'objectif majeur de ce présent mémoire étant d'analyser l'impact du changement climatique sur les inondations par débordement, une quantification du risque en 2050 doit être réalisée.

Pour cela, il est nécessaire de caractériser le péril modélisé en 2050 en estimant les hauteurs d'eau attendues cette même année, puis de quantifier le risque lié sur la base d'expositions. L'impact du changement climatique est analysé pour un scénario central « toutes choses égales par ailleurs », c'est-à-dire sans prendre en compte les variations du contexte économique et démographique. Ces derniers éléments seront évoqués dans les sensibilités du modèle, en ouvrant sur les conséquences amenant les organismes d'assurance à prendre des décisions, en termes de souscription et de tarification notamment.

Pour obtenir la valeur de l'AAL 2050, les hauteurs d'eau attendues et les probabilités de survenance associées doivent être estimées cette même année. L'objectif est d'obtenir la **Table 3.3**, mais cette fois avec une vision en 2050. Une fois ces hauteurs d'eau obtenues, il sera possible d'appliquer exactement la même suite d'étapes que celle effectuée sur les hauteurs d'eau attendues en 2024 : empreintes de crue, estimation des pertes assurantielles et obtention de l'AAL.

Pour obtenir les hauteurs d'eau en 2050, les données de projections climatiques présentées en **section 2.4.4** sont récupérées. Pour rappel, ce jeu de données climatiques permet d'obtenir, par bassin-versant français, le pourcentage d'augmentation des débits d'eau attendues en 2050 pour les périodes de retour de 2, 5, 10 et 50 ans. La projection des débits est répertoriée dans la **Table 3.14**.

Période de retour (en années)	Évolution du débit d'eau entre 2024 et 2050 (en %)
2	14.5
5	21.1
10	23.7
50	27.4

TABLE 3.14 : Projection de l'évolution des débits entre 2024 et 2050

Il est important de rappeler que les projections climatiques fournissent une évolution des **débits** pour certaines périodes de retour, à horizon 2050. Or, cette présente étude s'établit sur des **hauteurs d'eau**. Comme évoqué dans le chapitre précédent, il est possible de transformer un débit en une hauteur d'eau grâce à une courbe de tarage qui est propre à chaque station hydrométrique. La courbe propre à la station du Gardon d'Alès est visible en **Figure 3.15**.

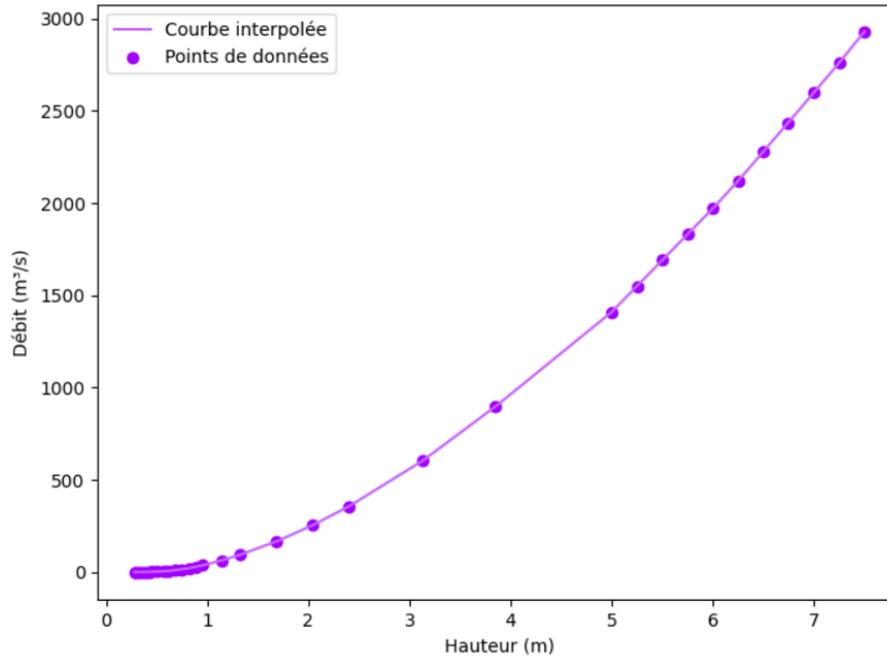


FIGURE 3.15 : Courbe de tarage de la station Gardon d'Alès à Alès

De cette courbe et des résultats de la **Table 3.13**, il est alors possible de calculer les débits attendus en 2050 à la station hydrométrique ayant pour période de retour 2, 5, 10 ou 50 ans.

Période de retour (en années)	Hauteur d'eau en 2024 (en m)	Débit en 2024 (en m ³ /s)	Débit en 2050 (en m ³ /s)	Hauteur d'eau 2050 (en m)
2	1.95	230.0	263.4	2.07
5	2.69	453.2	548.7	2.97
10	3.27	661.3	818.3	3.66
20	3.92	925.6	?	?
50	4.89	1 358.3	1 730.9	4.51
100	5.73	1 818.0	?	?
200	6.69	2 398.7	?	?

TABLE 3.15 : Estimation non exhaustive des hauteurs d'eau en 2050

Plusieurs données de la **Table 3.15** apparaissent comme manquantes puisque les projections climatiques ne fournissent pas l'évolution des débits à horizon 2050 pour les périodes de retour de 20, 100 et 200 ans. Ces données sont obtenues en utilisant la relation linéaire qui existe entre la hauteur d'eau et le logarithme de la période de retour de cette dernière.

L'interpolation linéaire est réalisée sur les 4 points dont la valeur de la hauteur d'eau en 2050 est connue grâce aux projections climatiques et à la courbe de tarage.

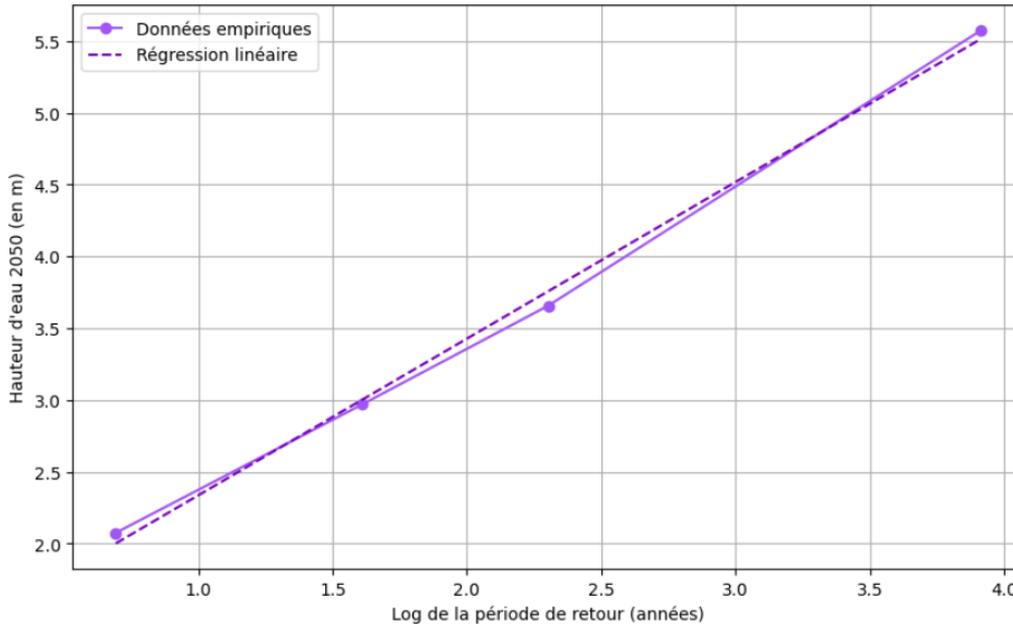


FIGURE 3.16 : Régression linéaire permettant d'estimer les hauteurs d'eau en 2050

La qualité de la régression linéaire réalisée en **Figure 3.16** est caractérisée par un R^2 de 0.997. Les paramètres (pente et ordonnée à l'origine) sont récupérés et permettent d'estimer n'importe quelle hauteur d'eau attendue en 2050 en fonction de sa période de retour estimée. Il est ainsi possible de compléter la **Table 3.15** et d'obtenir tous les résultats nécessaires à l'étude du risque d'inondation en 2050.

Période de retour (en années)	Hauteur d'eau en 2024 (en m)	Débit en 2024 (en m^3/s)	Débit en 2050 (en m^3/s)	Hauteur d'eau 2050 (en m)
2	1.95	230.0	263.4	2.07
5	2.69	453.2	548.7	2.97
10	3.27	661.3	818.3	3.66
20	3.92	925.6	1 193.1	4.51
50	4.89	1 358.3	1 730.9	5.57
100	5.73	1 818.0	2 132.8	6.27
200	6.69	2 398.7	2 616.8	7.03

TABLE 3.16 : Estimation exhaustive des hauteurs d'eau en 2050

Les résultats de la **Table 3.16** amènent une remarque importante sur l'impact du changement climatique sur la fréquence des événements rares. En effet, le tableau ci-dessus démontre qu'une crue considérée comme centennale aujourd'hui se rapproche davantage d'une crue cinquantennale en 2050. Ce glissement des périodes de retour témoigne de l'influence du changement climatique sur le risque d'inondation par débordement. Cependant, ce tableau permet de constater l'impact sur la fréquence et non sur la sévérité, bien que l'augmentation des hauteurs d'eau globales offre une première intuition. L'objectif est alors d'analyser l'évolution de la sinistralité sur la zone en analysant l'AAL 2050 et en le comparant avec celui obtenu en 2024.

Les hauteurs d'eau attendues en 2050 étant connues, il suffit de tracer les sept empreintes de crue qui y sont liées et de calculer les pertes assurantielles associées.

Période de retour (années)	Hauteur d'eau (mètres)	Nombre d'expositions touchées	Pertes assurantielles (euros)
2	2.07	0	0
5	2.97	0	0
10	3.66	0	0
20	4.51	220	21 253 994
50	5.57	1 187	80 102 656
100	6.27	1 399	111 721 601
200	7.03	1 577	144 041 742

TABLE 3.17 : Estimation des pertes associées à chaque crue en 2050

Premier constat concernant la **Table 3.17** : une hauteur d'eau vicennale (période de retour de 20 ans) causera une inondation en 2050 alors que cela n'était pas le cas pour une hauteur d'eau aussi probable en 2024. Une nette augmentation de l'AAL sera alors attendue en conséquence.

Afin de vérifier cette hypothèse, l'AAL 2050 est calculé en utilisant exactement la même méthodologie que celle présentée pour le calcul de l'AAL 2024. Sa valeur sera alors comparée avec celle de 2024 pour argumenter sur les impacts du changement climatique.

Période de retour (années)	Hauteur d'eau (mètres)	Pertes assurantielles (euros)	Contribution à l'AAL 2050 (euros)
2	2.07	0	0
5	2.97	0	0
10	3.66	0	0
20	4.51	21 253 994	1 062 700
50	5.57	80 102 656	1 602 053
100	6.27	111 721 601	1 117 216
200	7.03	144 041 742	720 209
Total			4 502 178

TABLE 3.18 : Obtention de l'AAL 2050

La **Table 3.18** stipule que l'AAL 2050 serait de **4 502 178 €**. L'AAL 2024 était de 2 044 078 €. Le constat de l'étude proposée dans ce mémoire affirme qu'à horizon 2050, et cela, « toutes choses égales par ailleurs », la sinistralité liée aux inondations par débordement va augmenter de **120 %** dans la commune d'Alès.

3.4.3 Utilisation des résultats par un organisme d'assurance

Le résultat final de cette étude est difficilement comparable à celui d'autres travaux similaires, en raison des hypothèses spécifiques adoptées dans ce mémoire. Actuellement, le livre blanc de Covéa constitue la source de référence la plus fiable et la plus proche de la démarche employée ici. La section dédiée aux inondations par débordement y anticipe une augmentation de la sinistralité de 100 % à 150 % dans le département du Gard d'ici 2050. Toutefois, ces valeurs doivent être interprétées avec prudence, car les hypothèses de ce mémoire diffèrent de celles du livre blanc comme l'explique l'**Annexe C**. Par exemple, Covéa intègre une projection de l'évolution démographique, un facteur non pris en compte dans cette étude. Néanmoins, il est pertinent de souligner que la variation observée ici reste cohérente avec des résultats robustes.

