

**Mémoire présenté le :
pour l'obtention du diplôme
de Statisticien Mention Actuariat
et l'admission à l'Institut des Actuares**

Par : **Ines BOUCHOUCHI**

Titre : **Défi climatique et durabilité, vers les limites de l'assurabilité ?**

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

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

Membres présents du jury de la
filère :

Signature :

Entreprise :

Nom : Actuelia

Signature : 

Directeur de mémoire en
entreprise

Membres présents du jury de
l'Institut des Actuares :

Signature :

Nom : Louis-Anselme de Lamaze

Signature : 

Invité :

Nom :

Signature :

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

Signature du responsable
entreprise :



Signature du candidat :



Résumé

Mots-clés : Durabilité, Assurabilité, Dérive climatique, Catastrophes naturelles, Solvabilité II, ORSA, Réassurance, *Open Data*, GLM, Séries temporelles, Théorie des valeurs extrêmes.

Dans un contexte où le réchauffement climatique est devenu une préoccupation majeure, les organismes d'assurance sont confrontés à des défis complexes. Une augmentation des sinistres climatiques en fréquence et en intensité, accompagnée de coûts d'indemnisation plus élevés, met en péril la stabilité financière des assureurs. De plus, la pression réglementaire croissante les pousse à intégrer la notion de durabilité et les risques climatiques dans leur gestion des risques pour garantir la viabilité de leur activité.

Face à cette situation, l'objectif de ce mémoire consiste à **analyser l'impact du changement climatique sur l'activité d'assurance**. Il vise à mettre en lumière la dérive de sinistralité future et ses conséquences. Ainsi, il souligne le défi de concilier l'assurabilité des risques et les impératifs de durabilité face au dérèglement climatique.

Pour ce faire, une modélisation de la fréquence de survenance des catastrophes naturelles liée aux risques d'inondation et de sécheresse en France est menée via l'utilisation d'un GLM et de séries temporelles sur de l'*open data*. L'augmentation des coûts est évaluée en se basant sur des articles assurantiels portant sur les évolutions des dépenses dues aux sinistres climatiques.

Plusieurs limites face à cette dérive de sinistralité future sont identifiées. L'efficacité de la réassurance comme atténuation du risque est remise en question et la définition actuelle de sinistres graves est susceptible d'évoluer en raison d'un décalage du seuil de ces derniers. Enfin, un exemple concret est présenté à travers une projection ORSA pour un organisme fictif non-vie. Plusieurs stratégies et *management actions* sont proposées pour permettre le maintien de l'activité face au défi climatique.

Ainsi, l'intérêt des assureurs à prendre des mesures face à cette situation inédite apparaît alors crucial.

Abstract

Keywords: Sustainability, Insurability, Climate drift, Natural disasters, Solvency II, ORSA, Reinsurance, Open Data, GLM, Time series, Extreme value theory.

At a time when global warming has become a major concern, insurance companies are facing complex challenges. An increase in the frequency and intensity of weather-related claims, accompanied by higher compensation costs, is jeopardizing the financial stability of insurers. In addition, growing regulatory pressure is forcing them to integrate the notion of sustainability and climate risks into their risk management to ensure the viability of their business.

Faced with this situation, the aim of this thesis is **to analyze the impact of climate change on the insurance business**. It aims to highlight the future claims drift and its consequences. In so doing, it highlights the challenge of reconciling the insurability of risks with the imperatives of sustainability in the face of climate disruption.

To this end, a model of the frequency of occurrence of natural disasters linked to the risks of flooding and drought in France is carried out using a GLM and time series on open data. The increase in costs is assessed based on insurance articles on changes in expenditure due to climatic disasters.

Several limitations to these future claims drift have been identified. The effectiveness of reinsurance as a risk mitigant is questioned and the current definition of severe claims is likely to evolve due to a shift in the threshold for severe claims. Finally, a concrete example is presented through an ORSA projection for a fictitious non-life insurer. Several strategies and management actions are proposed to enable business to continue in the face of the climate challenge.

Insurers therefore have a crucial interest in acting in this unprecedented situation.

Note de synthèse

Contexte et problématique

Ce mémoire s’inscrit dans un contexte où le réchauffement climatique suscite de nombreuses préoccupations. En effet, les dernières années sont marquées par une augmentation de la fréquence et de la sévérité des sinistres liés aux catastrophes naturelles. Cette situation inédite compromet la stabilité financière des organismes d’assurance qui acceptent de couvrir ces risques. En raison d’une pression réglementaire croissante, ces derniers se voient contraints d’intégrer les risques climatiques dans leur gestion des risques, afin d’assurer la pérennité de leur activité.

De ce fait, ce mémoire a pour objectif de mesurer la dérive de sinistralité future et d’évaluer ses conséquences sur un organisme d’assurance non-vie. Il vise également à proposer plusieurs solutions permettant le maintien de l’activité face au dérèglement climatique.

Dans un premier temps, un rappel du contexte actuel et des enjeux engendrés par le réchauffement climatique pour les compagnies d’assurance est effectué. Ensuite, une démarche visant à quantifier la dérive de sinistralité future, à la fois en termes de fréquence et de coût est présentée. Les résultats obtenus donnent lieu à l’évaluation des limites induites par cette évolution sur un portefeuille non-vie. Enfin, une illustration concrète est fournie au moyen d’une projection ORSA appliquée à une entité fictive non-vie. Diverses stratégies sont suggérées afin d’assurer la continuité de l’activité en réponse au défi climatique.

Mesure d’une dérive de sinistralité

Dans le domaine assurantiel, une dérive de sinistralité peut être définie comme une évolution ou un changement progressif pouvant affecter à la fois la fréquence des sinistres et leurs coûts d’indemnisation.

Fréquence

La dérive de sinistralité en fréquence correspond à une augmentation croissante du nombre de sinistres déclarés.

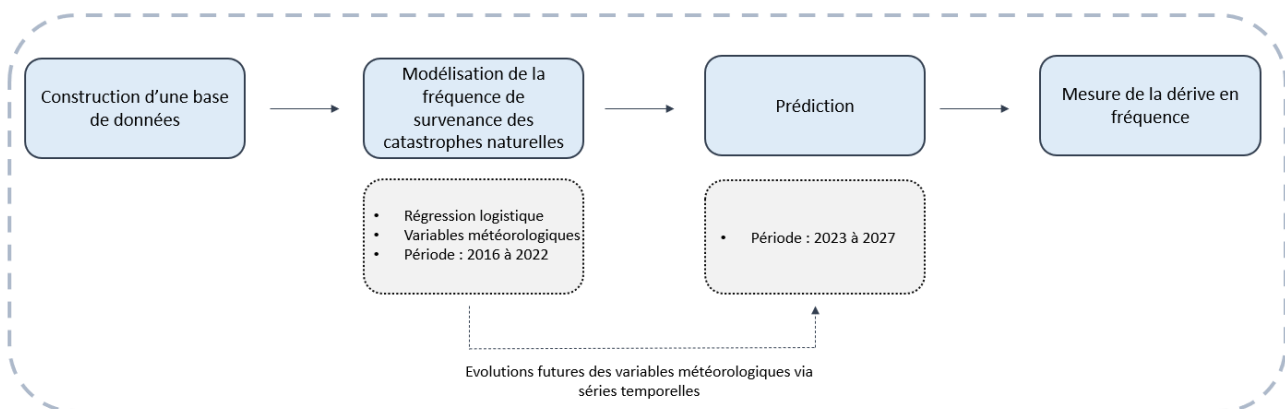


Figure 1 : Démarche pour la mesure de dérive en fréquence

Dans un premier temps, la constitution de la base de données utilisée pour la modélisation s'appuie sur des données de l'*Open Data* afin de pallier la difficulté de la récolte des données en entreprise. L'étude se limite aux catastrophes naturelles survenues entre 2016 et 2022 et aux risques d'inondation et de sécheresse. Celle-ci est effectuée de manière indépendante sur chaque péril afin d'analyser séparément les caractéristiques et les impacts de chaque risque. L'objectif du GLM est de prédire la fréquence d'occurrence d'évènements rares par le biais d'une régression logistique. Par conséquent, le *bagging* n'a pas été utilisé pour améliorer sa précision. Plusieurs paramètres météorologiques sont utilisés comme variables explicatives, tels que la température, l'humidité, la pression ou encore le volume de pluie mesuré. La variable d'intérêt est une variable binaire qui indique la survenance d'une catastrophe naturelle à une date donnée.

La robustesse du modèle a été testée via plusieurs mesures de performances. Les résultats obtenus indiquent l'absence de surapprentissage et confirment la bonne qualité prédictive du modèle.

	Base <i>train</i>	Base <i>test</i>
RMSE	35,89%	30,62%
MAE	22,53%	19,37%

Tableau 1 : Métriques d'erreur du modèle construit

Mesure de performance	Résultat
AUC	0,94
<i>Accuracy</i>	0,92
<i>F1-Score</i>	0,95

Tableau 2 : Mesures de performance du modèle inondation

Une fois que le modèle a été validé, les paramètres ont été projetés à l'aide de séries temporelles afin d'obtenir leur évolution dans le futur. Un modèle ARIMA saisonnier a été utilisé sur les différentes variables météorologiques en raison de sa capacité à modéliser les tendances et les variations saisonnières.

Station	Température moyenne sur la période 2016-2022	Température moyenne prévue sur la période 2023-2027	Evolution	Ecart
Reims	11,79°C	11,84°C	0,37%	0,05°C
Rennes	12,78°C	13,89°C	8,59%	1,11°C
Gourdon	13,62°C	13,94°C	2,28%	0,32°C
Loudes	10,01°C	10,26°C	2,48%	0,25°C
Nice	17,03°C	17,21°C	1,03%	0,18°C

Tableau 3 : Résultats sur l'évolution de la température à horizon 2027

Les estimations futures des différentes variables météorologiques ont permis de créer l'input de prédiction du GLM. Celui-ci est alors utilisé pour modéliser la probabilité des occurrences futures de catastrophes naturelles en France. Les résultats sont ensuite agrégés par année afin de visualiser l'évolution progressive des sinistres en termes de fréquence.

De la même façon pour les deux périls, une augmentation de la fréquence est attendue pour les cinq prochaines années. Une hausse respective de **19%** et **28%** du nombre d'arrêtés liés au risque d'inondation et de sécheresse est anticipée. Ces résultats confirment l'hypothèse d'une dérive de sinistralité future pour les assureurs.

Coût

À la suite de la partie relative à la dérive en fréquence, ce mémoire présente la démarche adoptée pour la dérive en coût, pouvant se définir comme la hausse graduelle du coût d'indemnisation. L'un des défis réside dans la confidentialité des données relatives aux coûts de sinistres, qui ne sont pas aussi accessibles que les données de fréquence. Une approche alternative a été adoptée, impliquant la réalisation d'un *benchmark* d'articles assurantiels qui abordent l'évolution des coûts de dédommagement liés au réchauffement climatique à partir d'observations de marché. Afin d'évaluer une dérive à court terme, les projections sont ajustées linéairement à horizon 2027 pour refléter de manière réaliste les évolutions futures.

Auteur	Année de publication	Horizon	Evolution du coût pour le péril inondation	Evolution du coût pour le péril sécheresse
CCR – Météo France	2018	2050	38%	23%
France Assureurs	2021	2050	81%	212%

Tableau 4 : Extrait du *benchmark* réalisé pour la dérive de coût

Hypothèses choisies pour la dérive en fréquence et en coût

Finalement, la démarche réalisée a permis de mesurer l'hypothèse de dérive de sinistralité future avancée par les spécialistes. La dérive de fréquence a été évaluée par le biais d'un GLM et d'un modèle de séries temporelles. L'évolution des coûts a été déterminée par un benchmark. Les coefficients d'évolution de la fréquence et du coût à horizon 2027 sont respectivement de :

- **19%** et **14,5%** pour le péril inondation
- **28%** et **37,9%** pour le péril sécheresse

Néanmoins, une approche prudente est essentielle lors de la considération de ces résultats, qui peuvent varier en fonction de chaque organisme d'assurance. Ils sont aussi susceptibles d'évoluer dans le temps avec de nouvelles données ou si les caractéristiques du régime des catastrophes naturelles changent également.

Impacts sur un portefeuille non-vie

Une fois l'hypothèse de dérive future en fréquence et en coût confirmée, il convient d'évaluer ses impacts sur le portefeuille de Climatia, un assureur non-vie fictif. L'analyse se concentre uniquement sur les sinistres climatiques liés au risque de sécheresse et survenus entre 2016 et 2022.

Modélisation des événements climatiques dans un scénario incluant une dérive de sinistralité

La simulation des événements se base sur la modélisation de la sinistralité historique de l'organisme en introduisant les coefficients de dérive (**28%** pour la fréquence et **37,9%** pour le coût). Celle-ci est effectuée à l'aide d'un processus de Poisson composé qui combine à la fois la fréquence des événements et leurs coûts, respectivement modélisés par une distribution de Poisson et une distribution gaussienne inverse.

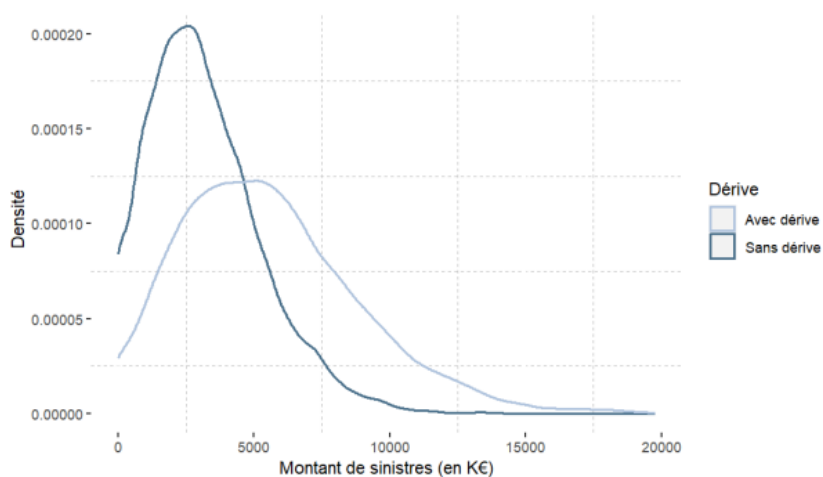


Figure 2 : Densité de distribution dans les scénarios sans et avec dérive de sinistralité

La dérive a un impact sur la distribution de sinistralité. En effet, un décalage et un aplatissement de la courbe sont observés et s'expliquent par l'augmentation de la moyenne en raison d'une sinistralité plus importante et une réduction de la dispersion.

Réassurance

La réassurance est très souvent utilisée par les assureurs non-vie pour céder une partie du risque et limiter les pertes financières. Cette technique d'atténuation est remise en question avec l'évolution croissante de la sinistralité climatique. En effet, la dérive a mis en exergue une dégradation du reste à charge moyen par an pour les organismes d'assurance de 48% du reste à charge cumulé. Afin de ne pas mettre en péril leur stabilité financière, ces derniers ont tout intérêt à effectuer une revue de leurs programmes de réassurance, en prenant en compte l'évolution du coût de ce procédé.

Dérive des sinistres graves

Par ailleurs, l'analyse des impacts d'une dérive climatique pour un assureur non-vie a mis en lumière un décalage du seuil des sinistres graves, accentué par l'accélération du réchauffement climatique. Celle-ci a été réalisée à l'aide de la méthode *Peaks-Over-Threshold*

qui permet d'étudier la distribution des excès au-delà d'un certain seuil, correspondant à quantile à 95%. Les paramètres (μ , σ , ξ) de la distribution des excès, approchée par une GPD, sont ensuite estimés à l'aide de la méthode du maximum de vraisemblance.

	Paramètre de localisation μ	Paramètre d'échelle σ	Paramètre de forme ξ
Scénario sans dérive	7 038,73	1376,46	-0,06
Scénario avec dérive	11 682,16	2079,21	-0,13

Tableau 5 : Estimation des paramètres de la distribution des excès sur le portefeuille exemple

Les paramètres obtenus traduisent un décalage du seuil des sinistres graves. L'augmentation du paramètre de forme illustre notamment cet effet avec l'épaississement de la queue de distribution fine à droite. Ce phénomène signifie que les événements extrêmes deviennent encore plus fréquents dans un scénario incluant une dérive de sinistralité. Autrement dit, des montants d'indemnisation considérés auparavant comme des sinistres graves pourront après dérive être considérés comme attritionnels. Les assureurs doivent prendre en compte cette nouvelle reclassification des sinistres et revoir leur stratégie pour assurer la pérennité de leur activité.

Projection ORSA sur l'organisme d'assurance non-vie : Climatia

Enfin, ce mémoire illustre de manière concrète l'impact d'une dérive de sinistralité future sur Climatia à travers une projection ORSA. Plusieurs solutions sont proposées pour garantir la pérennité de l'organisme face au défi climatique.

Stress-test incluant la dérive de sinistralité mesurée

L'organisme étudié est stable à la fois sur le plan de la rentabilité et de la solvabilité dans la projection du scénario dit central, c'est-à-dire, n'incluant pas de dérive de sinistralité. Néanmoins, afin d'évaluer sa robustesse face à une évolution croissante de la sinistralité climatique, un *stress-test* est effectué. La projection des événements climatiques est modifiée en intégrant la modélisation réalisée dans la partie précédente. Les ratios S/P sont alors dégradés.

De plus, les coûts de réassurance non-proportionnelle sont augmentés. En effet, en conservant une priorité à 3 M€ et un plafond à 10 M€, le réassureur prend en charge 40% des sinistres de Climatia dans le scénario avec dérive contre 10% auparavant. Ce dernier a alors tout intérêt à augmenter le prix de sa couverture, ici multiplié par quatre, puisqu'il va prendre en charge des risques encore plus fréquents et coûteux.

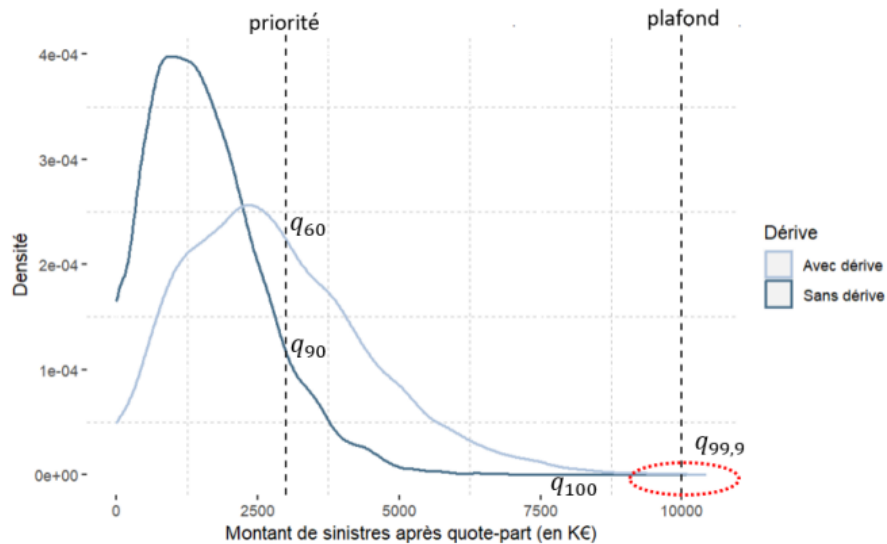


Figure 3 : Limite du programme de réassurance non-proportionnel dans le scénario avec dérive

De ce fait, le réassureur voit son résultat augmenter. L'assureur quant à lui voit sa rentabilité et sa solvabilité diminuer en raison d'une hausse du SCR et une forte diminution des fonds propres économiques pour absorber le pic de sinistralité. Cette situation conduit à un ratio de couverture ne correspondant plus à son appétence globale.

Comparaison avec le *stress-test* climatique ACPR

Dans son nouveau pilote climatique, l'ACPR intègre à travers un scénario court terme la solvabilité des organismes d'assurance. Contrairement au 1^{er} *stress-test* réalisé, celui initié par l'ACPR est à réaliser uniquement sur les années 2023 et 2024. Il se veut également être représentatif de la sinistralité liée au risque sécheresse observée en 2022. Des ajustements liés à l'inflation et à l'évolution du nombre de risques assurés sont ajoutés.

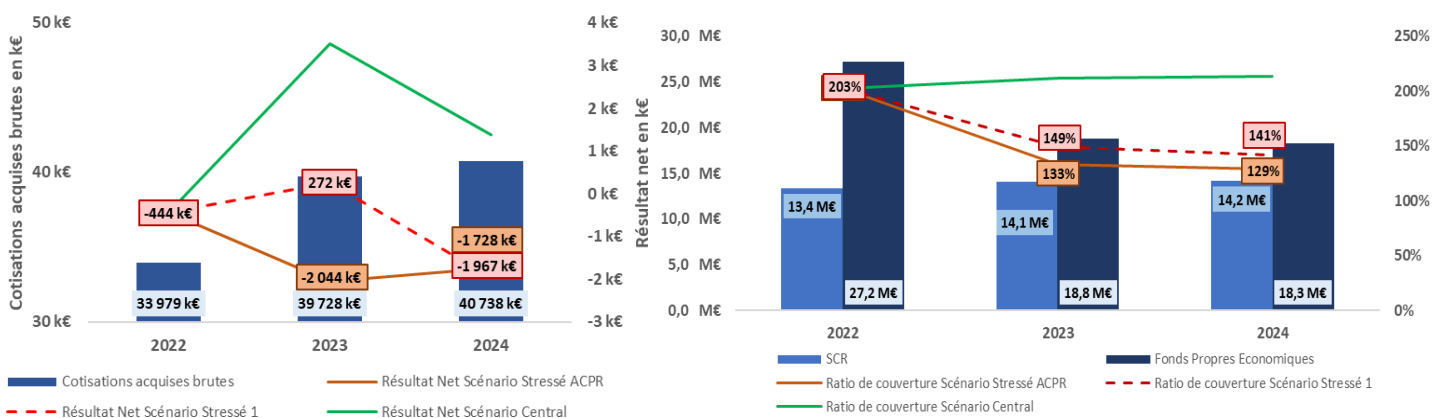


Figure 4 : Comparaison avec le *stress-test* climatique ACPR

Les résultats suivent la même trajectoire défavorable pour l'assureur tant sur le plan de la rentabilité que de la solvabilité. Néanmoins, le *stress-test* initié par l'ACPR apparaît encore

plus pénalisant pour Climatia. Cela peut s'expliquer par une sinistralité plus importante dans le *stress-test* du pilote climatique (18,40 M€ contre 13,82 M€). Celle-ci est représentative de l'année 2022, marquée par une sinistralité exceptionnelle pour Climatia en raison de vagues de sécheresse importantes. Puisque les coûts de réassurance sont augmentés, cette mesure d'atténuation du risque coûte encore plus cher à l'organisme.

Management actions

La réalisation du stress-test a mis en évidence les conséquences défavorables d'une dérive pour l'organisme. Par conséquent, il devient impératif d'introduire des mesures visant à garantir la durabilité de l'activité de Climatia.

De ce fait, la 1^{ère} *management action* consiste à augmenter les primes d'assurance de la branche « Dommages aux biens » de 7,6%. Le réassureur, bénéficiant toujours de la hausse du prix de sa couverture, voit alors son résultat augmenter. La mise en place de cette stratégie s'avère également avantageuse pour Climatia avec l'augmentation de son résultat et de sa solvabilité. Néanmoins, elle n'a pas permis un retour à la situation initiale. La rentabilité prend le dessus sur l'augmentation du ratio de solvabilité. Il est toutefois nécessaire pour l'organisme de considérer cette décision de gestion avec prudence afin de préserver son activité tout en restant concurrentiel sur le marché.

La 2^e *management action* correspond à la modification du traité de réassurance non-proportionnel. En effet, celui-ci n'est plus adapté à la nouvelle distribution de sinistralité dans le scénario avec dérive. Les nouvelles bornes du traité sont choisies de telle sorte à conserver les mêmes quantiles de risque que dans le scénario central (voir figure 3). Puisque le réassureur prend en charge le même pourcentage de risque que dans le scénario central, la hausse des prix de couverture n'est plus nécessaire. Les prix du programme initial sont alors maintenus.

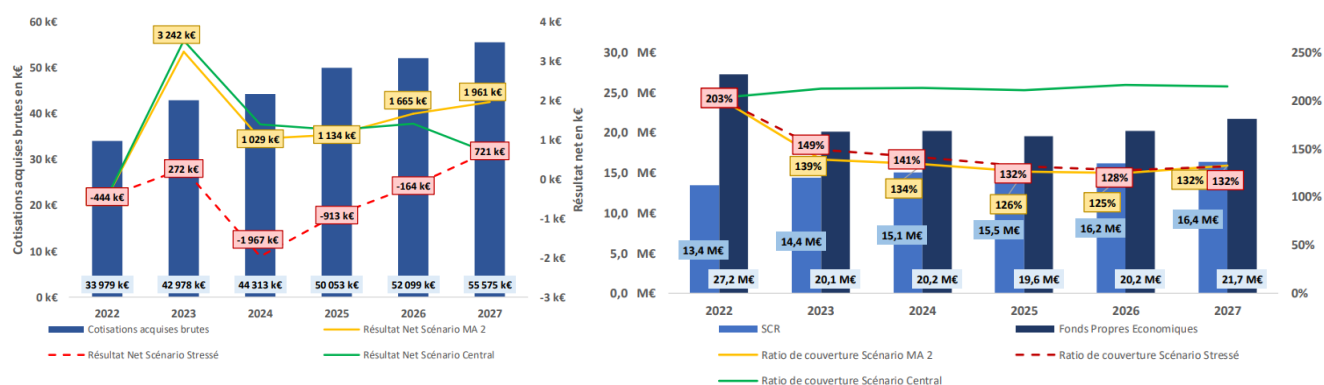


Figure 5 : Résultats de la MA n°2

L'implémentation de cette décision de gestion se traduit par la baisse du résultat du réassureur en raison d'une diminution des cessions. Sur le plan de la rentabilité, elle permet à Climatia de retrouver sa rentabilité historique et même de la dépasser sur la fin de la

projection. Néanmoins, sur le plan prudentiel, le ratio de couverture diminue encore plus que dans le scénario stressé. Ceci s'explique par des sinistres plus fréquents et coûteux qui entraînent une hausse respective du SCR Non-Vie et du SCR Contrepartie, et une baisse des fonds propres économiques.

Conclusion

Ce mémoire permet tout d'abord de confirmer et quantifier l'existence d'une dérive de sinistralité future pour les assureurs. Celle-ci se traduit par une augmentation de la fréquence et des coûts des sinistres climatiques.

Par la suite, plusieurs limites sont identifiées comme la revue des programmes de réassurance ou encore la dérive des sinistres graves incitant les assureurs à revoir leurs stratégies pour garantir la pérennité de leur activité.

Enfin, des solutions concrètes sont proposées à travers l'exemple de Climatia. Tout d'abord, l'augmentation du niveau des primes, qui permet à l'assureur d'augmenter largement son niveau de rentabilité. Sa solvabilité est légèrement améliorée. Néanmoins, cette décision n'apparaît pas bénéfique pour le réassureur. Ensuite, la modification du traité de réassurance non-proportionnel, n'étant plus adapté à la nouvelle distribution de sinistralité. Cette stratégie améliore la rentabilité des organismes d'assurance mais entraîne une baisse de la solvabilité. Cette situation soulève ainsi des interrogations quant à la capacité des assureurs à honorer leurs engagements envers les assurés à long terme et à une potentielle intervention de l'Etat.

Ce mémoire donne ainsi un aperçu des stratégies que les assureurs non-vie vont potentiellement devoir mettre en place pour faire face à un réchauffement climatique croissant.

Executive summary

Context and issues

This thesis takes place against a backdrop of widespread concern about global warming. Indeed, recent years have seen an increase in the frequency and severity of claims linked to natural disasters. This unprecedented situation is jeopardizing the financial stability of the insurance organizations that accept to cover these risks. Increasing regulatory pressure is forcing them to integrate climate risks into their risk management, to ensure the sustainability of their business.

The aim of this report is therefore to measure future claims drift and assess its impact on a non-life insurer. It also aims to propose several solutions for maintaining business in the face of climate disruption.

First, the current context and the challenges posed by global warming for insurance companies are reviewed. Next, an approach aimed at quantifying the future claims drift, both in terms of frequency and cost, is presented. The results obtained are used to assess the limits induced by this evolution on a non-life portfolio. Finally, a concrete illustration is provided by means of an ORSA projection applied to a fictitious non-life entity. Various strategies are suggested to ensure business continuity in response to the climate challenge.

Measuring a claims drift

In insurance field, a claims drift can be defined as a progressive change or development that can affect both the frequency of claims and their compensation costs.

Frequency

The claims frequency drift corresponds to an increasing increase in the number of claims reported.

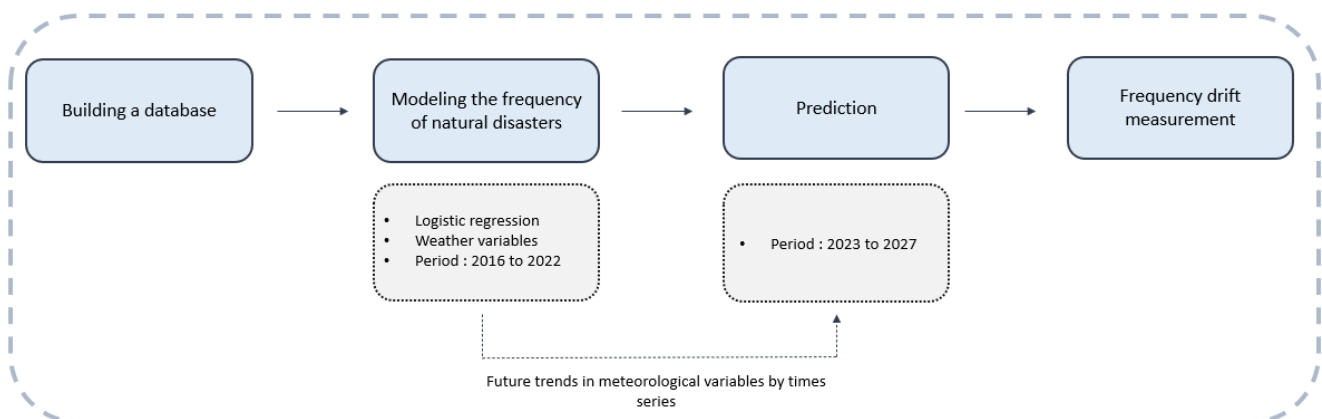


Figure 6 : Procedure for measuring frequency drift

Initially, the database used for the modeling is based on Open Data, to overcome the difficulty of collecting data in companies. The study is limited to natural disasters occurring between 2016 and 2022, and to flood and drought risks. It is carried out independently for each peril, to analyze the characteristics and impacts of each risk separately. The aim of GLM is to predict the frequency of occurrence of rare events by means of logistic regression. Consequently, bagging has not been used to improve its accuracy. Several meteorological parameters are used as explanatory variables, such as temperature, humidity, pressure, or measured rainfall volume. The variable of interest is a binary variable indicating the occurrence of a natural disaster on a given date.

The robustness of the model was tested using several performance measures. The results indicate the absence of overlearning and confirm the model's good predictive quality.

	<i>Train base</i>	<i>Test base</i>
RMSE	35,89%	30,62%
MAE	22,53%	19,37%

Tableau 6 : Model error metrics

Performance measure	Result
AUC	0,94
<i>Accuracy</i>	0,92
<i>F1-Score</i>	0,95

Tableau 7 : Flood model performance measurements

Once the model had been validated, the parameters were projected using time series to obtain their evolution in the future. A seasonal ARIMA model was used for the various meteorological variables because of its ability to model seasonal trends and variations.

Station	Average temperature 2016-2022	Projected average temperature 2023-2027	Change	Deviation
Reims	11,79°C	11,84°C	0,37%	0,05°C
Rennes	12,78°C	13,89°C	8,59%	1,11°C
Gourdon	13,62°C	13,94°C	2,28%	0,32°C
Loudes	10,01°C	10,26°C	2,48%	0,25°C
Nice	17,03°C	17,21°C	1,03%	0,18°C

Tableau 8 : Results on temperature trends to 2027

Future estimates of the various meteorological variables were used to create the GLM prediction input. This is then used to model the probability of future occurrences of natural disasters in France. The results are then aggregated by year to visualize the progressive evolution of claims in terms of frequency.

Similarly, for both perils, an increase in frequency is expected over the next five years. An increase of **19%** and **28%** respectively in the number of flood and drought claims is anticipated. These results confirm the assumption of a future claims drift for insurers.

Cost

Following the section on frequency drift, this paper presents the approach adopted for cost drift, which can be defined as the gradual increase in claims costs. One of the challenges is the confidentiality of claims cost data, which is not as accessible as frequency data. An alternative approach has been adopted, involving the benchmarking of insurance articles that address the evolution of compensation costs linked to global warming, based on market observations. To assess short-term drift, the projections are linearly adjusted to 2027 to realistically reflect future developments.

Author	Year of publication	Horizon	Cost trend for flood peril	Cost trend for drought peril
CCR – Météo France	2018	2050	38%	23%
France Assureurs	2021	2050	81%	212%

Tableau 9 : Extract from the cost drift benchmark

Assumptions for frequency and cost drift

Finally, the approach adopted enabled us to measure the hypothesis of future claims drift put forward by the specialists. Frequency drift was assessed using a GLM and a time series model. Cost trends were determined using a benchmark. The frequency and cost evolution coefficients up to 2027 are respectively:

- **19%** and **14.5%** for flood perils
- **28%** and **37.9%** for drought perils.

Nevertheless, a cautious approach is essential when considering these results, which may vary according to each insurance organization. They are also likely to evolve over time with new data or if the characteristics of the natural catastrophe regime also change.

Impacts on a non-life portfolio

Once the hypothesis of future drift in frequency and cost has been confirmed, we need to assess its impact on the portfolio of Climatia, a fictitious non-life insurer. The analysis focuses solely on drought-related weather-related claims occurring between 2016 and 2022.

Modeling climatic events in a scenario including a claims drift

Event simulation is based on the modeling of the organization's historical claims experience, with the introduction of drift coefficients (28% for frequency and 37.9% for cost). This is carried out using a compound Poisson process which combines both the frequency of events and their costs, respectively modeled by a Poisson distribution and an inverse Gaussian distribution.

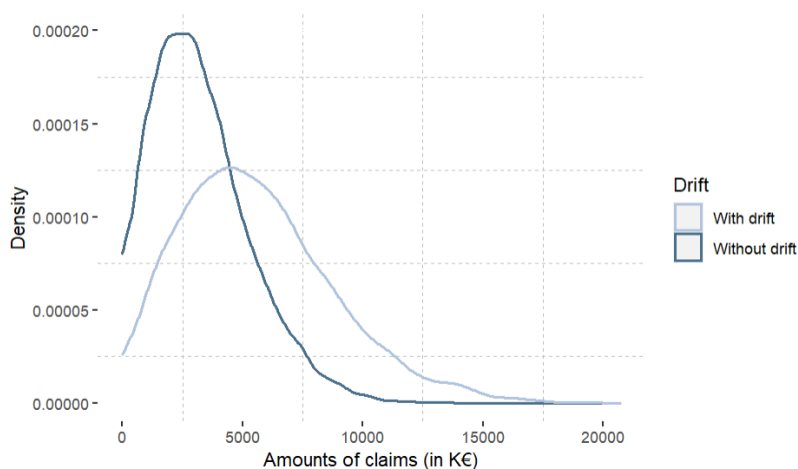


Figure 7 : Distribution density in scenarios with and without claims drift

Drift has an impact on claims distribution. Indeed, a shift and a flattening of the curve are observed and can be explained by an increase in the average due to a higher claims experience and a reduction in the dispersion.