Au-delà de la simple comparaison des résultats, l'objectif est de comprendre comment un assureur pourrait exploiter ces informations pour orienter ses décisions à court, moyen et long terme. L'augmentation projetée de 120 % de la sinistralité d'ici 2050 constitue un indicateur clé du risque à long terme. À court terme, les résultats de cette étude permettent d'identifier les habitations situées dans des zones considérées comme à faible risque en 2024, mais qui basculent vers une zone à risque d'ici 2050. Cela soulève des questions importantes sur l'ajustement des primes pour ces zones, ou même la nécessité de réévaluer la politique de souscription, avec une possible réduction de l'exposition dans ces secteurs.

À moyen terme, ces projections offrent des indications précieuses pour adapter les stratégies de gestion du portefeuille, en réévaluant l'allocation des capitaux face à la redistribution géographique du risque. De plus, cela pourrait encourager l'intégration de critères environnementaux plus stricts dans les décisions de souscription, notamment en privilégiant des constructions plus résilientes face aux inondations. En fin de compte, les résultats de cette modélisation fournissent des orientations sur la manière dont le risque devra être géré au fil des décennies, en tenant compte des évolutions climatiques, pour garantir la stabilité financière de l'assureur tout en contribuant à la résilience des territoires exposés.

3.5 Étude des sensibilités du modèle

Après avoir décrit les étapes clé de la modélisation permettant **d'analyser l'impact du changement climatique sur les inondations par débordement**, il est fondamental d'appliquer des sensibilités sur les hypothèses majeures qui ont permis de mettre en place la modélisation.

L'intérêt de réaliser des analyses de sensibilité dans un mémoire, notamment d'actuariat, est multiple. Tout d'abord, ces analyses permettent de tester la robustesse des résultats obtenus en variant les hypothèses de base. En modifiant les paramètres clé du modèle, tels que les caractéristiques des expositions ou les méthodes de quantification du risque, il est possible d'évaluer comment ces variations affectent les conclusions. Cela permet non seulement de valider la méthodologie employée, mais aussi de mettre en lumière les facteurs les plus influents sur le risque d'inondation.

De plus, les analyses de sensibilité démontrent la répliquabilité et l'adaptabilité du modèle à différentes zones géographiques et contextes, renforçant ainsi la crédibilité et l'utilité pratique des résultats.

Enfin, ces analyses offrent une meilleure compréhension des incertitudes inhérentes au modèle, permettant ainsi de mieux informer les décisions stratégiques en matière de gestion des risques et d'assurance.

En conservant tout d'abord l'idée de constater l'impact du changement climatique « toutes choses égales par ailleurs », une sensibilité sur les hauteurs d'eau sera réalisée en deux temps. D'une part, il sera question de faire varier les hauteurs obtenues après l'application de la théorie des valeurs extrêmes. D'autre part, l'utilisation de la régression linéaire pour estimer les hauteurs d'eau en 2050 ayant pour période de retour 100 et 200 ans sera discutée.

Dans une seconde partie, une sensibilité sur le taux de destruction est appliquée. L'enjeu suivant sera de considérer la variation du contexte économique à horizon 2050 afin de sortir de cette vision « toutes choses égales par ailleurs », et d'estimer les sommes assurées du contenu et du bâti en 2050.

Enfin, afin de démontrer que la méthodologie présentée dans le second chapitre est entièrement répliquable, l'étude sera appliquée à une seconde zone géographique, à savoir Paris. Ce choix sera expliqué plus en détail ultérieurement, mais la raison majeure réside dans la forte exposition et l'intérêt économique que connaît cette zone.

3.5.1 Variation des hauteurs d'eau liées à la théorie des valeurs extrêmes

La première sensibilité réalisée concerne les différentes hauteurs d'eau obtenues en utilisant la théorie des valeurs extrêmes. En effet, comme évoqué dans la [section 3.1.4](#), les résultats obtenus sont à interpréter avec prudence puisque l'historique de hauteurs d'eau sur lequel la théorie est appliquée est limité. Cela est lié à la volonté de conserver un ensemble de données considérées comme validées, ou du moins pré-validées, par la plateforme Hydroportail dont les données sont issues.

Il apparaît donc pertinent d'appliquer **une variation de $\pm 5\%$** aux sept hauteurs d'eau attendues en 2024. D'une part, une augmentation des hauteurs permet de compenser une éventuelle sous-estimation des résultats issus de la théorie des valeurs extrêmes. D'autre part, une diminution des hauteurs permet de modéliser une année future clémente en termes d'inondations à Alès.

Période de retour (années)	Hauteur d'eau diminuée de 5 % (mètres)	Hauteur d'eau centrale (mètres)	Hauteur d'eau augmentée de 5 % (mètres)
2	1.85	1.95	2.04
5	2.55	2.69	2.82
10	3.11	3.27	3.44
20	3.72	3.92	4.11
50	4.64	4.89	5.13
100	5.44	5.73	6.02
200	6.35	6.69	7.02

TABLE 3.19 : Sensibilités sur les hauteurs d'eau attendues en 2024

Les nouvelles hauteurs d'eau attendues en 2024 étant connues en [Table 3.19](#), toute la méthodologie présentée dans le mémoire est appliquée, notamment en utilisant le pourcentage d'évolution des débits à horizon 2050 exprimé dans la [Table 3.14](#). Cela permet d'obtenir les hauteurs d'eau attendues en 2050. Ces dernières sont affichées dans la [Table 3.20](#).

Période de retour (années)	Hauteur d'eau diminuée de 5 % (mètres)	Hauteur d'eau centrale (mètres)	Hauteur d'eau augmentée de 5 % (mètres)
2	1.97	2.07	2.17
5	2.81	2.97	3.13
10	3.46	3.66	3.86
20	4.30	4.51	4.75
50	5.33	5.57	5.85
100	5.98	6.27	6.60
200	6.71	7.03	7.39

TABLE 3.20 : Hauteurs d'eau attendues en 2050 après la sensibilité appliquée

Il est maintenant possible de calculer l'AAL 2024 et 2050 pour des hauteurs d'eau qui ont été choquées de $\pm 5\%$. Cela permettra d'obtenir un intervalle, plutôt qu'une valeur unique, pour le pourcentage d'augmentation de la sinistralité à horizon 2050. Les résultats sont affichés en **Table 3.21**

Période de retour (en années)	Pertes (euros) - Hauteurs diminuées	Pertes (euros) - Hauteurs centrales	Pertes (euros) - Hauteurs augmentées
2	0	0	0
5	0	0	0
10	0	0	0
20	0	0	0
50	22 896 710	25 963 086	29 175 781
100	74 310 876	87 757 923	100 631 844
200	115 256 037	129 447 332	143 640 144
AAL 2024	1 777 323	2 044 078	2 308 035

TABLE 3.21 : Sensibilité sur l'AAL 2024 liée aux hauteurs d'eau

Ce tableau de résultats permet de constater qu'une baisse de 5 % des hauteurs d'eau entraîne une **baisse de 13 % de l'AAL 2024**, tandis qu'une hausse de 5 % des hauteurs d'eau engendre une **hausse de 12,9 %**.

Période de retour (en années)	Pertes (euros) - Hauteurs diminuées	Pertes (euros) - Hauteurs centrales	Pertes (euros) - Hauteurs augmentées
2	0	0	0
5	0	0	0
10	0	0	0
20	0	21 253 994	24 232 335
50	68 995 163	80 102 656	93 130 246
100	98 874 369	111 721 601	125 771 041
200	130 257 335	144 041 742	159 067 417
AAL 2050	3 019 934	4 502 178	5 127 269

TABLE 3.22 : Sensibilité sur l'AAL 2050 liée aux hauteurs d'eau

La **Table 3.22** permet d'analyser les répercussions d'une variation des hauteurs d'eau attendues en 2024 sur l'AAL 2050. En effet, une baisse de 5 % des hauteurs d'eau entraîne une **baisse de 33 % de l'AAL 2050**, tandis qu'une hausse de 5 % des hauteurs d'eau engendre une **hausse de 13.9 %**.

Métrique / Hypothèse	Hauteurs diminuées	Hauteurs centrales	Hauteurs augmentées
AAL 2024 (€)	1 777 323	2 044 078	2 308 035
AAL 2050 (€)	3 019 934	4 502 178	5 127 269
Variation AAL	+69.9 %	+120.2 %	+122.1%

TABLE 3.23 : Sensibilité sur l'augmentation de la sinistralité à horizon 2050

Les résultats de la **Table 3.23** montrent qu'une surestimation des hauteurs d'eau projetées pour 2024 réduit l'augmentation de la sinistralité attendue en 2050, passant de +120,2 % à +69,9 %. Cette baisse s'explique principalement par l'absence d'inondation pour une hauteur d'eau vicennale dans le scénario des hauteurs diminuées, liée au retraitement des zones non connexes décrit en **section 2.2.2.2**. Ce traitement introduit un effet de « palier », où une hauteur critique provoque la rupture des digues et l'inondation généralisée, comme illustré en **Annexe A**.

D'autre part, la hausse de 5 % des hauteurs d'eau fait varier très légèrement le résultat obtenu, passant de +120.2 % dans le scénario central à +122.1 % dans le scénario de hauteurs augmentées. Cela s'explique par le fait que dans ces deux scénarios, la hauteur d'eau vicennale dépasse le seuil critique causant des inondations.

3.5.2 Sensibilité sur l'utilisation de la régression linéaire

Comme expliqué en détail dans la **section 3.4.2**, une régression linéaire entre les hauteurs d'eau et le logarithme de la période de retour associée à ces dernières a été effectuée pour estimer les hauteurs considérées comme centennales et bicentennales en 2050. Bien que la régression soit cohérente sur les 4 points connus grâce aux données de projections climatiques, il est possible que les performances liées à ce choix soient dégradées pour les hauteurs de période de retour plus grande que 50 ans, qui est le maximum récupéré dans le jeu de données climatiques. Étant conscient de cette limite, une variation de ± 5 % est réalisée sur les hauteurs d'eau centennales et bicentennales estimées en 2050. Les nouvelles valeurs sont à retrouver dans la **Table 3.24**.

Période de retour (années)	Hauteur d'eau diminuée de 5 % (mètres)	Hauteur d'eau centrale (mètres)	Hauteur d'eau augmentée de 5 % (mètres)
2	2.07	2.07	2.07
5	2.97	2.97	2.97
10	3.66	3.66	3.66
20	4.51	4.51	4.51
50	5.57	5.57	5.57
100	5.96	6.27	6.58
200	6.68	7.03	7.38

TABLE 3.24 : Sensibilités sur les hauteurs d'eau attendues en 2050

De nouvelles hauteurs sont ainsi obtenues et peuvent être mises en entrée du modèle d’empreinte de crue afin d’obtenir les zones inondées. Cela servira à connaître les pertes assurantielles liées à chaque nouvelle hauteur d’eau puis de recalculer l’AAL 2050.

Période de retour (en années)	Pertes (euros) - Hauteurs diminuées	Pertes (euros) - Hauteurs centrales	Pertes (euros) - Hauteurs augmentées
2	0	0	0
5	0	0	0
10	0	0	0
20	21 253 994	21 253 994	21 253 994
50	80 102 656	80 102 656	80 102 656
100	97 994 086	111 721 601	124 949 371
200	129 040 770	144 041 742	158 667 452
AAL 2050	4 289 898	4 502 178	4 707 584

TABLE 3.25 : Recalcul de l’AAL 2050 avec les nouvelles hauteurs d’eau

La **Table 3.25** offre la variation de l’AAL 2050 entre les différents scénarios considérés. Il est logique d’observer que si les hauteurs centennales et bicentennales sont diminuées, l’AAL 2050 va également diminuer. Même constat à l’inverse pour une augmentation des hauteurs d’eau par rapport au scénario central. Tout est à présent réuni pour discuter de l’augmentation de la sinistralité attendue en 2050. Les conclusions de l’année à venir n’ont pas été modifiées puisque cette sensibilité s’applique uniquement aux hauteurs d’eau de grande période de retour attendues en 2050.

Métrique / Hypothèse	Hauteurs 2050 diminuées	Hauteurs 2050 centrales	Hauteurs 2050 augmentées
AAL 2024 (€)	2 044 078	2 044 078	2 044 078
AAL 2050 (€)	4 289 898	4 502 178	4 707 584
Variation AAL	+109.9 %	+120.2 %	+130.3 %

TABLE 3.26 : Sensibilité sur l’augmentation de la sinistralité à horizon 2050

Les résultats de la **Table 3.26** montrent qu’une sous-estimation ou une surestimation des hauteurs d’eau centennales et bicentennales projetées pour 2050 n’affecte pas significativement l’évolution globale de la sinistralité attendue entre 2024 et 2050. Le point central et essentiel de cette étude repose sur une estimation précise des hauteurs d’eau en 2024, car elles constituent la base de l’ensemble de la modélisation.