Reinsurance

Reinsurance is very often used by non-life insurers to cede part of the risk and limit financial losses. This mitigation technique is being called into question by the growing trend in climatic claims. Indeed, the drift has highlighted a deterioration in the average annual outstandings for insurers, amounting to 48% of the cumulative outstandings. To avoid jeopardizing their financial stability, insurers are advised to review their reinsurance programs, taking into account changes in the cost of this process.

Severe claims trend

In addition, an analysis of the impact of climatic drift on a non-life insurer highlighted a shift in the threshold for serious claims, accentuated by the acceleration of global warming. The analysis was carried out using the Peaks-Over-Threshold method, which studies the distribution of excesses above a certain threshold, corresponding to a 95% quantile. The

parameters (μ, σ, ξ) of the excess distribution, approximated by a GPD, are then estimated using the maximum likelihood method.

	Location parameter μ	Scale parameter σ	Shape parameter ξ
Scenario without drift	7 038,73	1376,46	-0,06
Scenario with drift	11 682,16	2079,21	-0,13

Tableau 10 : Estimation of the parameters of the excess distribution on the example portfolio

The parameters obtained reflect a shift in the severe claim’s threshold. The increase in the shape parameter illustrates this effect, with the thickening of the tail of the fine distribution on the right. This phenomenon means that extreme events become even more frequent in a scenario including a claims experience drift. In other words, claims amount previously considered to be serious losses may, after drift, be considered attritional. Insurers need to take this new reclassification of claims into account and review their strategy to ensure the long-term viability of their business.

ORSA projection for non-life insurer: Climatia

Finally, this report provides a concrete illustration of the impact of a future claims drift on Climatia through an ORSA projection. Several solutions are proposed to guarantee the organization's sustainability in the face of the climate challenge.

Stress-test including measured claims drift

The organization studied is stable both in terms of profitability and solvency in the projection of the so-called central scenario, i.e., not including claims drift. Nevertheless, to assess its robustness in the face of an increasing trend in climatic claims, a stress test is carried. The projection of climatic events is modified by integrating the modeling carried out in the previous section. S/P ratios are then downgraded.

In addition, non-proportional reinsurance costs are increased. Indeed, with a priority of €3 million and a cap of €10 million, the reinsurer assumes 40% of Climatia's claims in the drift scenario, compared with 10% previously. It is therefore in the reinsurer's interest to increase the price of its cover, which in this case is multiplied by four, since it will be taking on even more frequent and costly risks.

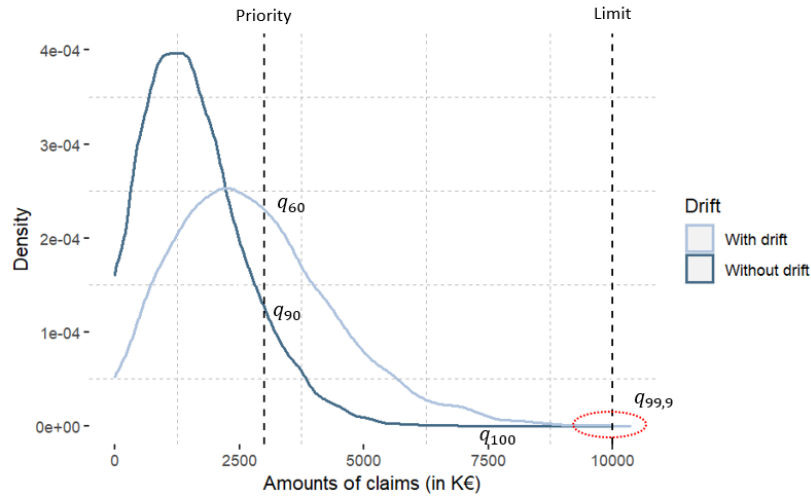


Figure 8 : Non-proportional reinsurance program limit in the drift scenario

As a result, the reinsurer's earnings increase. The insurer, on the other hand, sees its profitability and solvency decline due to a rise in SCR and a sharp reduction in economic equity to absorb the claims peak. This situation leads to a coverage ratio that no longer corresponds to the insurer's overall appetite.

Comparison with ACPR climatic stress test

In its new climate pilot, the ACPR is incorporating the solvency of insurance organizations into a short-term scenario. Unlike the 1st stress test, the one initiated by the ACPR is to be carried out over the years 2023 and 2024 only. It is also intended to be representative of the drought-related claims experience observed in 2022. Adjustments for inflation and changes in the number of risks insured are added.

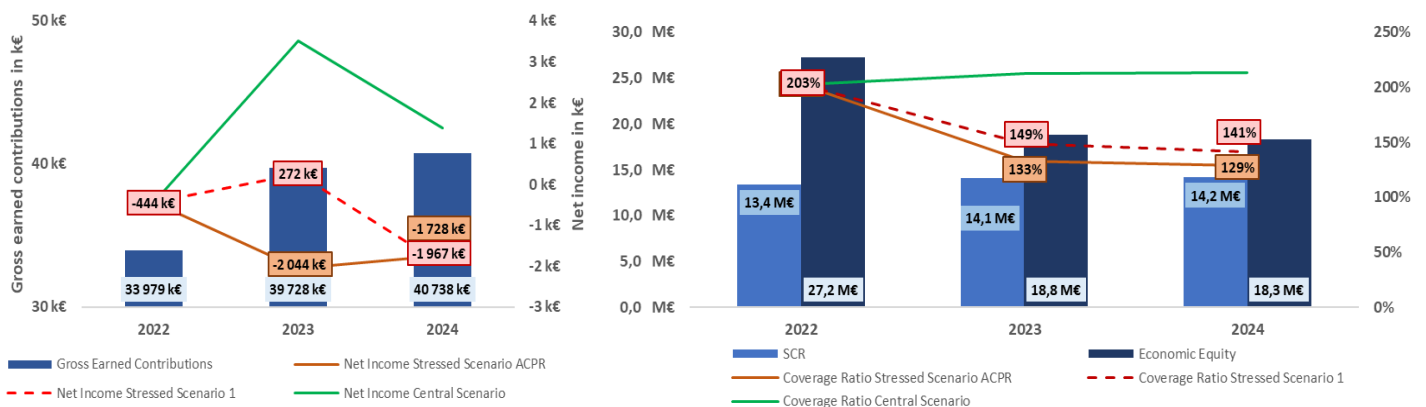


Figure 9 : Comparison with ACPR climatic stress test

The results follow the same unfavorable trajectory for the insurer in terms of both profitability and solvency. Nevertheless, the stress-test initiated by the ACPR appears even more penalizing for Climatia. This can be explained by a higher loss experience in the climatic pilot

stress test (€18.40m vs. €13.82m). This is representative of the year 2022, marked by an exceptional loss experience for Climatia. Since reinsurance costs are higher, this risk mitigation measure is even more costly for the entity.

Management actions

The stress-test revealed the adverse consequences of drift for the organization. Consequently, it became imperative to introduce measures aimed at guaranteeing the sustainability of Climatia's business.

Accordingly, the 1st management action was to increase the insurance premiums by 7.6%. The reinsurer, still benefiting from the increase in the price of its coverage, thus saw its earnings rise. The implementation of this strategy also proved advantageous for Climatia, with an increase in earnings and solvency. Nevertheless, it did not allow a return to the initial situation. Profitability takes precedence over the increase in the solvency ratio. However, Climatia needs to take a cautious approach to this management decision, in order to preserve its business while remaining competitive on the market.

The 2nd *management action* involves modifying the non-proportional reinsurance treaty. The treaty is no longer adapted to the new claim's distribution in the drift scenario. The new treaty limits are chosen to maintain the same risk quantiles as in the central scenario (see figure 8). Since the reinsurer assumes the same percentage of risk as in the central scenario, it is no longer necessary to increase hedging prices. The initial program prices are then maintained.

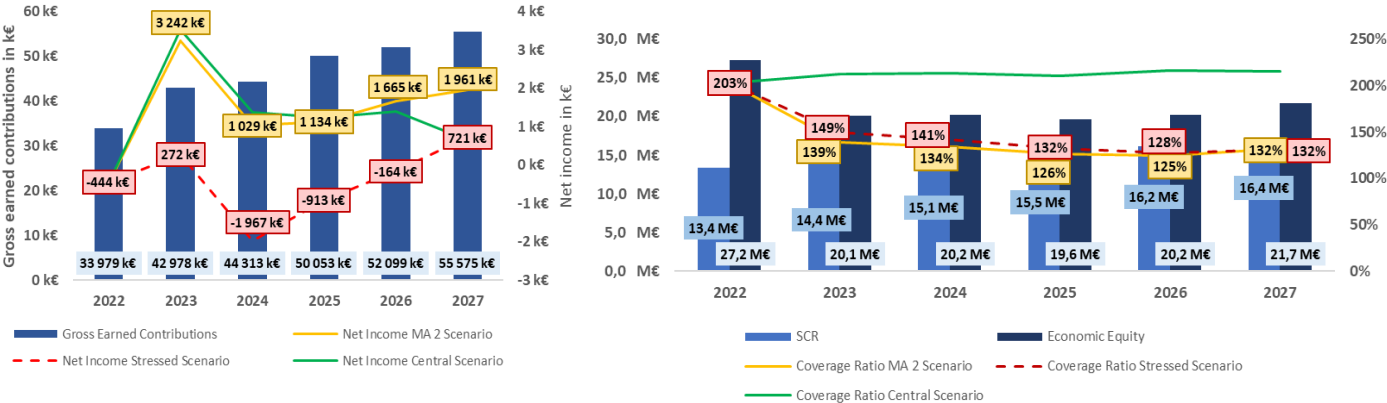


Figure 10 : Results of MA n°2

The implementation of this management decision resulted in a drop in the reinsurer's earnings, due to a reduction in cessions. In terms of profitability, it enabled Climatia to return to its historical profitability and even exceed it by the end of the projection period. Nevertheless, in prudential terms, the coverage ratio falls even further than in the stressed scenario. This is due to more frequent and costly claims, leading to an increase in Non-Life SCR and Counterparty SCR respectively, and a fall in economic equity.

Conclusion

This thesis firstly confirms and quantifies the existence of a future claims drift for insurers. This is reflected in an increase in the frequency and cost of weather-related claims.

Subsequently, several limits are identified, such as the need to review reinsurance programs and the drift in severe claims, prompting insurers to review their strategies to ensure the long-term viability of their business.

Finally, concrete solutions are proposed using the example of Climatia. Firstly, by increasing premium levels, the insurer was able to significantly boost its profitability. Its solvency is slightly improved. Nevertheless, this decision does not appear to be beneficial for the reinsurer. Secondly, the modification of the non-proportional reinsurance treaty, no longer adapted to the new claim's distribution. This strategy improves the profitability of insurers but leads to a decline in solvency. This situation raises questions about insurers' ability to honor their commitments to policyholders over the long term, and about potential government intervention.

This thesis provides an overview of the strategies that non-life insurers may have to implement to cope with increasing global warming.

Remerciements

En premier lieu je tiens à remercier David Fitouchi, Frank Boukobza et Louis-Anselme de Lamaze, associés du cabinet Actuelia, pour m'avoir donné l'opportunité de rejoindre leur équipe et m'avoir permis de réaliser ce mémoire.

Mes remerciements les plus sincères vont à Patrick Cohen, mon tuteur entreprise, pour sa disponibilité, ainsi que pour ses précieux conseils et ses nombreuses relectures. Je tiens aussi à exprimer toute ma reconnaissance à Louis-Anselme de Lamaze pour ses idées stimulantes et pour avoir eu foi en ce mémoire dès les premiers travaux.

Je tiens également à remercier chaleureusement tous les collaborateurs du cabinet pour leur bonne humeur quotidienne et leurs nombreux conseils. Une pensée particulière à mes co-alternants pour leur précieux soutien pendant les périodes les plus difficiles. Un grand merci également à Fida Beji et Benjamin Aubin pour leur aide et pour leurs idées.

Je remercie également Maud Thomas, ma tutrice ISUP, pour nos échanges constructifs et ses conseils éclairés.

Je tiens également à adresser mes remerciements à tous les professeurs de l'ISUP et de l'ESILV pour la qualité de l'enseignement dispensé.

Je souhaite adresser une mention particulière à Reda Ouchiha, actuaire externe à Actuelia, pour son aide, sa présence mais aussi les pistes de réflexion qu'il m'a apportées.

Enfin, je remercie ma famille et mes amis pour leur soutien et leur encouragement tout au long de la réalisation de ce mémoire.

Liste des abréviations

GIEC : Groupe d'Experts

Intergouvernemental sur l'Evolution du
Climat

ONU : Organisation des Nations Unies

SFCR : Solvency and Financial Conditions
Reports

FA : France Assureurs

PPRI : Plan de Prévention des Risques
d'Inondations

EIOPA: European Insurance and
Occupational Authority

EELV : Europe Ecologie Les Verts

ESG : Environnemental Social
Gouvernance

SFDR : Sustainable Finance Disclosure
Regulation

ACPR : Autorité de Contrôle Prudentiel et
de Résolution

UE : Union Européenne

GASPAR : Gestion Assistée des Procédures
Administratives relatives aux Risques

INSEE : Institut National de la Statistique
et des Etudes Economiques

OMM: Organisation Météorologique
Mondiale

GLM: Generalized Linear Model

DPEF : Déclaration de Performance Extra-
Financière

AMF: Autorité des Marchés Financiers

ORSA: Own Risk and Solvency Assessment

CSRD: Corporate Sustainability Reporting
Directive

BE: Best Estimate

SCR: Solvency Capital Requirement

VaR: Value at Risk

AMSB: Administrative Management and
Supervisory Body

BGS : Besoin Global de Solvabilité

PCA : Plan de Continuité d'Activité

SMP : Sinistre Maximum Probable

CRESTA : Catastrophe Risk Evaluation and
Standardizing Target Accumulations

CE : Commission Européenne

AIC: Akaike Information Criterion

BIC: Bayesian Information Criterion

RMSE: Root Mean Square Error

MAE: Mean Absolute Error

AUC: Area Under the Curve

ROC: Receiver Operating Characteristic

KPSS: Kwiatkowski-Philips-Schmidt-Shin

ADF: Augmented Dickey Fuller

ARIMA: Auto Regressive Integrated
Moving Average

CAH : Classification Ascendante
Hiérarchique

ACF : Auto Correlation Function

STL: Seasonal and Trend decomposition
using Loess

PACF : Partial Auto Correlation Function

CEREMA : Centre d'Etudes et d'expertise
sur les Risques, l'Environnement, la
Mobilité et l'Aménagement

ORN : Observatoire des Ressources
Naturelles

RGA : Retrait-Gonflement des Argiles

GEV: Generalized Extreme Value

POT: Peaks-Over-Threshold

GPD: Generalized Pareto Distribution

MRL: Mean Life Residual

Table des matières

Résumé	1
Abstract	2
Note de synthèse	3
Executive summary	11
Remerciements	19
Liste des abréviations	1
Introduction	4
I. Concilier assurabilité et durabilité face au défi climatique	6
1. Le secteur de l'assurance mis à rude épreuve	6
1.1. Une fréquence de plus en plus élevée	7
1.1.1. Contexte	7
1.1.2. Impact sur l'assurance	8
1.2. Un coût de plus en plus important.....	9
1.2.1. Contexte.....	9
1.2.2. Impact sur l'assurance	10
1.3. Des pratiques à repenser.....	11
2. Les enjeux de la durabilité	13
2.1. La durabilité, qu'est-ce que c'est ?.....	13
2.1.1. Le risque de durabilité.....	13
2.1.2. Trois catégories de risques.....	13
2.2. Les réglementations vertes	15
2.2.1. Les réglementations d'aujourd'hui	15
2.2.2. Les réglementations de demain.....	18
3. Prise en compte de la notion de durabilité dans Solvabilité II	20
3.1. Les fondamentaux de Solvabilité II.....	20
3.1.1. Les objectifs de Solvabilité II	20
3.1.2. Les trois piliers.....	21
3.1.3. Prise en compte du climat dans la Directive	26
3.2. L'intégration des risques de durabilité	30
3.2.1. Objectifs et calendrier d'application	30
3.2.2. Pilier 1	31
3.2.3. Pilier 2 et 3	31
4. Conclusion : une prise en compte du climat limitée	34
II. Analyse d'une dérive de sinistralité future et de ses impacts sur un portefeuille non-vie	35
1. Mesure d'une dérive de sinistralité	35

1.1.	Fréquence des sinistres	35
1.1.1.	Construction de la base de données.....	35
1.1.2.	Modélisation de la fréquence	45
1.1.3.	Prédiction de la fréquence dans un contexte de réchauffement climatique	56
1.2.	Coût des sinistres.....	77
1.2.1.	Démarche initiale	77
1.2.2.	Démarche alternative	78
2.	Impact sur la distribution de sinistres et limites de la réassurance	80
2.1.	La réassurance comme technique d'atténuation du risque.....	80
2.1.1.	La réassurance, quelles utilisations et fonctions ?.....	80
2.1.2.	Les formes de réassurance.....	81
2.1.3.	Les types de réassurance	82
2.2.	Application à un portefeuille non-vie.....	84
2.2.1.	Distribution des évènements climatiques.....	85
2.2.2.	Application du programme de réassurance.....	89
2.2.3.	Limites de la réassurance face à une dérive de sinistralité.....	92
2.3.	Une dérive des sinistres graves	93
2.3.1.	Théorie des valeurs extrêmes	93
2.3.2.	Vers une nouvelle segmentation des attritionnels et des graves.....	96
3.	Conclusion : une dérive de sinistralité grandissante et une réassurance à revoir	99
III.	Cas pratique, impacts et solutions	100
1.	L'organisme d'assurance non-vie fictif étudié : Climatia	100
1.1.	Présentation de l'organisme	100
1.1.1.	Le contrat de Climatia	100
1.1.2.	Situation comptable au 31/12/2022	101
1.1.3.	Situation prudentielle au 31/12/2022	103
1.1.4.	Présentation du programme de réassurance	104
1.2.	Projection de l'activité de Climatia.....	106
1.2.1.	Choix des hypothèses de projection ORSA	106
1.2.2.	Scénario central n'incluant pas la dérive climatique	109
1.2.3.	Stress-test incluant la dérive climatique.....	112
2.	Modification des stratégies d'atténuation du risque et managements actions	117
2.1.	<i>Management actions</i>	117
2.1.1.	<i>Management action n°1 : Augmentation des primes</i>	117
2.1.2.	<i>Management action n°2 : Modification de la réassurance non-proportionnelle</i>	121
2.2.	Comparaison de la dérive au stress-test climatique à court terme de l'ACPR.....	126

2.2.1.	Hypothèses du scénario court-terme	126
2.2.2.	Résultats et comparaison avec le scénario stressé	127
3.	Conclusion : vers une intervention inévitable de l'Etat ?.....	130
	Conclusion générale	131
	Bibliographie.....	134
	Textes réglementaires.....	134
	Articles, ouvrages et mémoires	134
	Annexes	136
	Annexe A.....	136
	Annexe B	137
	Annexe C	141
	Annexe D.....	143
	Liste des figures.....	144
	Liste des tableaux.....	146

Introduction

Le réchauffement climatique se présente comme l'un des défis majeurs de cette époque. Conformément aux évaluations et rapports du GIEC, la température moyenne a augmenté d'environ 1,2°C par rapport à l'ère préindustrielle. Cette évolution a engendré une série d'impacts significatifs. La hausse de la température et la montée du niveau de l'océan ont eu pour conséquences un déclin de la biodiversité et une succession d'épisodes de mortalité. De plus, l'augmentation des événements météorologiques extrêmes tels que les sécheresses, les tempêtes et les inondations reflètent les impacts croissants de ce phénomène. La situation ne présage pas d'amélioration, puisqu'une hausse de 1,5°C est anticipée d'ici à 2030, dans le scénario le plus optimiste.

Par ailleurs, le changement climatique a amplifié la fréquence et la sévérité des événements climatiques extrêmes, générant une augmentation des sinistres liés aux catastrophes naturelles. Au cours des dernières années, la France a été impactée par des événements naturels d'une intensité exceptionnelle, tels que la montée des eaux de la Seine en 2016 ou encore les ouragans Irma et Maria en septembre 2017. Le coût de ces événements a triplé en une quarantaine d'années passant de 1 à 3 milliards d'euros.

En France, l'indemnisation des catastrophes naturelles s'effectue à travers un régime associant assurance privée et solidarité nationale. De ce fait, les compagnies d'assurance qui assument la responsabilité de couvrir ces risques, se trouvent confrontées à de nouveaux défis. D'une part, une modélisation du risque complexe pouvant entraîner une mauvaise tarification. De l'autre, des coûts d'indemnisations élevés pouvant entraîner des conséquences financières majeures et une baisse de la solvabilité de l'organisme.

Les assureurs doivent également faire face à une difficulté supplémentaire. En effet, la pression réglementaire croissante les pousse à intégrer la notion de durabilité et les risques climatiques dans leur gestion des risques pour garantir la pérennité de leur activité.

Face au défi climatique, comment un organisme d'assurance non-vie peut-il ainsi conserver la viabilité de son activité ?

Pour y répondre, ce mémoire aura pour objectif d'évaluer l'impact du changement climatique sur l'activité d'assurance. Il s'agira d'évaluer la dérive de sinistralité future et ses impacts sur un assureur non-vie.

Dans un premier temps, les défis auxquels les compagnies d'assurance seront confrontées face au dérèglement climatique seront abordés. Ils permettront de mettre en évidence la difficulté de trouver un équilibre entre l'assurabilité des risques et les exigences de durabilité. Dans un second temps, une démarche visant à quantifier la dérive de sinistralité future sera présentée. Celle-ci repose sur une modélisation de la fréquence d'occurrence des catastrophes naturelles en France pour les risques d'inondation et de sécheresse. L'*open data* sera utilisée afin de pallier la difficulté de la récolte des données en entreprise. Elle permettra d'estimer la dérive en fréquence en utilisant une régression logistique et un modèle de séries temporelles. La dérive en coût quant à elle sera évaluée par le biais d'un *benchmark* d'articles assurantiels traitant des évolutions des coûts des sinistres climatiques. Les résultats obtenus conduiront à l'évaluation des limites de cette dérive sur un portefeuille d'assurance non-vie. L'efficacité de la réassurance et la définition actuelle de sinistres graves seront remises en question. Enfin, un cas pratique sera présenté au moyen d'un exercice ORSA pour une entité fictive d'assurance non-vie. Plusieurs solutions et *management actions* seront proposées afin de garantir la pérennité de l'activité en réponse au défi climatique.

I. Concilier assurabilité et durabilité face au défi climatique

Dans un contexte d'accélération du réchauffement climatique, la problématique environnementale, sociale et sociétale est au cœur des préoccupations des autorités publiques européennes. La notion de durabilité prend une grande place dans le panorama de l'assurance qui est mis à rude épreuve.

Ainsi, l'enjeu de ce premier chapitre est de présenter les **défis** de durabilité et les difficultés pour un assureur de préserver son activité et sa **pérennité** face au **changement climatique**.

1. Le secteur de l'assurance mis à rude épreuve

Le risque climatique modifie profondément le paysage assurantiel et soulève des difficultés auxquelles l'assureur devra faire face. Une augmentation de la **fréquence** et de l'intensité des sinistres mais aussi des **coûts d'indemnisation** s'est accentuée au cours de la dernière décennie.

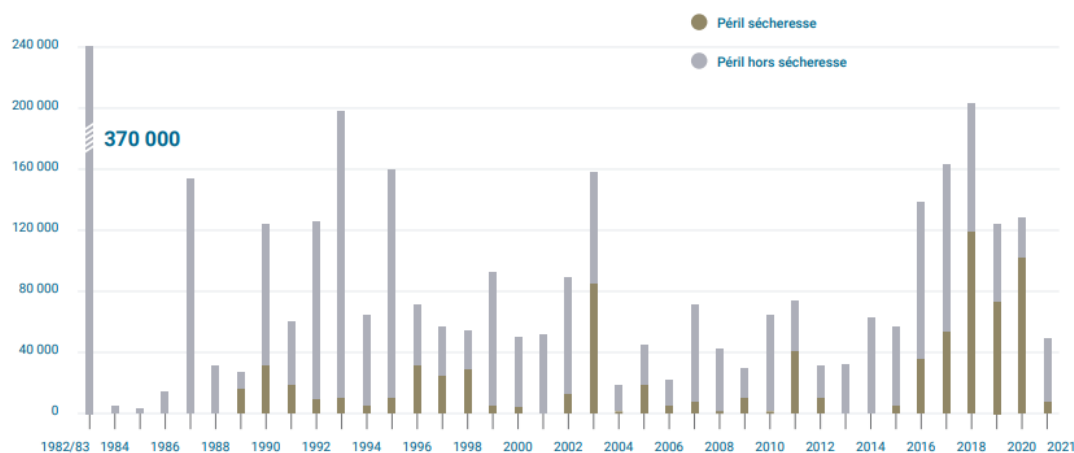


Figure I.1 : Le nombre de sinistres CatNat indemnisés en France de 1982 à 2021 [CCR]

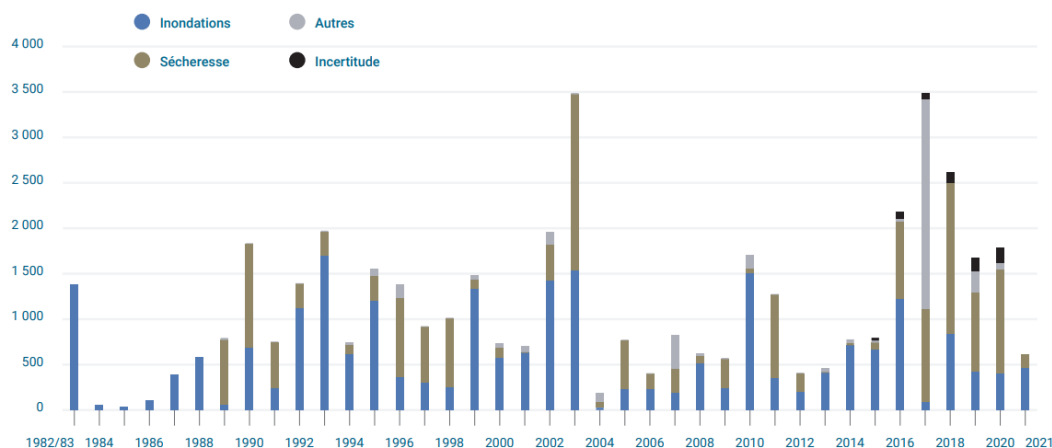


Figure I.2 : Le coût des sinistres CatNat de 1982 à 2021 en France (en millions d'euros) [CCR]

Ces répercussions peuvent engendrer d'importantes pertes financières pour les compagnies d'assurance. Celles-ci ont alors tout intérêt à prendre en compte ces nouveaux enjeux pour s'adapter et maintenir la viabilité de leur activité.

1.1. Une fréquence de plus en plus élevée

Une **fréquence** de sinistre peut être définie comme le nombre de sinistres déclarés par les assurés sur une période de couverture d'assurance donnée.

1.1.1. Contexte

Durant ces dernières années, les impacts du réchauffement climatique se sont accentués. Ce phénomène entraîne des conséquences importantes sur les événements météorologiques comme la sécheresse, les tempêtes ou encore les inondations et provoquent ainsi une **augmentation des sinistres** de catastrophes naturelles.

Selon le dernier rapport du GIEC (Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat), « *les épisodes extrêmes vont se multiplier et s'accroître en raison des dérèglements du climat* ». Plusieurs faits montrent que le changement climatique a déjà provoqué des dégâts. En effet, la hausse de la température et l'élévation du niveau de l'océan ont entraîné des extinctions d'espèces, la perte de biodiversité et plusieurs épisodes de mortalité. La situation ne risque pas de s'améliorer puisqu'une hausse de 1,5°C est attendue pour 2030, dans le scénario (SSP1-1,9), où SSP1 représente la trajectoire socio-économique utilisée pour modéliser ce scénario et 1,9 le niveau approximatif de forçage radiatif résultant du scénario en 2100. Ce scénario est le plus optimiste et se veut ambitieux afin de représenter l'objectif 1,5°C de l'Accord de Paris.

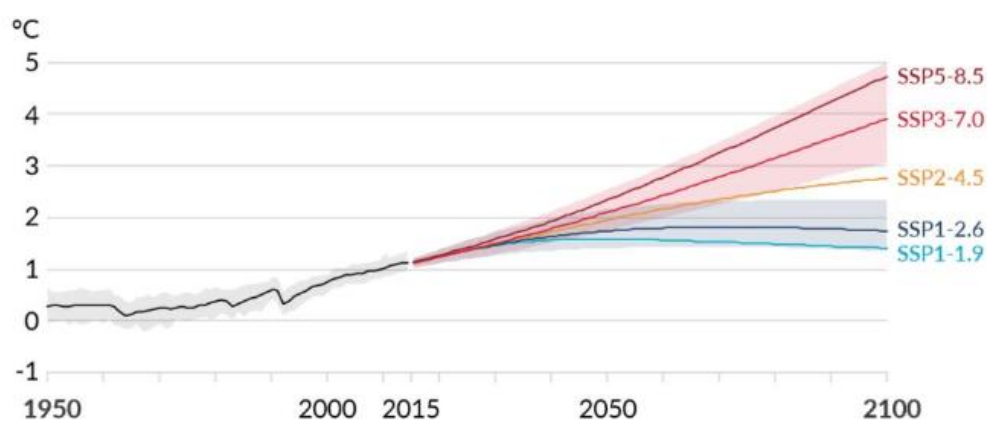


Figure I.3 : Evolution de la température de surface mondiale de 1950 à 2100 [GIEC]

A chaque degré dépassé, le réchauffement climatique s'accroît et les changements extrêmes s'amplifient également. La probabilité de « seuils de rupture » augmente. Ces

derniers peuvent être définis comme des points de bascule brutale où certains éléments du climat deviennent « *radicalement et irréversiblement différents* ».

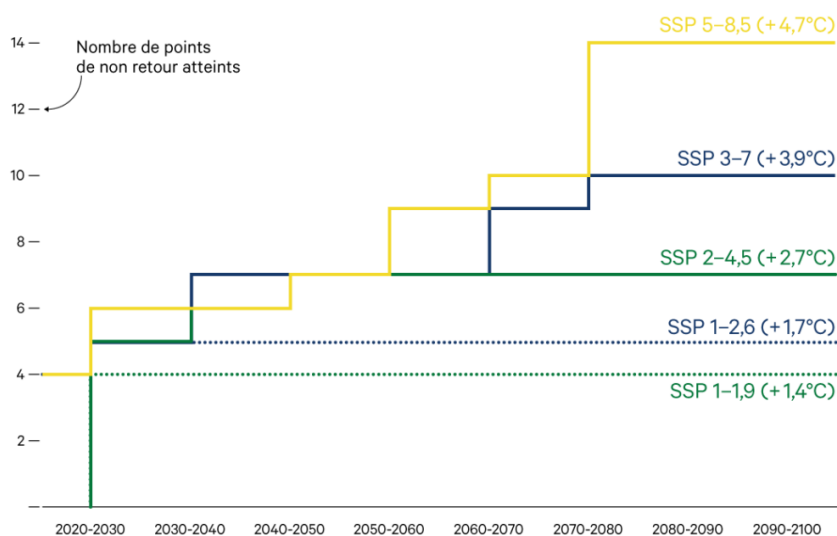


Figure I.4 : Nombre de points de bascule atteints à l'horizon 2100 [GIEC]

Ces facteurs imposent au système de se réorganiser. Avec l'accélération du réchauffement climatique, la fréquence et la nature des événements extrêmes sera de plus en plus extrême. Autrement dit, **ce qui était extrême pourrait devenir ordinaire**.

Le risque climatique vient complètement bouleverser et modifier le paysage de l'assurance. En effet, les assureurs doivent faire face à des fréquences et intensités de sinistres de plus en plus élevés. Les **chronologies** sont également amenées à changer. Des sinistres pourront se produire à des moments de l'année où ils ne s'étaient jamais ou très rarement produits. On pourrait aussi assister à des changements de **localisation** de ces sinistres.

1.1.2. Impact sur l'assurance

L'activité d'assurance est une opération par laquelle l'organisme d'assurance accepte de couvrir un risque futur en échange d'une prime perçue en amont. Ce transfert de risque est caractérisé par une **inversion du cycle de production**, c'est-à-dire que la prime est calculée et encaissée avant même de connaître le prix du sinistre. De ce fait, le recours à des modèles transformant la statistique du passé pour la rendre prédictive du futur est primordial.

Cette accélération du réchauffement climatique va bouleverser le secteur assurantiel puisque la modélisation du risque va devenir très complexe. En effet, l'historique de données utilisé pour établir la tarification sera biaisé et non cohérent. Le principal risque serait de réaliser une mauvaise tarification en sous estimant le risque. De ce fait, l'assureur pourrait ne plus être apte à indemniser le sinistre et honorer ses engagements envers les assurés.

Afin de mieux maîtriser ce risque, les organismes d'assurance essaient de trouver des méthodes alternatives. Par exemple, la **théorie des valeurs extrêmes** est utilisée par les assureurs pour les sinistres de catastrophes naturelles afin de pallier le manque d'information. En effet, elle permet de modéliser les queues de distribution et de construire des modèles capables d'estimer la probabilité d'occurrence d'évènements extrêmes. Une seconde approche consiste à utiliser la **théorie bayésienne** et à l'appliquer aux sinistres de catastrophes naturelles. Cette méthode permet de déterminer la fréquence et la gravité des sinistres en prenant en compte les informations disponibles. De plus, les probabilités de survenance sont ajustées au fur et à mesure que le jeu de données s'épaissit.

1.2. Un coût de plus en plus important

Le **coût** d'un sinistre peut être défini comme l'indemnisation que l'assuré reçoit de la part de l'assureur à la suite d'un sinistre pour compenser les pertes subies.

1.2.1. Contexte

Le phénomène d'accélération du réchauffement climatique, entraîne à la fois une augmentation de la fréquence des sinistres mais aussi des **coûts de plus en plus conséquents**.

Selon le réassureur Swiss Re, le coût des sinistres extrêmes en 2021 s'élève à 270 milliards de dollars. Ces montants n'étaient même pas imaginables quelques années auparavant.