3.5.3 Sensibilité sur la courbe de vulnérabilité

La seconde variation d’hypothèse considérée concerne la courbe de vulnérabilité traduisant une hauteur d’eau dans le bâtiment en un taux de destruction de ce dernier. Pour rappel, cette courbe est issue de l’étude de l’*European Commission JRC (Joint Research Center)* datant d’avril 2017 nommée *Global flood depth-damage functions database (European Commission, 2024 [53])*.

En présence de portefeuille d'assurance, défini par une base caractérisant les expositions en détail et une base de sinistres passés, il est possible de construire une courbe de vulnérabilité cohérente avec les expositions assurées. Ce n'est pas le cas dans cette étude, d'où l'importance de réaliser une sensibilité sur la courbe.

3.5.3.1 Variation uniforme du taux de destruction

Les données du JRC associent 9 hauteurs d'eau, de 0 à 6 mètres, à un taux de destruction. Cette sensibilité applique une variation uniforme de $\pm 10\%$ sur ces taux, générant un intervalle de pertes assurantielles plutôt qu'une valeur unique. Une baisse (ou hausse) des taux traduit une surestimation ou sous-estimation de la courbe de vulnérabilité centrale. Avec une variation uniforme, les résultats devraient suivre l'amplitude de la sensibilité. Les nouvelles courbes sont transcrites sur la **Figure 3.17**.

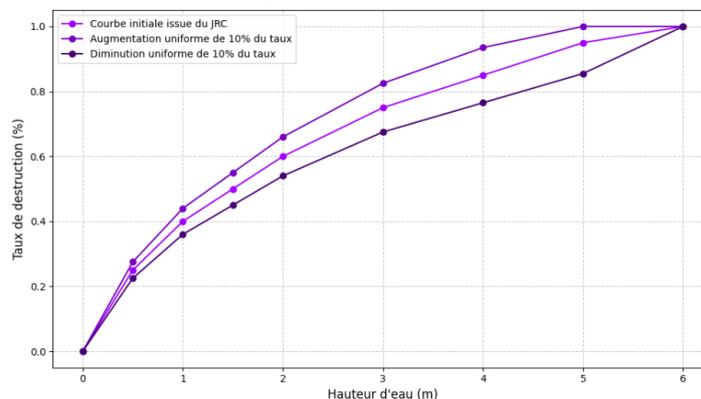


FIGURE 3.17 : Sensibilités sur la courbe de vulnérabilité du JRC

3.5.3.2 Variation de l'AAL 2024

Ayant à présent deux nouvelles courbes de vulnérabilité, le calcul des pertes assurantielles est modifié. En effet, chaque hauteur d'eau attendue en 2024 va engendrer un intervalle de pertes où la borne inférieure (respectivement supérieure) sera obtenue à l'aide de la courbe de vulnérabilité traduisant une baisse uniforme de 10 % du taux de destruction (respectivement une hausse uniforme de 10 %).

Hauteur d'eau [période de retour]	Pertes - Taux baissé	Pertes - Taux central	Pertes - Taux haussé
1.95 [2]	0	0	0
2.69 [5]	0	0	0
3.27 [10]	0	0	0
3.92 [20]	0	0	0
4.89 [50]	23 366 778	25 963 086	28 559 395
5.73 [100]	78 982 131	87 757 923	96 465 352
6.69 [200]	116 629 923	129 447 332	141 770 003
AAL 2024	1 840 306	2 044 078	2 244 691

TABLE 3.27 : Sensibilité sur l'AAL 2024 liée aux courbes de vulnérabilité

Les résultats de la **Table 3.27** illustrent l'extrême importance de calibrer une courbe de vulnérabilité cohérente avec les expositions d'un portefeuille MRH. En effet, une baisse uniforme de 10 % du taux de destruction entraîne une baisse de 9.97 % de l'AAL, tandis qu'une hausse uniforme de 10 % entraîne une hausse de 9.8 % de l'AAL.

3.5.3.3 Variation de l'AAL 2050

Cette sensibilité appliquée sur l'AAL 2024 peut également être réalisée sur l'AAL 2050. Cela permettra d'obtenir encore une fois un intervalle concernant l'augmentation de la sinistralité à horizon 2050 et non plus une valeur unique, de +120 % en l'occurrence.

Hauteur d'eau [période de retour]	Pertes - Taux baissé	Pertes - Taux central	Pertes - Taux haussé
2.07 [2]	0	0	0
2.97 [5]	0	0	0
3.66 [10]	0	0	0
4.51 [20]	19 128 594	21 253 994	23 379 393
5.57 [50]	72 092 391	80 102 656	88 082 349
6.27 [100]	100 559 022	111 721 600	122 603 439
7.03 [200]	130 025 532	144 041 742	157 445 911
AAL 2050	4 053 995	4 502 178	4 943 881

TABLE 3.28 : Sensibilité sur l'AAL 2050 liée aux courbes de vulnérabilité

À l'instar de ce qui a été constaté en 2024, la variation du taux de destruction dans la courbe de vulnérabilité modifie l'AAL 2050. En effet, la **Table 3.28** montre qu'une baisse uniforme de 10 % du taux de destruction entraîne une baisse de 9.95 % de l'AAL, tandis qu'une hausse uniforme de 10 % entraîne une hausse de 9.81 % de l'AAL.

Métrique / Hypothèse	Taux baissé	Taux central	Taux haussé
AAL 2024 (€)	1 840 306	2 044 078	2 244 691
AAL 2050 (€)	4 053 995	4 502 178	4 943 881
Variation AAL	+120.29 %	+120.25 %	+120.25 %

TABLE 3.29 : Sensibilité sur l'augmentation de l'AAL à horizon 2050

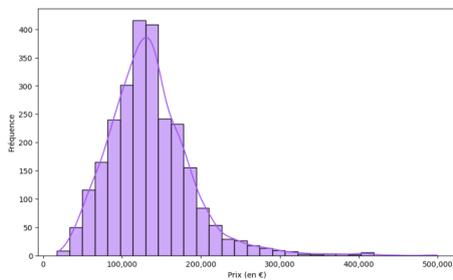
Les résultats de la **Table 3.29** étaient attendus, car une variation uniforme de ± 10 % du taux de destruction devait entraîner une fluctuation des pertes d'environ ± 10 %. Toutefois, cette variation n'est pas entièrement symétrique en raison du plafonnement du taux de destruction à 100 % pour la hauteur d'eau maximale de 6 mètres. Cette asymétrie reflète le fait que certaines expositions, situées très près de la rivière, subissent une destruction totale.

3.5.4 Prise en compte de l'évolution du contexte économique

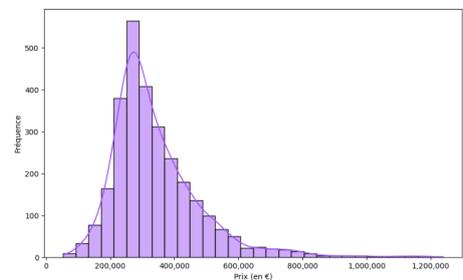
Comme évoqué dans le chapitre précédent, le contexte assurantiel ne sera pas le même en 2050 qu'il ne l'est aujourd'hui. En effet, la variation du contexte économique et démographique doit être prise en compte entre aujourd'hui et l'année 2050.

Le contexte démographique n'a pas été considéré car le déplacement des populations à horizon 2050 était trop subjectif pour être pertinent dans cette étude. En revanche, la variation du contexte économique est considérée avec la projection des sommes assurées du bâti (respectivement du contenu) à l'aide de l'évolution des prix de l'immobilier (respectivement de l'inflation en France) en 2050.

Les projections réalisées sur l'indice FFB des coûts de construction ont permis de considérer que pour une exposition donnée, la somme assurée de son bâti sera multipliée par **1.49** entre aujourd'hui et 2050. Ce facteur est alors appliqué et la distribution des sommes assurées du bâti de la base d'expositions à horizon 2050 est obtenue en **Figure 3.18**.



(a) Sommes Assurées Bâti en 2050 - Appartements

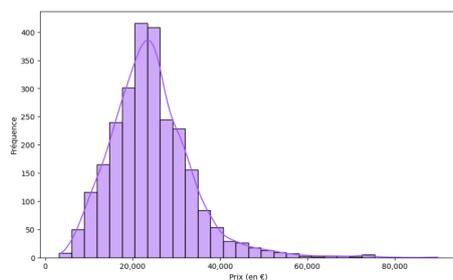


(b) Sommes Assurées Bâti en 2050 - Maisons

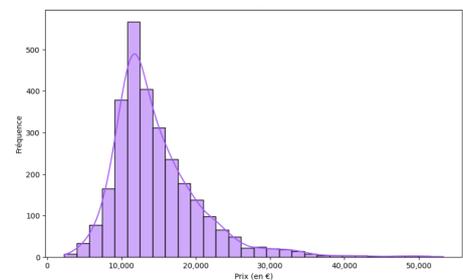
FIGURE 3.18 : Analyse de la distribution des sommes assurées du bâti de notre base en 2050

La moyenne des sommes assurées du bâti est passée de 90 546 € à 134 997 € pour les appartements, et de 228 239 € à 340 285 € pour les maisons.

Concernant les sommes assurées du contenu en 2050, l'évolution du contexte économique est à nouveau considéré. Le choix d'indexer les sommes assurées du contenu sur le taux d'inflation a été fait. Il a été estimé dans le chapitre précédent que les sommes assurées du contenu devraient être augmentées d'un facteur de **1.73**. Ce facteur correspond à l'indice d'inflation cumulée entre 2025 et 2050 pour le scénario prospectif d'inflation *Delayed Transition* fourni par le NGFS.



(a) Sommes Assurées Contenu en 2050 - Appartements



(b) Sommes Assurées Contenu en 2050 - Maisons

FIGURE 3.19 : Analyse de la distribution des sommes assurées du contenu de la base en 2050

Les distributions présentes sur la **Figure 3.19** ont été décalées par rapport à celles de la **Figure 3.14**. Pour cause, la moyenne des sommes assurées du contenu est passée de 13 797 € à 23 959 € pour les appartements, et de 8 312 € à 13 959 € pour les maisons.

Les sommes assurées ayant évoluées, l'AAL 2050 va être modifié. Les pertes vont naturellement augmentées, ainsi que l'évolution de la sinistralité entre 2024 et 2050.

Période de retour (années)	Hauteur d'eau (mètres)	Pertes assurantielles (euros)	Contribution à l'AAL 2050 (euros)
2	2.07	0	0
5	2.97	0	0
10	3.66	0	0
20	4.51	31 932 264	1 596 613
50	5.57	121 037 283	2 420 746
100	6.27	168 895 263	1 688 953
200	7.03	217 836 647	1 089 183
Total			6 795 495

TABLE 3.30 : Obtention de l'AAL 2050 avec augmentation des sommes assurées

Comme envisagé, la **Table 3.30** montre que l'AAL 2050 augmente de **51 %** en considérant l'évolution du contexte économique, passant de 4 502 178 € à 6 795 495 €.

L'augmentation de la sinistralité entre 2024 et 2050 serait alors de **+232 %** dans la commune d'Alès, contre +120 % dans le scénario central qui ne considère pas l'évolution du contexte économique. Cependant, il est important de comprendre que l'augmentation des pertes liée à la variation des sommes assurées sera compensée par les primes demandées au titre des contrats MRH, qui sont notamment indexées sur l'indice ICC FFB qui a été pris en compte pour augmenter les sommes assurées du bâti.

Par ailleurs, les hypothèses prises pour augmenter les sommes assurées sont simplistes et ne sont pas entièrement représentatives de la réalité. L'idée derrière cette sensibilité est de mettre en lumière l'évolution nécessaire des primes d'assurance afin de contrebalancer l'augmentation du risque. C'est pourquoi la prime demandée au titre du régime CatNat augmente en 2025, et continuera d'augmenter dans les années à venir avec le phénomène de revalorisation automatique prévu et présenté dans le rapport Langreny.