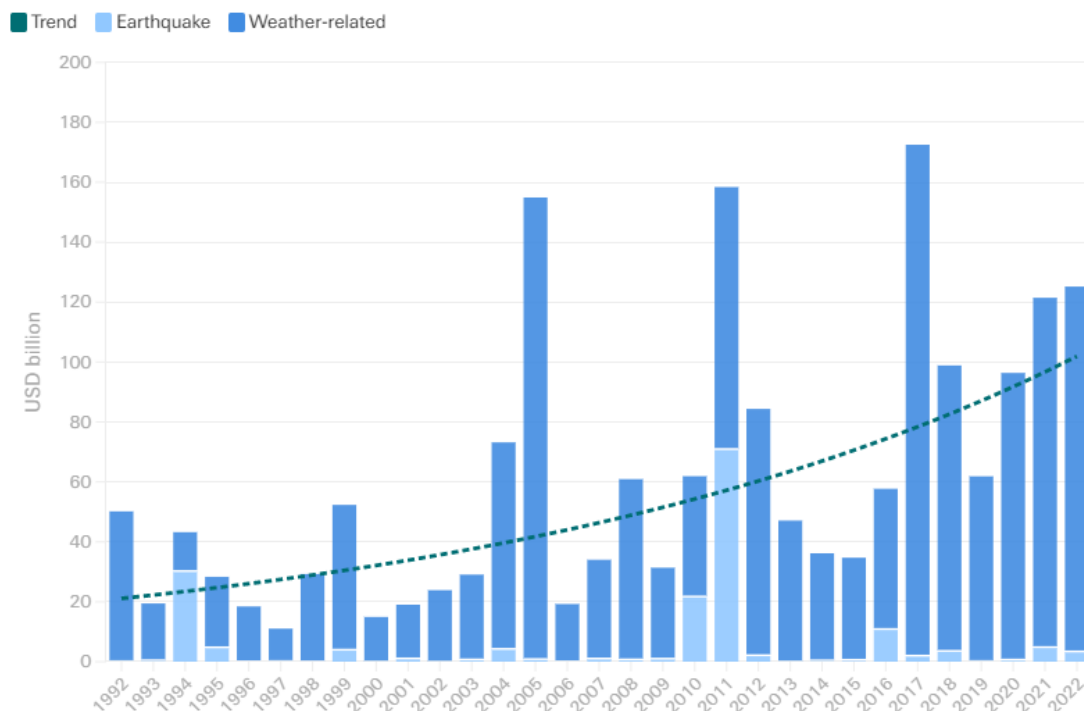


Figure I.5 : Evolution des coûts des sinistres CatNat dans le monde [SwissRe]

Ces ordres de grandeur sont évoqués dans beaucoup d'études des acteurs de la place. En effet, l'ONU (Organisation des Nations Unies) estime les coûts des sinistres liés aux catastrophes naturelles à 360 milliards de dollars d'ici 2030.

Si l'on s'intéresse maintenant à l'exemple de la France, le coût des catastrophes naturelles a triplé en une quarantaine d'années, passant de 1 à 3 milliards d'euros.

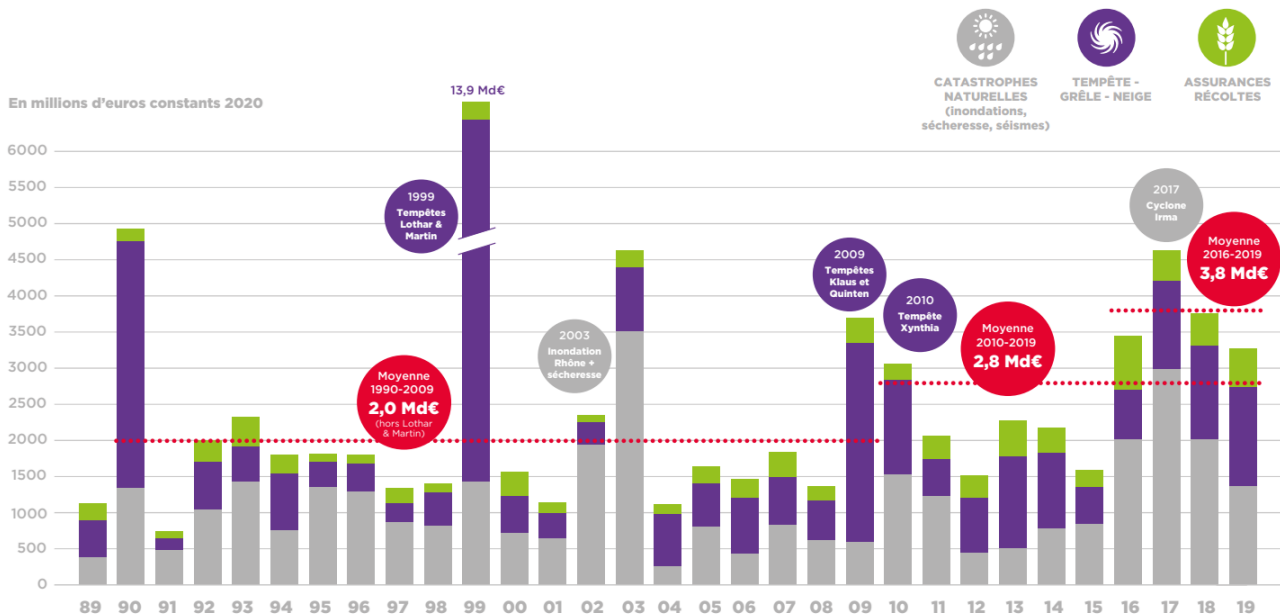


Figure I.6 : Evolution des coûts de sinistres CatNat en France [FA]

L'assureur dommages Thémis a particulièrement été touché par cette augmentation de coût. Selon son rapport SFCR (*Solvency and Financial Conditions Reports*) publié en avril 2023, l'organisme a subi une hausse de 40% de sinistralité. La branche la plus touchée est celle des **catastrophes naturelles** avec une hausse de 2557% de charges de sinistres, un chiffre encore jamais atteint pour l'assureur.

Selon les récentes études, cette dynamique est en **constante croissance** à mesure que le réchauffement climatique s'accroît.

1.2.2. Impact sur l'assurance

Tout comme la fréquence, **l'augmentation du coût des sinistres** a un impact sur l'activité d'assurance. En effet, l'assureur peut faire face à des coûts d'indemnisation importants qu'il n'avait pas forcément anticipés. Cela peut lui entraîner des conséquences financières majeures.

Afin de se prémunir d'une **baisse du ratio de solvabilité**, les organismes d'assurance ont tout intérêt à adapter le prix des primes afin que celles-ci puissent refléter au mieux le risque lié aux catastrophes naturelles. Néanmoins, dans ce contexte d'accélération du

réchauffement climatique, cela revient à augmenter graduellement le niveau des primes. Cela apparaît alors comme une hausse des exigences de solvabilité.

Certains assureurs ont déjà opté pour cette solution, notamment sur les contrats d'assurance habitation. En effet, une hausse de 2,3% a été constatée en 2021 selon une étude de la FA (France Assureurs). Cette augmentation est d'autant plus visible dans les zones exposées aux catastrophes naturelles comme les inondations. Le coût d'une couverture d'assurance pourrait alors devenir inaccessible pour certains foyers, surtout lorsqu'on sait que les populations les plus démunies sont celles qui sont les plus exposées aux risques extrêmes.

Le principe fondamental de **mutualisation** en assurance peut-il être préservé dans un tel contexte ? Rappelons que celui-ci autorise le partage du risque entre les assurés. L'ensemble des primes payées permet d'indemniser les assurés qui ont subi un sinistre. De ce fait, certains acteurs y sont opposés dans le contexte du défi climatique. Ils encouragent une tarification segmentée, en adaptant le tarif aux zones les plus exposées, afin de ne pas pénaliser l'ensemble des ménages.

Par ailleurs, certains organismes d'assurance ou de réassurance **refusent d'indemniser** certains risques, qu'ils jugent trop grands ou trop risqués. Par exemple, pour les zones inondables, Generali refuse d'indemniser le foyer en cas de reconnaissance de catastrophe naturelle si les mesures fixées par le PPRI (Plan de Prévention des Risques d'Inondations) n'ont pas été respectées ou si l'habitation se situe sur une zone dite « inconstructible ». L'assureur estime que le risque est quasi-certain. Face à ce désengagement, les compagnies soulèvent alors des questions de responsabilité. A l'avenir, **de nouveaux acteurs** pourraient intervenir et s'engager dans l'indemnisation des sinistres de catastrophes naturelles comme l'Etat.

Dans leur dernier document de travail publié en avril 2023, l'EIOPA (*European Insurance and Occupational Pensions Authority*) et la BCE (Banque Centrale Européenne) encouragent la mise en place de **partenariats publics-privé** pour améliorer l'indemnisation des risques de catastrophes naturelles. Les pertes assurées seraient prises en charge par le secteur privé qui bénéficierait également d'un soutien financier de la part de l'Etat. De plus, un régime public à l'échelle de l'Union Européenne pourrait être créé afin de compléter les régimes d'assurance nationaux. Le but étant de garantir que des fonds suffisants sont mis à la disposition pour la reconstruction à la suite de catastrophes rares et à grande échelle liées au climat.

Ainsi, l'enjeu pour les assureurs est de maintenir leur solvabilité tout en offrant une couverture adaptée et accessible aux assurés.

1.3. Des pratiques à repenser

Le secteur de l'assurance est dans une situation inédite, encore jamais vue auparavant. Celui-ci doit s'adapter à un monde changeant, marqué par l'accélération du réchauffement climatique. Outre la modélisation du sinistre et le calcul de la prime, les acteurs doivent aussi anticiper la **gestion du sinistre** et son **indemnisation**.

En effet, l'assureur peut se heurter à deux situations. La première est celle de sinistres complètement inédits et violents comme des tempêtes ou des inondations. La seconde est la réalisation de phénomènes beaucoup plus lents pouvant un jour atteindre leur seuil de rupture et entraîner d'importants dégâts comme l'érosion des littoraux en France. Dans ces deux cas, il paraît essentiel pour les organismes de repenser leurs pratiques afin de mieux gérer les impacts des catastrophes naturelles.

Cette **restructuration** peut passer par plusieurs étapes. D'une part, par l'amélioration des mesures de prévention et de sensibilisation. De l'autre, par une gestion de crise plus efficace de ces sinistres. L'objectif final étant de protéger au mieux les populations locales contre les dommages que peuvent causer les catastrophes naturelles.

L'évolution des pratiques peut également être encouragée par des propositions de lois. Parmi elles, celle de Sandrine Rousseau, ancienne porte-parole du parti politique EELV (Europe Ecologie les Verts) et candidate à la dernière élection présidentielle française en 2022. Sa proposition de loi en 2021, porte sur l'indemnisation des dommages causés par le phénomène du **RGA** (Retrait-Gonflement des Argiles).

Il est principalement causé par les variations de teneur en eau des argiles qui provoquent des modifications de volume et de forme du sol. Les conséquences sur les habitations peuvent être graves : détérioration des fondations, fissuration des bâtiments... De ce fait, c'est un phénomène impactant pour les assureurs car il peut causer des **dommages importants** entraînant des **coûts d'indemnisation élevés**.

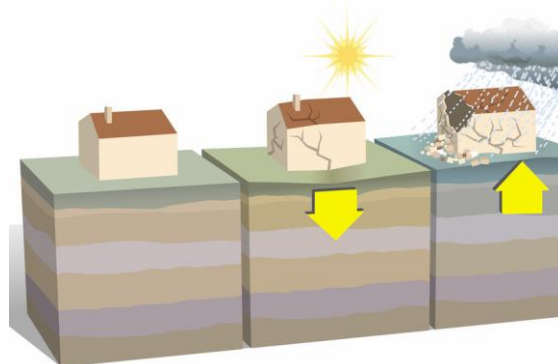


Figure I.7 : Phénomène du retrait-gonflement des argiles

La loi a été adoptée en mars 2023 par la commission des finances de l'Assemblée Nationale. L'objectif de cette proposition est de **faciliter l'indemnisation** de ces sinistres qui est aujourd'hui qualifiée d'inefficace. En effet, celle-ci n'est effective qu'en cas de reconnaissance de catastrophe naturelle.

Afin d'améliorer les pratiques, la loi vise à augmenter le nombre de communes reconnues à l'aide de nouveaux critères. Elle aspire également à un traitement plus équitable et efficace des sinistres par l'assureur. Une hausse des primes n'est pas envisageable selon l'ancienne députée. Des réflexions s'imposent alors sur le financement du régime « CatNat » pour les années à venir.

2. Les enjeux de la durabilité

Face à un secteur assurantiel bouleversé par l'accélération du réchauffement climatique, les organismes d'assurances doivent faire face à une difficulté supplémentaire : concilier assurabilité et **durabilité** pour maintenir leur activité.

L'enjeu de cette section est de s'intéresser aux enjeux de durabilité et la manière dont ce concept s'inscrit dans l'exigence de reportings extra-financiers.

2.1. La durabilité, qu'est-ce que c'est ?

La durabilité fait référence à la capacité à maintenir une certaine qualité ou fonctionnalité sur le long terme, sans nuire à l'environnement, à l'économie ou à la société. Dans un monde où les ressources naturelles sont limitées, la durabilité est devenue un enjeu crucial pour garantir un avenir viable pour les générations futures.

2.1.1. Le risque de durabilité

Le **risque de durabilité**, également appelé ESG (Environnemental, Social et Gouvernance), fait référence aux risques financiers et non financiers associés aux facteurs environnementaux, sociaux et de gouvernance qui peuvent avoir un impact sur la durabilité à long terme d'une entreprise, d'un investissement ou d'une économie.

Il est également défini par le Règlement européen SFDR (*Sustainable Finance Disclosure Regulation*) comme « *un événement ou un état de fait dans le domaine environnemental, social ou de la gouvernance qui, s'il survenait, pourrait avoir une incidence négative réelle ou potentielle sur la valeur de l'investissement ou de l'engagement.* », une définition qui est reprise par les autres régulateurs européens : EIOPA, ACPR, BCE...

2.1.2. Trois catégories de risques

Ces **risques de durabilité** sont généralement divisés en trois catégories :

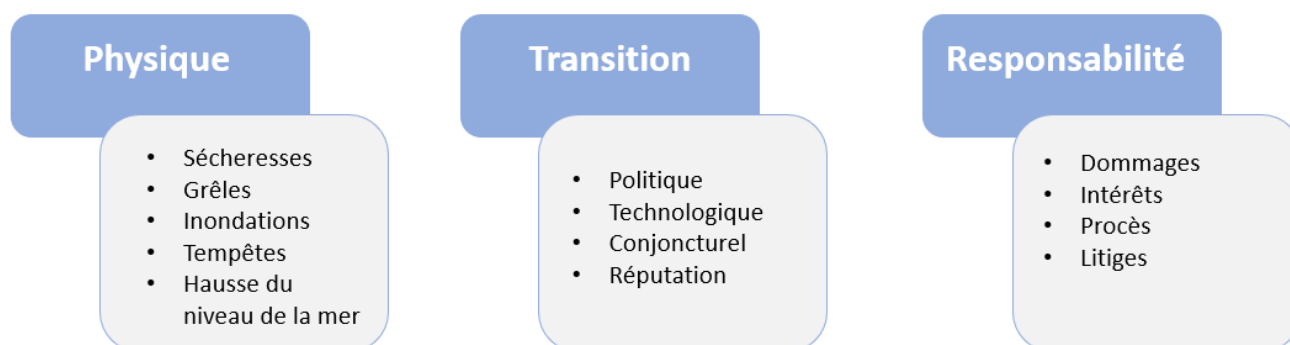


Figure I.8 : Les trois catégories de risques de durabilité

2.1.2.1. Les risques physiques

Les **risques physiques** sont des risques liés aux **événements naturels extrêmes** (sécheresses, grêle, inondations, tempêtes) dont le nombre et l'intensité devraient augmenter. Ils sont couverts dans le risque climatique, pris en compte dans l'exigence de capital des assureurs.

Ils résultent des dommages directement et indirectement causés par les phénomènes climatiques, qu'il s'agisse d'événements majeurs à développement long, appelés également risques « aigus » comme les tempêtes, les inondations, les incendies, les canicules... ou d'événements tendanciels, appelés aussi risques « chroniques » comme la hausse du niveau de la mer ou la hausse des températures.

Ces risques peuvent avoir plusieurs impacts pour les assureurs. En effet, du côté de l'**actif**, l'assureur peut se heurter à une difficulté d'évaluation des investissements, selon leur localisation. Cette complexité peut entraîner des conséquences sur les risques de marché, de crédit et de liquidité. Par ailleurs, du côté du **passif**, le principal effet serait sur le risque de souscription. En non-vie, ce dernier dépend de l'exposition, de la vulnérabilité et de l'intensité du choc. En santé, on pourrait imaginer des répercussions sur la mortalité et la morbidité.

2.1.2.2. Les risques de transition

Les **risques de transition** sont des risques affectant les actifs **menacés de dépréciation** du fait de réglementations contraignantes destinées à satisfaire les engagements climatiques. Ils sont liés à une restructuration profonde du système économique, poussée par l'accélération du réchauffement climatique.

Ces risques sont divers. En effet, ils ont plusieurs natures : politique avec par exemple le prix du carbone, technologique, conjoncturel ou encore de réputation.

De la même manière que les risques physiques, les risques de transition sont tout aussi périlleux pour l'assureur. Du côté de l'**actif**, l'assureur doit étudier la quantification de ses investissements, notamment ceux liés au prix du carbone afin de ne pas détériorer ses risques de marché, de crédit et de liquidité. D'autre part, du côté du **passif**, c'est également le risque de souscription qui serait affecté, notamment sur les hypothèses de pérennité des *business model* et de la cessation d'activité.

2.1.2.3. Les risques de responsabilité

Les **risques de responsabilité** sont les risques liés aux **procès et litiges** auxquels les organismes pourraient être confrontés du fait de la mise en jeu de leur responsabilité dans le changement climatique et du fait de leurs investissements. Ils correspondent aux dommages et intérêts qu'une entreprise devrait payer si elle était jugée responsable du changement climatique.

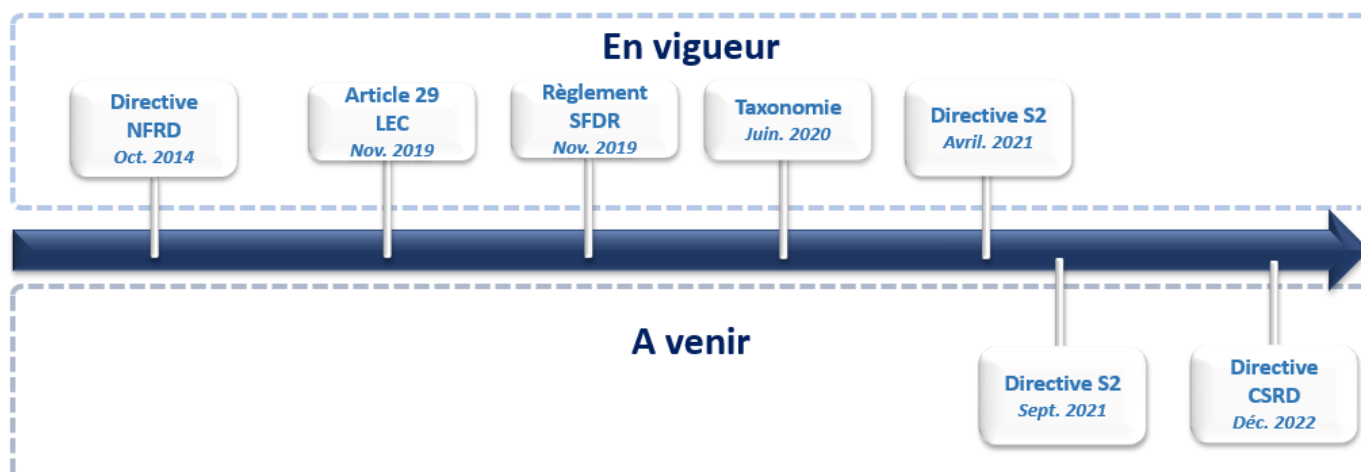
Ces risques sont très liés aux risques de transition précédemment évoqués et sont facilement assimilables au risque opérationnel.

Il existe peu d'études sur ces risques et ils sont en effet difficilement quantifiables. Néanmoins, ils auront sans doute des impacts pour l'assureur, notamment sur le risque de réputation.

2.2. Les réglementations vertes

L'importance croissante de la problématique environnementale, sociale et sociétale a conduit les autorités publiques européennes à augmenter l'exigence en matière **de reporting extra-financier** pour les sociétés.

En particulier, les assurances et les mutuelles françaises sont soumises depuis peu à des réglementations européennes et françaises dont les principaux objectifs résident dans la transparence des reportings et la prise en compte de ces enjeux en interne.



Dates indiquées ↔ dates d'adoption des réglementations (≠ dates d'application)

Figure I.9 : Calendrier des réglementations vertes en vigueur et à venir

2.2.1. Les réglementations d'aujourd'hui

2.2.1.1. Déclaration de Performance Extra-Financière

La DPEF (Déclaration de Performance Extra-Financière) constitue la transposition en droit français de la Directive européenne NFRD (*Non Financial Reporting Directive*) et est entrée en vigueur en 2017.

Elle représente un moyen sous la forme d'un rapport pour les entreprises de rendre compte de leur impact sur l'environnement et la société, et de démontrer leur engagement en faveur du développement durable.

2.2.1.2. Article 29 de la loi Energie Climat

L'article 29 de la loi n°2019-1147, aussi appelée loi énergie climat, renforce les exigences sur la publication des informations sur les modalités de prise en compte des critères ESG au sein de la loi française.

L'objectif de cet article est de réduire les émissions de gaz à effet de serre liées au secteur résidentiel, qui représente environ un quart des émissions totales en France. En encourageant la rénovation énergétique des logements les plus énergivores, cette disposition contribue également à lutter contre la précarité énergétique en réduisant les factures d'énergie des ménages les plus modestes.

L'article 29 LEC tire la leçon de l'expérience française de reporting extra-financier et renforce les exigences déjà existantes inhérentes à l'article 173-VI. Ce dispositif français a fortement influencé le référentiel européen sur le sujet, dont le Règlement « SFDR ».

Ses principaux objectifs sont une meilleure intégration des enjeux climatiques et de biodiversité au sein des politiques d'investissement et la prise en compte des critères ESG dans la gestion des risques.

2.2.1.3. Règlement SFDR

Le Règlement SFDR, précise et complète les modalités de publication d'informations en matière de durabilité pour les secteurs financiers. Son objectif est de favoriser les investissements dans des activités durables tout en renforçant la protection des investisseurs finaux.

Cette réglementation européenne impose également aux acteurs financiers de publier des informations sur leur politique d'investissement durable, leur processus de sélection des investissements, leur gestion des risques liés à la durabilité et l'impact des investissements sur les critères ESG.

Elle définit de nouvelles notions et introduit de nouvelles exigences de reporting associées :

- La distinction des produits financiers dits « durables » (article 8 et 9) et les autres.
- Le reporting des informations suivant le principe de double matérialité.
- La création d'exigences de transparence sur les principales incidences négatives en matière de durabilité.

La supervision des exigences de reporting extra-financier en matière de durabilité issu du règlement SFDR incombe, en France, à l'AMF (Autorité des Marchés Financiers) et à l'ACPR.

2.2.1.4. Règlement Taxonomie

Le Règlement Taxonomie définit un langage commun permettant aux entreprises et aux investisseurs de déterminer quelles sont les activités économiques considérées comme durables sur le plan environnemental.

Il complète les exigences de transparence déjà introduites par la directive NFRD et le Règlement SFDR en établissant un système de classification européen des activités durables sur le plan environnemental.

Il introduit et définit des notions clés relatives à l'appréhension des risques de durabilité, notamment sur le plan environnemental, à travers plusieurs objectifs :

- Atténuation du changement climatique
- Adaptation au changement climatique
- Utilisation durable et protection des ressources aquatiques et marines
- Transition vers une économie circulaire
- Prévention et réduction de la pollution
- Protection et restauration de la biodiversité

2.2.1.5. Règlements Délégués Solvabilité II, Piliers 2 et 3

Le Règlement (UE) 2021/1256 complète le Règlement délégué Solvabilité II en ce qui concerne les risques en matière de durabilité dans la gouvernance des entreprises d'assurance et de réassurance.

Son principal objectif est la prise en compte des risques de durabilité dans les fonctions et processus ci-dessous :

- Fonction clé gestion des risques
- Fonction clé actuariat
- Instances de gouvernance
- Souscription et provisionnement
- Rémunération
- Investissement
- Gestion des risques

L'intégration de ces risques entraîne la modification de plusieurs rapports narratifs et documents internes comme :

- **Rapport ORSA (*Own Risk and Solvency Assessment*):**

Ce processus interne a pour objectif d'identifier les risques auxquels l'entreprise est exposée et d'avoir une vision sur le long terme de l'évolution de la solvabilité de l'organisme. Il constitue un outil de pilotage de l'activité.

- **Rapport de la fonction actuarielle :**

Il rend compte de tous les travaux conduits par la fonction actuarielle et de leur résultat. Le rapport indique clairement toute défaillance et émet des recommandations sur la manière d'y remédier.

- **Politiques écrites :**

Elles définissent le rôle et les responsabilités de chacun, ainsi que les procédures relatives à l'activité de l'organisme.

- **Documentation interne du système de gestion des risques :**

Cette notice permet de documenter le processus de gestion de risques qui consiste à identifier et les contrôler les potentiels risques auquel l'organisme est soumis.

L'ACPR supervise la mise en application de ce nouveau Règlement, en tant qu'organisme superviseur de la bonne application de la Directive Solvabilité II.

2.2.2. Les réglementations de demain

2.2.2.1. Règlement délégué S2, Pilier 1 et ORSA

Pilier 1

Le premier chantier majeur de révision du Règlement Délégué pour les prochaines années porte sur le **Pilier 1**. Ce premier volet a pour objectif d'estimer le niveau de richesse de l'organisme et de vérifier qu'il lui permet d'assurer sa solvabilité dans le cas de la survenance d'un risque très rare.

Deux mandats prévus par la Commission européenne ont été confiés à l'EIOPA. Le premier vise à envisager un **traitement spécifique des investissements** associés aux actifs liés à des objectifs environnementaux ou sociaux.

Le second s'inscrit dans la revue périodique de la formule du **SCR « Cat Nat »**. L'objectif est d'identifier les écarts significatifs entre le SCR calculé et le risque réel.

ORSA

Le second chantier prévu par l'EIOPA s'inscrit dans le pilier 2 de la réglementation, à travers l'**ORSA**. L'objectif est de doter les entreprises d'assurance et de réassurance d'outils adaptés à l'appréhension des risques liés au changement climatique en vision prospective.

La proposition de Directive prévoit d'introduire des analyses de scénarios climatiques dans l'ORSA afin de les approfondir dans le cadre de ce processus.

Les éléments clés des dispositions prévues sont les suivantes :

1. L'entreprise évalue dans l'ORSA si elle est **exposée de manière significative** aux risques liés au changement climatique.
2. L'entreprise démontre l'importance de son exposition aux risques liés au changement climatique dans l'évaluation ORSA, elle précise **au moins deux scénarios de changement à long terme**, dont les suivants :

- Un scénario dans lequel l'augmentation de la température mondiale reste inférieure à 2°C
 - Un scénario dans lequel l'augmentation de la température mondiale est égale ou supérieure à 2°C
3. L'ORSA contient, à intervalles réguliers (tous les 3 ans minimum), une **analyse de l'impact sur l'activité de l'entreprise** des scénarios de changement climatique à long terme.
 4. Les scénarios de changement climatique à long terme sont **réexaminés au moins tous les trois ans et mis à jour** si nécessaire.
 5. Les entreprises d'assurance et de réassurance à **faible profil de risque lié au changement climatique sont exemptées** de la réalisation des scénarios de changement climatique et de l'évaluation de leur impact sur l'activité de l'entreprise.

2.2.2.2. Directive CSRD

La Directive CSRD (*Corporate Sustainability Reporting Directive*) a pris forme en réaction au Conseil de l'UE qui avait souligné l'importance de disposer d'informations fiables, comparables et pertinentes sur les risques, les opportunités et les incidences en matière de durabilité.

Elle remplacera la directive NFRD actuelle en matière de reporting extra-financier destinée aux grandes entreprises européennes. Un de ses objectifs est d'étendre le périmètre des entités considérées et d'améliorer le contenu des rapports extra-financiers.

3. Prise en compte de la notion de durabilité dans Solvabilité II

Dans la section précédente, une émergence de la notion durabilité a été constatée, dans un contexte d'accélération du réchauffement climatique. Ces préoccupations environnementales ont également augmenté l'exigence en matière de reporting extra-financiers pour les sociétés d'assurances et mutuelles. Ces entités sont également soumises à la réglementation européenne Solvabilité II. Il est donc judicieux de s'intéresser à la manière dont la **durabilité s'inscrit dans cette directive** et de voir comment les organismes d'assurances devront revoir leur **gestion du risque**.

Dans cette section, nous nous intéresserons alors à la Directive européenne Solvabilité II et son évolution à la suite de l'intégration des risques de durabilité.

3.1. Les fondamentaux de Solvabilité II

Avant d'explicitier les attentes de la Directive Solvabilité II en termes de durabilité, il est intéressant de rappeler ses principaux enjeux et caractéristiques.

L'intégralité des acteurs européens de l'assurance sont soumis depuis 2016 à la norme **Solvabilité II**. Cette Directive, inspirée de la précédente norme Solvabilité I, a pour objectif d'homogénéiser la mesure des fonds propres à l'échelle européenne, d'évaluer la solvabilité et d'inciter les organismes à mieux contrôler leurs risques.

Elle a été développée avec **l'objectif de protéger les assurés**. En effet, caractérisée par **l'inversion du cycle de production**, l'activité d'assurance est un transfert de risque au travers d'un contrat d'assurance. Il est donc primordial que l'organisme soit en mesure de respecter ses engagements vis-à-vis de ses assurés.

3.1.1. Les objectifs de Solvabilité II

Les insuffisances de Solvabilité I ont été à l'origine de la refonte de la norme et de l'apparition de Solvabilité II. En effet, la nouvelle Directive a un double objectif. D'une part, une **meilleure évaluation des risques** et de l'autre une **meilleure supervision** des groupes d'assurances.

La nouvelle réglementation a été construite autour de plusieurs grands **objectifs** :

- Harmoniser les normes et la réglementation du marché européen de l'assurance
- Renforcer la solidité financière des organismes d'assurance
- Protéger les assurés
- Inciter les organismes d'assurance à mesurer et mieux contrôler leurs risques
- Accroître la transparence envers les assurés et le superviseur
- Favoriser une surveillance efficace

3.1.2. Les trois piliers

Afin de faciliter la compréhension de la Directive Solvabilité, celle-ci est articulée autour de **trois piliers** :

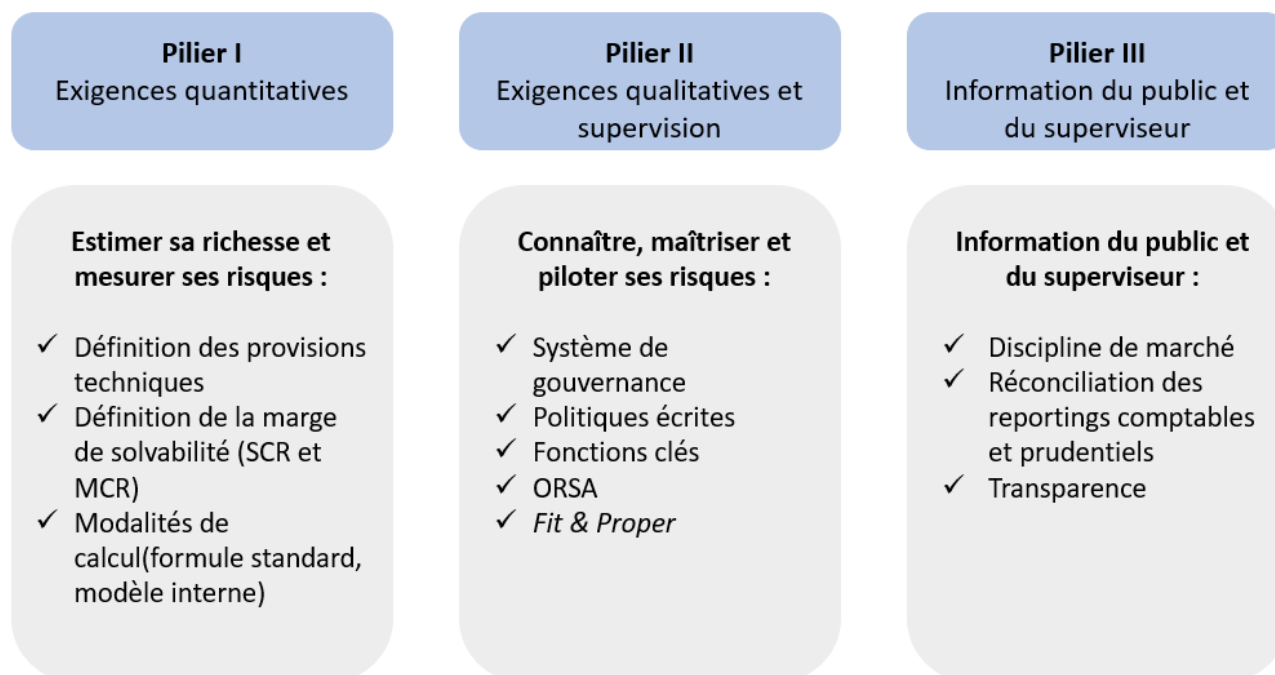


Figure I.10 : Les trois piliers de la Directive Solvabilité II

3.1.2.1. Pilier 1

Le pilier 1 de la Directive Solvabilité II présente les **exigences quantitatives**. Son objectif est d'harmoniser les normes de calcul des composantes du bilan économique. De ce fait, l'EIOPA exige aux différents organismes d'adopter une **vision économique** des composants de leur richesse, afin de pouvoir mieux mesurer leurs risques.

Bilan prudentiel

Dans le but d'adapter au mieux le profil de risque de l'organisme au cadre prudentiel, il est demandé d'adopter une vision économique de la richesse en utilisant un **bilan prudentiel**. Celui-ci est construit à partir du bilan comptable auxquels des retraitements sont effectués.

Au niveau de l'**actif économique**, il n'est plus valorisé en coût historique mais en **valeur de marché** en intégrant les **plus ou moins-values latentes**. En effet, l'idée est de refléter un maximum la réalité économique en comptabilisant la valeur à laquelle les actifs seraient échangés sur un marché coté à l'instant t.

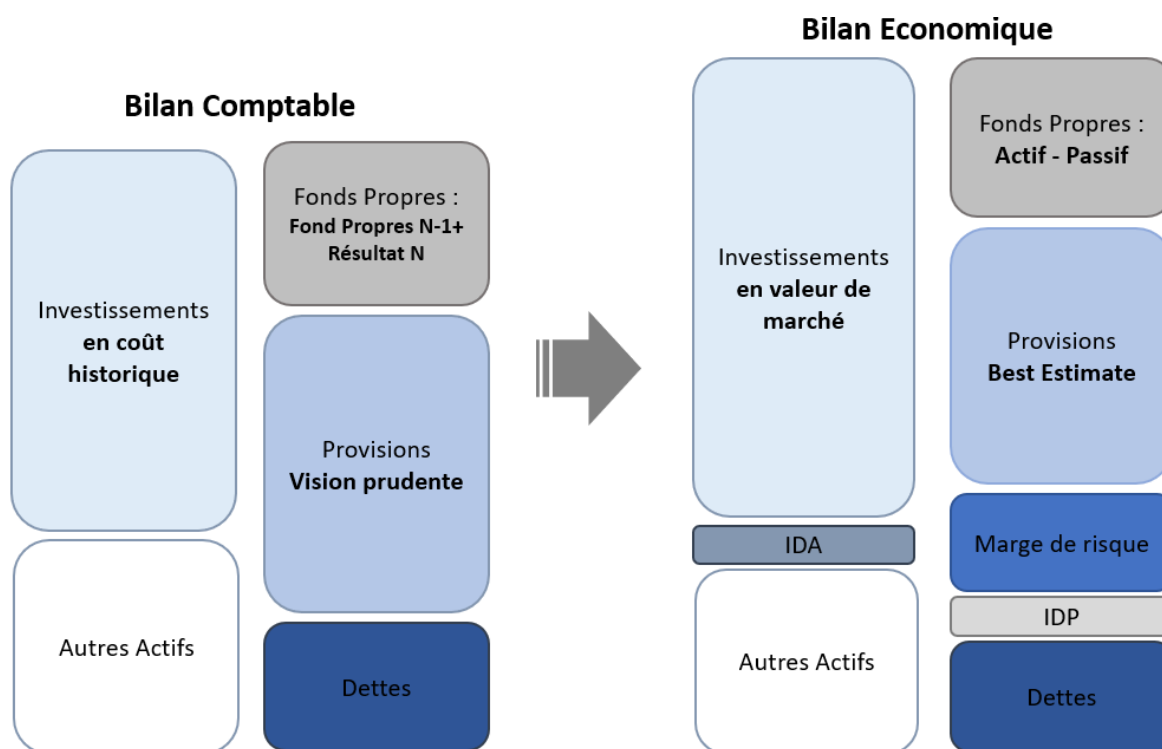


Figure I.11 : Passage du bilan comptable au bilan économique

Concernant le **passif économique**, celui-ci est composé des provisions en vision « Best Estimate » et d'une marge pour risque. Dans le but de refléter au plus près la réalité des engagements de l'organisme, la Directive Solvabilité II introduit la notion de meilleure estimation ou « **BE** » (*Best Estimate*). Cette provision correspond alors à la moyenne pondérée par leur probabilité des flux de trésorerie futurs. Ces derniers sont actualisés sur la base de la courbe des taux sans risque fournie par l'EIOPA. **La marge de risque** quant à elle correspond au montant que demanderait un tiers pour reprendre l'activité, en plus des provisions et dettes.