3.5.5 Modélisation d'une seconde zone géographique : Paris

La dernière sensibilité abordée concerne l'aspect géographique. Comme mentionné à plusieurs reprises à la fin du premier chapitre, la répliquabilité du modèle est un élément clé. L'objectif sous-jacent de ce mémoire est de développer une modélisation capable de fournir des résultats à l'échelle nationale, sous réserve de disposer de temps et des ressources informatiques suffisantes.

Après avoir analysé en détail les résultats pour la ville d'Alès, il a été décidé de présenter de manière concise les résultats pour une autre zone géographique pertinente.

3.5.5.1 Choix de la zone d'étude

Ce mémoire a démontré que la méthodologie développée est adaptable à toute station hydrométrique, à condition de disposer de données adéquates, telles que les relevés de hauteurs d'eau, de débits et des projections climatiques fiables. Pour valider cette adaptabilité, une seconde zone a été étudiée. Après Alès, choisi pour son intérêt climatique lié aux épisodes cévenols, Paris s'impose pour son enjeu économique, marqué par une forte concentration d'expositions assurées. La crue historique de 1910, avec ses 45 jours de dégâts majeurs, illustre l'impact potentiel d'une crue sur la capitale, tant en dommages directs qu'économiques.

3.5.5.2 Estimation des hauteurs d'eau en 2024 et 2050

Concernant la modélisation climatique, la méthodologie est bien entendu exactement la même que celle développée sur Alès. La première étape consiste alors à récupérer un historique de données, à la station « Pont Austerlitz » située dans le 13^{ème} arrondissement de Paris. La période historique considérée est 2009-2023, avec les mêmes critères de sélection que ceux évoqués pour Alès, à savoir la fiabilité des données. La crue de 1910 n'a malheureusement pas pu être prise en compte, bien que la hauteur d'eau relevée de cette crue historique est connue, car les données entre 1910 et 2009 ne sont pas considérées comme suffisamment fiables pour cette étude.

Comme pour l'analyse du Gardon d'Alès, après vérification de la fiabilité et de la cohérence des données, les hauteurs d'eau maximales journalières ont été récupérées à la station Pont d'Austerlitz via la plateforme Hydroportail. Les maximums annuels ont ainsi pu être extraits, et ce sont sur ces derniers que la théorie des valeurs extrêmes sera appliquée. L'évolution de ces maximums est représentée sur la **Figure 3.20**.

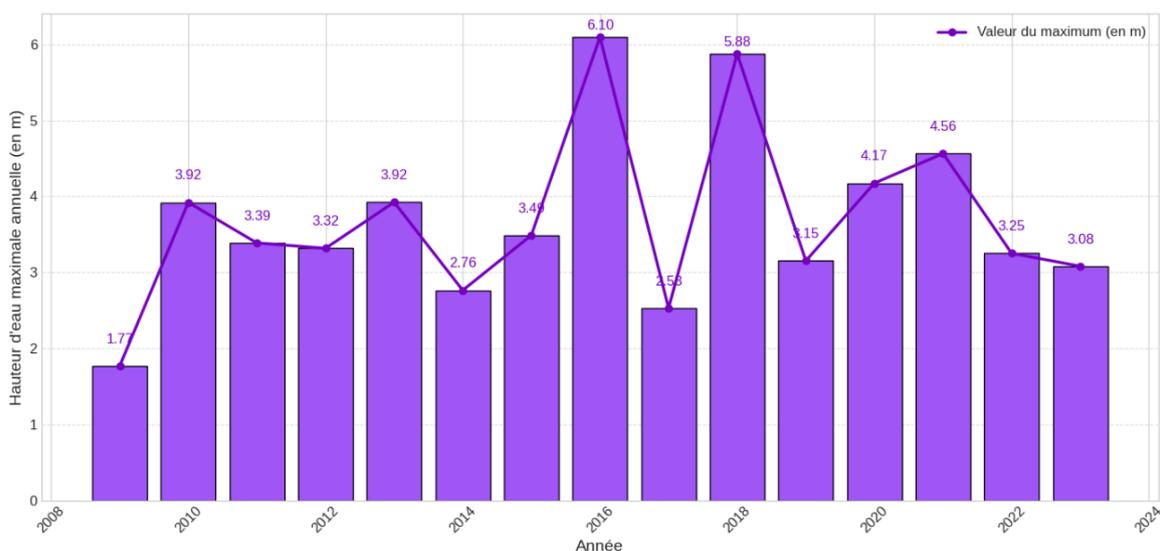


FIGURE 3.20 : Hauteurs d'eau maximales annuelles entre 2009 et 2023 au Pont d'Austerlitz

La théorie des valeurs extrêmes a ensuite été appliquée sur ces maximums afin d'ajuster une loi la plus adaptée aux données, et aboutir au calcul des hauteurs d'eau, affichées sur la **Table 3.31**, via l'utilisation des quantiles de cette loi. Après une étude similaire à ce qui a été réalisé sur Alès, avec notamment l'utilisation de critères de sélection, la loi de Gumbel a été sélectionnée.

Période de retour (en années)	Hauteur d'eau (en mètres)
2	3.51
5	4.56
10	5.26
20	5.93
50	6.79
100	7.44
200	8.09

TABLE 3.31 : Estimation des hauteurs d'eau 2024 via la loi de Gumbel ($\mu = 3.17$, $\sigma = 0.93$)

Les données de projections climatiques, s'apparentant à un pourcentage d'évolution des débits pour les périodes de retour de 2, 5, 10 et 50 ans à horizon 2050, sont ensuite récupérées pour le bassin-versant de la Seine proche de la station Austerlitz (**Table 3.32**).

Période de retour (en années)	Évolution du débit d'eau entre 2024 et 2050 (en %)
2	9.1
5	11.6
10	12.8
50	14.8

TABLE 3.32 : Projection de l'évolution des débits entre 2024 et 2050 au pont d'Austerlitz

Pour les périodes de retour manquantes, la relation linéaire entre les hauteurs d'eau relevées et le logarithme de la période de retour de ces hauteurs est à nouveau utilisée. (**Figure 3.21**).

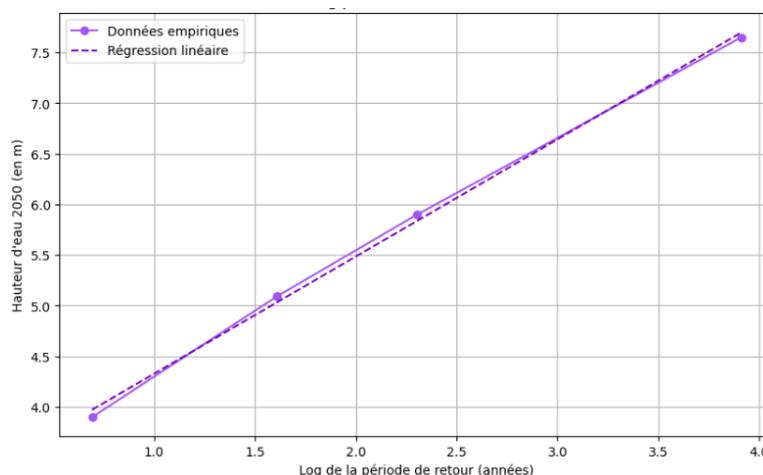


FIGURE 3.21 : Régression linéaire entre hauteur d'eau et logarithme de la période de retour

Cela permet d'obtenir, pour toutes les périodes de retour considérées dans ce mémoire, les hauteurs d'eau attendues en 2024 et en 2050 qui sont présentées dans la **Table 3.33**.

Période de retour (en années)	Hauteur d'eau en 2024 (en m)	Débit en 2024 (en m ³ /s)	Débit en 2050 (en m ³ /s)	Hauteur d'eau 2050 (en m)
2	3.51	1 046.1	1 141.2	3.90
5	4.56	1 310.4	1 461.9	5.09
10	5.26	1 510.0	1 703.7	5.90
20	5.93	1 713.3	1 946.0	6.64
50	6.79	1 995.2	2 291.1	7.65
100	7.44	2 218.8	2 605.2	8.50
200	8.09	2 447.4	2 963.6	9.30

TABLE 3.33 : Estimation des hauteurs d'eau en 2024 et 2050 au Pont d'Austerlitz

Les résultats trouvés sont validés via les informations obtenues dans les études du TRI du bassin-versant de la Seine. Les données récupérées en **Table 3.34** fournissent les hauteurs d'eau caractéristiques de trois périodes de retour distinctes (environ décennale, centennale et millénaire).

Période de retour (en années)	Hauteur d'eau (en mètres)
[10 ; 30]	6.1
[100 ; 300]	8.7
1000	10.9

TABLE 3.34 : Données obtenues via l'étude du TRI de Paris (*DRIEAT, 2013* [65])

La modélisation estime très bien les hauteurs d'eau plutôt fréquentes, mais sous-estime légèrement les hauteurs d'eau d'une crue moyenne et extrême. En effet, selon notre modélisation, une hauteur d'eau de période de retour 300 ans (respectivement 1 000 ans) est estimée aux alentours de 8.46 mètres (respectivement 9.60 mètres). Cet écart vient naturellement de la faible profondeur de l'historique retenue, ne prenant par exemple pas en compte la crue de 1910; et également du fait qu'il est difficile d'estimer des crues extrêmement rares simplement via l'utilisation de la théorie des valeurs extrêmes.

3.5.5.3 Construction de la base d'expositions

À l'instar du traitement de la commune d'Alès, les bases DPE et DVF+ ont été récupérées pour le département 75 correspondant à Paris. Les mêmes retraitements ont été appliqués à ces deux bases que ceux réalisés sur les données concernant Alès.

La première étape consistait à traiter la base DPE pour construire une base d'expositions situées dans le département. Sont ainsi obtenus les 73 896 appartements et 1 167 maisons affichés sur la **Figure 3.22**.

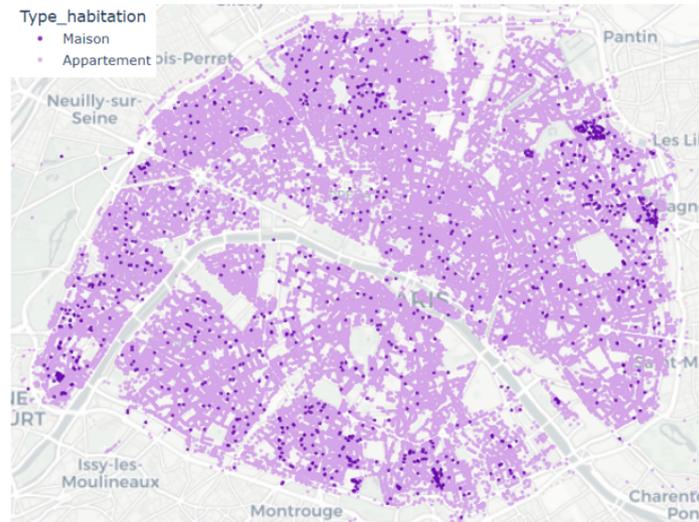


FIGURE 3.22 : Vue générale des expositions sur Paris

Le traitement de la base DVF+ est ensuite réalisé, permettant d'obtenir le prix au m² par type d'habitation (maison ou appartement) pour chaque arrondissement (chaque commune) de Paris. L'ensemble des résultats obtenus est répertorié dans la **Table 3.35**.

Arrondissement	Estimation du modèle (prix au m ²)	Valeur réelle (prix au m ²)
1 ^{er}	14 027 €	13 550 €
2 ^{ème}	12 522 €	11 830 €
3 ^{ème}	13 145 €	12 570 €
4 ^{ème}	14 242 €	13 080 €
5 ^{ème}	13 012 €	12 000 €
6 ^{ème}	16 315 €	13 840 €
7 ^{ème}	16 018 €	13 190 €
8 ^{ème}	13 864 €	11 230 €
9 ^{ème}	11 872 €	10 120 €
10 ^{ème}	10 444 €	9 330 €
11 ^{ème}	10 788 €	9 740 €
12 ^{ème}	10 195 €	8 670 €
13 ^{ème}	10 222 €	8 340 €
14 ^{ème}	10 978 €	9 140 €
15 ^{ème}	11 031 €	9 170 €
16 ^{ème}	12 440 €	10 440 €
17 ^{ème}	11 534 €	9 570 €
18 ^{ème}	10 244 €	8 780 €
19 ^{ème}	9 134 €	7 930 €
20 ^{ème}	9 289 €	9 190 €

TABLE 3.35 : Estimation du prix au m² d'un appartement à Paris (*Paris Notaires Services, 2024* [66])

L'erreur relative moyenne liée aux estimations est de **14.36 %**. Cette erreur est plus importante que celle trouvée pour l'étude d'Alès, ce qui s'explique par la surestimation du prix au m² causée par l'ajustement des valeurs foncières à l'aide de l'indice des coûts de construction. Il est alors possible de calculer la somme assurée du bâti de chacune des expositions. Il en résulte une moyenne de 609 929 € pour un appartement et 2 234 725 € pour une maison. Concernant la somme assurée du contenu, la même méthode que celle utilisée pour Alès dans le cœur de ce mémoire est appliquée. Pour une question de simplicité, le ratio de sommes assurées (contenu/bati) est calculé de manière globale et non pas par arrondissement.

Type de bien	Ratio moyen des sommes assurées (en %)
Maison	3.87
Appartement	2.34

TABLE 3.36 : Ratio moyen des sommes assurées par type d'habitation à Paris (75)

Les résultats de la **Table 3.36** permettent de savoir qu'en moyenne, la somme assurée du contenu est de 14 266 € pour un appartement et de 86 569 € pour une maison.

3.5.5.4 Utilisation du modèle d'empreinte de crue

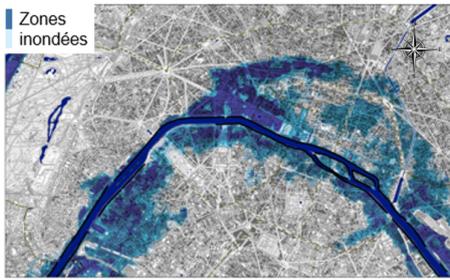
La base d'expositions étant maintenant construite, elle va être croisée avec le modèle d'empreinte de crue pour estimer les pertes assurantielles liées aux inondations. Comme pour Alès, le modèle doit être validé en comparant les résultats avec les cartes du TRI. Ainsi, il est appliqué aux trois hauteurs d'eau correspondant aux scénarios du TRI, présentés dans la **Table 3.34**.



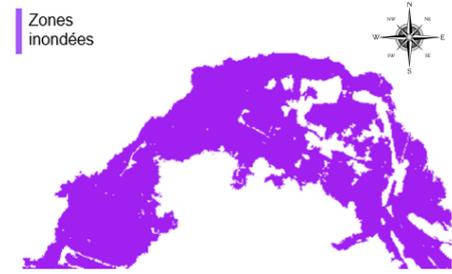
FIGURE 3.23 : Validation de la modélisation à l'aide du scénario fréquent du TRI



FIGURE 3.24 : Validation de la modélisation à l'aide du scénario moyen du TRI



(a) Empreinte du TRI - Scénario extrême



(b) Empreinte modélisation - HE = 10.9m

FIGURE 3.25 : Validation de la modélisation à l'aide du scénario extrême du TRI

Les **Figure 3.23**, **Figure 3.24** et **Figure 3.25** permettent de valider visuellement le modèle d'empreinte de crue qui fournit des cartes relativement proches de celles du TRI. De plus, les métriques de validation sont satisfaisantes, avec notamment un *F1-score* supérieur à 0.80 pour les trois cartes. Le modèle peut donc être utilisé sur les différentes hauteurs d'eau estimées, ce qui permettra de calculer les pertes assurantielles liées à chacune de ces hauteurs d'eau. Cela amènera au calcul de l'AAL, la métrique quantifiant la sinistralité annuelle attendue, pour les années 2024 et 2050.

3.5.5.5 Calcul de l'AAL 2024 et 2050

Le calcul de cette métrique en 2024 et 2050 permettra d'analyser l'impact du changement climatique sur la sinistralité liée aux inondations par débordement. Les résultats sont affichés dans la **Table 3.37** pour des hauteurs d'eau de période de retour de 2, 5, 10, 20, 50, 100 et 200 ans.

Période de retour (années)	Hauteur d'eau (mètres)	Pertes assurantielles (euros)	Contribution à l'AAL 2024 (euros)
2	3.51	0	0
5	4.56	0	0
10	5.26	0	0
20	5.93	2 025 994	101 300
50	6.79	7 960 444	159 209
100	7.44	214 396 341	2 143 963
200	8.09	576 779 949	2 883 900
AAL 2024			5 288 372

TABLE 3.37 : Obtention de l'AAL 2024 à Paris

Le risque inondation à présent quantifié dans la ville de Paris en 2024, le calcul de l'AAL 2050 peut être réalisé afin de discuter de l'impact du changement climatique sur les inondations par débordement de la Seine. Les résultats sont présentés dans la **Table 3.38**.

Période de retour (années)	Hauteur d'eau (mètres)	Pertes assurantielles (euros)	Contribution à l'AAL 2050 (euros)
2	3.90	0	0
5	5.09	0	0
10	5.90	1 804 691	180 469
20	6.64	6 898 785	344 939
50	7.65	297 480 039	5 949 601
100	8.50	993 245 381	9 932 454
200	9.30	1 698 804 454	8 494 022
AAL 2050			24 901 485

TABLE 3.38 : Obtention de l'AAL 2050 à Paris

Le calcul de cette métrique pour deux horizons temporels différents permet d'émettre deux conclusions dépendantes.

- Concernant l'impact sur la fréquence des événements extrêmes, il est possible de constater par exemple qu'une crue considérée comme **vicennale** (période de retour de 20 ans) deviendra **décennale** en 2050. Ce glissement des périodes de retour vers le bas est un indicateur clé de l'impact du climat sur la fréquence des inondations par débordement.
- Concernant l'impact sur la sinistralité, l'évolution de l'AAL entre 2024 et 2050 est considérée. La modélisation exprime une augmentation de la sinistralité de **371 %**. C'est une évolution « toutes choses égales par ailleurs » puisque l'évolution du contexte économique et démographique n'est pas prise en compte.

Les conclusions générales obtenues sont globalement similaires à celles de la ville d'Alès, notamment en ce qui concerne le glissement des périodes de retour et l'augmentation de la sinistralité d'ici 2050. Cependant, peu de sources comparatives sont disponibles pour discuter de ces résultats. Le livre blanc de Covéa, publié en 2022, représente l'étude la plus proche de ce mémoire. Parmi les projections faites sur Paris, il est estimé une augmentation d'environ 20 % des débits décennaux d'ici 2050. Le scénario climatique utilisé dans cette étude est le RCP 8.5, alors que ce mémoire se base sur le RCP 4.5. Toutefois, le dernier rapport de l'ACPR indique que les différences entre ces deux scénarios sont faibles concernant le risque d'inondation à l'horizon 2050. Comme le montre la **Table 3.32**, une hausse de 12,83 % des débits décennaux est attendue en 2050 selon le RCP 4.5, ce qui reste proche des résultats annoncés par Covéa.

En termes de sinistralité, Covéa prévoit une augmentation d'au moins 50 % d'ici 2050, tandis que les résultats de ce mémoire estiment une hausse de 370 %. Cette différence importante peut s'expliquer par diverses hypothèses, notamment certaines limites discutées précédemment, telles que la surestimation du prix au m² (**Table 3.35**) ou des zones inondées identifiables sur la **Figure 3.25**.

En complément des résultats globaux de l'étude, il est pertinent d'examiner la validité des différentes composantes présentées dans les **Table 3.37** et **Table 3.38**. Tout d'abord, la validation de l'estimation des pertes assurantielles estimées dans nos scénarios de crues présente plusieurs limites méthodologiques. Premièrement, les données disponibles sur le coût des crues majeures de la Seine, notamment celles issues du site de la Caisse Centrale de Réassurance (CCR), intègrent des composantes non couvertes par cette étude, telles que les pertes d'exploitation ou celles liées aux contrats d'assurance automobile.

Dans ce mémoire, l'attention est portée exclusivement sur les pertes liées aux habitations (appartements et maisons) qui composent une base fictive de contrats multirisques habitation (MRH). Deuxièmement, les estimations publiques se réfèrent généralement à des pertes globales à l'échelle de l'ensemble de l'Île-de-France, alors que les évaluations de cette étude reposent sur une base d'expositions non exhaustive, limitée au département de Paris. Ces divergences méthodologiques compliquent la validation directe des pertes estimées.

Malgré cela, pour contextualiser ces résultats, la crue historique de 1910, avec une hauteur de 8,62 m mesurée à la station du Pont d'Austerlitz, est estimée avoir causé des dommages de l'ordre de 1,6 milliard d'euros en valeur actuelle. Le modèle d'empreinte de crue, pour une hauteur d'eau de 8,50 m, estime des pertes proches du milliard d'euros. Bien que le modèle tende à surestimer les zones inondées pour des hauteurs d'eau importantes, tandis que la base d'exposition sous-estime le nombre de biens potentiellement inondés, l'ordre de grandeur des pertes reste cohérent.

D'autre part, en examinant le lien entre les coûts potentiels d'une crue et la hauteur d'eau correspondante, les résultats obtenus confirment leur cohérence avec les observations. Par exemple, lors de la crue du 29 janvier 2018, avec une hauteur de 5,88 m mesurée à la station du Pont d'Austerlitz, aucun dommage direct aux habitations parisiennes n'a été signalé, bien que certaines évacuations préventives aient eu lieu. Les images de la Seine montrent cependant que le niveau de l'eau était proche d'atteindre les rives et les habitations environnantes. Dans le cadre de cette étude, les premières pertes assurantielles sont estimées à partir d'une hauteur d'environ 5,90 m, ce qui reflète une cohérence notable avec les observations réelles.

3.6 Limites globales inhérentes au modèle

Il semble nécessaire de terminer la réalisation de cette étude par un rappel des limites globales inhérentes à l'ensemble des processus développés. En effet, bien que ce mémoire fournisse aux organismes d'assurance des indicateurs précieux pour anticiper l'impact du changement climatique sur leurs activités, en particulier sur les contrats multirisques habitation (MRH), des approximations limitent son application directe dans un contexte opérationnel, justifiant une réflexion sur les améliorations possibles.

La principale limite concerne l'utilisation de l'*Average Annual Loss* (AAL) comme métrique principale. Bien que cette approche soit reconnue dans la littérature scientifique et couramment utilisée, notamment dans des publications telles que le livre blanc de Covéa, elle repose sur un nombre restreint de périodes de retour, limité ici à 200 ans. Ce choix est justifié par la volonté d'aligner l'étude avec le cadre réglementaire de Solvabilité II, qui évalue la capacité des assureurs à résister à des événements bicentennaux dans le calcul du SCR. De plus, l'utilisation de la théorie des valeurs extrêmes, bien qu'efficace pour modéliser des crues rares, présente une incertitude accrue pour des périodes de retour supérieures à 200 ans, notamment liée à la faible profondeur d'historique de hauteurs d'eau récupérable. Incorporer des événements plus rares pourrait biaiser davantage les résultats sans offrir une amélioration substantielle de leur pertinence, bien que leur absence sous-estime potentiellement l'espérance des pertes. Il est également primordial de rappeler que l'objectif de ce mémoire n'est pas d'utiliser une métrique permettant d'estimer parfaitement la sinistralité attendue d'une année donnée, mais bien d'utiliser cette métrique comme outil de comparaison pour analyser l'impact du changement climatique sur les inondations par débordement.

La dépendance à l'*Open Data* constitue une autre limite. Les approximations réalisées pour estimer les sommes assurées sur lesquelles les pertes assurantielles sont calculées, et la courbe de vulnérabilité reflètent les contraintes des données disponibles. Par exemple, la courbe de vulnérabilité utilisée ne distingue pas les maisons des appartements et ne tient pas compte de spécificités telles que la superficie par étage ou le nombre de pièces. Ces approximations disparaîtraient si l'on appliquait la méthodologie à un portefeuille réel d'assurance, permettant une meilleure précision grâce à des données détaillées sur la localisation des biens, leurs caractéristiques, et des historiques de sinistres permettant d'établir une courbe de vulnérabilité adaptée aux biens du portefeuille.

Enfin, la précision des données disponibles et les contraintes computationnelles ont restreint la profondeur des analyses réalisées. Concernant le modèle d'empreinte de crue, la non prise en compte de la qualité d'absorption des sols ou de la présence d'ouvrages de protection restreint les performances du modèle développé. Cela se traduit par des métriques de validation (*Recall*, *Precision* et *F1-score*) pas toujours parfaites, comme c'est le cas sur Paris où la considération unique des altitudes pour tracer les empreintes surestime les zones inondées. L'utilisation d'un modèle numérique de terrain plus précis, tel que le RGE Alti 1 mètre, aurait permis d'affiner l'évaluation du phénomène d'inondation par débordement. De plus, l'analyse a été limitée à deux cours d'eau, ce qui a réduit la possibilité de réaliser des comparaisons régionales et d'effectuer une validation à une échelle plus large, comme cela a été fait par Covéa dans ses travaux.