Afin de tenir compte des différences de valorisation à l'actif et au passif, le bilan prudentiel en vision Solvabilité II introduit la notion d'impôts différés. **L'IDA (impôt différé actif)** correspond alors à un crédit d'impôt futur dû à un écart à la baisse entre vision comptable et économique. À l'inverse, **l'IDP (impôt différé passif)** correspond à un écart à la hausse.

Finalement, les **fonds propres économiques** de l'organisme sont obtenus en effectuant la différence entre l'actif et le passif économique. Ils sont classés selon leur nature et leur capacité d'absorption des pertes dans trois catégories : Tier 1, Tier 2 ou Tier 3.

Mesure de risque

SCR

La principale mesure de risque introduite par la Directive Solvabilité II est le **SCR (Solvency Capital Requirement)**. C'est l'exigence de capital nécessaire pour un organisme afin

d'éviter la faillite avec une probabilité de 99,5%. Autrement dit, il représente le capital cible nécessaire pour absorber le choc provoqué par une sinistralité exceptionnelle avec une probabilité de 99,5% sur un horizon d'un an.

Le SCR correspond au quantile (*Value-at-Risk*) défini par un niveau de probabilité $\alpha = 99,5\%$ et un horizon de temps $t=1$ tels que :

$$P (Résultat \leq VaR (\alpha, t)) = 1 - \alpha$$

Le SCR peut être calculé à l'aide de deux méthodes : par la **formule standard** ou par un **modèle interne** (partiel ou complet).

La formule standard est basée sur une **architecture modulaire** prenant en compte les risques suivants :

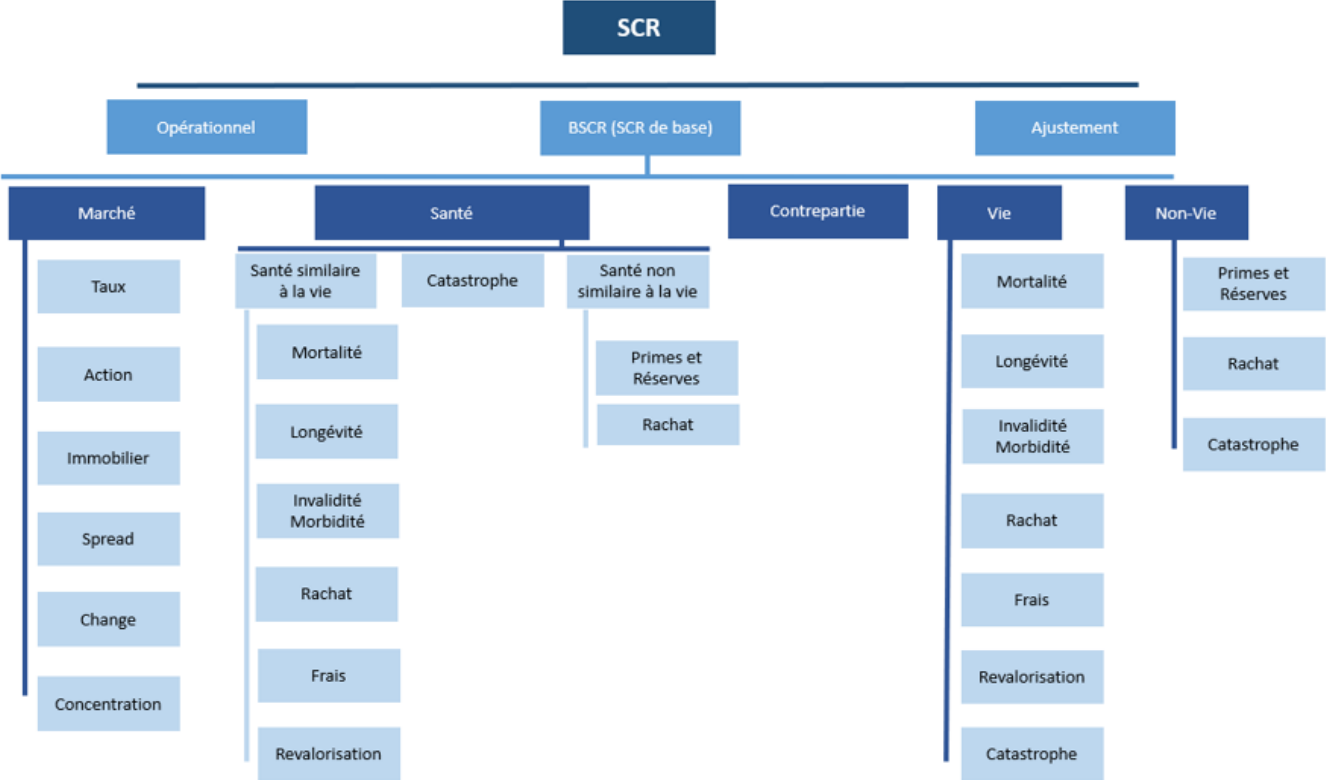


Figure I.12 : Risques pris en compte dans la formule standard

En effet, la Directive Solvabilité II définit plusieurs modules et sous-modules de risque. Pour chaque sous-module, un SCR est calculé à l'aide d'un scénario spécifique fourni dans le Règlement Délégué. Les différentes exigences en capitaux sont par la suite, agrégées à l'aide de **matrices de corrélation** suivant deux niveaux d'agrégation : intra-modulaire puis inter-modulaire.

MCR

La seconde mesure de risque introduite par la Directive Solvabilité II est le **MCR (Minimum Capital Requirement)**. Ce montant correspond au minimum de fonds propres que doit détenir un organisme afin de conserver son agrément.

Indicateurs de solvabilité

Ratios de couverture

Afin de s'assurer de disposer de fonds propres suffisants, la Directive a mis en place le calcul de deux **ratios de couverture** :

$$\text{Ratio de couverture}_{SCR} = \frac{\text{Fonds propres éligibles}_{SCR}}{SCR}$$

$$\text{Ratio de couverture}_{MCR} = \frac{\text{Fonds propres éligibles}_{MCR}}{MCR}$$

Ces deux ratios doivent être supérieurs à 100%. Le premier permet à l'organisme de garantir la continuité de son activité même en cas de survenance d'un risque rare et le second lui permet d'assurer la conservation de son agrément.

3.1.2.2. Pilier 2

Une gouvernance renforcée

Ce second pilier de Solvabilité II a pour but de s'assurer que l'organisme connaisse et maîtrise son profil de risque. Il s'agit de garantir une gestion saine, prudente et efficace de l'activité. A cette fin, la directive présente dans le cadre de son deuxième pilier ses **exigences qualitatives** et des notions de supervisions. Ce pilier introduit une notion importante : le **renforcement du système de gouvernance** qui doit s'articuler autour de quatre éléments :

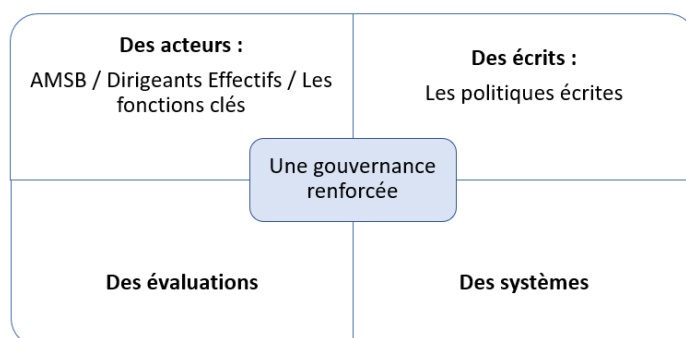


Figure I.13 : Structure du pilier 2

Des acteurs

L'**AMSB (Administrative Management and Supervisory Body)** est l'instance des décisions relatives à Solvabilité II. Le plus souvent, il s'agit du Conseil d'Administration auquel

s'ajoutent les **Dirigeants effectifs**, qui sont les personnes qui dirigent au quotidien l'organisme. Ils sont au minimum deux afin de respecter le principe des « quatre yeux ».

Afin de garantir une gestion saine et prudente de l'activité, quatre **fonctions clés** sont désignées en interne : gestion des risques, actuariat, audit interne et vérification de la conformité.

Des écrits

Les **politiques écrites** définissent le rôle et les responsabilités de chacun, ainsi que les procédures relatives à l'activité de l'organisme.

Des systèmes

Le **système de gestion des risques** a pour but de soutenir la fonction clé gestion des risques et concerne l'ensemble des risques de l'organisme. Le **système de contrôle interne** est, quant à lui, un dispositif de contrôle spécifique aux risques opérationnels.

Des évaluations

L'**ORSA** est un outil d'aide à la décision stratégique. Il rend compte des risques propres de l'organisme ainsi que de l'évolution de sa solvabilité à moyen terme, tout en permettant aux administrateurs d'avoir une vue de l'impact de leur stratégie sur la solvabilité.

L'article 45 de la Directive Solvabilité II apporte des précisions quant aux exigences du processus ORSA et met en avant **trois principaux axes** :

1. La détermination du BGS (Besoin Global de Solvabilité)
2. Le respect permanent des exigences de capital
3. La mesure des écarts avec les hypothèses sous-tendant le calcul du SCR sous la Formule Standard.

Souvent, les hypothèses et chocs issus de la Formule Standard ne sont pas adaptés et représentatifs des risques réellement encourus par l'organisme. L'évaluation du **BGS** apparaît donc comme une étape primordiale pour avoir une vision plus réaliste et complète du risque.

Les orientations ACPR suggèrent aux organismes d'établir une liste des différents moyens, qu'ils soient quantifiables ou non, pour faire face à leurs risques majeurs. L'entreprise doit également présenter une quantification de ses besoins en capitaux. Elle doit s'assurer que l'évaluation du BGS comporte une perspective prospective.

Au sein du cabinet Actuelia, cette évaluation est réalisée en revoyant la métrique de risque utilisée ainsi que les paramètres de la Formule Standard. Ensuite, les risques exclus de la Formule Standard ainsi qu'un éventuel capital supplémentaire sont intégrés. Cette critique de la Formule Standard se poursuit avec **l'intégration de l'ensemble des risques** inhérents à l'activité et à son développement, qui ne seraient pas déjà inclus dans la formule standard. On peut citer le risque « homme-clé », le risque d'absence de PCA (Plan de Continuité d'Activité) ou encore le risque cyber. Il est également possible d'intégrer des risques liés à l'actualité comme le **risque de durabilité**.

D'autre part, l'analyse du respect permanent des exigences réglementaires est un axe primordial du processus ORSA. L'organisme vérifie sa conformité continue avec les provisions techniques et les exigences réglementaires de capital. L'analyse s'effectue à travers plusieurs étapes. En effet, le **Business Plan** permet de projeter les indicateurs de solvabilité sur un horizon de temps qui varie entre trois et cinq ans. Il traduit entre autres, les orientations stratégiques de l'organisme. De plus, chaque organisme d'assurance est tenu de réaliser des **stress-tests** dans le but d'étudier l'impact de ces scénarios extrêmes sur la solvabilité de l'organisme à moyen terme.

Finalement, l'AMSB décide alors de retenir une formulation de son **appétence au risque** qui peut être défini comme le niveau global de risque qu'un organisme est prêt à accepter. Grâce à sa vision prospective, l'ORSA permet de vérifier que le niveau de risque supporté par l'organisme correspond bien à l'appétence choisie.

Ainsi, le processus ORSA apparaît comme **l'outil le plus adapté pour évaluer des impacts à long terme**. En effet, l'ACPR l'a souvent mentionné lors de ses demandes de scénarios sur des horizons prospectifs. Par exemple avec l'exercice pilote climatique réalisé en 2020 qui tire une première évaluation des risques financiers dus au changement climatique. Dans le cadre de ce mémoire, un ORSA sera réalisé en partie III afin de mesurer les impacts à long terme du risque de durabilité sur un organisme exemple.

3.1.2.3. Pilier 3

Le troisième pilier a pour objectif d'**accentuer la transparence** envers le public et de communiquer au superviseur les données nécessaires au contrôle.

De ce fait, les organismes d'assurance européens sont tenus de remettre annuellement et trimestriellement à l'ACPR leurs **états prudentiels** Solvabilité II sous forme de rapports narratifs et d'états quantitatifs.

3.1.3. Prise en compte du climat dans la Directive

Après avoir rappelé les enjeux et les caractéristiques de la Directive, il est intéressant de se pencher sur la façon dont le climat a été pris en compte dans Solvabilité II.

3.1.3.1. Le risque non-vie

Le climat est principalement abordé et calibré à travers le risque de Souscription non-vie. Celui-ci est composé des risques ci-dessous :

- Le risque de primes et de réserves
- Le risque de rachat
- Le risque de catastrophe

Le risque de primes et de réserves

Le **risque de réserves** est le risque que les provisions techniques constituées par l'organisme soient insuffisantes pour couvrir des sinistres déjà survenus. En effet, l'évaluation des provisions techniques comporte toujours un risque d'incertitude puisque les engagements futurs de la compagnie ne sont pas connus au moment de l'estimation de ces passifs.

Le **risque de primes** est le risque que les primes payées par les clients ne suffisent pas à couvrir les sinistres futurs ou les engagements de paiement de l'assureur envers les clients. Cet écart peut provenir de la fréquence et de la sévérité des sinistres futurs, d'une erreur de tarification ou d'une fluctuation des frais. Il entraîne alors des déficits dans la valeur des passifs d'assurance de l'organisme car le coût des sinistres futurs dépasse le coût attendu.

Le **risque de primes et de réserves** est calculé par ligne d'activité suivant une formule spécifique du Règlement Délégué. Les événements extrêmes avec une faible fréquence ne sont pas pris en compte dans le risque de primes et de réserves en non-vie. Ils ont néanmoins été pris en compte lors du calibrage des paramètres pour le risque de catastrophe. De plus, le recours à de la réassurance non-proportionnelle peut permettre d'ajuster la volatilité de certaines lignes d'activité. En effet, utilisée comme une technique d'atténuation du risque, la réassurance permet à l'assureur de réduire une partie de son risque moyennant une prime. D'après l'article 117 du Règlement Délégué, le recours à la réassurance non-proportionnelle permet à l'assureur de bénéficier de facteurs d'ajustement. Par exemple, pour les segments « Responsabilité Civile Automobile », « Incendie » et « Responsabilité Civile Générale », la réduction de la volatilité est de 20%.

Le risque de rachat

Le **risque de rachat** fait référence à la possibilité que les clients décident de résilier leur contrat d'assurance avant la fin de la période de couverture. Il entraîne alors une perte de fonds propres pour l'organisme d'assurance qui doit une partie des primes pour la période non couverte.

Le risque de catastrophe

Le **risque de catastrophe** est le risque que des événements exceptionnels et extrêmes entraînent une perte de la valeur des passifs d'assurance. Il s'agit d'un cas particulier du risque de primes et de réserves, pour des sinistres de faible fréquence et de grande sévérité.

Ce risque fait référence aux situations ci-dessous :

- Les catastrophes naturelles
- Les catastrophes d'origine humaine
- Les autres catastrophes en non-vie
- Les événements de réassurance non proportionnelle

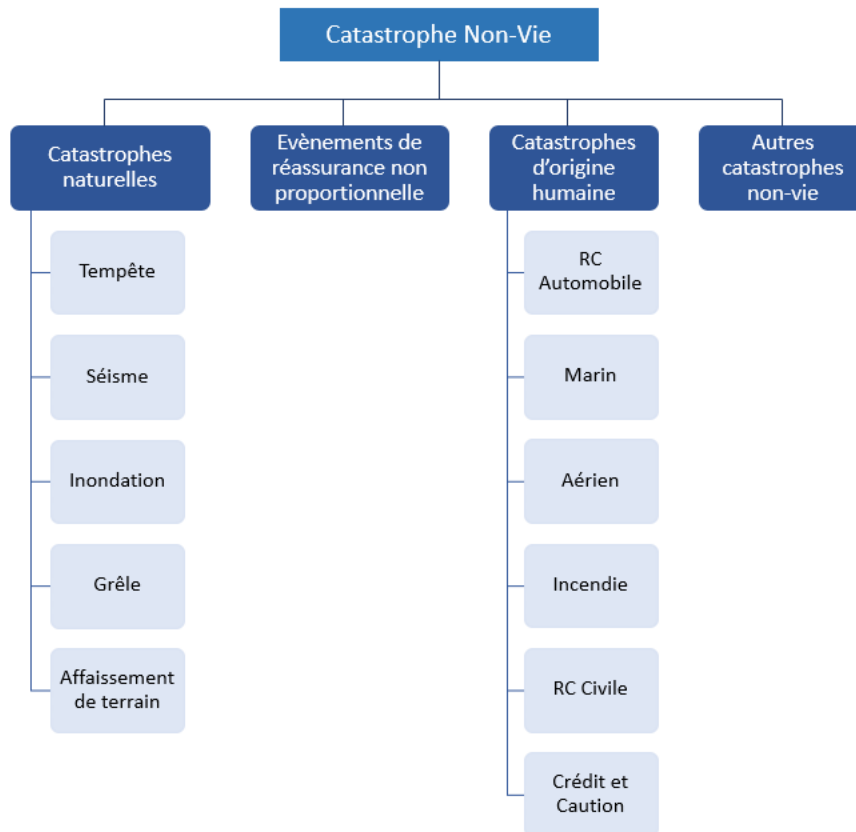


Figure I.14 : Structure du module catastrophe en non-vie

L'exigence de capital pour le risque de catastrophe en non-vie est obtenue en agrégeant les exigences des sous-modules ci-dessus. Dans son document *Calibration Paper*, l'EIOPA mentionne uniquement ses travaux concernant le calibrage du risque de catastrophe naturelle et du risque de catastrophe d'origine humaine.

Les catastrophes naturelles

Il apparaît intéressant de regarder plus en détail comment fonctionne le sous-module lié aux **catastrophes naturelles**. Il est composé des sous-modules suivants :

- Tempête
- Séisme
- Inondation
- Grêle
- Affaissement de terrain

De manière générale, le calcul du risque de catastrophe non-vie dans Solvabilité II s'effectue sous la forme de **scénarios**, construits au niveau Européen afin d'avoir une échelle homogène pour la comparaison.

Différentes options ont été étudiées pour le calibrage du risque de catastrophe naturelle. Il a alors été décidé que les scénarios devraient être déterminés par l'exposition des entreprises.

De ce fait, plusieurs **agrégations** ont été effectuées. En effet, une première idée a été évoquée en décomposant chaque péril et type de catastrophe par pays. Néanmoins le choix cette maille, en particulier pour les gros pays, n'apparaît pas suffisante pour refléter de manière réaliste la volatilité du risque. L'EIOPA a ainsi choisi d'établir les scénarios à un niveau de sous-pays.

En raison de mailles différentes selon les pays et d'un manque de données, le système de classification géographique **CRESTA** (*Catastrophe Risk Evaluation and Standardizing Target Accumulations*) est utilisé. Son objectif est de faciliter la comparaison des risques entre les organismes d'assurance en fournissant une référence commune pour évaluer les risques de catastrophes naturelles.

Le système de classification est composé de « *Cresta Zone* » avec un code unique, correspondant à une zone géographique du monde. Un « **facteur 1 sur 200** », représentant le coût d'un sinistre de 1 sur 200 pour l'ensemble du secteur et exprimé en pourcentage de la somme assurée est associé à chaque pays.

De plus, des **facteurs de relativité** sont affectés à chaque zone par pays. Ils reflètent ainsi le fait que dans certaines régions d'un pays, l'exposition et le niveau de dommages peut être plus important que dans d'autres. Plusieurs paramètres sont pris en compte dans leur évaluation comme les caractéristiques géographiques de la zone, l'historique de sinistres de catastrophes naturelles ou encore la probabilité de survenance de sinistre. Une matrice d'agrégation entre les différentes zones est également disponible.

Ces différents outils sont utilisés pour évaluer le risque de catastrophes naturelles et déterminer la **charge brute de réassurance** :

$$WTIV_{Zone} = F_{Zone} * TIV_{Zone}$$

$$CAT_{Peril} = Q_{Country} \sqrt{\sum_{rxc} AGG_{r,c} * WTIV_r * WTIV_c}$$

Où :

- CAT_{Peril} correspond à l'estimation de charge de capital pour un pays ;
- $Q_{Country}$ correspond à un « facteur 1 sur 200 » pour chaque pays et péril ;
- AGG correspond à la matrice d'agrégation par pays ;
- $WTIV$ correspond à la valeur totale assurée pondérée géographiquement par zone ;
- F_{Zone} correspond aux facteurs de relativité pour chaque zone par pays ;
- TIV_{Zone} correspond à la valeur totale assurée pour la ligne d'activité incendie et autres dommages par zone du CRESTA.

Ensuite, une application du **programme de réassurance** est réalisée, toujours selon une approche par scénario. Dans une démarche de prudence, la charge finale nette retenue correspond au scénario **le plus pénalisant** pour l'organisme d'assurance.

En raison de l'accélération du réchauffement climatique, la fréquence et l'intensité des catastrophes naturelles augmentent. Les organismes d'assurance doivent alors améliorer la gestion de ce risque.

3.1.3.2. Limites

La Directive Solvabilité II a été créée à la suite de la **crise financière** majeure de 2008. Le défi climatique n'était à l'époque pas au cœur des préoccupations des autorités. A mesure que l'accélération du réchauffement climatique s'accroît, la manière dont la Directive aborde les risques de catastrophes naturelles a été remise en question.

En effet, la période d'un an utilisée pour le calibrage du SCR est jugée trop courte pour des risques extrêmes qui peuvent s'étendre dans la durée. De plus, l'actualité récente avec les pandémies ou encore les événements climatiques majeurs ont poussé les autorités à réviser la Directive à travers un projet de refonte, comme en témoigne le pilote climatique réalisé en 2020. L'objectif étant de créer de **nouvelles dispositions dédiées au risque climatique** et de pouvoir dégager des fonds propres afin d'investir sur le climat.

3.2. L'intégration des risques de durabilité

Cette sous-section s'intéresse à l'intégration des **risques de durabilité** dans la Directive Solvabilité II. Les principaux objectifs et attentes seront explicités.

3.2.1. Objectifs et calendrier d'application

Face au défi climatique, la notion de durabilité prend de plus en plus de place dans le panorama de l'assurance. Les réglementations vertes se multiplient afin de parvenir à une économie durable.

Dans le cadre de cette démarche, l'EIOPA a remis à la CE (Commission Européenne) le 30/04/2019, un avis technique dans lequel elle recommande notamment de modifier plusieurs articles du Règlement Délégué de Solvabilité II. **L'intégration du risque de durabilité** dans Solvabilité II apparaît comme une évolution récente et importante dans le cadre réglementaire de l'UE (Union Européenne).

Le Règlement Délégué (UE) 2021/2056 modifie le Règlement Délégué (UE) 2015/35 complétant la directive Solvabilité II en ce qui concerne « *l'intégration des risques en matière de durabilité dans la gouvernance des entreprises d'assurance et de réassurance* ». Il est en vigueur depuis le 2 août 2022.

La figure I.15 expose le calendrier des grandes dates des textes intégrant les risques de durabilité pour le secteur de l'assurance :

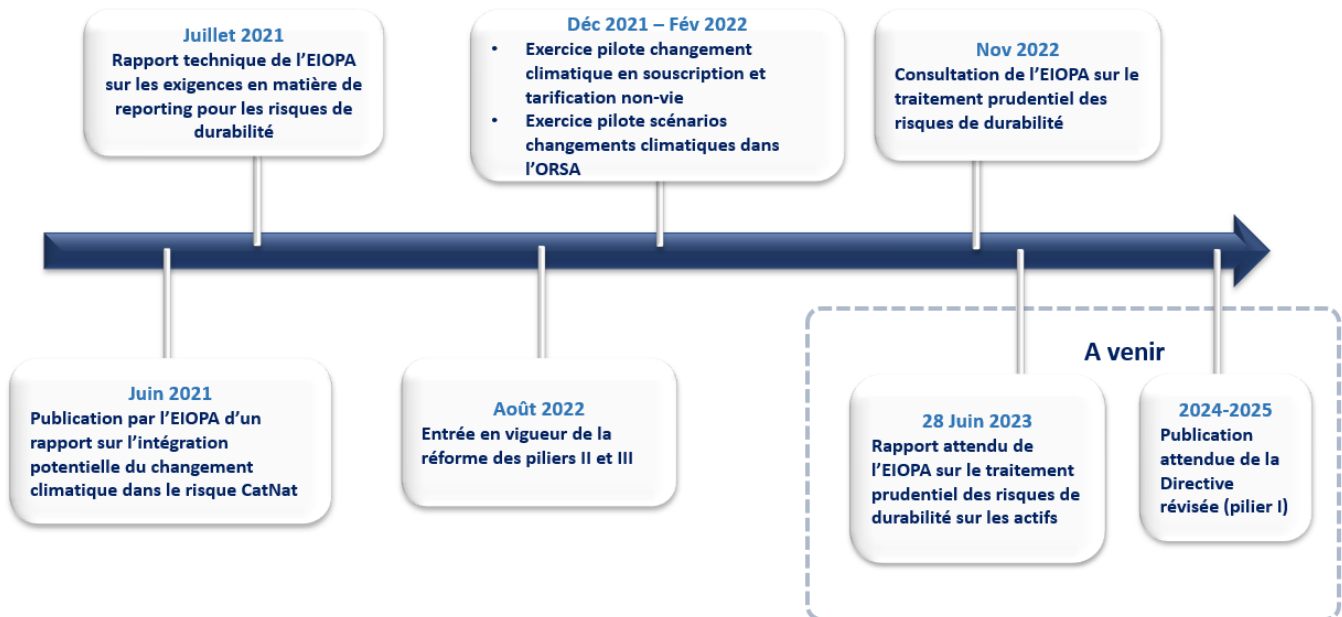


Figure I.15 : Calendrier des projets intégrant la notion de durabilité dans la Directive Solvabilité II

3.2.2. Pilier 1

Dans le cadre de la révision de la Directive Solvabilité II, deux principaux axes de travail ont été confiés à l'EIOPA concernant le pilier 1.

La première mission prend la forme d'un rapport attendu pour le 28 juin 2023. Ce dernier portera sur l'analyse de la pertinence d'un **traitement prudentiel spécifique des risques de durabilité liés aux actifs**.

La seconde porte sur la **revue du module SCR Catastrophe en non-vie**. En effet, principalement touché par l'accélération du réchauffement climatique, l'EIOPA a pour objectif d'évaluer les écarts potentiels de calibrage entre la formule standard et le risque réel. Pour cela, elle prévoit une revue à minima tous les trois ans, en utilisant des données climatologiques récentes. Elle a par ailleurs déjà publié un article méthodologique le 29 juin 2021 détaillant plusieurs mesures pour prendre en compte l'impact du changement climatique dans le calcul du SCR Catastrophe. La fréquence et la sévérité des événements catastrophes naturelles devraient être reconsidérées afin de prendre en compte le changement climatique.

3.2.3. Pilier 2 et 3

La modification du Règlement Délégué Solvabilité II, entrée en vigueur depuis août 2022, apporte plusieurs évolutions. Les organismes d'assurance sont tenus d'intégrer les

risques de durabilité dans leur **système de gouvernance** et dans leur **système de gestion des risques**.

3.2.3.1. Intégration des risques de durabilité dans la gouvernance

Réglementations vertes

Comme vu dans une section précédente, les assureurs sont soumis à un grand nombre de reportings extra-financiers liés à la finance durable. En particulier, les **réglementations Disclosure et Taxonomie** modifient les exigences de reportings en établissant un système de classification européen des activités durables sur le plan environnemental. En s'appuyant sur ce nouveau système, le Règlement Délégué (UE) 2021/2056 oblige les organismes d'assurance à prendre en compte les préférences des clients en matière de critères ESG.

Principe de la personne prudente

Le **principe de la personne prudente** est une notion clé de la Directive Solvabilité II. Les assureurs sont incités à évaluer leur risque et à les gérer de manière efficace et prudente. De ce fait, dans le cadre de l'intégration des risques de durabilité dans la gouvernance, les organismes d'assurance sont amenés à prendre en compte ces risques. En effet, d'une part en investissant dans des actifs « sûrs », c'est-à-dire présentant des risques identifiables et maîtrisables. De l'autre, en prenant en compte ces risques de durabilité dans l'élaboration de stratégies d'investissements.

Politiques écrites

De nombreuses **politiques écrites** sont affectées par les changements du Règlement Délégué. Parmi elles, les politiques de **rémunération** et d'**investissement** devront communiquer des informations sur la façon dont elles intègrent ces nouveaux risques de durabilité dans leur système de gestion des risques. Les politiques de **souscription**, **gestion des risques** et **provisionnement** sont également concernées par ces modifications.

Concernant la politique de provisionnement, l'EIOPA a fourni des recommandations :

- Identification et évaluation de l'impact des risques ESG sur les provisions techniques
- Réalisation de stress-tests ESG et de tests de sensibilité
- Intégration des différents résultats et conclusions dans le provisionnement

Fonctions clés

La **fonction clé actuariat** doit intégrer dans l'avis qu'elle émet sur la politique de souscription des conclusions relatives à l'effet des risques en matière de durabilité.

La **fonction clé gestion des risques** doit prendre en compte les risques de durabilité dans son système de gouvernance. Elle doit les identifier, les évaluer mais également les intégrer dans le calcul du besoin global de solvabilité.

3.2.3.2. Intégration des risques de durabilité dans le besoin global de solvabilité

Le changement climatique est un processus long et ses conséquences peuvent être visibles sur plusieurs années. L'horizon de calcul du SCR apparaît alors comme court pour évaluer les effets long-terme des risques climatiques. C'est pour cette raison que l'EIOPA recommande de prendre en compte ces risques dans l'ORSA.

Celle-ci a publié en août 2022 les conclusions d'un exercice pilote mené de décembre 2021 à février 2022 sur l'utilisation de **scénarios climatiques** dans l'ORSA.

Par ailleurs, les organismes d'assurance sont tenus d'intégrer les risques de durabilité dans le **besoin global de solvabilité**. Pour cela, l'EIOPA a fourni certaines pistes et recommandations. En effet, tout d'abord, les organismes sont tenus d'évaluer la matérialité, selon le profil de l'entreprise, des risques liés au changement climatique. Une réflexion sur les impacts potentiels de ce phénomène est à réaliser. Les conclusions de cette réflexion peuvent être retranscrits à travers une matrice de matérialité. Initialement, il s'agit d'un outil de stratégie visuel utilisée dans la mise en place d'une démarche RSE. Appliqué au cadre du défi climatique, la matrice compte trois axes : l'horizon temporel, la probabilité de réalisation du risque et l'impact sur l'exposition de l'organisme.

Une fois la matrice réalisée, l'organisme doit intégrer ses conclusions dans l'ORSA. Si les risques sont non-matériels, il doit tout de même expliciter leur évaluation. Pour les risques matériels, des scénarios de changement climatique doivent alors être utilisés pour en évaluer les pertes financières.

L'EIOPA recommande l'utilisation à minima des **deux scénarios** ci-dessous :

- Un scénario dans lequel l'augmentation globale de température reste sous 2°C
- Un scénario où l'augmentation de température globale excède 2°C

4. Conclusion : une prise en compte du climat limitée

Le changement climatique apparaît comme un véritable défi pour les assureurs du fait de la multiplicité des difficultés qu'il engendre : une augmentation de la fréquence et de l'intensité des sinistres climatiques mais aussi une hausse des coûts de réclamation et d'indemnisation. Ces répercussions peuvent conduire à des pertes financières importantes.

Par ailleurs, les acteurs subissent une pression réglementaire croissante. L'exigence de reportings extra-financiers s'accroît et les projets de refontes réglementaires se multiplient. Les autorités contraignent les organismes à intégrer la notion de durabilité et les risques climatiques dans leur gestion des risques, afin de maintenir leur activité.

Ainsi, les différentes instances du monde de l'assurance se trouvent face à la même problématique, à savoir, **comment concilier assurabilité et durabilité face au défi climatique ?**

II. Analyse d'une dérive de sinistralité future et de ses impacts sur un portefeuille non-vie

Le précédent chapitre a permis de mettre en exergue les difficultés auxquelles les organismes d'assurance vont devoir se confronter durant les prochaines années. En effet, face à un réchauffement climatique croissant, les assureurs vont se heurter à une augmentation du nombre de sinistres et de leur coût. Les stratégies et moyens d'atténuation actuellement mis en place seront à revoir et à optimiser afin de maintenir la viabilité de leur activité.

Ce second chapitre a pour objectif de quantifier une **dérive de sinistralité future**, en fréquence et en coût, dans un contexte de dérèglement climatique. Les **impacts et limites** sur un portefeuille non-vie seront explicités.

1. Mesure d'une dérive de sinistralité

Une **dérive** peut être définie de manière générale comme une évolution ou un changement progressif vers une direction. Dans le domaine assurantiel, la dérive de sinistralité peut se manifester à la fois en termes de **fréquence** mais aussi en **coûts** des dommages.

Pour les sinistres climatiques, cette tendance peut être influencée par plusieurs facteurs comme les évolutions réglementaires, les changements de démographie, l'inflation mais surtout le réchauffement climatique, marqué par une **dégradation des conditions météorologiques**.

L'enjeu de cette section est d'évaluer la dérive de sinistralité future pour les assureurs.

1.1. Fréquence des sinistres

Cette sous-section s'intéresse à la dérive de sinistralité **en fréquence**. Celle-ci se traduit par une augmentation graduelle du nombre de sinistres déclarés.

1.1.1. Construction de la base de données

L'objectif du présent chapitre est de mesurer une dérive de sinistralité. De ce fait, la **construction** de la base de données utilisée dans le modèle est une étape primordiale de l'étude.

1.1.1.1. Sources de données

Les sources de données utilisées dans la construction de la base de données sont issues de l'**Open Data**. Ce terme désigne un ensemble de données qui sont accessibles au public et

gratuites. Les données ouvertes présentent de nombreux avantages comme leur transparence, leur disponibilité et leur accès.

Elles sont de plus en plus utilisées dans l'assurance. En effet, elles permettent de pallier le manque d'information mais aussi d'utiliser de nouvelles sources de données afin d'améliorer les modèles créés par les assureurs. En France, l'Etat participe grandement à l'enrichissement de l'*Open Data* puisqu'il met à disposition plusieurs informations par souci de transparence comme des bases de données. Parmi elles, des jeux de données démographiques, économiques, géographiques ou encore des données sur les conditions météorologiques ou les arrêtés de catastrophes naturelles.

Dans la cadre de ce mémoire, les deux dernières bases de données évoquées ont été utilisées.

Géorisques

La plateforme **Géorisques** a été développée par le Ministère de la Transition Ecologique et regroupe plusieurs informations, travaux et outils sur les risques naturels. Elle a pour vocation de sensibiliser le public sur les différents risques présents sur le territoire français.

Le jeu de données utilisé dans ce mémoire provient essentiellement de la base de données **GASPAR** (Gestion Assistée des Procédures Administratives relatives aux Risques). Ce dernier est présenté ci-dessous :

Nom de la base de données	Type de données	Années de couverture	Structure
Arrêtés de catastrophes naturelles	Sinistralité	1982 à janvier 2023	Une ligne correspond à une reconnaissance qui concerne une commune, un évènement et un risque.

Tableau II.1 : Données Géorisques

A noter qu'il est possible d'avoir plusieurs reconnaissances sur une même commune pour un même évènement.

Météo France

Organisme national de météorologie en France, **Météo France** propose un large panel de données météorologiques et climatologiques, mesurées dans ses différentes stations. Néanmoins, la plupart de données ne sont accessibles qu'avec une compensation financière.

De ce fait, le jeu de données utilisé dans ce mémoire provient de la **base SYNOP**, disponible sur l'*Open Data* et présenté ci-dessous :

Nom de la base de données	Type de données	Années de couverture	Structure
SYNOP	Météo	1996 à 2023	Données mensuelles avec pour chaque jour un relevé toutes les 3h par station météorologique.

Tableau II.2 : Données Météo France

INSEE

L'**INSEE** (Institut National de la Statistique et des Etudes Economiques) est un organisme public français qui a pour mission de produire et diffuser des données statistiques et économiques sur la société et l'économie française. Il contribue à l'enrichissement de l'*Open Data* en rendant publiques les données produites dans le cadre de ses travaux.

Les données utilisées dans ce mémoire sont présentées ci-dessous :

Nom de la base de données	Type de données	Année de mise à jour	Structure
Code officiel géographique	Géographiques	1 ^{er} janvier 2021	Correspondances entre communes, départements et régions.

Tableau II.3 : Données INSEE

DATA GOUV

Cette plateforme *Open Data*, offre un accès facile à une large variété de jeux de données provenant d'organismes gouvernementaux. Elle a pour vocation de promouvoir la transparence et la réutilisation des données publiques en France.

Les données utilisées dans ce mémoire sont présentées ci-dessous :

Nom de la base de données	Type de données	Année de mise à jour	Structure
Listes des communes géolocalisées	Géographiques	20 mars 2014	Latitudes et longitudes des communes en France.

Tableau II.4 : Données DATA GOUV

1.1.1.2. Choix de la plage temporelle

Les sources de données utilisées dans ce mémoire n'ont pas la même fréquence de publication. Pour garantir la fiabilité des résultats, il est primordial d'utiliser des données complètes et cohérentes. De plus, cette section a pour objectif de mesurer l'évolution de la sinistralité pour les années à venir. Dans cette perspective, il est essentiel d'utiliser les données les plus récentes disponibles.

Ainsi, l'étude se limitera aux **catastrophes naturelles survenues entre 2016 et 2022**. En choisissant cette période de référence, les données les plus exhaustives disponibles jusqu'à présent pourront être utilisées afin d'analyser les tendances et de détecter toute éventuelle dérive de la sinistralité.

1.1.1.3. Travail sur la base « Météo »

Les données météorologiques ont été obtenues à partir de la base SYNOP de Météo France. Celles-ci sont mesurées à l'aide de plusieurs stations météorologiques et circulent sur le système mondial de télécommunication de l'OMM (Organisation Météorologique Mondiale). La méthode suivie pour la construction de la base de données « Météo » est indiquée à la figure II.1.

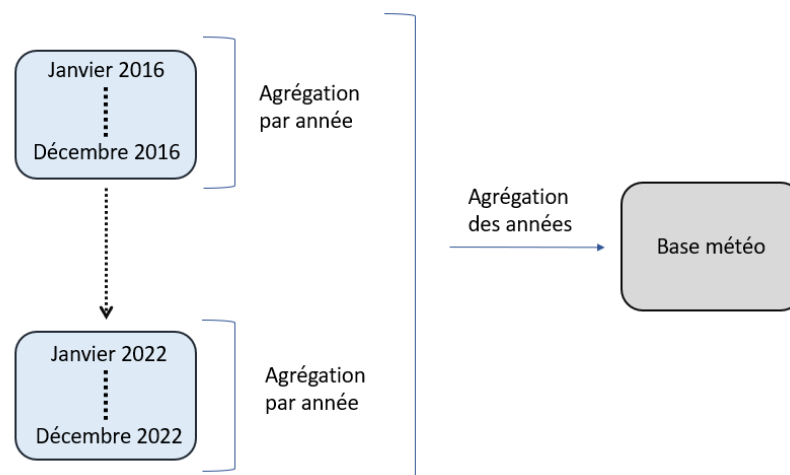


Figure II.1 : Schéma représentatif de la construction de la base de données "Météo"

Les informations et **paramètres météorologiques conservés** pour cette étude sont les suivants :

- Indicatif OMM de la station météorologique
- Date de la mesure
- Température (en °C)
- Humidité (en %)
- Pression au niveau de la station (en hPa)
- Précipitations dans les dernières 24h (en mL)

La base initiale est constituée de données mensuelles avec pour chaque jour un relevé toutes les 3h par station météorologique. Pour la suite de l'étude, en plus de **l'agrégation annuelle** qui a été effectuée, seulement **une mesure par jour et par station** a été conservée en faisant la moyenne des indicateurs météorologiques sur une même journée.

1.1.1.4. Travail sur la base « Sinistre »

Statistiques sur les reconnaissances d'état de catastrophes naturelles

Les statistiques ont été obtenues à partir du jeu de données GASPARD répertoriant les arrêtés de catastrophes naturelles de 1982 à janvier 2023. Comme vu dans les sous-sections précédentes, l'étude se limitera aux catastrophes naturelles survenues **entre 2016 et 2022**.

Au cours de cette période, la France a enregistré un total de 33 058 déclarations sur tout son territoire. Parmi ces déclarations, 32 759 concernaient des catastrophes naturelles survenues en France métropolitaine, tandis que les 299 restantes étaient liées à des évènements dans les départements d'Outre-Mer.

Afin d'analyser la base de données, un **regroupement** des différents types d'évènements par famille de risque a été réalisé en suivant les règles du tableau II.5. Ce regroupement de données sera exploité ultérieurement dans ce mémoire.

Type de risque	Description
Affaissements de terrain	Mouvements de terrain différentiels consécutifs à la sécheresse et à la réhydratation des sols, éboulements rocheux, glissements de terrain
Inondations	Coulées de boue, chocs mécaniques liés à l'action des vagues, inondations par remontées de nappes phréatiques
Sécheresses	Sécheresses
Autres	Avalanches, séismes, secousses sismiques, vents cycloniques

Tableau II.5 : Regroupement en famille de risques

La figure II.2 montre que **42%** des catastrophes naturelles sur la période d'étude correspondent à **des arrêtés d'inondation**. En effet, selon Covéa dans son livre blanc sur le changement climatique, « *Le risque inondation représente le 1er pôle d'indemnisation au titre du régime des Catastrophes Naturelles, avec 21,6 milliards d'euros d'indemnisation cumulée entre 1982 et 2020* ». Le second risque le plus fréquent est le **risque de sécheresse** avec **50%** des arrêtés soit 16 615 reconnaissances. Ces deux risques sont donc responsables **de plus de 90%** des reconnaissances d'état de catastrophe naturelle.

Les **affaissements de terrain** représentent 7% des reconnaissances, soit 2 347 entre 2016 et 2022. Enfin, les **autres risques** ne sont responsables que de 1% des arrêtés. Ce chiffre peut s'expliquer par le fait que les risques d'avalanche et de chute de neige n'ont été couverts par le régime d'indemnisation des catastrophes naturelles que jusqu'en 1992.

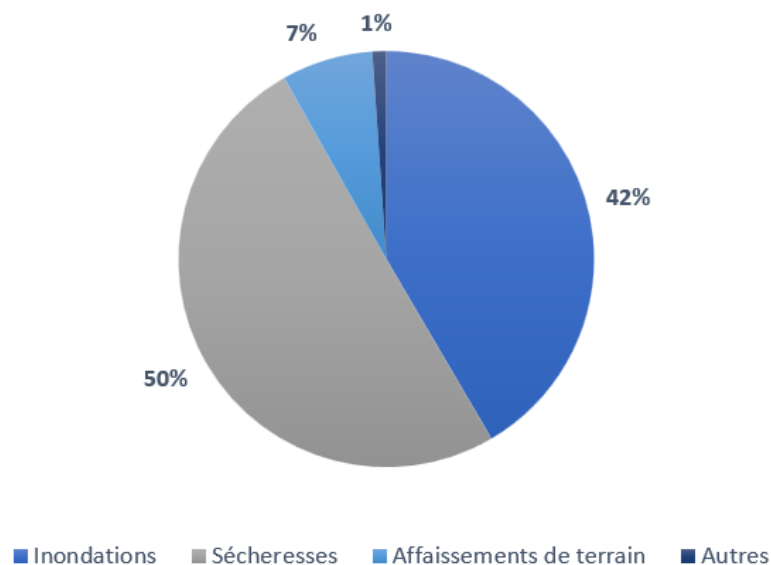


Figure II.2 : Répartition des arrêtés par famille de risque de 2016 à 2022

Ainsi, pour la suite du présent mémoire, l'étude se limitera au risque d'**inondation** et de **sécheresse** puisqu'ils constituent les risques ayant le plus affecté le territoire Français sur la durée de l'étude.

Risque inondation

La figure II.3 s'intéresse à l'**évolution** des reconnaissances d'état de catastrophe naturelle pour le risque inondation de 2016 à 2022.

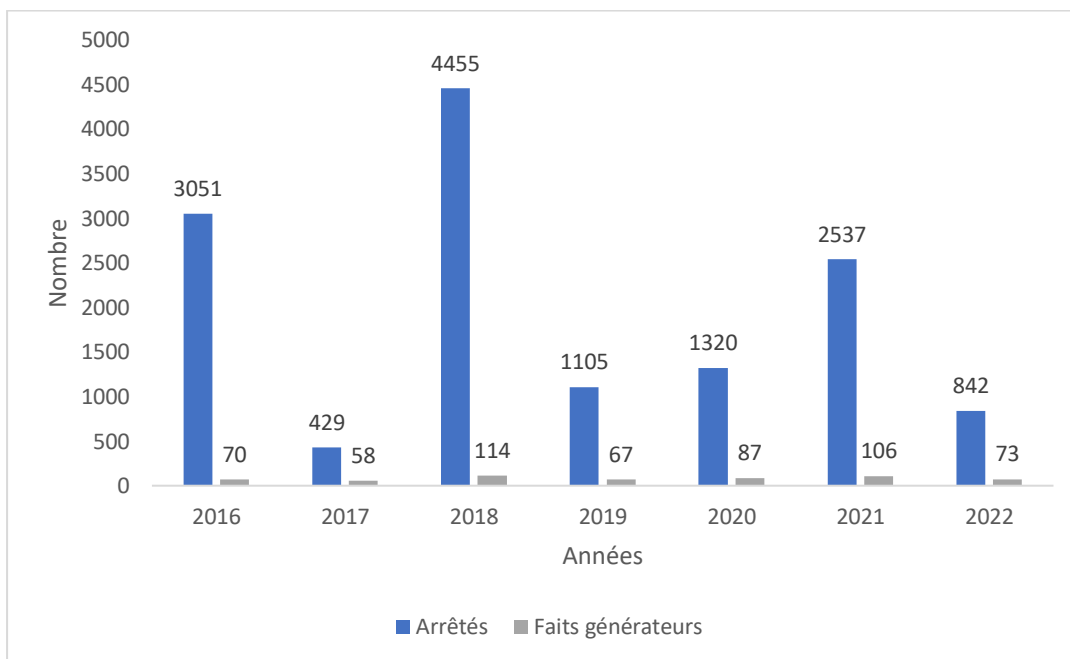


Figure II.3 : Evolution temporelle du nombre d'arrêtés et faits générateurs (inondation)

Une distinction est effectuée entre le nombre d'**arrêtés** et le nombre de **faits générateurs**. Pour rappel, dans la base « Sinistre », une ligne correspond à une reconnaissance qui concerne une commune, un évènement et un risque. Il est donc possible d'avoir plusieurs reconnaissances sur une même commune pour un même évènement. Le fait générateur fait ainsi référence à une **date unique** pour laquelle il y a eu un sinistre, pouvant s'étaler sur plusieurs jours et toucher plusieurs communes. Il existe une **corrélation positive** entre le nombre d'arrêtés et le nombre de faits générateurs. Lorsque le premier augmente, le second croît également.

Les années 2016 et 2018 se démarquent par leur **forte sinistralité** avec respectivement 3051 et 4455 arrêtés. En effet, l'année 2016 a été marquée par des crues exceptionnelles au mois de mai et juin dans plusieurs régions, notamment en Ile-de-France, Normandie, Aquitaine et en Alsace. En 2018, des pluies torrentielles ont entraîné d'importantes inondations dans le département de l'Aude, dans le sud de la France. L'année 2021 compte également 2537 arrêtés et 106 faits générateurs, correspondant à de nombreux épisodes d'inondations dans la vallée de l'Aude et dans plusieurs départements du Nord et du Nord-Est de la France.

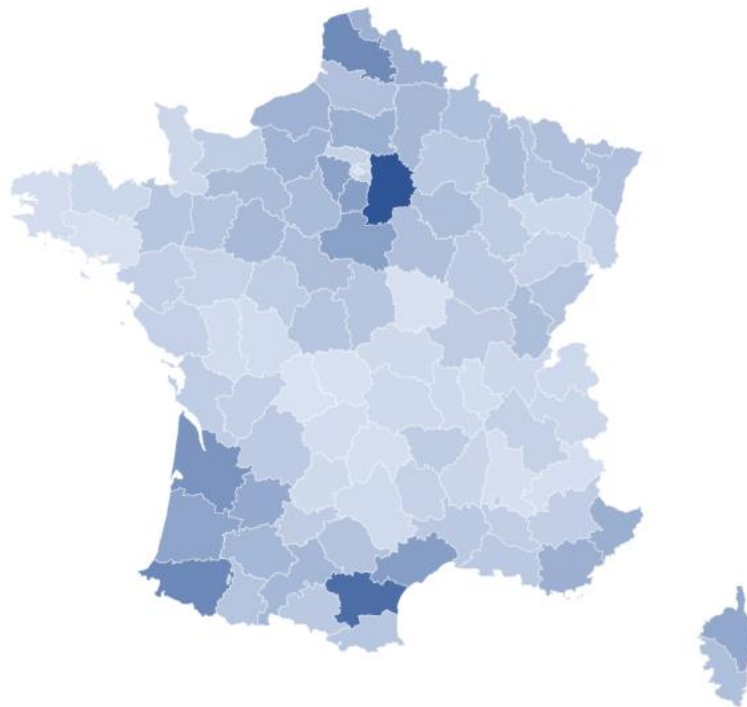


Figure II.4 : Nombre d'arrêtés par département (inondation)

La figure II.4 s'intéresse à la répartition géographique des arrêtés de reconnaissance de catastrophe naturelle pour le risque inondation. **Les zones les plus touchées**, les plus foncées sur la carte, par ce péril sont la vallée de la Seine en raison du fleuve et de ses affluents. Le Sud-Ouest de la France, et certaines zones côtières comme le littoral méditerranéen ou le nord de la France sont aussi des zones vulnérables en raison de leur proximité avec la mer.

L'évolution temporelle du nombre de reconnaissances de sécheresse n'a pas la même allure que celui des inondations. En effet, ce risque se manifeste généralement de manière **beaucoup plus lente et progressive** par rapport aux inondations, ce qui explique le nombre très faible de faits générateurs. Il est important de noter que l'appréciation de ces sinistres relève des autorités avec la déclaration de l'état de catastrophe naturelle. De ce fait, il est possible parfois que certaines communes juxtaposées soient exclues de l'arrêté. Selon le Sénat, il existe une sous-évaluation d'au moins 50% en ce qui concerne la reconnaissance des indemnisations liées à ce péril. Par ailleurs, l'indemnisation du risque de sécheresse a évolué au fil du temps. Afin de simplifier et réduire les délais de traitements, plusieurs dispositifs et efforts ont été mis en place par les autorités pour accélérer les procédures et garantir une indemnisation équitable.

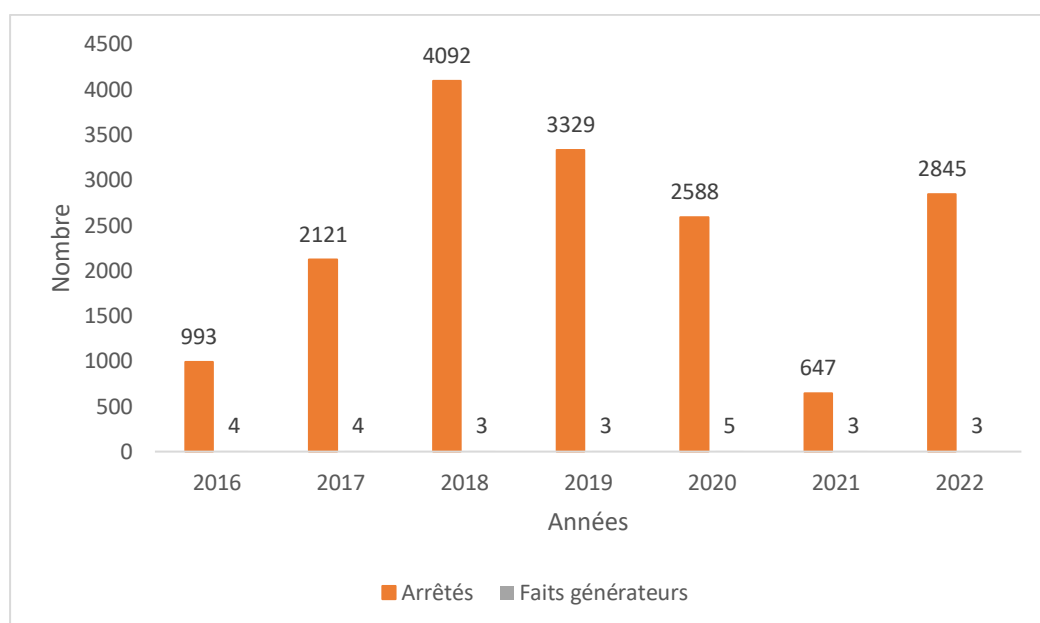


Figure II.5 : Evolution du nombre d'arrêtés et faits générateurs (sécheresse)

Les années 2018 et 2019 sont caractérisées par une **sinistralité élevée**, avec un nombre d'arrêtés respectivement de 4092 et 3329. Durant cette période, des températures élevées et des précipitations très faibles ont touché la France et ont entraîné des sécheresses dans le Nord, Centre et Sud-Est du pays. La sécheresse s'est également poursuivie en 2019, avec des conséquences similaires sur le territoire français.

L'année 2022 est également très sinistrée avec 2845 arrêtés et 3 faits générateurs. De nombreux dégâts ont été provoqués par des mouvements de terrain dus à la sécheresse dans plusieurs communes en Auvergne Rhône-Alpes, Nouvelle-Aquitaine, Occitanie et Provence-Alpes-Côte d'Azur. Des records de températures ont été atteints tout au long de l'année. Les spécialistes recensent 33 jours de canicule.

D'après la figure II.6, présentée ci-dessous, **les zones les plus impactées**, les plus foncées sur la carte, par les sécheresses depuis 2016 sont le Centre de la France en raison de

la diminution des précipitations et la présence des sols relativement peu profonds. Le Bassin méditerranéen, le Sud-Ouest et Nord-Est font également partie des régions les plus exposées aux sécheresses.

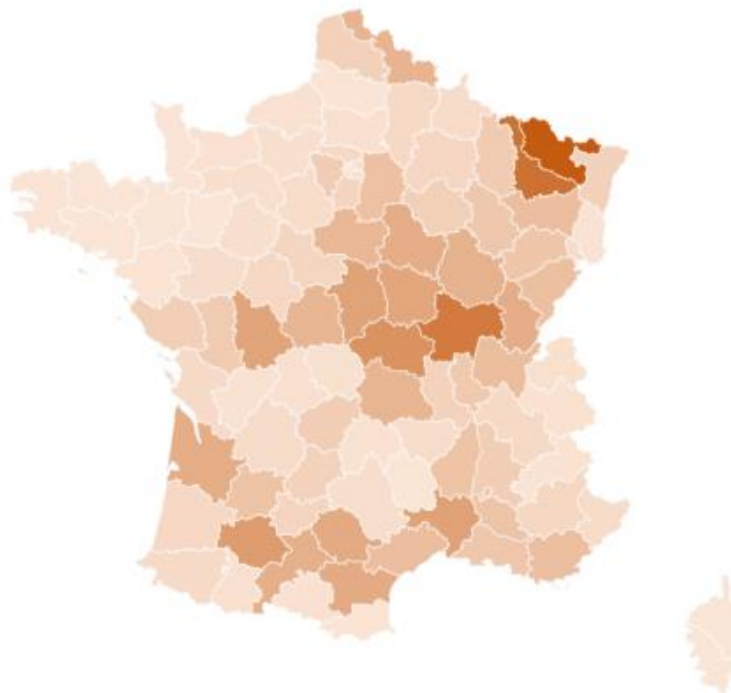


Figure II.6 : Nombre d'arrêts par département depuis 2016 (sécheresse)

Retraitements de la base de données

À la suite du choix de la plage temporelle et des deux risques conservés, une variable « sinistre » a été ajoutée, valant 1 pour toutes les lignes de la base GASPARG retraitée. Celle-ci sera utile pour la construction du modèle GLM (*Generalized Linear Model*) présenté ultérieurement dans ce mémoire.

Une **jointure** a été réalisée avec les bases de données de l'INSEE et de DATA GOUV via le code de la commune afin de récupérer les codes et noms des départements et régions correspondants ainsi que les coordonnées géographiques de la commune.

1.1.1.5. Création d'une base unique

Association d'une station météorologique à chaque commune

Les données météorologiques utilisées dans la base « Météo » ont été obtenues à l'aide de plusieurs stations météorologiques. Cependant, le nombre de stations climatiques en France est limité, en comparaison au nombre de communes.

De ce fait, afin de garantir une **couverture complète et adéquate à l'échelle communale**, un algorithme a été mis en place pour attribuer à chaque commune les données de la station météorologique la plus proche. La répartition des communes selon leur station

de rattachement est présentée dans la figure II.7, où chaque station est symbolisée par un point et les communes associées sont colorées de la même manière.

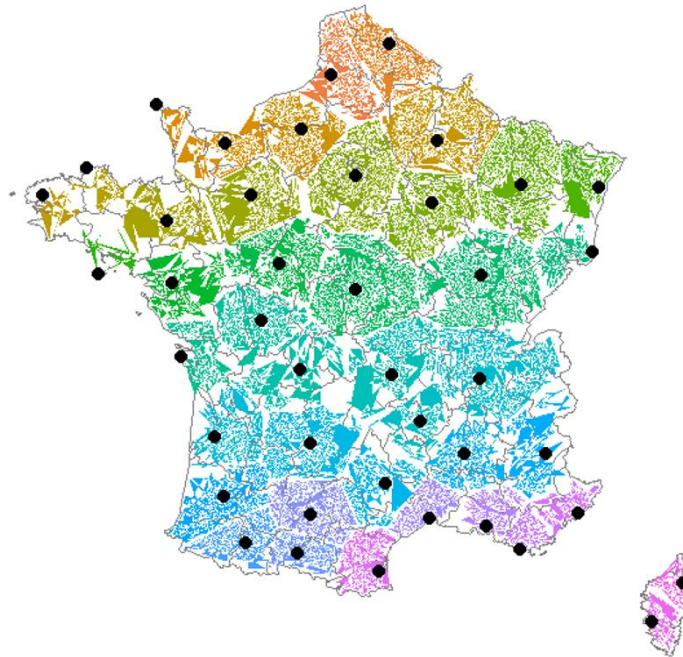


Figure II.7 : Association d'une station météorologique à chaque commune

Démarche suivie pour la jointure

Cette sous-section s'intéresse à la **construction de la base de données finale** qui est utilisée ultérieurement pour la modélisation (voir figure II.8).

La première base utilisée est la base « Météo » issue de Météo France. La méthode suivie pour la construction de cette base est détaillée dans une section précédente (voir figure II.1). Le second point de départ est la base « Sinistre » qui est obtenue à l'aide des données de sinistralité issues de la base GASPARD et les données géographiques provenant de l'INSEE et DATA GOUV.

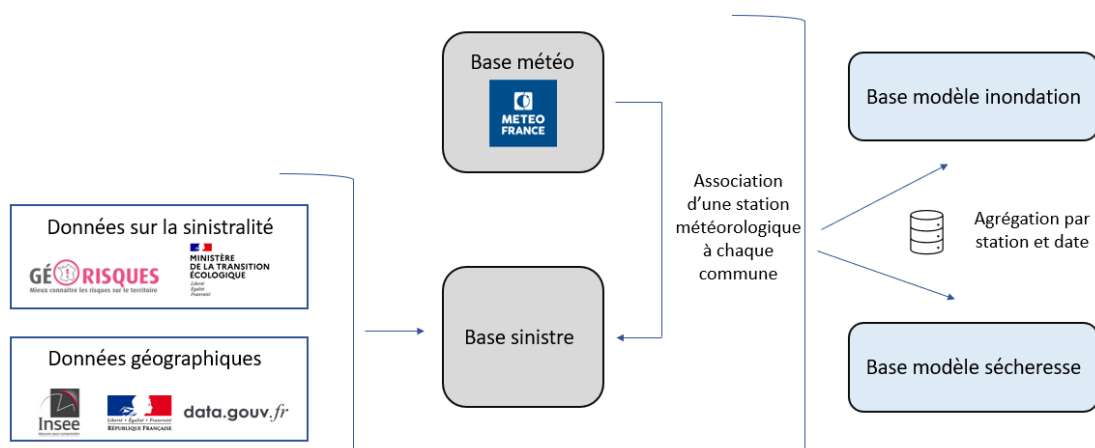


Figure II.8 : Schéma représentatif de la construction de la base finale

Ensuite, afin de lier ces deux bases, il a été décidé d'attribuer à chaque commune de la base « Sinistre » l'identifiant de la station météorologique la plus proche, afin de pouvoir in fine récupérer les données météorologiques correspondantes.

Enfin, une **jointure** a été réalisée entre les deux jeux de données en prenant comme clé le couple (station, date). Deux sous-bases distinctes ont été créées à partir de la base obtenue en appliquant un filtre en fonction du type de risque afin d'analyser de manière indépendante les caractéristiques et les impacts spécifiques de chaque péril.

1.1.2. Modélisation de la fréquence

Cette sous-section s'intéresse à la modélisation de la **fréquence d'occurrence des catastrophes naturelles** en France, à l'aide de la base de données construite.

La première partie expose les principes des modèles linéaires généralisés et la seconde aborde la construction du modèle utilisé.

1.1.2.1. Théorie des Modèles Linéaires Généralisés

Rappel sur les Modèles Linéaires Généralisés

Le **modèle linéaire généralisé** permet de modéliser la relation mathématique entre une variable réponse Y_i en fonction d'un ensemble de variables explicatives X_1, \dots, X_n .

Pour rappel, le **modèle linéaire simple** a pour équation $Y = X\beta + \varepsilon$ et pour hypothèses :

- $Y | X \sim \mathcal{N}(X\beta, \sigma)$ et $\varepsilon | X \sim \mathcal{N}(0, \sigma)$

Le GLM constitue de ce fait une **extension** du modèle linéaire simple pour les situations où la variable à expliquer Y ne suit pas une distribution normale. Il définit l'espérance de Y comme une fonction linéaire des variables explicatives :

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

Composantes du modèle

Un GLM est constitué de trois éléments :

- **Une composante aléatoire**

Elle permet d'identifier la distribution de probabilité de la variable Y à expliquer $Y \sim f_Y(y)$ telle que la loi de Y est issue d'une famille exponentielle. La densité de la variable Y a une densité de la forme :

$$f_{Y_i}(y_i, \theta_i, \phi) = \exp\left[\frac{y_i \theta_i - b(\theta_i)}{a_i(\phi)} + c(y_i, \phi)\right]$$

L'espérance et la variance peuvent s'écrire sous la forme :

$$\mathbb{E}(Y) = b'(\theta) \quad \text{Var}(Y) = a(\phi) b''(\theta^2)$$

avec θ le paramètre de position et ϕ le paramètre de dispersion.

- **Un prédicteur linéaire**

Il est donné par la combinaison linéaire des variables explicatives sous la forme :

$$n = X\beta = \beta_0 + \sum_{i=1}^n \beta_i X_i$$

- **Une fonction de lien**

La fonction de lien g établit la relation entre l'espérance de Y et les variables explicatives

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

$$\Leftrightarrow g(\mathbb{E}[Y]) = g^{-1}(X\beta) = g^{-1}(n)$$

avec g une fonction monotone, différentiable et inversible.

Le tableau II.6 donne les fonctions de lien les plus courantes.

Distribution	Nom de la fonction lien	Fonction de lien
Gamma	Inverse	$g(y) = \frac{1}{y}$
Normale	Identité	$g(y) = y$
Bernoulli	Logit	$g(y) = \ln\left(\frac{y}{1-y}\right)$
Poisson	Logarithme	$g(y) = \ln(y)$
Binomiale négative	Logit	$g(y) = \ln\left(\frac{y}{1-y}\right)$

Tableau II.6 : Exemples de fonctions de lien

Estimation des paramètres

L'estimation des paramètres du modèle se fait généralement par la **méthode du maximum de vraisemblance**, dont l'expression est :

$$L(y_i, \theta, \phi) = \exp \left\{ \sum_{i=1}^n \frac{y_i \theta_i - b(\theta_i)}{a_i(\phi)} + c(y_i, \phi) \right\}$$

$$\Leftrightarrow \ln(L) = \sum_{i=1}^n \frac{y_i \theta_i - b(\theta_i)}{a_i(\phi)} + c(y_i, \phi)$$

La maximisation de cette expression, en passant par sa dérivée, permet d'obtenir l'estimateur.

$$\frac{\partial}{\partial \beta_j} \ln(L) = \sum_{i=1}^n \frac{\partial}{\partial \beta_j} \left(\frac{y_i \theta_i - b(\theta_i)}{a_i(\phi)} + c(y_i, \phi) \right)$$

Sélection des variables

La sélection des variables est une étape importante dans la construction d'un GLM. En effet, seules les variables qui expliquent le mieux la variable Y doivent être conservées. Un trop grand nombre de variables explicatives complexifie le modèle et peut entraîner une mauvaise performance tandis qu'un nombre limité de variables explicatives peut biaiser le modèle.

En pratique, il existe des **algorithmes automatisés** pour sélectionner les variables les plus pertinentes. Ces méthodes pas à pas utilisent les critères AIC (Critère d'Information d'Akaike) et BIC (Critère d'information Bayésienne) données par les formules ci-dessous pour comparer les modèles entre eux.

$$AIC = -2L + 2k$$

$$BIC = -2L + k \log(n)$$

avec L la log-vraisemblance du modèle, k le nombre de paramètres et n le nombre d'observations.

Le modèle choisi est celui qui sélectionne les variables de manière à **minimiser** les critères AIC et BIC.

La méthode choisie dans ce mémoire est la **stepwise** qui est une combinaison des méthodes *backward* et *forward*. Cet algorithme commence par un modèle initial sans variables explicatives, puis il ajoute séquentiellement les variables les plus significatives. Après l'ajout de chaque nouvelle variable, le modèle évalue la pertinence de toutes les variables et supprime celles qui ne contribuent pas de manière significative à la performance du modèle, cherchant ainsi à minimiser le critère établi.

Régression logistique

Dans le cadre de ce mémoire, une régression logistique est réalisée. Il s'agit d'un GLM avec un **lien logit** qui est utilisé pour la modélisation de **variables binaires**. La régression logistique permet de prédire la probabilité qu'une observation prenne l'une des deux valeurs.

Le tableau II.7 donne les paramètres de cette régression.

Distribution	Fonction de lien	Expression du modèle
Bernoulli	$g(y) = \ln\left(\frac{y}{1-y}\right)$	$\mathbb{E}(Y X) = \left(1 + \exp(-(X\beta))\right)^{-1}$

Tableau II.7 : Paramètres d'une régression logistique

Métriques de performance classiques des modèles

Une fois le modèle construit, il s'agit de mesurer sa **robustesse** à l'aide d'indicateurs de performance.

RMSE

Le **RMSE** (*Root Mean Square Error*) mesure l'écart quadratique moyen entre les valeurs prédites par le modèle et les valeurs réelles.

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

avec \hat{y} les valeurs prédites, y_i les valeurs réelles et N le nombre d'observations.

MAE

Le **MAE** (*Mean Absolute Error*) est une mesure qui évalue la moyenne des écarts absolus entre les valeurs prédites par le modèle et les valeurs réelles.

$$MAE(\hat{y}) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |\hat{y}_i - y_i|$$

avec \hat{y} les valeurs prédites, y_i les valeurs réelles et N le nombre d'observations.

Matrice de confusion

Dans le cas d'une classification binaire, comme pour une régression logistique, la valeur retournée par le modèle correspond à la probabilité que l'observation prenne une des deux modalités. La **matrice de confusion** est un outil qui permet de comparer les valeurs prédites avec les valeurs réelles de la variable à expliquer.

Classe	Valeurs réelles	
	0	1
0	Vrais positifs	Faux positifs
1	Faux négatifs	Vrais négatifs

Valeurs prédites

Tableau II.8 : Matrice de confusion

- **Vrais positifs (TP)** (*True Positives*) : la prédiction et la valeur réelle sont positives
- **Faux positifs (FP)** (*False Positives*) : la prédiction est positive alors que la valeur réelle est négative
- **Vrais négatifs (TN)** (*True Negatives*) : la prédiction et la valeur réelle sont négatives
- **Faux négatifs (FN)** (*False Negatives*) : la prédiction est négative alors que la valeur réelle est positive

Sensibilité

La **sensibilité** mesure la capacité du modèle à identifier les observations positives parmi toutes les observations réellement positives.

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

Spécificité

La **spécificité** mesure la capacité du modèle de régression logistique à identifier les observations négatives parmi toutes les observations réellement négatives.

$$Specificity = \frac{TN}{TN + TP}$$

AUC

L'**AUC (Area Under the Curve)** permet d'évaluer la performance du modèle sans spécifier de seuil. Cette notion découle de la **courbe ROC (Receiver Operating Characteristic)** qui représente le taux de vrais positifs en fonction du taux de faux positifs pour différents seuils de classification. Elle permet donc de représenter le taux de fausses prédictions par rapport au taux de réussite.

Lorsque le seuil de classification diminue, le modèle attribue une classification positive à un plus grand nombre d'éléments, ce qui entraîne une augmentation à la fois des faux positifs) et des vrais positifs.

L'AUC représente l'aire sous la courbe ROC. Sa valeur est comprise entre 0 et 1. Plus l'AUC se rapproche de 1, meilleure est la prédiction.