En dépit des limites rappelées dans cette sous-section, la méthodologie présentée constitue un outil robuste pour analyser les impacts du changement climatique et offre une base solide pour des améliorations futures, notamment dans le cadre d'applications opérationnelles.

Conclusion

Cette étude avait pour objectif d'analyser l'impact prospectif du changement climatique sur les inondations par débordement et les conséquences assurantielles qui en découlent. Pour ce faire, une double modélisation, climatique et actuarielle, a été mise en place afin de mesurer les effets attendus du changement climatique sur la fréquence et la sévérité des crues.

La première partie, consacrée à la modélisation climatique, a ciblé le bassin versant du Gardon d'Alès pour étudier les inondations par débordement. La sélection de cette région est motivée par la présence de pluies intenses et courtes, caractéristiques des épisodes cévenols. En utilisant les données hydrométriques de la station du Gardon d'Alès sur la période 2000-2023, la théorie des valeurs extrêmes a été appliquée pour estimer les hauteurs d'eau attendues en 2024. Cette première phase a permis de modéliser les hauteurs d'eau avec leurs probabilités associées. Ces hauteurs ont ensuite été utilisées dans un modèle d'empreinte de crue pour délimiter les zones potentiellement inondées selon les différents scénarios. La seconde phase s'est focalisée sur l'impact du changement climatique à l'horizon 2050, une période recommandée par les régulateurs tels que l'ACPR. Des données de projections climatiques ont été mobilisées pour estimer l'évolution des hauteurs d'eau entre 2024 et 2050. Les résultats ont montré un glissement significatif des périodes de retour des crues, reflétant une augmentation des événements extrêmes. Par exemple, une crue centennale attendue en 2024 pourrait devenir une crue cinquantennale en 2050, illustrant un raccourcissement des intervalles entre les grandes crues.

Dans un second temps, l'étude s'est concentrée sur la quantification du risque d'inondation en 2024 et en 2050. Une base d'expositions a été construite en utilisant des bases de données publiques telles que les DPE et DVF+. Cela a permis de créer une base d'habitations semblable à un portefeuille multirisque habitation (MRH), avec une caractérisation précise des expositions par localisation, type de bien, et montants des sommes assurées pour le bâti et le contenu. Ces expositions ont ensuite été croisées avec les empreintes de crue obtenues dans la modélisation climatique. À partir de là, une courbe de vulnérabilité issue du JRC a permis d'évaluer les pertes assurantielles associées à chaque période de retour des crues (2, 5, 10, 20, 50, 100 et 200 ans). L'*Average Annual Loss* (AAL), représentant la perte annuelle moyenne attendue, a été utilisée comme indicateur clé pour quantifier la sinistralité. En comparant cette métrique entre 2024 et 2050, l'impact du changement climatique sur la sinistralité a pu être estimé, avec une augmentation de +120 % principalement liée à la fréquence accrue des événements rares.

Des analyses de sensibilité ont confirmé la robustesse du modèle. Premièrement, une variation de ± 5 % de toutes les hauteurs d'eau calculées via la théorie des valeurs extrêmes a montré que l'augmentation de la sinistralité à Alès pourrait varier entre +69,9 % et +121,1 % (contre +120 % dans le scénario central). Deuxièmement, l'intégration de l'augmentation des sommes assurées à l'horizon 2050, basée sur des projections d'inflation et de coûts de construction, a engendré une hausse de 51 % de l'AAL pour 2050, portant l'augmentation globale de la sinistralité de +120 % à +232 %. Cependant, cette hausse pourrait être compensée par une augmentation des primes d'assurance.

Troisièmement, afin de valider la répliquabilité de la méthodologie, une étude similaire a été menée sur le débordement de la Seine à Paris. Les résultats annoncent une augmentation de la fréquence des événements extrêmes, avec une crue vicennale en 2024 devenant décennale en 2050, et une hausse de la sinistralité attendue de 371 %.

Néanmoins, il est essentiel de souligner les limites inhérentes à cette étude, qui se divisent en deux catégories : celles liées à la modélisation climatique et celles liées à la modélisation actuarielle. Du point de vue climatique, la disponibilité limitée des données hydrométriques historiques engendre des biais dans l'estimation des hauteurs d'eau et des périodes de retour. De plus, l'étude des inondations étant un domaine complexe mobilisant de multiples experts en climatologie et hydrologie, l'approche développée, bien que cohérente, repose essentiellement sur la théorie des valeurs extrêmes et sur un modèle d'empreinte de crue basé uniquement sur les altitudes. Ce dernier point est restrictif, car il ne tient pas compte d'autres facteurs cruciaux tels que la nature des sols ou l'urbanisme, qui pourraient affiner les résultats. Une autre limite réside dans l'utilisation des projections climatiques pour estimer les hauteurs d'eau en 2050. Bien qu'il aurait été pertinent de réaliser des études climatiques indépendantes, l'absence de ressources disponibles a conduit à s'appuyer exclusivement sur ces projections.

Concernant les limites actuarielles, elles s'articulent principalement autour de deux aspects : les approximations liées à la base d'expositions et l'utilisation de l'AAL. Premièrement, le caractère non exhaustif des données récupérées en libre accès a introduit des incertitudes sur les caractéristiques des expositions étudiées, notamment concernant le montant des sommes assurées. Deuxièmement, l'utilisation de l'AAL, calculée à partir d'un ensemble limité de points, soulève des questions de robustesse en raison de sa sensibilité au choix de ces points. Cela limite son interprétation comme mesure exacte de la sinistralité attendue. Toutefois, ce biais n'altère pas l'objectif principal : utiliser l'AAL comme métrique de comparaison entre deux horizons pour analyser l'impact du changement climatique sur les inondations par débordement.

Enfin, ce travail ouvre des perspectives pour des recherches futures. Une première piste consisterait à appliquer la méthodologie développée à un portefeuille réel d'assurance, ce qui permettrait de surmonter certaines limites actuarielles évoquées. Cela offrirait également l'opportunité d'évaluer la pertinence et l'applicabilité du modèle dans un contexte opérationnel pour les assureurs. Par ailleurs, l'intégration de diverses projections climatiques permettrait d'estimer l'impact du changement climatique sur les inondations par débordement à des horizons temporels plus rapprochés. Une telle approche serait particulièrement utile dans le cadre de la gestion des risques, notamment pour des exercices tels que l'*Own Risk and Solvency Assessment* (ORSA), ou pour analyser l'évolution graduelle des risques climatiques au fil du temps. Ces pistes ouvriraient la voie à une compréhension plus fine et dynamique de l'évolution des risques climatiques pour le secteur de l'assurance.

En conclusion, cette étude montre que le changement climatique aura un impact significatif sur les inondations par débordement, tant en termes de fréquence que de sévérité. Les conséquences assurantielles sont claires : une augmentation importante de la sinistralité est à prévoir, nécessitant des ajustements dans la tarification des primes et la gestion du risque par les assureurs. Ces résultats mettent en lumière la nécessité d'adapter les modèles de prévision et de gestion des inondations face aux défis posés par le climat futur.

Bibliographie

- [1] GIEC (2023). AR6 Synthetis Report : Climate change.
- [2] MINISTÈRE DE L'ÉCONOMIE (2023). Arrêté n°1484 : Publication des arrêtés renforçant les moyens d'action du régime d'indemnisation des catastrophes naturelles et du fonds de garantie des victimes.
- [3] ACPR (2023). Exercice climatique.
- [4] GÉORISQUES (2024). Inondations : le premier risque naturel en France. <https://www.georisques.gouv.fr/minformer-sur-un-risque/inondation>.
- [5] GÉORISQUES (2024). Les risques naturels sur le territoire français : chiffres clés. <https://www.georisques.gouv.fr/minformer-sur-la-prevention-des-risques>.
- [6] CODE DES ASSURANCES (2023). Chapitre V article L125-1 : L'assurance des risques de catastrophes naturelles.
- [7] EM-DAT (2024). Inventaire des dangers et des catastrophes dans le monde entier depuis 1988. <https://www.emdat.be/>.
- [8] CLEMENT C, JOMARD H, BAIZE S (2010). Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire : Sésime du Chili. <https://www.irsn.fr>, p. 2.
- [9] MONCOULON D, CCR (2016). La crue de la Seine en Ile-De-France.
- [10] ANZIANI A, SÉNAT (2010). Rapport d'information n°554 : Xynthia : les leçons d'une catastrophe.
- [11] MÉTÉO FRANCE - BILAN ANNUEL (2022). 1ère partie - Synthèse, année mois par mois et année au fil des saisons. <https://meteofrance.fr>
- [12] INSTITUT PASTEUR (2021). Fiches maladies - Ebola. <https://www.pasteur.fr>
- [13] FOUCART S, LE MONDE (2013). Le « superbolide de Tcheliabinsk », le plus gros météore depuis 1908. <https://www.lemonde.fr>
- [14] LEGIFRANCE (2024). Loi n° 82-600 du 13 juillet 1982 relative à l'indemnisation des victimes de catastrophes naturelles.
- [15] DATA GOUV (2024). Base nationale de Gestion ASsistée des Procédures Administratives relatives aux Risques (GASPAR). <https://www.data.gouv.fr>
- [16] CCR (2022). L'indemnisation des Catastrophes Naturelles en France. <https://www.ccr.fr>
- [17] ECOACT (2022). Comment EcoAct accompagne les organisations pour faire face au risque d'inondation ? <https://eco-act.com/fr/blog/accompagnement-risques-inondation>
- [18] SCOR (2018). Modélisation du risque gel en France.
- [19] L'ARGUS DE L'ASSURANCE (2018). Inondations : comment les assureurs alertent communes et particuliers. <https://www.argusdelassurance.com/assurance-dommages>

- [20] LANGRENEY T, LE COZANNET G, MERAD M (2024). Adapter le système assurantiel français face à l'évolution des risques climatiques.
- [21] FRANCE ASSUREURS (2021). Assurance et finance durable – Chiffres clés 2021. <https://www.franceassureurs.fr/nos-chiffres-cles/financement-de-leconomie>.
- [22] LEGIFRANCE (2021). Décret n°2021-516 du 29 avril 2021 portant abrogation de certaines dispositions relatives à la prévention des risques naturels majeurs.
- [23] SÉNAT (2024). Rapport général n° 128 (2023-2024), tome III, annexe 11, volume 1, déposé le 23 novembre 2023.
- [24] PRÉFET DES PYRÉNÉES ORIENTALES (2023). Définition d'une inondation. <https://www.pyrenees-orientales.gouv.fr>.
- [25] EAU FRANCE (2024). Les volumes de précipitations. <https://www.eaufrance.fr/les-volumes-de-precipitations>.
- [26] EAU FRANCE (2024). Les inondations et les submersions marines. <https://www.eaufrance.fr/les-inondations-et-les-submersions-marines>.
- [27] CCR (2022). Les catastrophes naturelles en France, bilan 1982-2022.
- [28] GÉORISQUES (2024). Dossier expert sur les inondations. <https://www.georisques.gouv.fr/les-inondations-par-debordement-de-cours-deau>.
- [29] COVÉA (2022). Livre blanc : Quelles conséquences sur la sinistralité à l'horizon 2050 ?
- [30] PARLEMENT EUROPÉEN (2007). Directive 2007/60/CE relative à l'évaluation et à la gestion des risques d'inondation.
- [31] GÉORISQUES (2024). Cartographie des zones inondables des Territoires à risque important d'inondation (TRI). <https://www.data.gouv.fr/fr/reuses/cartographie-des-zones-inondables-des-territoires-a-risque-important-dinondation-tri/>.
- [32] CONSEIL DÉPARTEMENTAL DU GARD (2024). Risque inondation. <https://noe.gard.fr/observatoire/prevision-vigilance-et-gestion-de-crise/plans-communaux-de-sauvegarde-pcs.html>.
- [33] MIDILIBRE (2024). Les épisodes cévenols. <https://www.midilibre.fr>.
- [34] EPTB (2020). La crue du 19 septembre 2020 du Gardon, une crue qui restera dans les mémoires. <https://www.les-gardons.fr>.
- [35] ASIA PACIFIC DISASTER (2019). Average Annual Loss methodology. <https://www.unescap.org>.
- [36] FAVRE A-C, MEYLAN P, MUSY A (2008). Hydrologie fréquentielle : une science prédictive. <https://books.google.fr>.
- [37] DUBUISSON B, COLIN J, PLANTON S, RIBES A, SOMOT S, SOUBEYROUX J-M, THAO S, VAUTARD R (2018). Augmentation observée des précipitations journalières extrêmes en Méditerranée française. <https://link.springer.com/article/10.1007/>.
- [38] GUMBEL E-J (1935). Les valeurs extrêmes des distributions statistiques.
- [39] BOREL E (1909). Les probabilités dénombrables et leurs applications arithmétiques.
- [40] LAPLACE P-S (1809). Mémoire sur les approximations des formules qui sont fonctions de très-grands nombres, et sur leur application aux probabilités.
- [41] FISHER R, GNEDENKO B ET TIPPETT L (1928). Théorème de Fisher-Tippett-Gnedenko.
- [42] SOCIÉTÉ FRANÇAISE DE STATISTIQUE (2006). Application de la théorie des valeurs extrêmes en hydrologie.