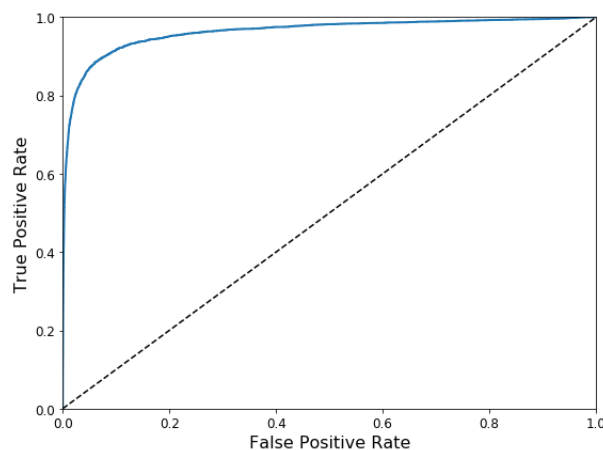


Figure II.9 : Courbe ROC

Nouvelles métriques de performance des modèles

Le présent mémoire étudie des événements de catastrophes naturelles qui sont par définition **rare**s et **peu fréquents** et cherche à prédire la probabilité d'occurrence de ces phénomènes.

Par conséquent, les métriques de performance classiques ne sont **pas adaptées** à ce problème. Par exemple, la courbe ROC n'accorde pas de poids particulier à une classe par rapport à l'autre. Elle permet d'évaluer de **manière équilibrée** la performance globale du modèle, indépendamment de la distribution des classes dans l'ensemble de données. De **nouvelles métriques** de robustesses sont alors introduites.

Precision

La **précision** mesure la capacité du modèle à classer correctement les différentes observations dans leur classe respective.

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

Recall curve

La **recall curve** permet d'analyser comment le modèle se comporte en termes de sensibilité à différentes valeurs de seuil de décision.

Une valeur de sensibilité **élevée** indique que le modèle est capable de **bien détecter** les exemples de la **classe minoritaire**, tandis qu'une valeur de sensibilité faible indique que le modèle a tendance à manquer de nombreux exemples positifs de la classe minoritaire.

La courbe permet également de choisir un **seuil** qui offre un bon compromis entre ces deux aspects en fonction des besoins spécifiques du problème.

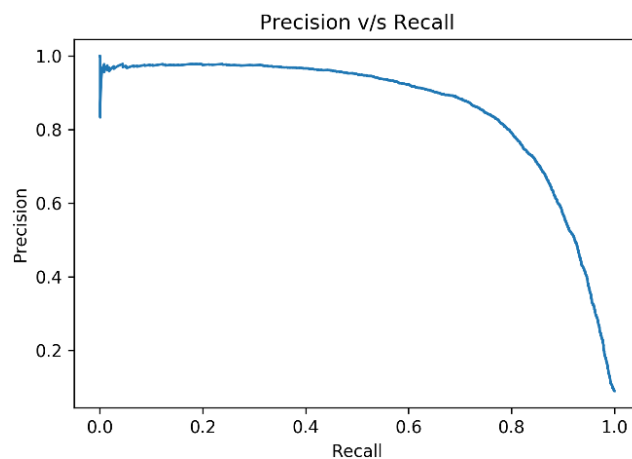


Figure II.10 : Recall curve

F1-Score

Le **F1-score** est une métrique qui combine la précision et la sensibilité, fournissant ainsi un **résumé global** de la performance d'un modèle de régression logistique.

Il est défini comme la moyenne harmonique de deux métriques, exprimée par l'équation suivante :

$$F1 - Score = \frac{TP}{TP + \frac{1}{2}(FN + FP)}$$

1.1.2.2. Construction du modèle

Cette sous-section s'intéresse à la construction du modèle GLM dans le but de prédire la fréquence d'occurrence future des catastrophes naturelles en France et de mesurer une dérive de sinistralité.

Les bases de données « **modèle inondation** » et « **modèle sécheresse** » sont utilisées pour réaliser deux **régressions logistiques** de manière à analyser chaque péril indépendamment de l'autre.

Inondation

Cette partie traite de la construction du modèle **inondation**.

Présentation de la base initiale

La base de modélisation comporte 164 468 lignes et est composée de 10 variables. Le tableau ci-dessous répertorie l'ensemble des informations de la base :

Variable	Modalité
ID de la station météorologique (<i>ID</i>)	7005 ... 80 642
Date (<i>dat_deb</i>)	01/01/2016 ... 31/12/2022
Température mesurée (<i>temperature</i>)	Variable numérique
Humidité mesurée (<i>humidite</i>)	Variable numérique
Pression mesurée (<i>pres_station</i>)	Variable numérique
Précipitations dans les dernières 24h (<i>pluie_24h</i>)	Variable numérique
Occurrence d'une catastrophe naturelle faisant l'objet d'un arrêté (<i>sin</i>)	0 1
Mois de la mesure (<i>mois</i>)	1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12
Année de la mesure (<i>annee</i>)	2016 2017 2018 2019 2021 2022

Tableau II.9 : Informations de la base initiale utilisée pour la modélisation

La **variable d'intérêt** pour la suite de l'étude est la variable « *sin* » qui indique la survenance d'un évènement climatique à une date donnée.

Valeurs aberrantes

Il est essentiel de veiller à ce qu'il n'y ait pas d'observations avec des **valeurs aberrantes** afin de ne pas biaiser le modèle et ne pas impacter sa précision et sa robustesse.

Des analyses de cohérence ont été effectuées sur les variables afin de détecter la présence d'*outliers*. Le tableau II.10 synthétise la distribution de la variable « Température ».

Minimum	1 ^{er} quartile	Médiane	Moyenne	3 ^e quartile	Maximum
-30,93 °C	9,36°C	15,80°C	15,66°C	23,52°C	45,53°C

Tableau II.10 : Distribution de la variable "Température" avant traitement

Les valeurs du minimum et maximum apparaissent comme **extrêmes** et ne représentent pas de manière réaliste le climat sur le territoire Français. Ceci s'explique par la présence de stations météorologiques dans la base situées dans les territoires d'Outre-Mer et sur la côte Est de la Terre-Adélie, en Antarctique. Pour la suite de l'étude, les lignes correspondant à ces stations sont retirées afin de ne pas biaiser les résultats. La distribution de la variable « Température » après traitement est disponible dans le tableau II.11.

Minimum	1 ^{er} quartile	Médiane	Moyenne	3 ^e quartile	Maximum
-10,59 °C	8,84°C	13,61°C	13,76°C	18,66°C	34,37°C

Tableau II.11 : Distribution de la variable "Température" avant traitement

Les nouvelles valeurs sont plus réalistes et représentent mieux le climat en France. La même démarche est effectuée pour les autres variables météorologiques.

Valeurs manquantes

La qualité des données consiste également à vérifier qu'il n'y ait pas de **variables manquantes** dans la base utilisée pour la modélisation. Le tableau II.12 synthétise les pourcentages de valeurs manquantes par variable.

Variable	Pourcentage de valeurs manquantes
ID de la station météorologique (<i>ID</i>)	0%
Date (<i>dat_deb</i>)	0%
Température mesurée (<i>temperature</i>)	1%
Humidité mesurée (<i>humidite</i>)	1%
Pression mesurée (<i>pres_station</i>)	0,9%
Précipitations dans les dernières 24h (<i>pluie_24h</i>)	1,8%
Occurrence d'une catastrophe naturelle faisant l'objet d'un arrêté (<i>sin</i>)	0%
Mois de la mesure (<i>mois</i>)	0%
Année de la mesure (<i>annee</i>)	0%

Tableau II.12 : Pourcentage de valeurs manquantes par variable

De manière générale, la base de données présente de très faibles pourcentages de valeurs manquantes pour les données météorologiques. Il a été décidé de remplacer ces valeurs, selon les règles d'imputation par **la moyenne**.

Variables d'intérêt

La figure II.11 montre que dans la base de données, seulement **11,4%** des dates correspondent à la survenance d'une catastrophe naturelle faisant l'objet d'un arrêté. Néanmoins, ce **déséquilibre** ne pose pas de problème puisque le modèle a pour objectif de prédire une fréquence d'occurrence d'évènements rares. L'utilisation du *bagging* pour

améliorer la précision et la stabilité des modèles prédictifs ne serait pas pertinente et conforme à la réalité des évènements de catastrophes naturelles.

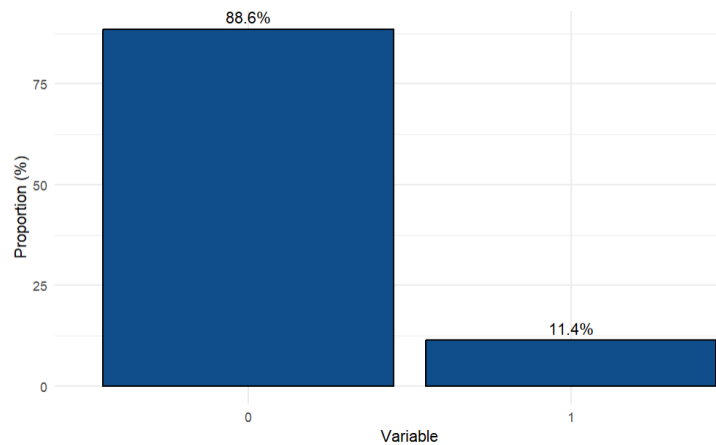


Figure II.11 : Répartition de la variable d'intérêt

Corrélations entre les variables

Lors de la construction d'un modèle, il est essentiel de vérifier la **corrélation** entre les variables. En effet, cette étape permet de sélectionner les données les plus pertinentes et d'éviter les phénomènes de multi colinéarité qui peut se produire lorsque deux ou plusieurs variables dans un modèle sont fortement corrélées entre elles.

Il existe plusieurs coefficients permettant de détecter les corrélations entre les variables. Parmi eux, le **test de Pearson** pour les variables continues ou le **test du χ^2** ou **V de Cramer** pour les variables nominales.

Dans le cadre de cette étude, le test de Pearson semble plus adapté puisque la majorité des variables explicatives sont numériques. Il est donné par la formule suivante :

$$r = \frac{cov(X, Y)}{\sigma_X \sigma_Y}$$

avec $cov(X, Y)$ la covariance entre les variables X et Y, σ_X et σ_Y leur variance respective.

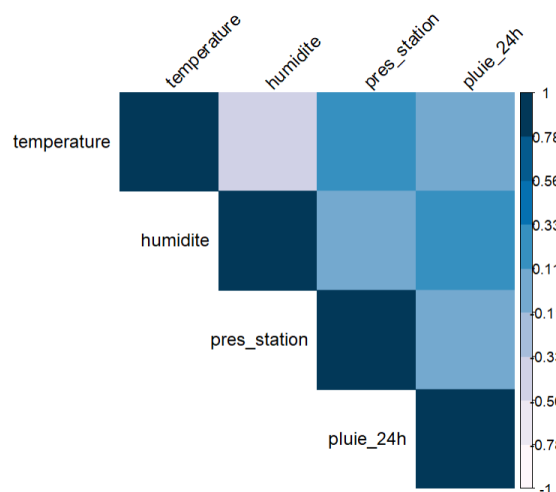


Figure II.12 : Test de Pearson pour les variables numériques

La figure II.12 montre qu'il n'existe pas de variables fortement corrélées entre elles. Ainsi, pour la suite du mémoire, il a été décidé de conserver l'ensemble des variables numériques.

Présentation de la base finale

L'objectif de la construction du GLM est in fine de prédire l'occurrence de la sinistralité future des sinistres climatiques à horizon 2027. La prévision se base donc sur des dates ultérieures à celle de l'apprentissage.

Pour cette raison, il a été décidé de supprimer les variables « dat_deb » et « annee ». La base finale comporte 117 946 lignes et est composée de 7 variables. Les résultats obtenus à l'aide de la méthode **stepwise** sont similaires et suggère de conserver les variables ci-dessous :

- ID de la station météorologique
- Température mesurée (en °C)
- Humidité mesurée (en %)
- Pression mesurée (en hPa)
- Précipitations dans les dernières 24h (en mL)
- Occurrence d'une catastrophe naturelle faisant l'objet d'un arrêté
- Mois de la mesure

Mesures de performance du modèle

Avant de valider le modèle, il est nécessaire de tester **sa robustesse**. Pour cela, une base *train* représentant 80% des données et une base *test* contenant les 20% restants ont été créés.

	Base <i>train</i>	Base <i>test</i>
RMSE	38,74%	35,32%
MAE	20,16%	18,13%

Tableau II.13 : Métriques d'erreur du modèle construit

Il existe une faible variation des métriques entre la base *train* et *test*. Ces résultats montrent qu'il n'y a **pas de surapprentissage**. En d'autres termes, le modèle n'est pas excessivement ajusté aux données d'entraînement et est capable de maintenir sa performance lorsqu'il est confronté à de nouvelles observations.

La figure II.13 indique que l'**AUC** du modèle est de **0,94**. Ce résultat confirme la robustesse du modèle. Celui-ci arrive à bien à distinguer les classes positives des classes négatives, ce qui lui confère une bonne capacité prédictive.

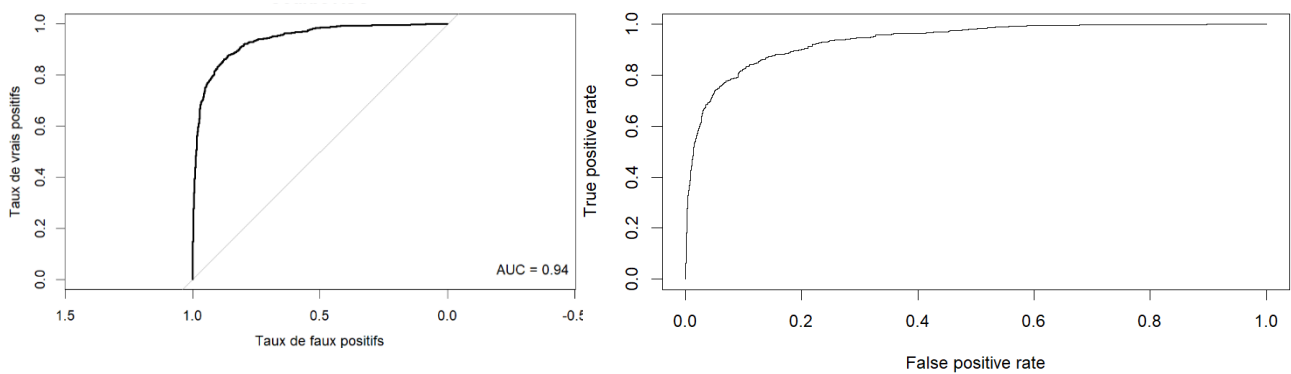


Figure II.13 : Courbe ROC et *recall curve* du modèle construit

Le tableau II.14 représente la matrice de confusion du modèle. Les résultats sont satisfaisants. En effet, on obtient une *accuracy* de **92%** et un *F1-Score* de **95%**.

Sur 20 911 lignes où il n’y a pas eu de catastrophe naturelle faisant l’objet d’un arrêté, le modèle en a correctement prédit 20 441 soit dans plus de **95%**. Pour les lignes où il y a eu la survenance d’un sinistre, le modèle a eu près de **72%** de bonnes réponses.

	0	1
0	TP : 16 997	FP : 736
1	FN : 846	TN : 1907

Tableau II.14 : Matrice de confusion du modèle construit

Backtesting du modèle

Les mesures de performance du modèle sont satisfaisantes et montre que celui-ci est robuste. Néanmoins, il est intéressant de regarder si les **erreurs** du modèle sont **localisées**, c’est-à-dire que pour une variable donnée, celles-ci sont plus ou moins fréquentes pour une même modalité.

On s’intéresse d’abord à la variable explicative « mois » qui présente douze modalités. Il a été décidé de se fixer un **seuil d’erreur de 15%**. Au-dessus de ce pallier, on considère que l’erreur est « localisée ». Les résultats montrent que seul le **mois de juin** dépasse ce seuil et présente des erreurs fréquentes.

On étudie ensuite la variable « ID » qui comporte 42 modalités. En prenant le même seuil de référence, seulement **5%** des stations sont signalées. Toutefois, celles-ci ne se situent pas dans les mêmes régions et zones géographiques.

Ainsi, la majorité des erreurs ne sont pas « localisées ». Il a alors été décidé de conserver toutes les modalités de la base de données utilisée pour la modélisation.

Sécheresse

La même approche est adoptée pour la construction du modèle « Sécheresse ». Pour plus de visibilité sur les résultats, le lecteur est invité à consulter l'annexe A.

1.1.3. Prédiction de la fréquence dans un contexte de réchauffement climatique

Cette sous-partie traite de la prédiction de la **fréquence de survenance des catastrophes naturelles** en France à l'aide du GLM construit, dans un contexte de réchauffement climatique.

La première partie expose les principes des séries temporelles et la seconde aborde la dégradation des variables météorologiques. Celles-ci sont ensuite utilisées pour la prédiction afin d'évaluer une dérive de sinistralité future.

1.1.3.1. Théorie des séries temporelles

Cette sous-section a pour objectif d'introduire les séries temporelles et le modèle utilisé ultérieurement pour obtenir les évolutions futures des variables météorologiques.

Rappels sur les séries temporelles

Une **série temporelle** est une suite d'observations (X_t) d'un phénomène faites au cours du temps $t \in T$ avec $T \subset \mathbb{Z}$, un ensemble temporel discret pouvant être par exemple l'ensemble des jours au cours desquelles les observations sont collectées.

En considérant un espace de probabilité $(\Omega, \mathcal{F}, \mathbb{P})$, une série temporelle peut être considérée comme la réalisation de la variable aléatoire $X = \{X_t\}_{t \in T}$ tel que :

$$X_t : \Omega \rightarrow \mathbb{R}$$
$$(t, \omega) \mapsto X_t(\omega) = x_t$$

La série temporelle est alors un morceau de la trajectoire d'un processus stochastique discret $X = (X_t)_{t \in T}$.

Composantes d'une série temporelle

Une série temporelle est composée de trois éléments :

- **Une tendance T_t**

Elle représente la trajectoire de la série à long terme. Elle peut être linéaire, non linéaire, positive ou négative.

- **Une composante saisonnière S_t**

Elle représente les fluctuations de la série temporelle se produisant à des périodes spécifiques de l'année, tels que les saisons, les mois, les jours de la semaine et peut être influencée par plusieurs facteurs spécifiques.

- **Une composante résiduelle R_t**

Également connu sous le nom de résidu ou bruit, la composante résiduelle d'une série temporelle représente la partie de la série qui n'est pas expliquée par la tendance ou la composante saisonnière.

La tendance et la saisonnalité constituent la composante **déterministe** de la série tandis que le « bruit » est la composante **non déterministe** du processus.

Une série temporelle peut être définie sous la forme de deux types de structures. Elle peut être définie de façon **additive**, avec :

$$X_t = S_t + T_t + R_t$$

Elle peut également être sous la forme d'un modèle **multiplicatif** avec :

$$X_t = S_t * T_t * R_t$$

avec S_t la composante saisonnière, T_t la tendance et R_t la composante résiduelle.

Stationnarité d'une série temporelle

Une série temporelle est dite **stationnaire** si ses propriétés restent constantes indépendamment du temps t où elle est observée. De ce fait, lorsqu'une série temporelle présente des tendances ou des saisonnalités, elle n'est pas considérée comme étant stationnaire puisque ces dernières affecteront ses valeurs. Cette propriété est importante puisqu'elle garantit des prédictions plus fiables.

Bruit blanc

Le **bruit** représente la composante non déterministe d'une série temporelle. C'est un cas particulier d'un processus stationnaire. Il s'agit d'un bruit blanc **faible** si ses variables $(\varepsilon_t)_{t \in \mathbb{N}}$ sont centrées, non corrélées et de variances constantes finies.

- $\mathbb{E}(\varepsilon_t) = 0$
- $Var(\varepsilon_t) = \sigma^2$
- $Cov(\varepsilon_t, \varepsilon_s) = 0$ si $t \neq s$

Un bruit blanc est dit **fort** si ses variables sont centrées, indépendantes et identiquement distribuées.

- $\mathbb{E}(\varepsilon_t) = 0$
- $Var(\varepsilon_t) = \sigma^2$

Niveaux de stationnarité

La **stationnarité stricte** implique que toutes les lois des X_t soient identiques.

$$X_t \in \mathbb{R}^d, k \geq 1$$

$$(X_{t_1}, \dots, X_{t_n}) \sim (X_{t_1+k}, \dots, X_{t_n+k}) \quad \forall n$$

La **stationnarité faible** (dite du second ordre) est moins contraignante. Elle vérifie les hypothèses ci-dessous :

- $t \mapsto \mu_X(t)$ est indépendante de t
- $t \mapsto \gamma_X(t, t+k)$ est indépendante de $t \forall k$

avec μ_X et γ_X la fonction de la moyenne et la fonction d'autocorrélation, définies ci-dessous.

Fonctions de la moyenne et d'autocorrélation

Soit (X_t) un processus tel que $\mathbb{E}(X_t^2) < \infty$. La **fonction de la moyenne** est définie comme suit :

$$\mu_X = \mathbb{E}(X_t) \forall t \in \mathbb{Z}$$

La **fonction d'autocorrélation** est définie par :

$$\rho(t) = \frac{\gamma(t)}{\gamma(0)}$$

où γ représente la fonction d'autocovariance d'un processus avec

$$\gamma(h) = \text{Cov}(X_t, X_{t+k})$$

Enfin, la notion d'**autocorrélation partielle**, utilisée lors de l'identification des paramètres du modèle, est introduite. Elle est définie comme suit :

$$\tau_X(t) = \text{Cor}_{X_2, \dots, X_t}(X_1, X_{t+1})$$

Transformation en une série stationnaire

La **différenciation** est souvent utilisée pour rendre une série temporelle stationnaire, c'est-à-dire pour éliminer les tendances et les structures temporelles systématiques.

L'**opérateur retard** (ou *Backshift*), noté B est introduit afin de faciliter la lecture. Il est défini tel que :

$$B(X_t) = X_{t-1} \forall t > 1$$

$$B(B(X_t)) = B^2(X_t) = X_{t-2}$$

De ce fait, pour une différenciation du 1^{er} ordre on a :

$$X_t^{(1)} = X_t - X_{t-1} \forall t \in \llbracket 2, T \rrbracket$$

$$X_t^{(1)} = (1 - B)X_t \in \llbracket 2, T \rrbracket$$

Dans certains cas, la différenciation du 1^{er} ordre n'est pas suffisante pour rendre stationnaire la série temporelle. Une différenciation du 2nd ordre est alors effectuée :

$$X_t^{(2)} = X_t^{(1)} - X_{t-1}^{(1)} \forall t \in \llbracket 3, T \rrbracket$$

$$X_t^{(2)} = (1 - B)X_t - (1 - B)X_{t-1} \forall t \in \llbracket 3, T \rrbracket$$

$$X_t^{(2)} = (1 - B) X_t - (1 - B) L X_t \quad \forall t \in \llbracket 3, T \rrbracket$$

$$X_t^{(2)} = (1 - B) X_t - (1 - B)^2 X_t \quad \forall t \in \llbracket 3, T \rrbracket$$

$$X_t^{(2)} = X_t - 2X_{t-1} + X_{t-2} \quad \forall t \in \llbracket 3, T \rrbracket$$

Ainsi, une différenciation d'ordre k s'écrit :

$$X_t^{(k)} = (1 - B)^k X_t \quad \forall t \in \llbracket k + 1, T \rrbracket$$

Enfin, la notion de **polynôme retard**, noté $\phi(B)$ est introduite :

$$\phi_k(B) = 1 - \phi_1(B) - \dots - \phi_k B^k$$

Elle est utilisée pour simplifier l'équation d'une série temporelle, qui peut s'écrire sous la forme :

$$\phi_k(B) X_t = 1 - \phi_1 X_{t-1} - \dots - \phi_k X_{t-k}$$

Tests de stationnarité

Plusieurs tests permettent de vérifier la stationnarité d'une série temporelle. Deux de ces tests sont abordés dans ce mémoire.

Le 1^{er} est le **test KPSS** (Kwiatkowski-Philips-Schmidt-Shin). Ce test détermine la stationnarité autour d'une tendance ou la non-stationnarité en raison de la présence d'une racine unitaire.

Soit X_t une série temporelle telle que :

$$X_t = r_t + \varepsilon_t$$

$$r_t = r_{t-1} + u_t$$

avec $u_t \sim \mathcal{N}(0, \sigma_u^2)$, $\varepsilon_t \sim \mathcal{N}(0, \varepsilon_t^2)$ et indépendantes et identiquement distribuées.

Les hypothèses du test sont les suivantes :

$$\begin{cases} H_0 : \sigma_u^2 = 0 \\ H_1 : \sigma_u^2 \neq 0 \end{cases}$$

La série est dite stationnaire si le test donne une **p-value inférieure à 0,05**.

Néanmoins, ce test a tendance à rejeter facilement l'hypothèse nulle. Afin d'y remédier, il est judicieux de réaliser un autre test de stationnarité, le **test ADF** (*Augmented Dickey Fuller*), pour valider la stationnarité de la série temporelle.

Ce test découle du test DF (*Dickey Fuller*) qui vérifie la présence de racines unitaires d'un polynôme autorégressif (AR 2.3.2). Autrement dit, il vérifie si un certain type de motif se répète dans les données. L'ADF étend la formulation du DF en incluant d'autres ordres du processus de régression.

Soit X_t une série temporelle admettant pour équation :

$$X_t = \alpha + \rho X_{t-1} + \sum_{i=1}^k \beta_i \Delta X_{t-i} + \varepsilon_t$$

Les hypothèses du test sont les suivantes :

$$\begin{cases} H_0 : |\rho| = 1 \\ H_1 : |\rho| < 1 \end{cases}$$

De la même manière, la série est dite stationnaire si le test donne une **p-value supérieure à 0,05**.

Les différents types de modèles d'une série temporelle

Il existe différents types de processus pour modéliser une série temporelle.

Processus auto régressifs : AR

Un processus est dit **autorégressif** lorsque la valeur actuelle de la série temporelle est linéairement dépendante des valeurs précédentes de la série. Un processus *AR* d'ordre p , noté *AR*(p) admet pour équation :

$$X_t = \sum_{i=1}^p \phi_i X_{t-i} + \varepsilon_t \quad \forall t \geq 0$$

Processus moyennes mobiles : MA

Un processus en **moyenne mobile** est un modèle où la valeur actuelle de la série temporelle est linéairement dépendante des termes d'erreur ou des chocs aléatoires précédents. Un processus *MA* d'ordre q , noté *MA*(q) admet pour équation :

$$X_t = \sum_{i=1}^q \theta_i \varepsilon_{t-i} + \varepsilon_t \quad \forall t \geq 0$$

Modèle ARIMA

Un modèle **ARIMA** (*Auto Regressive Integrated Moving Average*) est constitué d'un modèle **AR** et d'un modèle **MA**. Il est souvent utilisé pour l'analyse et la prévision des séries temporelles car il est adapté pour faire des prévisions à court terme en utilisant les valeurs passées et les tendances identifiées.

ARIMA sans saisonnalité

Le modèle **ARIMA non saisonnier**, noté *ARIMA*(p, d, q) est utilisé pour la modélisation de séries temporelles ne présentant pas de motifs saisonniers avec :

- p : ordre de l'auto-régression
- d : ordre de la différenciation
- q : ordre de la moyenne mobile

Il s'écrit sous la forme :

$$X_t^{(d)} = c + \phi_1 X_{t-1}^{(d)} + \dots + \phi_p X_{t-p}^{(d)} + \theta_1 \varepsilon_{t-1} + \dots + \theta_q \varepsilon_{t-q} + \varepsilon_t$$

$$(1 - B)^d X_t = c + \sum_{i=1}^p (\phi_i (1 - B)^d X_{t-i}) + \sum_{j=1}^q (\theta_j \varepsilon_{t-j}) + \varepsilon_t$$

$$(1 - B)^d X_t = c + \sum_{i=1}^p (\phi_i (1 - B)^d B^i X_t) + \sum_{j=1}^q (\theta_j B^j \varepsilon_t) + \varepsilon_t$$

avec :

- $c, \phi_1, \dots, \phi_p, \theta_1, \dots, \theta_q \in \mathbb{R}$
- $\varepsilon_t, \dots, \varepsilon_{t-q}$ sont des bruits blancs indépendants et identiquement distribués

Le modèle peut également s'écrire sous sa forme factorisée en faisant apparaître les différents processus qui le composent :

- $AR(p) \rightarrow (1 - (\sum_{i=1}^p \phi_i B^i))$
- Différenciation d'ordre $d \rightarrow (1 - B)^d X_t$
- $MA(q) \rightarrow c + (1 + \sum_{i=1}^q \theta_i B^i) \varepsilon_t$

ARIMA avec saisonnalité

Le modèle ARIMA **saisonnier**, noté $ARIMA(p, d, q)(P, D, Q)_s$, est utilisé pour la modélisation de séries temporelles présentant des motifs saisonniers explicites. La prise en compte de la saisonnalité est effectuée en rajoutant les termes suivants dans le modèle :

- P : ordre saisonnier de l'auto régression
- D : ordre saisonnier de différenciation
- Q : ordre saisonnier de la moyenne mobile
- s : période saisonnière

Le modèle s'écrit sous la forme :

$$(1 - (\sum_{i=1}^p \phi_i B^i))(1 - (\sum_{i=1}^P \Phi_i B^{si}))(1 - B)^d (1 - B^s)^D X_t$$

$$= c + (1 + \sum_{i=1}^q \theta_i B^i)(1 + \sum_{i=1}^Q \Theta_i B^{si}) \varepsilon_t$$

avec :

- $c, \phi_1, \dots, \phi_p, \theta_1, \dots, \theta_q, \Phi_1, \dots, \Phi_p, \Theta_1, \dots, \Theta_q \in \mathbb{R}$
- $\varepsilon_t, \dots, \varepsilon_{t-q}$ sont des bruits blancs indépendants et identiquement distribués

1.1.3.2. Dégradation des conditions météorologiques

Après avoir rappelé le principe des séries temporelles, on s'intéresse maintenant à la création de **l'input de prédiction du GLM**. En effet, pour rappel, l'objectif est de modéliser la probabilité de survenance future des catastrophes naturelles. Pour cela, il faut d'abord déterminer **l'évolution** de nos variables météorologiques dans le futur, en utilisant les **séries temporelles**.

Clustering des stations météorologiques

Comme expliqué dans la partie 1.1.1.5, chaque commune de la base de données utilisée pour la création du GLM est rattachée à la station météorologique la plus proche parmi les 42 existantes.

De ce fait, il a été décidé de réaliser un **clustering géographique** des stations météorologiques afin de désigner pour chaque cluster la **station de référence** sur laquelle est réalisée la modélisation à l'aide des séries temporelles. Les évolutions des variables météorologiques dans le futur pour chaque station de référence sont ensuite appliquées à chaque station appartenant au cluster.

Principe de la CAH (Classification Ascendante Hiérarchique)

La **CAH** (Classification Ascendante Hiérarchique) est un algorithme non supervisé en *Machine Learning*, très utilisé pour effectuer du **clustering**. Il vise à regrouper des individus ou des variables, ici les **stations météorologiques**.

L'algorithme vise à diviser un ensemble de points donnés en k groupes, également appelés clusters, de façon à ce que les points au sein de chaque cluster soient similaires entre eux et que les clusters soient compacts, c'est-à-dire qu'ils occupent une région bien délimitée dans l'espace des données similaires en fonction de leurs caractéristiques.

Dans le cadre de ce mémoire, la **distance euclidienne** est utilisée comme mesure de similarité pour le calcul entre chaque paire de stations. Chaque station est considérée comme un cluster distinct au départ. Puis en fonction des distances euclidiennes, les k groupes sont formés progressivement.

Enfin, une fois que les clusters sont créés, la station la plus au centre du groupe est désignée comme **station de référence**.

Application sur les stations météorologiques

Afin d'obtenir des groupes homogènes sur tout le territoire français, il a été décidé de créer **cinq clusters**. Cette approche nous permet de regrouper des zones géographiques où les variables météorologiques présentent des similarités, afin de ne pas biaiser l'étude.

La répartition des stations selon leur cluster de rattachement est présentée dans la figure II.14, où les stations appartenant à un cluster donné sont colorées de la même manière. Les stations de référence de chaque cluster sont symbolisées par un point noir.

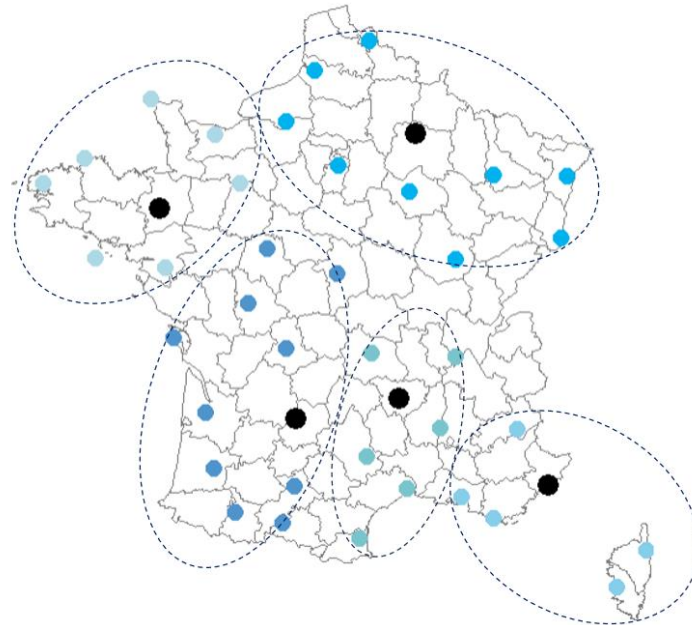


Figure II.14 : Clustering des stations météorologiques

Le tableau II.15 synthétise les informations concernant les stations de référence sur lesquelles est réalisée la modélisation à l'aide des séries temporelles.

Numéro de cluster	ID de la station de référence	Nom de la station de référence
1	7072	Reims
2	7130	Rennes
3	7535	Gourdon
4	7471	Loudes
5	7690	Nice

Tableau II.15 : Stations de référence après clustering

Modélisation d'une série ARIMA saisonnière

Afin de déterminer **l'évolution future** des variables météorologiques, il est d'abord nécessaire de les modéliser à l'aide des séries temporelles. Les **variables concernées** sont les suivantes :

- Température (en °C)
- Humidité (en %)
- Pression (en hPa)
- Volume de précipitations dans les dernières 24h (en mL)

Dans le cadre du présent mémoire, seule l'approche utilisée pour la variable « Température » est détaillée. La même méthode a été adoptée pour la modélisation des autres variables météorologiques. Pour plus de visibilité sur les résultats, le lecteur est invité à consulter l'annexe B.

Il a été décidé de **mensualiser** les mesures de température pour la modélisation. En effet, ce choix permet de **réduire le bruit** et de mieux capturer les **variations saisonnières**. De plus, cela peut aider à éviter l'*overfitting* ou **surajustement** des modèles. Enfin, comme on se place dans un cadre de dérive climatique, il est plus intéressant de travailler sur des données mensuelles afin d'étudier les tendances climatiques à long terme.

Observations des données

Tout d'abord, il est toujours judicieux d'observer les données avant d'entamer la modélisation.