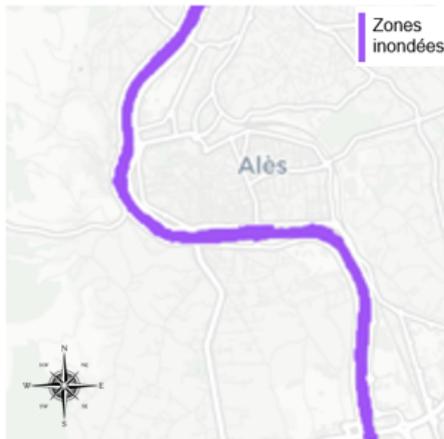
BIBLIOGRAPHIE

- [43] HUBEAU (2024). Stations hydrométriques en France métropolitaine. <https://hubeau.eaufrance.fr>
- [44] HYDROPORTAIL (2024). Courbes de tarage, explications. <https://www.hydro.eaufrance.fr/aide/station-courbe-tarage-details>
- [45] DATA GOUV (2017). BD Carthage. <https://www.data.gouv.fr/fr/datasets/bd-carthage-r/>
- [46] INSTITUT NATIONAL DE L'INFORMATION GÉOGRAPHIQUE ET FORESTIÈRE (2024). RGE Alti 5m. <https://geoservices.ign.fr/rgealti>
- [47] SAGA GIS (2024). Module shapes to grid. <https://saga-gis.sourceforge.io>
- [48] SAGA GIS (2024). Module Vertical Distance to Channel Network. https://saga-gis.sourceforge.io/saga_tool_doc
- [49] DATA GOUV (2024). Base des diagnostics de performance énergétique (DPE). <https://www.data.gouv.fr/fr/datasets>
- [50] CEREMA (2024). Base des Demandes de Valeurs Foncières (DVF). <https://www.data.gouv.fr/fr/datasets/demandes-de-valeurs-foncieres/>
- [51] FÉDÉRATION FRANÇAISE DU BÂTIMENT (2024). Historique de l'indice des coûts de construction de la FFB. <https://www.ffbatiment.fr>
- [52] INSEE (2019). Revenus, pauvreté et niveau de vie en 2019 - Données carroyées. <https://www.insee.fr>
- [53] COMMISSION EUROPÉENNE (2023). Global flood depth-damage functions.
- [54] MILLIMAN (2024). Flood risk modelling in Europe.
- [55] CARBONE4 (2024). Les scénarios SSP. <https://www.carbone4.com/publication-scenarios-ssp-adaptation>
- [56] COPERNICUS (2024). Indicateurs d'impact climatique liés à l'hydrologie de 1970 à 2100 dérivés de projections climatiques européennes ajustées en fonction des biais. <https://cds.climate.copernicus.eu>
- [57] GUMBEL E-J (1954). Statistical Theory of Extreme Values 'and Some Practical Applications. <https://ntrl.ntis.gov>
- [58] NETWORK OF CENTRAL BANKS AND SUPERVISORS FOR GREENING THE FINANCIAL SYSTEM (2023). NGFS Climate Scenarios for central banks and supervisors - Phase III.
- [59] INSEE (2024). Projections de population 2018-2070. <https://www.insee.fr>
- [60] DIRECTION RÉGIONALE DE L'ENVIRONNEMENT, DE L'AMÉNAGEMENT ET DU LOGEMENT, LANGUEDOC-ROUSSILLON (2013). Cartographie des surfaces inondables et des risques. <https://www.rhone-mediterranee.eaufrance.fr>
- [61] SUDALEA (2020). 150 ans d'inondations en photographies sur l'arc méditerranéen. <https://www.les-gardons.fr>
- [62] SERVICE PUBLIC (2024). Quelle est la hauteur et la surface minimum d'un logement à louer ? <https://www.service-public.fr>
- [63] SELOGER.COM (2024). Prix m² immobilier Alès. <https://www.seloger.com>
- [64] MEILLEURSAGENTS.COM (2024). Prix m² immobilier Alès. <https://www.meilleursagents.com>
- [65] DIRECTION RÉGIONALE ET INTERDÉPARTEMENTALE DE L'ENVIRONNEMENT, DE L'AMÉNAGEMENT ET DES TRANSPORTS D'ÎLE-DE-FRANCE (2013). Cartographie des surfaces inondables et des risques. <https://www.drieat.ile-de-france.developpement-durable.gouv.fr>

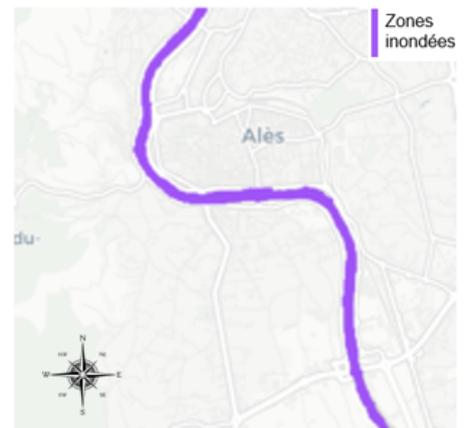
- [66] PARIS NOTAIRES SERVICES (2024). Historique des prix au m² des appartements anciens à Paris.
- [67] OPEN AI (2024). Utilisation de ChatGPT pour un usage de reformulation uniquement.

Annexes

A Empreintes de crue pour la ville d'Alès

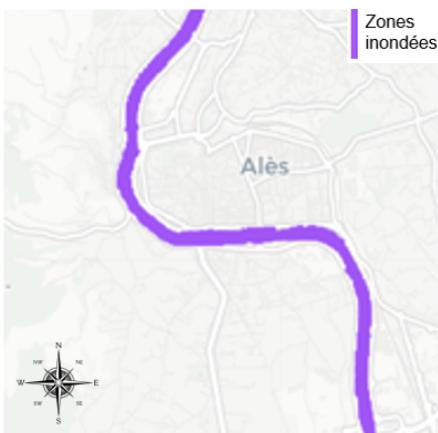


(a) Hauteur d'eau de 1.95m

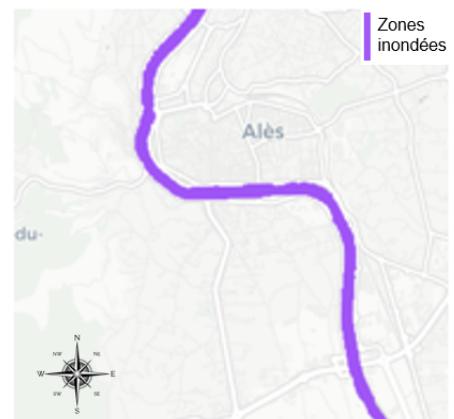


(b) Hauteur d'eau de 2.07m

FIGURE A.1 : Hauteur d'eau biennale (période de retour de 2 ans) : 2024 vs 2050

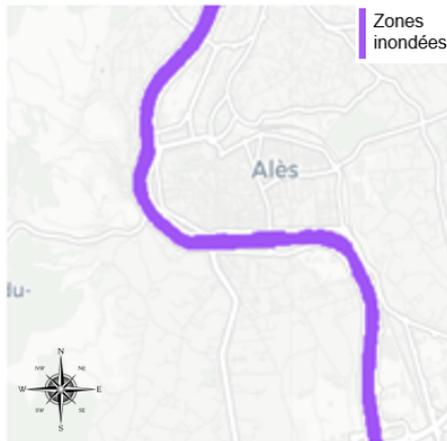


(a) Hauteur d'eau de 2.69m

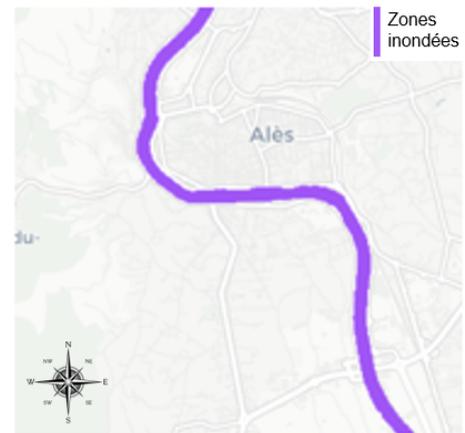


(b) Hauteur d'eau de 2.97m

FIGURE A.2 : Hauteur d'eau quinquennale (période de retour de 5 ans) : 2024 vs 2050



(a) Hauteur d'eau de 3.27m

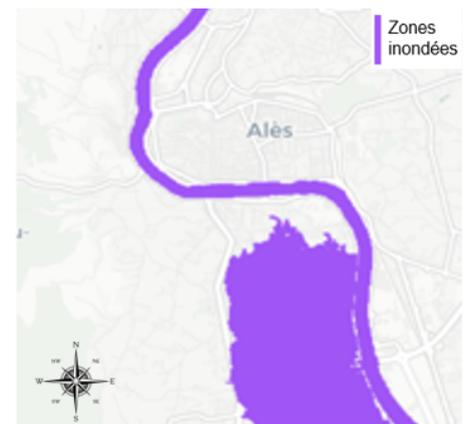


(b) Hauteur d'eau de 3.66m

FIGURE A.3 : Hauteur d'eau décennale (période de retour de 10 ans) : 2024 vs 2050



(a) Hauteur d'eau de 3.92m



(b) Hauteur d'eau de 4.51m

FIGURE A.4 : Hauteur d'eau vicennale (période de retour de 20 ans) : 2024 vs 2050



(a) Hauteur d'eau de 4.89m



(b) Hauteur d'eau de 5.57m

FIGURE A.5 : Hauteur d'eau cinquantennale (période de retour de 50 ans) : 2024 vs 2050

A EMPREINTES DE CRUE POUR LA VILLE D'ALÈS



(a) Hauteur d'eau de 5.73m

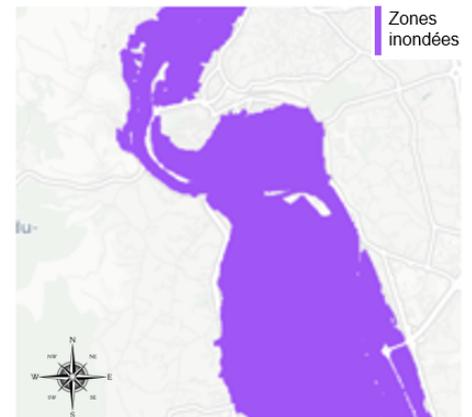


(b) Hauteur d'eau de 6.27m

FIGURE A.6 : Hauteur d'eau centennale (période de retour de 100 ans) : 2024 vs 2050



(a) Hauteur d'eau de 6.69m



(b) Hauteur d'eau de 7.03m

FIGURE A.7 : Hauteur d'eau bicentennale (période de retour de 200 ans) : 2024 vs 2050