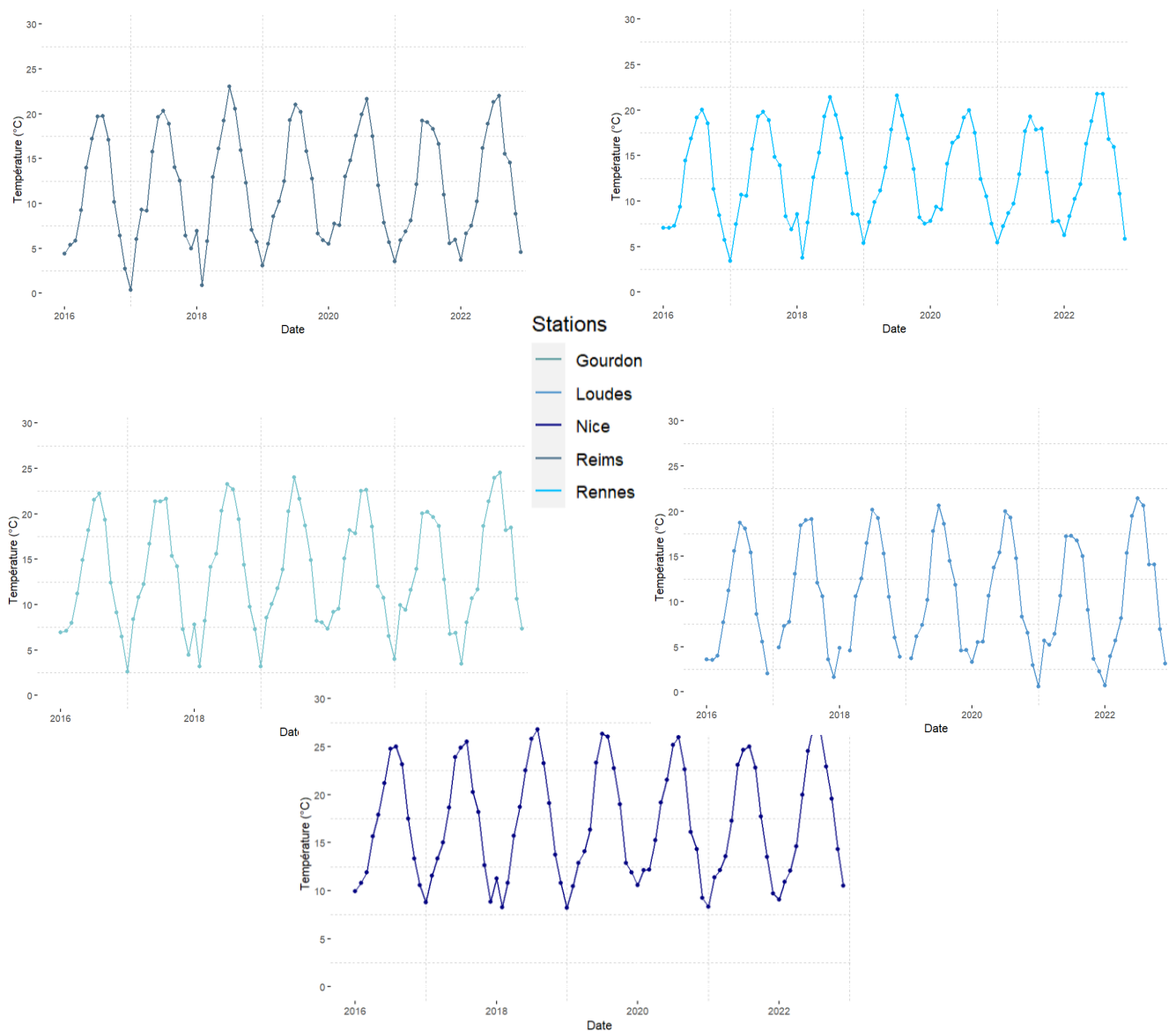


Figure II.15 : Observations des séries temporelles

La figure II.15 montre dans l'ensemble une **légère hausse** de la température entre 2016 et 2022. On observe néanmoins une baisse de la température entre 2020 et 2021. En effet, selon une étude de Météo France, l'année 2021 a été très **contrastée**. D'une part, des records de froid ont été enregistrés au mois de janvier et février. Le printemps a été particulièrement frais avec des fortes gelées et des températures en dessous des moyennes de saison. De l'autre, le pays a également connu des vagues de chaleur, notamment à la mi-juin, pendant la première quinzaine de septembre et à la fin décembre avec des températures très douces.

Une hausse de la température est constatée entre 2021 et 2022. Dans son bilan climatique, Météo France qualifie 2022 comme l'année **la plus chaude** jamais enregistrée en France. Des records de températures ont été atteints tout au long de l'année. Les spécialistes recensent 33 jours de canicule. De ce fait, l'automne 2022 est le plus chaud depuis 1900 et l'été 2022 le deuxième plus chaud qu'a connu la France. Ces conditions météorologiques exceptionnelles, conséquence directe du réchauffement climatique, ont entraîné des **impacts négatifs** comme des épisodes de sécheresses de huit mois, un déficit pluviométrique de 15 à 25% et des feux de forêts. Selon les trajectoires du GIEC, en 2050, l'année record 2022 sera en réalité une année normale.

Par ailleurs, la figure II.15 traduit une **saisonnalité** plutôt homogène pour les cinq stations enregistrées avec des températures augmentant pendant la première moitié de l'année et diminuant progressivement jusqu'au mois de décembre. La station de Nice, bénéficiant d'un climat doux méditerranéen, présente des températures plus élevées. En raison de son emplacement dans les montagnes, Loudes bénéficie d'un climat de type montagnard et présente des températures plus basses.

Ainsi, pouvons conclure qu'il existe une forte possibilité de présence d'une **tendance** et d'une **saisonnalité** dans la série temporelle, ce qui indiquerait sa **non-stationnarité**. Pour une visualisation plus détaillée des variations de la série temporelle, le lecteur est encouragé à se référer à l'annexe B.1.

Test de saisonnalité

La **fonction d'autocorrélation** (ACF) est une représentation graphique qui permet de déterminer la présence ou l'absence d'une composante saisonnière dans une série temporelle.

Lorsque la série temporelle présente une **composante saisonnière**, cela signifie que les valeurs observées à des périodes similaires à travers les différentes saisons sont fortement corrélées. Cela se traduit par des pics réguliers dans le graphique d'ACF à des décalages correspondant aux multiples des périodes saisonnières. Un graphique d'ACF qui ressemble à des **ondes sinusoïdales** indique une **forte corrélation** entre les valeurs à différents décalages temporels, ce qui suggère l'existence d'une saisonnalité dans les données.

La figure II.16 montre que la fonction d'autocorrélation a la même allure pour les cinq stations. Les coefficients de l'ACF ont une tendance sinusoïdale. L'alternance de décalages positifs et négatifs confirme la présence d'une **saisonnalité** dans les données.

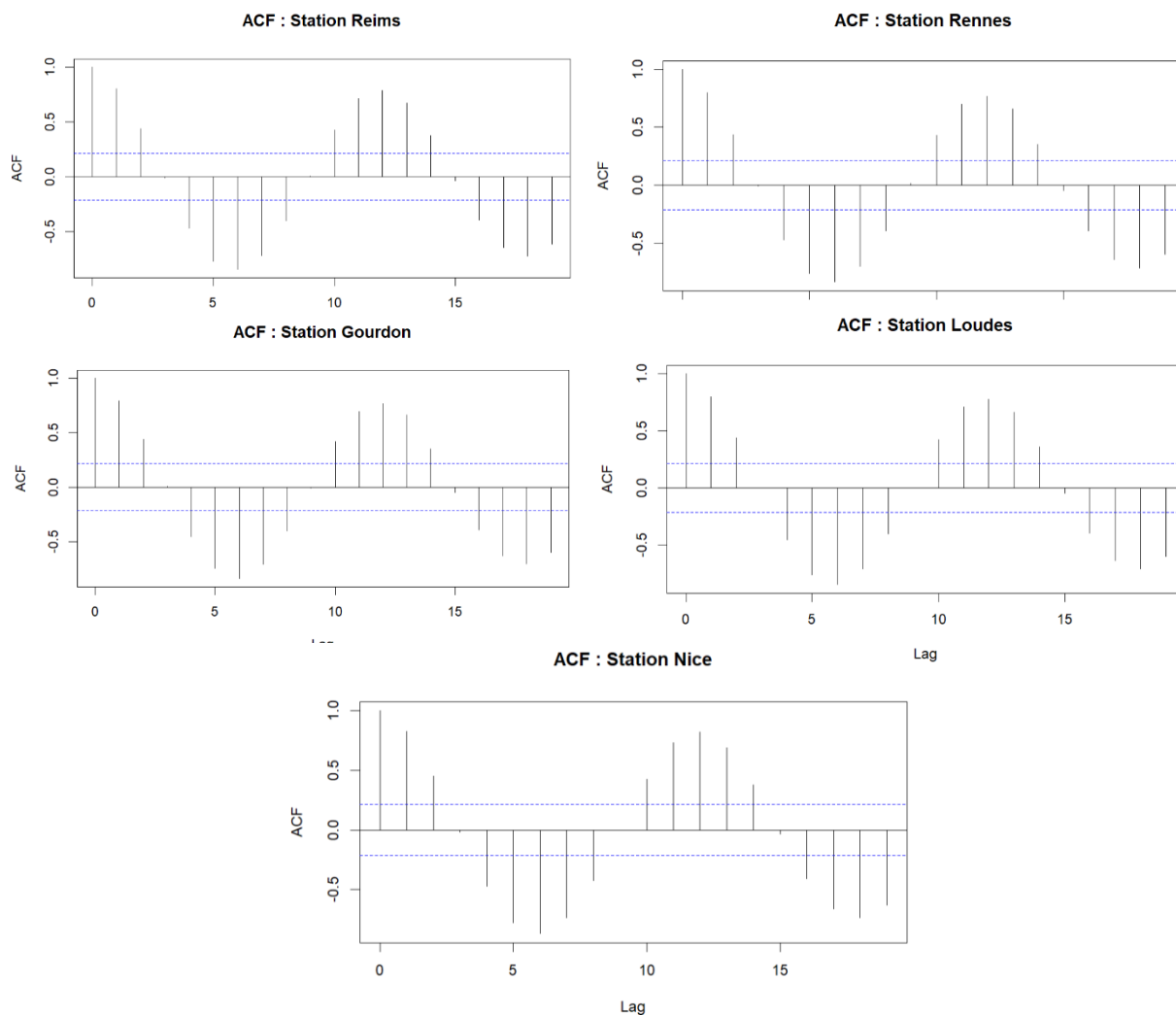


Figure II.16 : Observation des fonctions d'autocorrélation

Le caractère saisonnier des données est confirmé. Afin de mieux distinguer la tendance et la composante saisonnière de la série, une **décomposition STL** (Seasonal and Trend decomposition using Loess) est réalisée. Cette méthode permet d'isoler et d'examiner séparément ces différentes composantes, ce qui facilite l'analyse de la tendance à long terme, de la saisonnalité et des variations résiduelles d'une série temporelle.

Les résultats sont visibles à la figure II.17. Comme constaté avec l'ACF, la décomposition STL confirme que la **saisonnalité** a la même allure pour les cinq stations avec des températures qui augmentent graduellement pendant la première moitié de l'année avant de diminuer.

La **tendance**, quant à elle est globalement croissante sur la période 2016-2022. Néanmoins on observe des pics à la baisse pour certaines stations. Les stations de Nice et Gourdon présentent une baisse de températures en 2018, en raison d'épisodes neigeux au mois de février à l'Est de la région Provence-Alpes Côte d'Azur et un taux de faible

ensoleillement dans le Sud-Ouest. Une baisse de la tendance est constatée en 2019 pour les stations de Reims et Rennes, en raison d'un climat peu ensoleillé sur la partie Nord du pays.

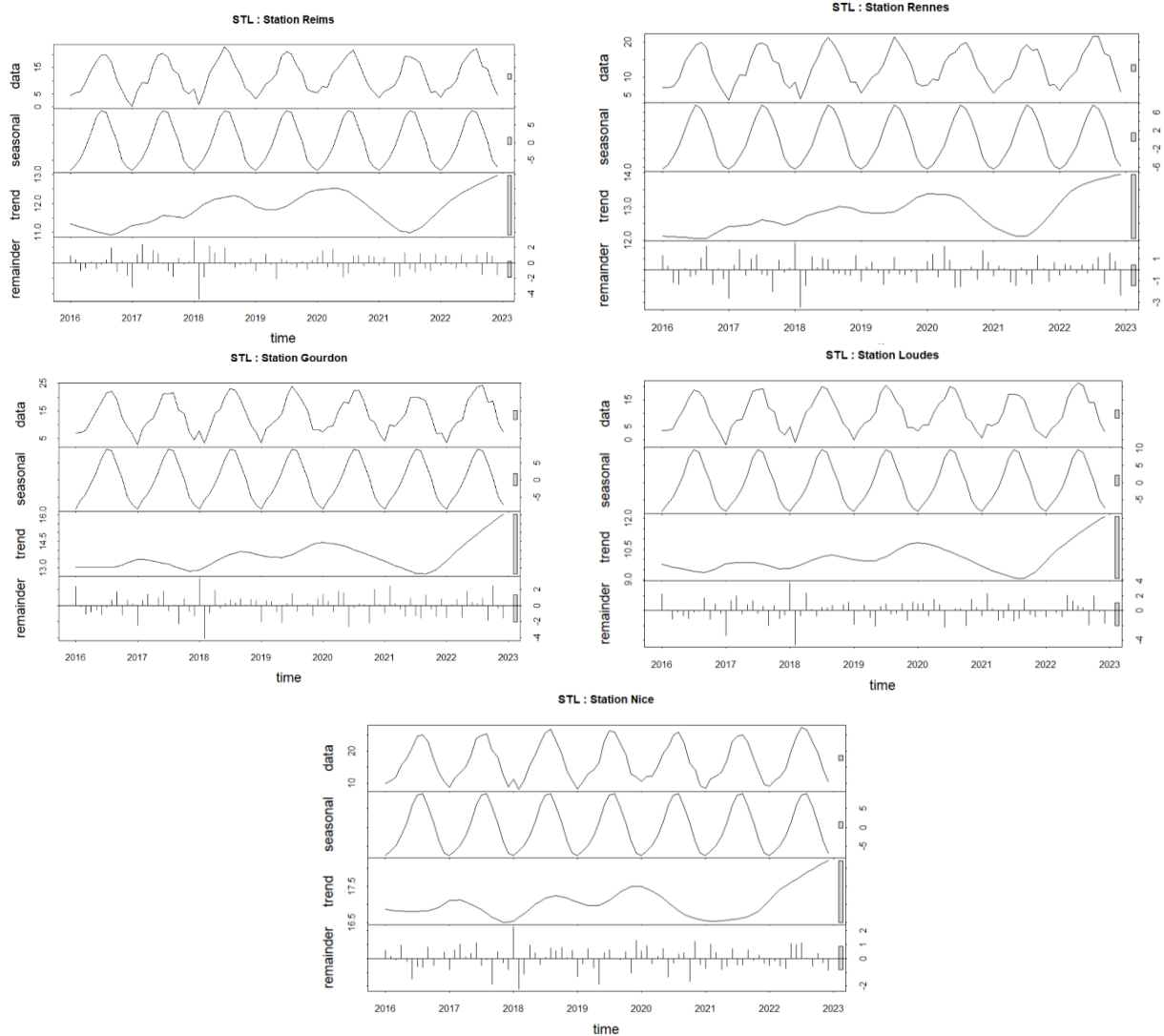


Figure II.17 : Décompositions STL des données

Désaisonnalisation

Les données montrent des schémas qui se répètent en fonction des saisons. Ainsi, pour mieux analyser la série temporelle, on effectue une **désaisonnalisation**. Cette méthode consiste à **éliminer l'effet de la composante saisonnière** d'une série temporelle. Cela permet de mettre en évidence les autres motifs et tendances sous-jacentes qui ne sont pas liés aux variations saisonnières. Ce retraitement est essentiel puisqu'il permet de ne pas introduire de biais et de construire un modèle plus précis.

Malgré la désaisonnalisation des données sur la figure II.18, celles-ci présentent toujours une **tendance**. Il faut alors procéder à la différenciation des séries.

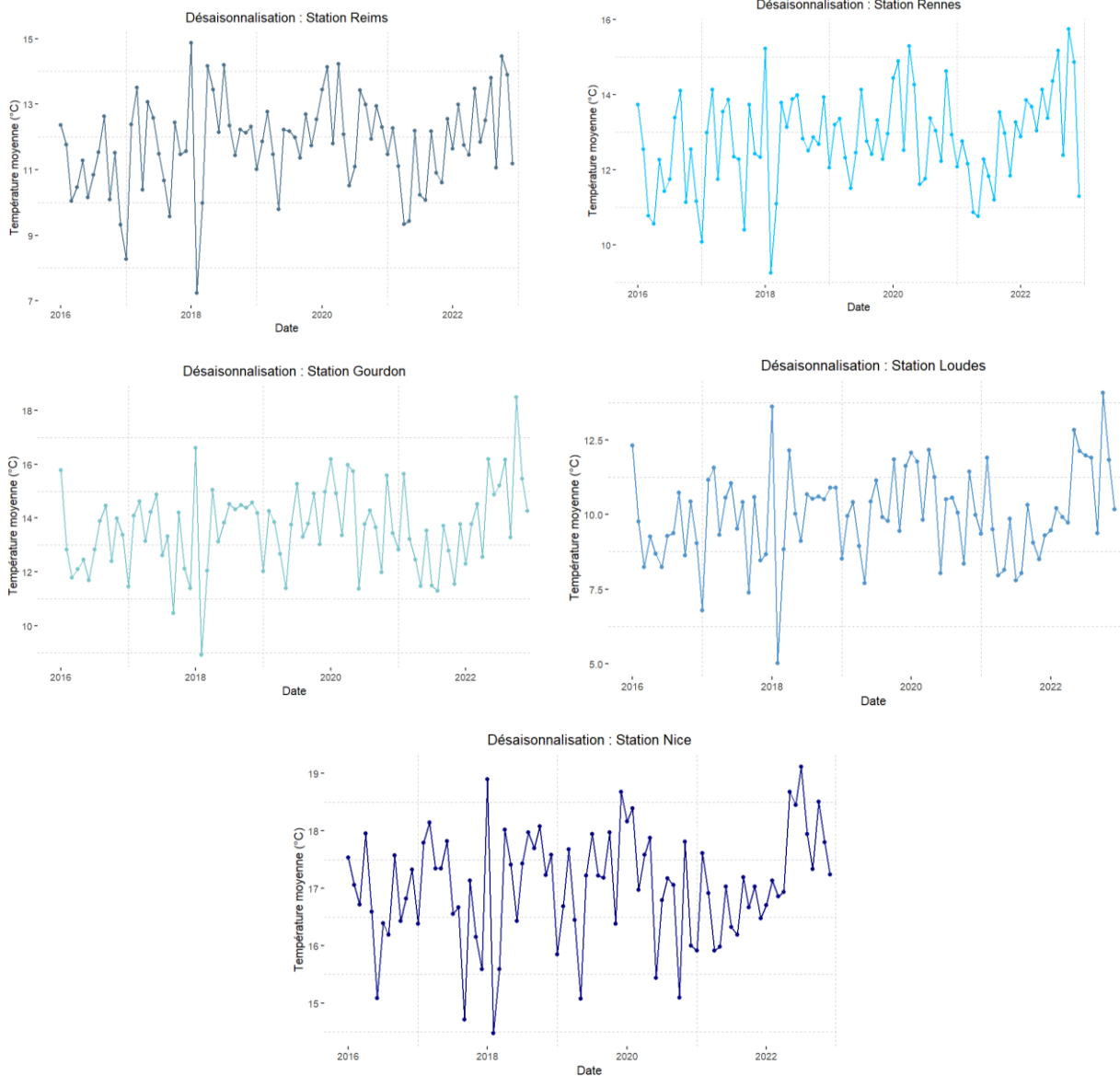


Figure II.18 : Séries temporelles désaisonnalisées

Différenciation

La **différenciation** permet de détecter les variations à court terme et les changements brusques dans la série. La différenciation est souvent utilisée pour rendre une série temporelle **stationnaire**, c'est-à-dire pour éliminer les tendances et les structures temporelles systématiques.

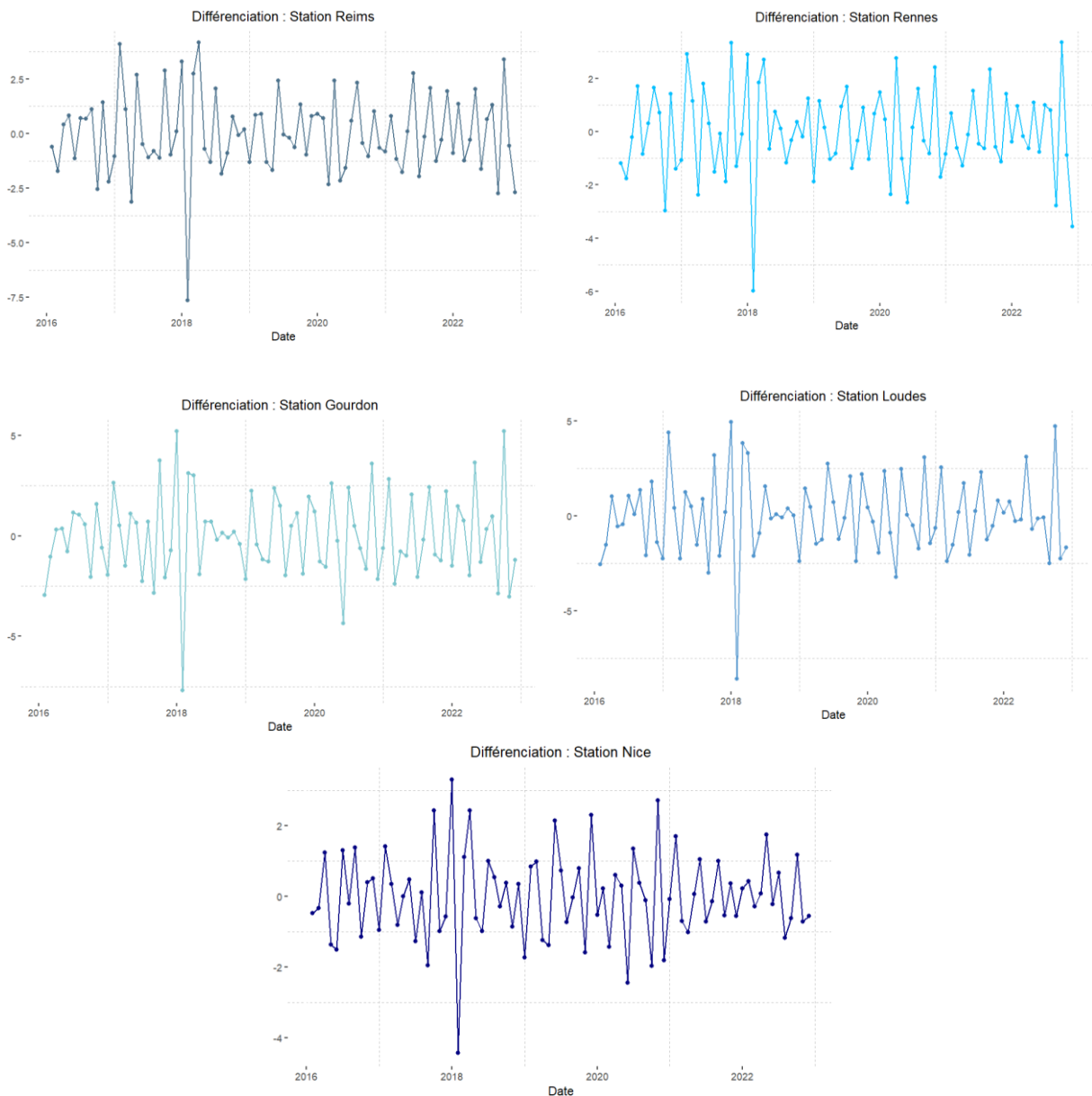


Figure II.19 : Séries temporelles différenciées

Vérification de la stationnarité

A présent, les séries ne présentent plus de composante saisonnière et de tendance. Il est alors judicieux de vérifier leur stationnarité à l'aide des **tests KPSS et ADF**. Les résultats figurant sur le tableau II.16 confirment la **stationnarité** des séries.

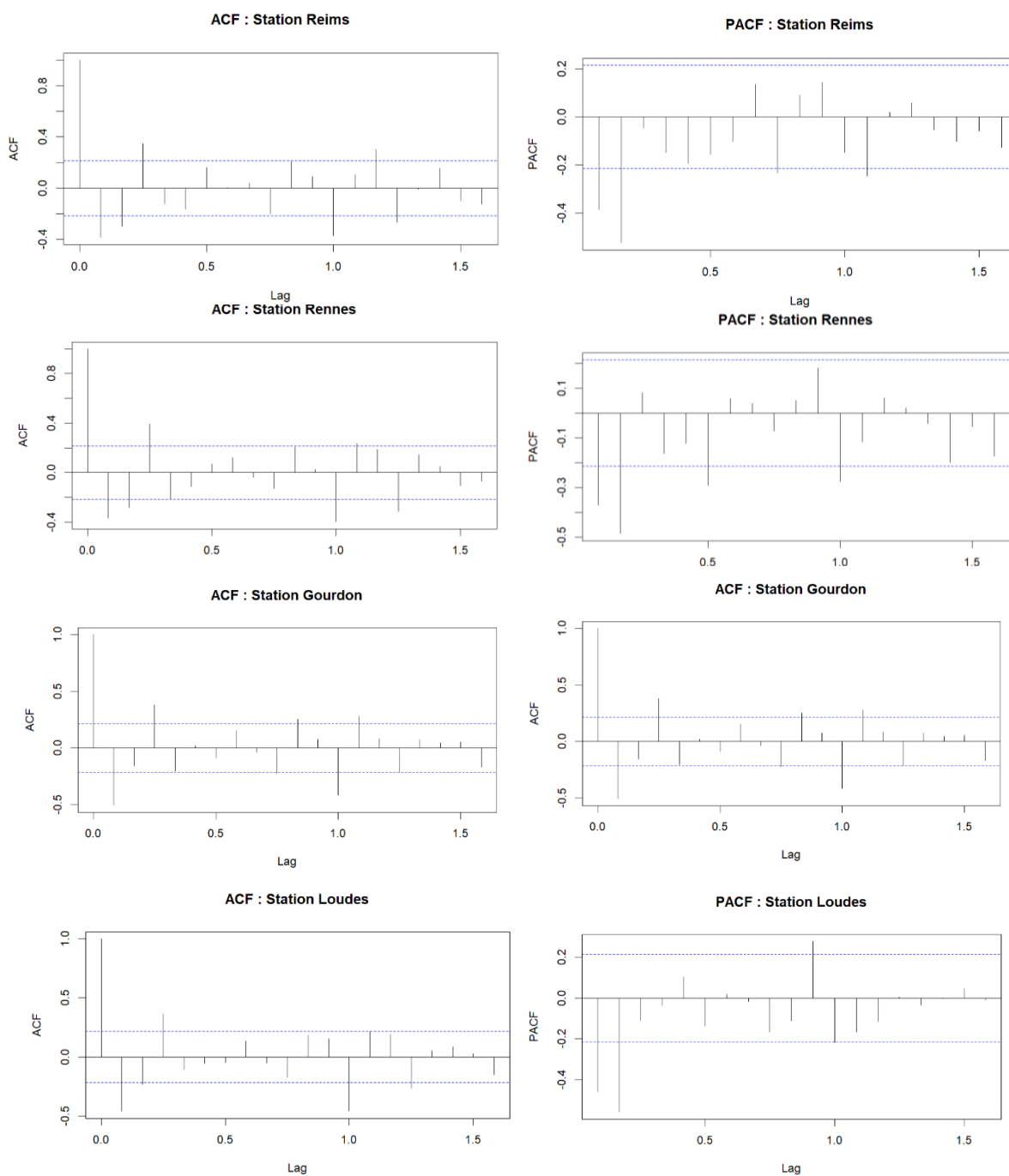
Stations	Type de test	P-value
Reims	KPSS	0,1 > 0,05
	ADF	0,01 < 0,05
Rennes	KPSS	0,1 > 0,05
	ADF	0,01 < 0,05
Gourdon	KPSS	0,1 > 0,05
	ADF	0,01 < 0,05

Loudes	KPSS ADF	0,1 > 0,05 0,01 < 0,05
Nice	KPSS ADF	0,1 > 0,05 0,01 < 0,05

Tableau II.16 : Résultats des tests de stationnarité

Modélisation ARIMA à l'aide des ACF/PACF

Les représentations de l'ACF et du PACF des séries stationnaires permettent de trouver les **paramètres adéquats** pour réaliser une modélisation ARIMA.



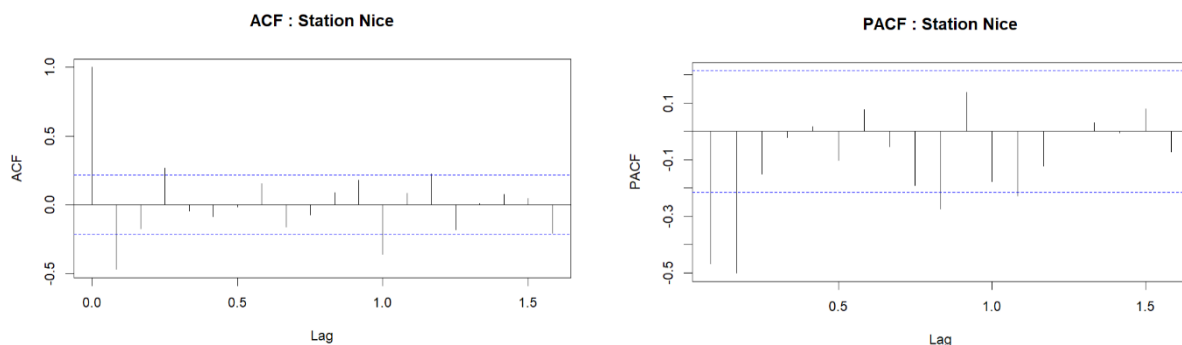


Figure II.20 : ACF et PACF des séries stationnaires

Les résultats révèlent plusieurs moments où la série dépasse les limites bleues, signalant des autocorrélations probables. Ces dépassements sont principalement dus à la présence de **saisonnalités** dans la série temporelle stationnaire. L'utilisation d'un modèle ARIMA saisonnier est judicieux.

L'**absence de composante AR** est suggérée par un tracé PACF qui décroît rapidement et atteint une valeur proche de zéro après le premier retard. Tandis que **la présence d'une composante MA** est suggérée par un tracé ACF qui décroît rapidement et atteint une valeur proche de zéro après le premier retard. Le modèle $ARIMA(0,0,0)(1,1,0)_{12}$ est un modèle potentiel pour la série.

Modélisation ARIMA à l'aide de la fonction « *auto.arima* »

Afin de valider le modèle candidat, la fonction « **auto.arima** » est utilisée. Celle-ci effectue une sélection *stepwise* et recherche le modèle qui minimise les critères d'information AIC et BIC.

Pour cela, il a fallu diviser notre jeu de données en deux bases *train* (données de 2016 à 2020) et *test* (données 2021 et 2022). Les résultats confirment le modèle $ARIMA(0,0,0)(1,1,0)_{12}$ pour les cinq stations de référence.

Test sur les résidus

Avant de valider le modèle, un test **de Ljung-Box** est réalisé afin de vérifier que les **résidus** sont non auto-corrélés.

On obtient pour les cinq stations des *p-values* supérieures à 0,05, ce qui confirme que les résidus du modèle sont bien **non auto-corrélés**.

Résultats des prévisions sur la base test

Afin de mesurer la robustesse du modèle, il est intéressant de comparer les **valeurs réelles** et les **valeurs prédites** pour la base test.

La figure II.21 et le tableau II.17 montrent que la **prédiction** est moins bonne sur l'année 2021. Cela s'explique notamment par le fait que cette année est très contrastée au niveau des températures. De ce fait, le modèle **surestime** légèrement les températures prédites. Ainsi, l'année 2022 affiche de meilleurs résultats et la station de Nice présente les pourcentages d'erreur les plus faibles puisqu'il s'agit de la station avec les températures les plus élevées.

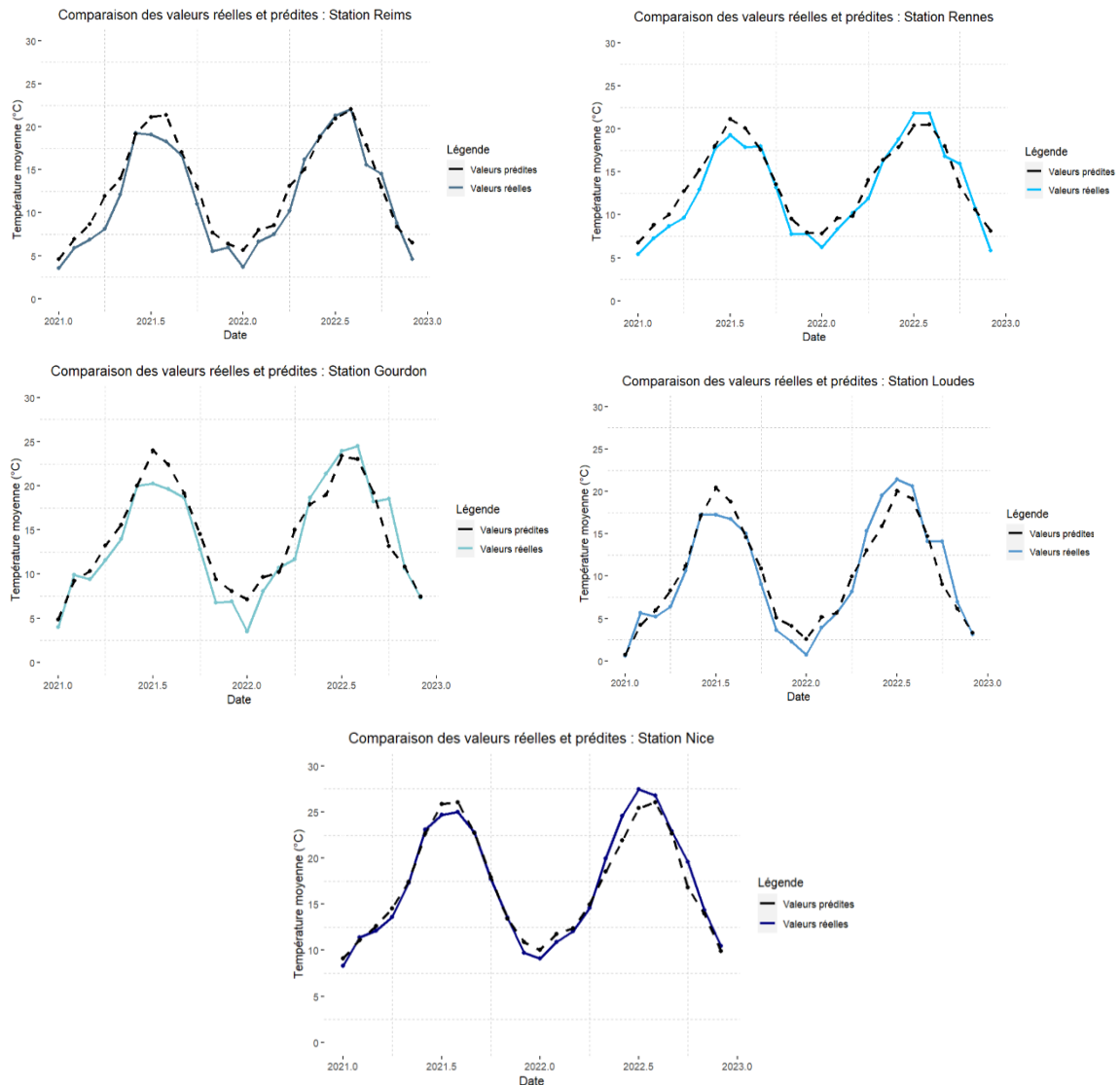


Figure II.21 : Prédictions pour la base test

Station	Erreur moyenne absolue	Moyenne du % d'erreur absolue
Reims	1,46°C	17,92%
Rennes	1,33°C	12,83%
Gourdon	1,64°C	16,20%
Loudes	1,50°C	29,27%
Nice	0,84°C	5,16%

Tableau II.17 : Résultats des prédictions sur la base test

Mesures d'écart au sein d'un même cluster

La modélisation à l'aide des séries temporelles est réalisée sur les cinq stations de référence. Les évolutions sont ensuite appliquées à toutes les stations du cluster. Il est alors judicieux de s'interroger sur la **pertinence** de ce choix et de mesurer les **écarts** au sein d'un même cluster.