B Empreintes de crue pour la ville de Paris

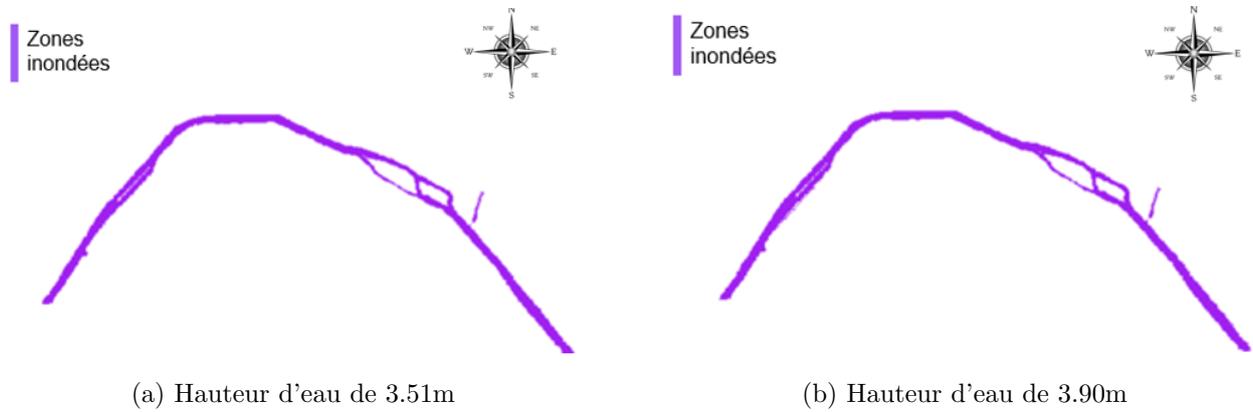


FIGURE B.1 : Hauteur d'eau biennale (période de retour de 2 ans) : 2024 vs 2050

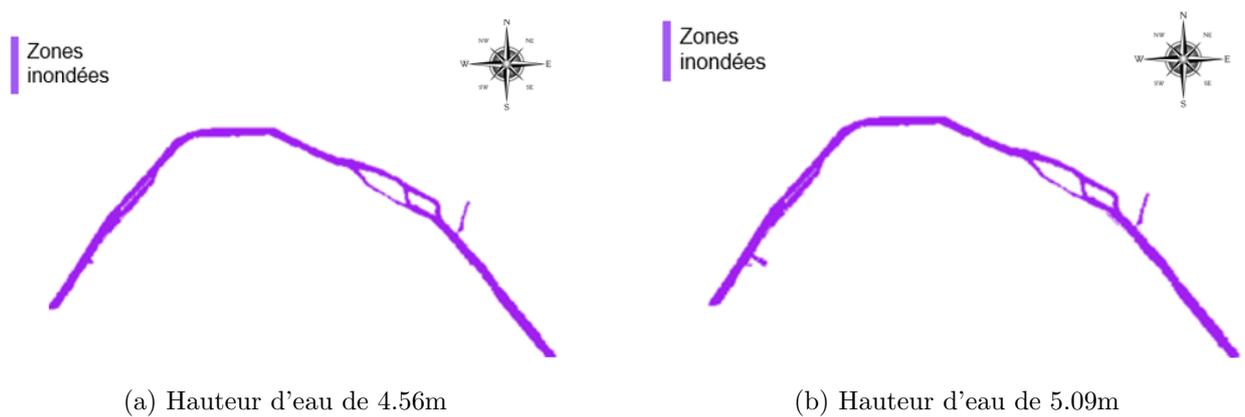


FIGURE B.2 : Hauteur d'eau quinquennale (période de retour de 5 ans) : 2024 vs 2050

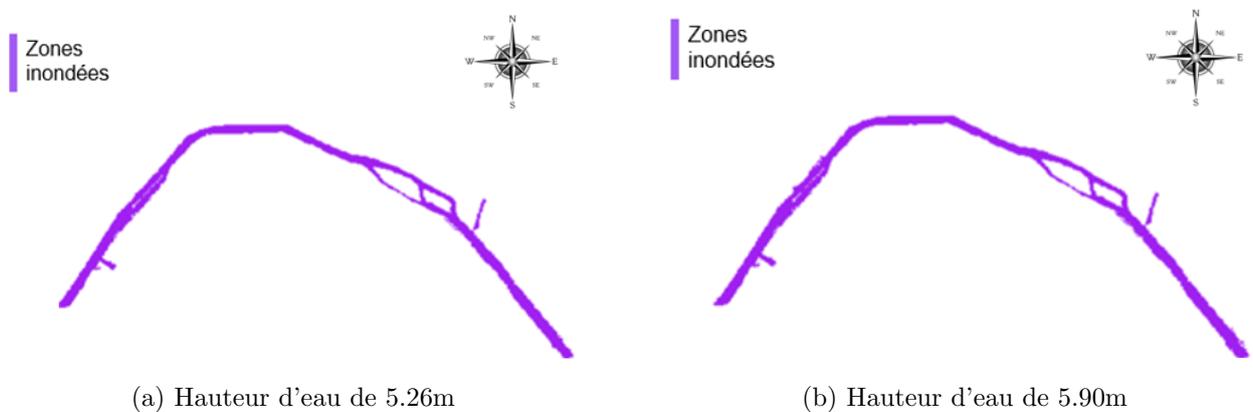


FIGURE B.3 : Hauteur d'eau décennale (période de retour de 10 ans) : 2024 vs 2050

B EMPREINTES DE CRUE POUR LA VILLE DE PARIS

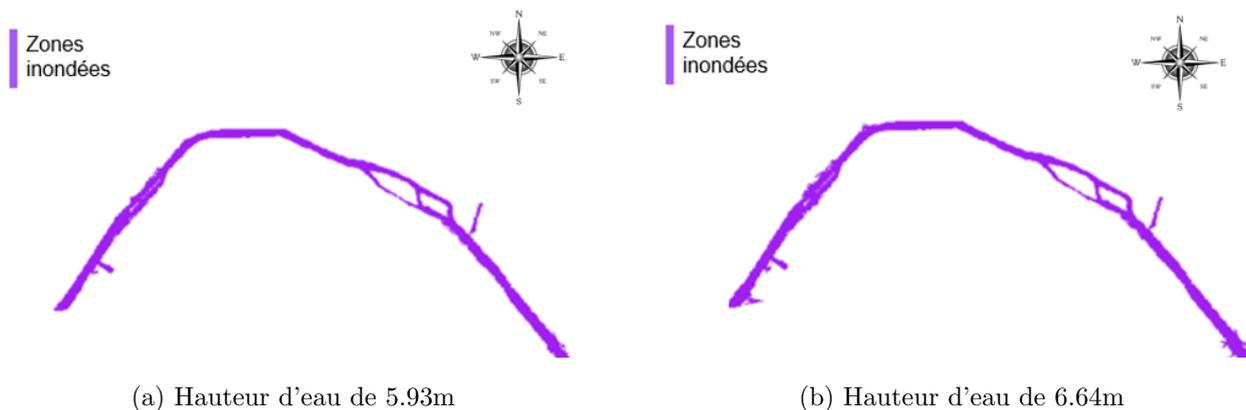


FIGURE B.4 : Hauteur d'eau vicennale (période de retour de 20 ans) : 2024 vs 2050

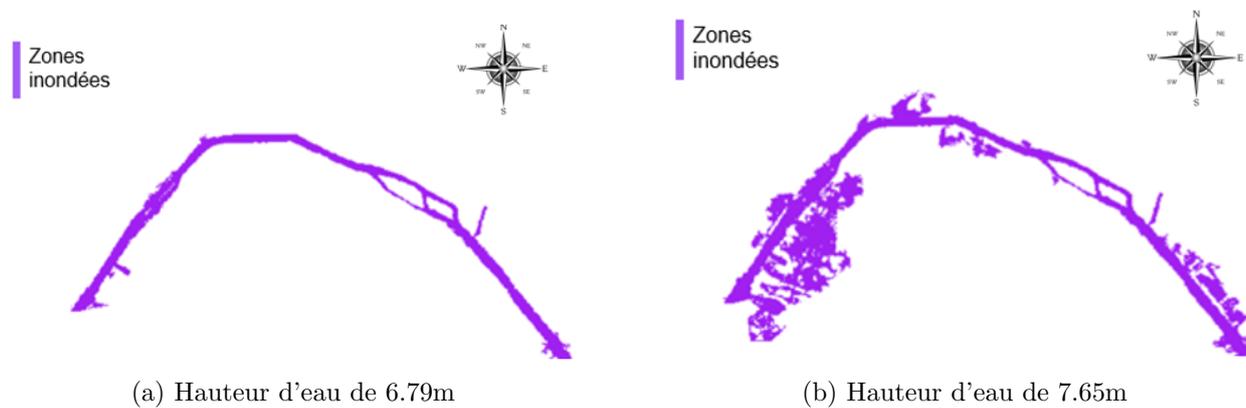


FIGURE B.5 : Hauteur d'eau cinquantennale (période de retour de 50 ans) : 2024 vs 2050

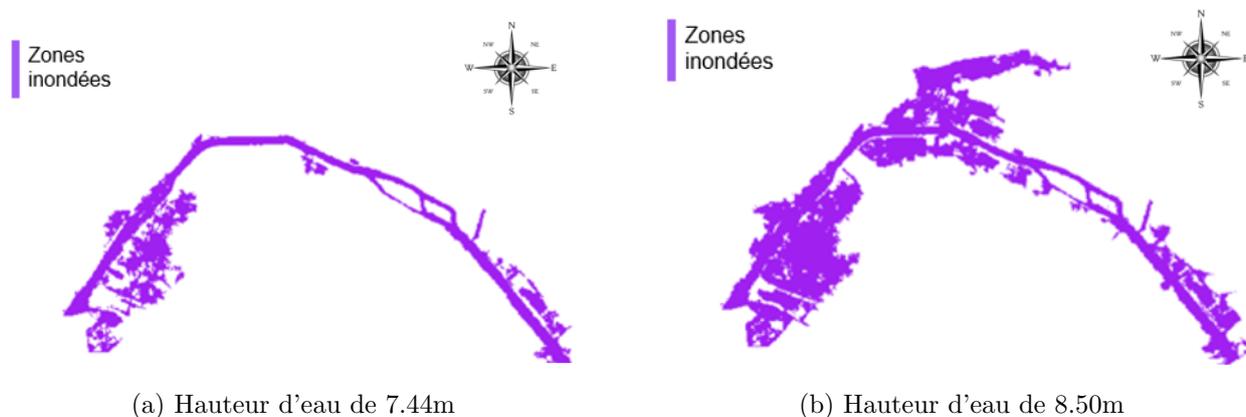


FIGURE B.6 : Hauteur d'eau centennale (période de retour de 100 ans) : 2024 vs 2050

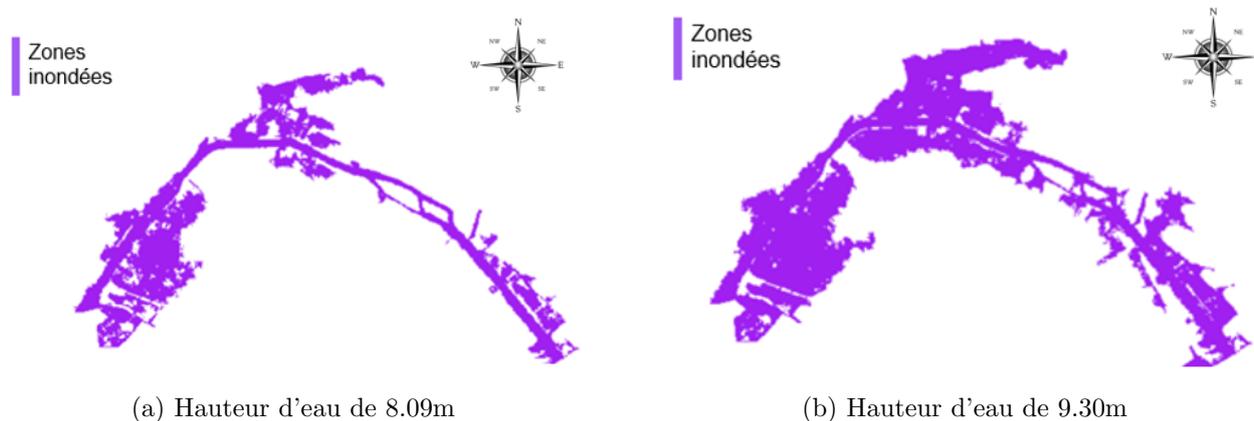


FIGURE B.7 : Hauteur d'eau bicentennale (période de retour de 200 ans) : 2024 vs 2050

C Comparaison des hypothèses prises entre ce mémoire et le livre blanc de Covéa

Hypothèse	Modèle	Covéa
Scénario RCP	4.5	8.5
Maille géographique	Commune	Département
Projections climatiques	Jeu de données A	Jeu de données B
Évolution démographique	Non	Oui
Période historique	Variable	2008-2018
Loi théorie valeurs extrêmes	Variable	Gumbel

TABLE 39 : Différences d'hypothèses entre ce mémoire et Covéa dans son livre blanc