Pour cela, la modélisation a été aussi effectuée sur la station **la plus éloignée** (ici Bâle) par rapport à la station de référence d'un cluster donné (ici Reims). Les différences sont représentées au tableau II.18.

Variable	Écarts (en %)
Température	11,47
Humidité	5,04
Pluie	35,68
Pression	0,66

Tableau II.18 : Écarts entre les stations de Bâle et Reims

Les variations observées sont **cohérentes**. Les variables « Pression » et « Humidité » montrent de légères différences en raison de la similitude géographique des deux stations. Cependant, l'écart de température est plus marqué en raison des climats différents des deux villes, l'une étant tempérée et l'autre semi-continentale. Enfin, la variable « Pluie » présente les plus grandes divergences en raison de facteurs météorologiques et géographiques variés.

Il est essentiel de souligner que ces écarts peuvent avoir un **impact** sur les projections des séries temporelles, particulièrement lorsqu'on vise une modélisation à une granularité très fine.

Prédiction à horizon 2027

Une fois le modèle construit et validé, on peut alors effectuer les prédictions afin d'obtenir les **évolutions futures** des températures et créer notre input de prédiction pour le GLM, dans le but de mesurer la fréquence future de survenance des catastrophes naturelles.

La période de prédiction 2023 à 2027 a été choisie pour mesurer et évaluer la dérive de sinistralité sur un scénario à court terme pour un organisme d'assurance.

Résultats des prévisions

Le tableau II.19 montre qu'une **hausse modérée** de la température est attendue pour 2027. La station la plus touchée est celle de Rennes avec une augmentation d'environ 1°C à horizon cinq ans.

Station	Température moyenne sur la période 2016-2022	Température moyenne prévue sur la période 2023-2027	Evolution	Ecart
Reims	11,79°C	11,84°C	0,37%	0,05°C
Rennes	12,78°C	13,89°C	8,59%	1,11°C

Gourdon	13,62°C	13,94°C	2,28%	0,32°C
Loudes	10,01°C	10,26°C	2,48%	0,25°C
Nice	17,03°C	17,21°C	1,03%	0,18°C

Tableau II.19 : Mesures d'évolution de la température à horizon 2027

Cohérence des résultats

Afin d'évaluer la **cohérence** des résultats obtenus, il est judicieux de se référer à des travaux menés par des spécialistes comme le GIEC ou Météo France.

Le GIEC mène ses **études** selon différents scénarios d'émissions afin d'évaluer les possibles conséquences du réchauffement climatique. Selon son dernier rapport, il estime une hausse des températures **minimale à 1,5°C d'ici 2030** quel que soit le scénario d'émission. La figure I.3 donne une fourchette de prévision **entre 1,5°C et 3°C**, à horizon 2050.

Station	Température moyenne sur la période 2016-2022	Température moyenne prévue sur la période 2023-2050	Evolution	Ecart
Reims	11,79°C	13,31°C	12,89%	1,52°C
Rennes	12,78°C	17,12°C	33,84%	4,33°C
Gourdon	13,62°C	15,85°C	16,37%	2,23°C
Loudes	10,01°C	12,02°C	20,08%	2,01°C
Nice	17,03°C	18,68°C	9,69%	1,65°C

Tableau II.20 : Mesures d'évolution de la température à horizon 2050

Le tableau II.20 donne les résultats des prédictions à horizon 2050 obtenues à l'aide des séries temporelles. Les valeurs obtenues **coïncident** avec les prévisions du GIEC à l'exception de la station de Rennes qui affiche une évolution assez élevée de 33,84%.

1.1.3.3. Vers une dérive de sinistralité

L'utilisation des séries temporelles a permis d'obtenir les estimations futures des différentes variables météorologiques sur la période de prédiction pour chacune des stations de référence. Les évolutions de chaque station de référence sont ensuite appliquées aux autres stations du cluster afin de créer l'input de prédiction du GLM.

Celui-ci est alors utilisé pour modéliser la **probabilité d'occurrence future des catastrophes naturelles en France**. Les résultats sont ensuite agrégés par année afin d'observer une dérive de sinistralité en fréquence.

Inondation

La figure II.22 montre les prédictions obtenues pour le péril « Inondation ». Une **augmentation de la fréquence** est attendue pour les cinq prochaines années. En effet, on

constate une hausse de **19%** du nombre d'arrêtés liés au risque d'inondations sur les trois prochaines années par rapport aux trois dernières.

La figure II.23 représente la prévision linéaire du nombre d'arrêtés après 2027. On remarque que la tendance à la hausse se poursuit. Cela traduit une **dérive de sinistralité** future en fréquence pour les assureurs.

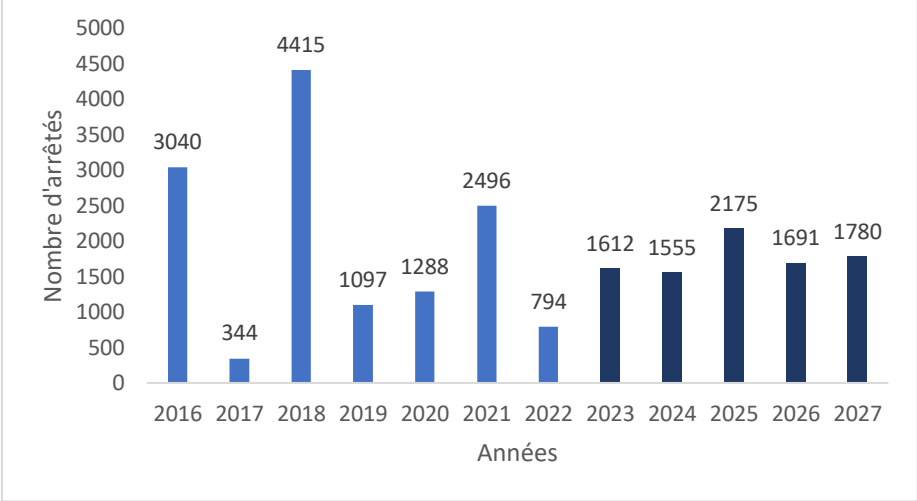


Figure II.22 : Résultats des prédictions pour le GLM inondation

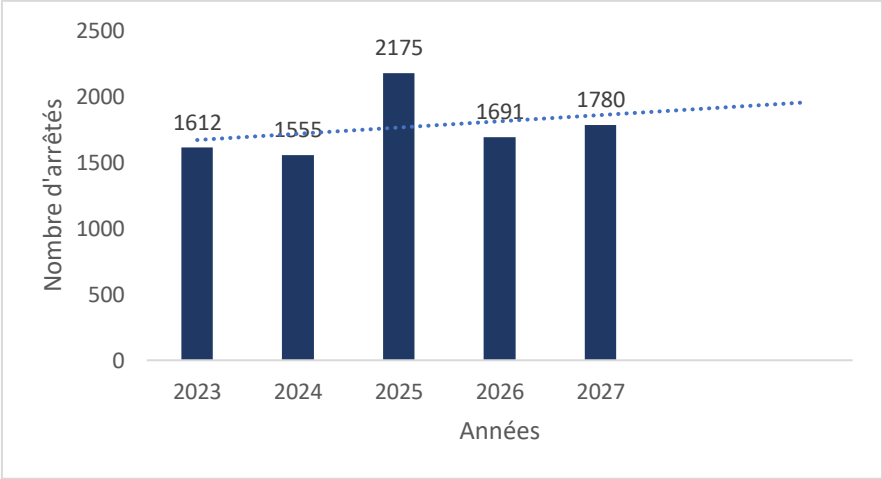


Figure II.23 : Prévision linéaire au-delà de 2027 (inondation)

Sécheresse

La figure II.24 représente les résultats pour le péril « Sécheresse ». De la même manière, une **hausse de la fréquence** de survenance des sinistres climatiques est attendue

pour les cinq prochaines années. Une augmentation de **37%** du nombre d'arrêtés est attendu pour les trois prochaines années par rapport aux trois dernières.

D'après la figure II.25, la **dérive de sinistralité** est aussi valable pour le péril sécheresse. En effet, d'après la prévision linéaire, le nombre d'arrêtés liés à ce risque est amené à augmenter davantage dans les prochaines années.

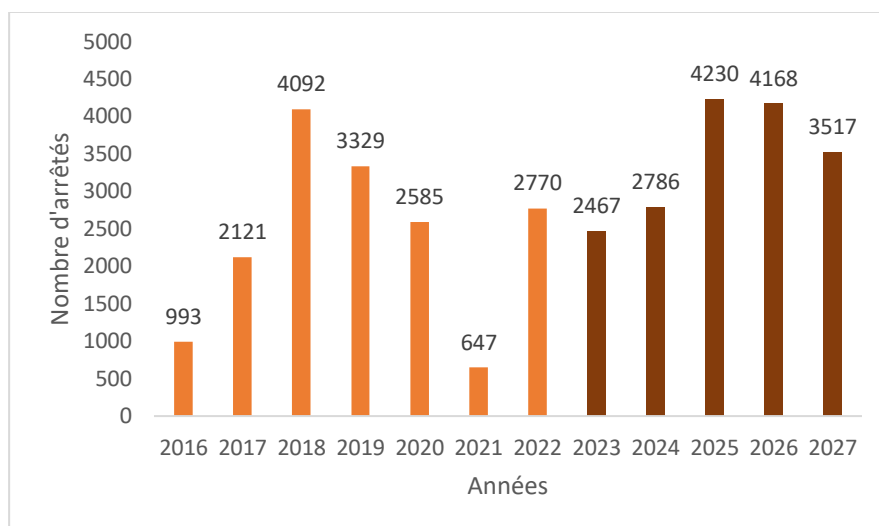


Figure II.24 : Résultats des prédictions pour le GLM sécheresse

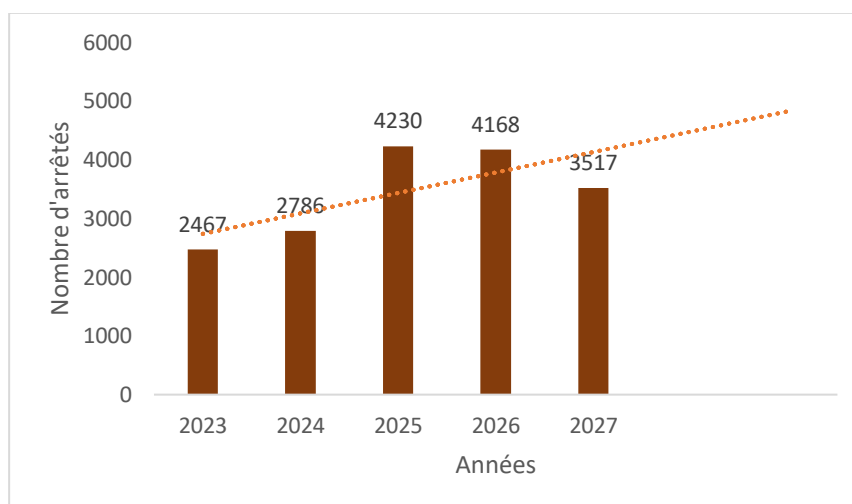


Figure II.25 : Prévision linéaire au-delà de 2027 (sécheresse)

Limites du modèle

Les résultats obtenus sont satisfaisants et **confirment** l'hypothèse de **dérive de sinistralité en fréquence** évoquée dans la partie I du présent mémoire. Néanmoins, il est toujours intéressant d'évoquer les **limites** du modèle et de la démarche adoptée afin de maintenir un regard critique et nuancé.

Tout d'abord, afin de pallier l'absence de données, l'*open data* a été utilisé pour construire le GLM en utilisant les données météorologiques disponibles. Cependant, il convient de souligner que **l'ajout d'autres sources** de données aurait pu considérablement améliorer les performances du modèle.

De plus, le GLM est basé sur sept années d'informations. L'utilisation d'une plage temporelle plus large permettrait d'améliorer sa qualité et d'obtenir des résultats plus précis.

Il est aussi possible et intéressant de challenger cette régression logistique avec des méthodes de *Machine Learning* plus puissantes comme *Random Forest* ou *XGBoost* mais le déséquilibre des classes serait toujours présent et la difficulté serait identique.

Ensuite, une modélisation via les séries temporelles a été effectuée afin d'obtenir les évolutions futures des variables météorologiques. Toutefois, celle-ci est basée sur une hypothèse de linéarité et de dépendance temporelle et ne tient pas forcément compte des **facteurs externes** qui peuvent affecter l'évolution des conditions météorologiques. De plus, des changements soudains sont tout à fait possibles et peuvent ne **pas être anticipés** par les prédictions. Les résultats pour la variable "Pluie" peuvent être discutés car sa modélisation est plus complexe. Cela s'explique par le fait que les séries temporelles ont du mal à capturer les **variations spatiales** de la quantité de pluie d'un endroit à un autre. Pour améliorer les prédictions de cette variable, l'utilisation de modèles qui prennent en compte à la fois le temps et l'espace pourrait être bénéfique.

Enfin, il est important de noter que les résultats obtenus sont **susceptibles d'évoluer** si les caractéristiques du régime des catastrophes naturelles changent également. De plus, chaque organisme d'assurance peut connaître des évolutions de fréquence différentes des estimations établies, en raison de ses propres caractéristiques. Par conséquent, il est nécessaire d'adopter une **approche prudente** lors de la prise en compte des hypothèses et des résultats.

1.2. Coût des sinistres

Cette sous-section s'intéresse à la dérive de sinistralité **en coût**. Celle-ci se traduit par une augmentation graduelle du coût des sinistres.

1.2.1. Démarche initiale

L'objectif de cette sous-partie est de mesurer une **dérive de sinistralité en coût**. L'une des difficultés réside dans le fait que le coût des sinistres est souvent considéré comme une **donnée confidentielle** et n'est pas facilement disponible, contrairement à la fréquence.

Afin de pallier cette problématique, des **demandes** ont été effectuées auprès de plusieurs **organismes publics** dans le but de récupérer les données nécessaires : France Assureurs, CEREMA (Centre d'Etudes et d'expertise sur les Risques, l'Environnement, la Mobilité et

l'Aménagement), le Ministère de la Transition Ecologique, ORN (Observatoire des Ressources Naturelles) ... Celles-ci n'ont pas abouties.

1.2.2. Démarche alternative

Une démarche alternative a été adoptée et consiste à réaliser un **benchmark d'articles assurantiels** qui traitent des conséquences financières du coût du réchauffement climatique en se basant sur des observations et des analyses de marché.

1.2.2.1. CCR – Météo France

Les chiffres évoqués dans cette sous-section sont tirés de l'ouvrage « *Conséquences du changement climatique sur le coût des catastrophes naturelles à horizon 2050* » paru en 2018.

Risque	Horizon	Scénario 8.5	Scénario 4.5
Inondation	2050	38%	20%
Sécheresse	2050	23%	

Tableau II.21 : Hypothèses CCR - Météo France

1.2.2.2. France Assureurs

Les estimations évoquées dans cette sous-section sont extraites du document « *Impact du changement climatique sur l'assurance à horizon 2050* » publié en 2021.

Risque	Horizon	Evolution du coût
Inondation	2050	81%
Sécheresse	2050	212%

Tableau II.22 : Hypothèses France Assureurs

1.2.2.3. ACPR

Les hypothèses d'évolution de sinistralité ci-dessous proviennent du document « *Les principaux résultats de l'exercice pilote climatique 2020* » publié en 2021.

Risque	Horizon	Evolution faible	Evolution moyenne	Evolution forte	Evolution très forte
Inondation	2050	[20 ; 75[%	[75 ; 115[%	[115 ; 196[%	[196 ; 1909[%
Sécheresse	2050	[-23 ; 75[%	[75 ; 161[%	[161 ; 395[%	[395 ; 1249[%

Tableau II.23 : Hypothèses ACPR

1.2.2.4. Covéa

Les hypothèses mentionnées dans cette sous-partie sont tirées du livre blanc « *Quelles conséquences sur la sinistralité à horizon 2050 ?* » paru en 2022.

Risque	Horizon	Evolution de la sinistralité
Inondation	2050	120%
Sécheresse	2050	60%

Tableau II.24 : Hypothèses Covéa

1.2.2.5. Hypothèses choisies à horizon 2027

Les hypothèses des différents ouvrages sont très **différentes** principalement parce qu'elles ont été élaborées à des moments différents. Certaines d'entre elles sont évaluées selon les scénarios du GIEC et d'autres non.

Dans ce contexte, il est judicieux de raisonner en **fourchette d'hypothèses** plutôt que d'établir un pourcentage d'évolution de coût unique, afin de mieux prendre en compte des projections climatiques résultant de différentes sources et aussi d'avoir une vision plus nuancée des évolutions futures des coûts.

De plus, toutes ces hypothèses ont pour horizon temporel 2050. Cependant, l'objectif de cette partie est d'évaluer une dérive de coût à court terme. De ce fait, les projections seront **ajustées** à l'horizon 2027, de **façon linéaire**, afin de représenter de manière réaliste les évolutions futures.

Les chiffres utilisés pour le reste de l'étude sont présentés dans le tableau II.25.

Risque	Horizon	Evolution du coût
Inondation	2027	3,6% à 14,5%
Sécheresse	2027	3,6% à 37,9%

Tableau II.25 : Hypothèses choisies pour la dérive de coût

De la même manière que pour la fréquence, il est important de noter que ces hypothèses reposent sur des estimations qui **peuvent évoluer** avec le temps et les nouvelles données disponibles. De plus, chaque structure d'assurance possède ses propres spécificités et peut connaître des évolutions de coûts **différentes** des fourchettes établies. Ainsi, la prise en compte des hypothèses et des résultats doit se faire de manière **prudente**.

2. Impact sur la distribution de sinistres et limites de la réassurance

La section précédente a permis de confirmer et de mesurer l'**hypothèse de dérive future en fréquence et en coût** des sinistres climatiques avancée par les spécialistes pour les risques d'inondation et de sécheresse en France.

De ce fait, cette section a pour objectif d'évaluer les **impacts et les limites** de cette dérive sur un portefeuille non-vie afin de mettre en exergue les **difficultés potentielles** auxquelles les assureurs pourraient faire face dans le maintien de la viabilité de leur activité.

2.1. La réassurance comme technique d'atténuation du risque

Les sinistres liés aux catastrophes naturelles sont souvent onéreux, imprévisibles et de ce fait, susceptibles de mettre en péril la stabilité financière des organismes d'assurance. Ces derniers ont alors recours à des **mesures d'atténuation du risque** afin de limiter leurs pertes financières.

Parmi ces techniques, on retrouve la **réassurance** qui peut se définir comme étant un procédé par lequel l'assureur (ou cédante), cède une partie des engagements dont il est responsable à un réassureur (ou cessionnaire), moyennant le paiement d'une prime. Autrement dit, c'est « l'assurance de l'assureur ». Les réassureurs, de leur côté, peuvent également recourir à des réassureurs supplémentaires, appelés rétrocessionnaires.

2.1.1. La réassurance, quelles utilisations et fonctions ?

Cette sous-section s'intéresse aux diverses fonctions et utilisations de la réassurance pour les organismes d'assurance.

2.1.1.1. Transfert de risque

Risque de grandes catastrophes

Les grandes catastrophes sont un risque considérable pour les assureurs et peuvent mettre en péril leur sécurité financière.

Ces risques peuvent être **d'origine naturelle** avec par exemple les sinistres climatiques (tempêtes, sécheresse, inondations, ouragans, tremblements de terre...). A noter que la France est l'un des seuls pays au monde à couvrir la sécheresse pour les maisons avec notamment le phénomène de RGA. Les **risques non naturels**, appelés également « *man made losses* » peuvent également représenter une menace et concernent les risques d'incendie, explosion, cyber, terrorisme...

Ces catastrophes se déclinent sous la forme de plusieurs types de risque. Le 1^{er} étant les **risques événementiels** entraînant une accumulation de sinistres pour un même fait

générateur avec par exemple les catastrophes naturelles ou encore l'attentat du 11 septembre. Le 2nd étant les **risques individuels** qui peuvent parfois entraîner des montants individuels élevés.

Risque de surfréquence

Il est possible qu'un risque particulier, comme le bris de glace ou la garantie vol, entraîne une **sinistralité** suffisamment grave pour **impacter le compte de résultat** de l'assureur et mettre en péril sa solidité financière. La réassurance apparaît alors comme une solution adéquate pour limiter ce risque.

Risque d'incertitude

Elle peut également être utilisée pour diminuer le **risque d'erreur** lors de la **tarification** d'un produit ou d'une garantie et particulièrement dans le **lancement** de nouveaux produits.

2.1.1.2. Outil de gestion du capital

La réassurance constitue aussi un **levier financier** pour la gestion du capital mais aussi l'amélioration de la marge de solvabilité. Elle répond parfaitement à des problématiques de **financement**.

2.1.1.3. Source d'information, de support de gestion et de formation

Enfin, étant vecteur de données de marché, elle constitue une **source d'information** et permet alors de développer des supports de formation et des travaux actuariels divers.

2.1.2. Les formes de réassurance

Plusieurs formes de réassurance existent :

2.1.2.1. La réassurance obligatoire

La **réassurance obligatoire** se caractérise par un cadre contractuel prédéfini (nature des risques, dimension géographique, limites monétaires, exclusions, durée...). L'obligation est réciproque, c'est-à-dire que la cédante a l'obligation de céder une partie de ses engagements et le cessionnaire est contraint d'accepter.

2.1.2.2. La réassurance facultative

La **réassurance facultative** offre une certaine liberté à la cédante contrairement à la réassurance obligatoire. En effet, cette dernière présente au cessionnaire si elle le souhaite le risque ou l'affaire et ce dernier n'a aucune obligation de l'accepter.

Une forme particulière, la **réassurance facultative obligatoire**, est aussi possible. Dans ce cas, la cédante est en facultatif et le cessionnaire en obligatoire. En optant pour cette approche, l'assureur peut se protéger contre certains risques, tout en conservant une certaine souplesse dans la gestion de son portefeuille.

2.1.3. Les types de réassurance

Par ailleurs, il est possible de discerner deux types de réassurance, la **proportionnelle** et la **non-proportionnelle**.

2.1.3.1. La réassurance proportionnelle

La **réassurance proportionnelle** est basée sur le principe de **partage du sort**. Une proportion de l'exposition ou des primes est prédéfinie et la sinistralité est cédée en contrepartie sur cette même proportion.

Afin de compenser la prise en charge directe des frais de la cédante, le cessionnaire a pour obligation de verser une **commission de réassurance**. Celle-ci a pour objectif de couvrir un prorata des frais de la cédante tout en prenant en compte la profitabilité du portefeuille.

De plus, toujours dans une logique de proportionnalité, une notion de **participation bénéficiaire** est introduite. Si le résultat à posteriori du cessionnaire est supérieur à un seuil prédéfini, il ristourne une partie du résultat à la cédante.

En réassurance proportionnelle, on distingue généralement deux principaux traités : quote-part et excédent de plein.

Quote-part

Le traité en **quote-part** est défini par un pourcentage fixe, appelé **taux de cession**. La cédante conserve alors cette part du risque et cède le reste au cessionnaire.

Le principal avantage est qu'il s'agit d'une gestion simple et que la cédante gagne en solvabilité puisqu'elle va diminuer son SCR en cédant une partie de son risque. Néanmoins, la cédante perd une partie importante de ses primes et ne protège pas la volatilité de son compte de résultat.

Ce type de contrat est utilisé notamment pour accroître sa capacité de souscription avec par exemple le développement de nouvelles branches d'activité.

Excédent de plein

Le traité en **excédent de plein** permet à la cédante de conserver davantage de primes en introduisant un **taux de cession variable**, t_i , qui dépend du sinistre :

$$t_i = \min \left(\frac{C}{K_i}; \max \left(\frac{K_i - R}{K_i}; 0 \right) \right)$$

Avec :

- K_i le capital assuré de la police,
- R la rétention de l'excédent de plein, étant le seuil à partir duquel le réassureur intervient,
- C la capacité de l'excédent de plein, étant l'engagement maximum du réassureur.

Le principal avantage pour la cédante est d'optimiser la rétention et conserver les « petits » sinistres. Cependant, ce type de traité nécessite des coûts de gestion élevés.

2.1.3.2. La réassurance non-proportionnelle

Pour ce type de réassurance, il n'existe pas de lien direct entre les primes de l'assureur et la cession des sinistres. **Le principe de partage du sort disparaît.** Le montant de sinistres conservé par la cédante est prédéfini et l'excédent de sinistralité est alors cédé au cessionnaire. L'intérêt pour l'assureur est de se protéger contre l'éventualité de risques majeurs et de lisser son résultat, moyennant le paiement d'une prime au cessionnaire.

De manière générale, ce type de réassurance est noté « *Portée XS Priorité* ». La **priorité** représente le seuil d'intervention du cessionnaire et la **portée** son engagement maximum. La prime de réassurance est établie par le réassureur en se basant sur des données marché ou sur les informations de la cédante.

Deux types de traités sont à différencier en réassurance non proportionnelle : l'excédent de sinistres et l'excédent de perte annuelle (*Stop Loss*).

Excédent de sinistre

Par risque

Le traité **en excédent de sinistre par risque** est défini par une priorité et une portée. Il est appliqué pour un même type de risque et de manière individuelle pour chaque sinistre.

La cédante détermine le montant maximum pris à sa charge pour un sinistre et le cessionnaire récupère l'excédent dans la limite de la portée définie. Le montant Y pris en charge par le réassureur est défini par :

$$Y = \min(\max(X - \text{priorité}; 0); \text{portée})$$

Il est important de souligner que l'excédent de sinistre peut être réparti **en plusieurs tranches**, et plusieurs réassureurs peuvent participer à chaque tranche.

Ce type de contrat permet à la cédante de réduire la volatilité de son résultat et de limiter son exposition par risque. Son principal avantage est qu'il s'agit d'un procédé simple permettant une réduction des frais de gestions et une conservation de l'équilibre du portefeuille. Cependant, ce traité ne protège pas le résultat global de la cédante, et peut s'avérer moins efficace dans le cas d'une dérive de fréquence du risque.

Par évènement

L'**excédent de sinistre par évènement** fonctionne de manière similaire à la différence qu'il s'applique au montant total des sinistres touchés **par un même évènement ou fait générateur**, (par exemple une inondation). On parle alors d'excédent de sinistre catastrophe (« XS CAT »).

La notion d'évènement est définie contractuellement par sa nature, sa délimitation spatiale et temporelle ...

Stop Loss

Le traité **Stop Loss** permet à la cédante de protéger le résultat de son portefeuille à travers le $\frac{S}{P}$ (ratio sinistre sur prime) annuel.

Il est alors défini par le S/P à partir duquel le cessionnaire va intervenir et le plafond maximum associé. Le montant Y pris en charge par le réassureur est défini par :

$$Y = \min \left(\max \left(\frac{\sum_i X_i}{P} - \text{priorité}; 0 \right); \text{portée} \right) * P$$

avec :

- X_i la charge des sinistres
- P la prime

L'avantage de ce contrat est qu'il permet à la cédante de céder un volume de primes faible si la priorité est suffisamment éloignée du S/P moyen tout en protégeant son résultat. L'inconvénient réside dans le fait qu'il peut être compliqué de s'accorder sur un prix et qu'il peut y'avoir des écarts de prime importants entre les concurrents.

2.2. Application à un portefeuille non-vie

Après avoir expliqué les principaux concepts de la réassurance, cette sous-section s'intéresse à **l'analyse de l'impact** d'une augmentation inattendue du nombre de sinistres et des coûts associés pour un **assureur non-vie**.

Le portefeuille étudié est celui d'un assureur non-vie fictif, présenté ultérieurement dans ce mémoire. L'organisme commercialise plusieurs types de contrats (Automobile, Santé, Habitation, Accidents de la Vie). L'étude se base uniquement sur la garantie « Dommage aux biens » et plus particulièrement sur les **sinistres climatiques** liés au risque de **sécheresse** survenus entre 2016 et 2022.

2.2.1. Distribution des évènements climatiques

La **distribution des évènements** ou de sinistralité, peut se définir comme la répartition statistiques des sinistres d'un organisme d'assurance en fonction de leur coût et de leur fréquence associée.

La représentation graphique de cette distribution est un outil d'analyse puisqu'elle permet à l'assureur d'évaluer les risques et anticiper les coûts futurs liés aux sinistres.

2.2.1.1. Données du portefeuille

Avant d'entamer la modélisation des évènements climatiques, il est intéressant de regarder l'évolution du portefeuille étudié.

Année	Nombre de sinistres	Montant total (en M€)	Montant moyen (en M€)	Nombre d'évènements dans le portefeuille	Nombre d'évènements dans l'année
2016	0	0,00	0,00	0	4
2017	2	1,37	0,69	3	4
2018	3	2,14	0,71	2	3
2019	11	11,10	1,01	3	3
2020	30	31,35	1,05	4	5
2021	19	20,77	1,09	3	3
2022	20	22,61	1,13	3	3

Tableau II.26 : Données du portefeuille exemple étudié

Le tableau II.26 montre d'une part une augmentation du **nombre de sinistres** et des coûts associés sur la période d'étude. D'autre part, une hausse du nombre de **faits générateurs**, ou évènements, liés au risque sécheresse en France est visible. Le portefeuille semble **de plus en plus touché** par ces phénomènes climatiques, avec une fréquence d'exposition croissante.

De ce fait, il est judicieux de la part de l'organisme d'assurance de s'interroger sur la viabilité de son activité économique dans le cas d'une dérive de sinistralité future.

2.2.1.2. Scénario sans dérive

Tout d'abord, il est nécessaire de modéliser la sinistralité de l'organisme dans un **scénario sans dérive**.

Modélisation de la gravité des évènements

Afin de modéliser la distribution de la gravité des évènements, plusieurs distributions usuelles ont été testées :

- La distribution log-normale,
- La distribution gaussienne inverse,
- La distribution de Pareto,
- La distribution Gamma,
- La distribution de Weibull,
- La distribution de Gumbel.

Ces différentes distributions sont **strictement positives** et sont les plus utilisées pour modéliser les coûts des événements.

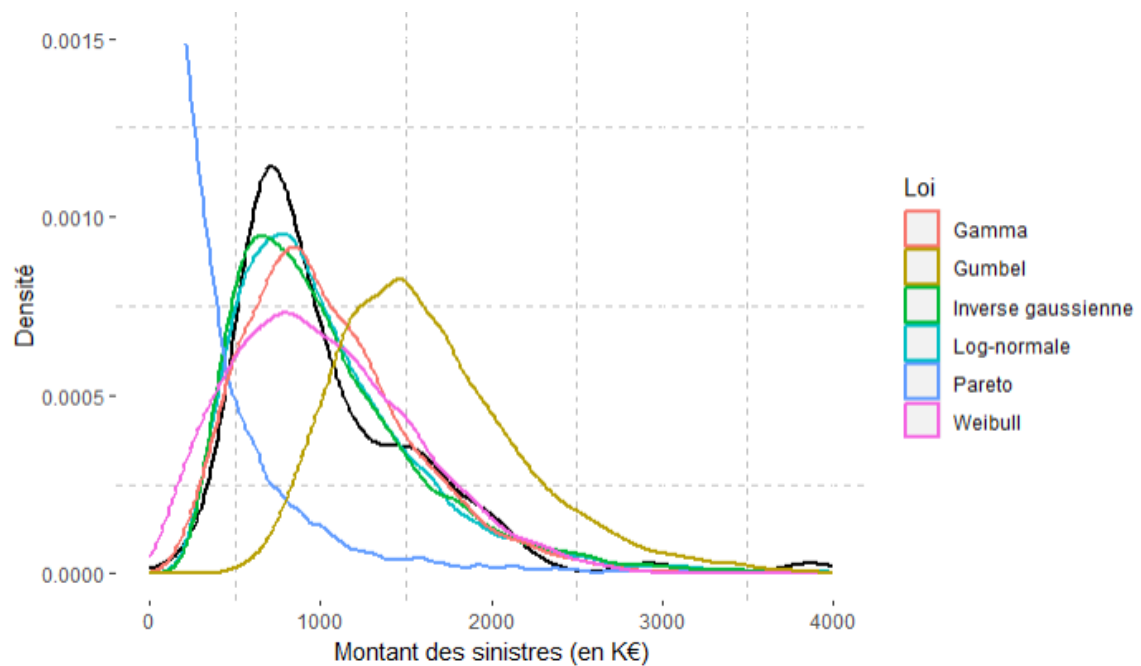


Figure II.26 : Modélisation du coût des sinistres sur le portefeuille exemple

Graphiquement, les distributions **log-normale** et **inverse gaussienne** semblent le mieux convenir aux données du portefeuille exemple. Afin de vérifier cette hypothèse, le test de Kolmogorov Smirnov et la mesure de la distance euclidienne sont réalisés.

Test de Kolmogorov Smirnov

Le **test KS** (Kolmogorov Smirnov) est utilisé pour déterminer si un échantillon suit bien une loi donnée connue par sa fonction de répartition continue.

Soit (X_1, \dots, X_n) un échantillon de variables indépendantes et identiquement distribuées, de même loi X admettant une fonction de répartition F .

Le test mesure l'écart maximum entre la fonction de répartition empirique et la fonction de répartition théorique testée à travers la statistique D_n :

$$D_n = \sup_{x \in \mathbb{R}} |F_{emp}(x) - F_0(x)|$$

avec :

- F_{emp} la fonction de répartition empirique de X
- F_0 une fonction de répartition d'une loi donnée connue

Les hypothèses du test sont les suivantes :

$$\begin{cases} H_0 : F = F_0 \\ H_1 : F \neq F_0 \end{cases}$$

L'échantillon suit la distribution d'une loi donnée si le test donne une **p-value supérieure à 0,05**.

Résultats des tests

Ayant peu de données dans l'extrait du portefeuille, une **simulation** répliquant le test KS mille fois a été effectuée. La **moyenne** des *p-values* obtenues a été retenue.

Distribution	Moyenne des p-value	Distance euclidienne
Log-normale	19,24%	0,46%
Gaussienne inverse	19,95%	0,44%
Pareto	0,00%	18,61%
Gamma	15,11%	0,83%
Weibull	12,46%	0,67%
Gumbel	0,00%	13,89%

Tableau II.27 : Résultats des tests pour la modélisation du coût des sinistres sur le portefeuille exemple

Le tableau II.27 confirme l'hypothèse selon laquelle les distributions log-normale et gaussienne inverse conviennent le mieux à notre échantillon. La distribution choisie pour la suite de l'étude est la **gaussienne inverse** car elle présente une *p-value* plus élevée et une distance euclidienne plus faible.

Modélisation de la fréquence des évènements

N'ayant qu'un historique de sept années, il semble approprié d'utiliser la **loi de distribution de Poisson** en prenant comme paramètre la moyenne des évènements survenus dans le portefeuille, soit $\mathcal{P}(\lambda = 3)$.

En effet, cette loi est souvent utilisée pour modéliser la **fréquence** d'évènements avec une faible probabilité de survenance.

Modélisation des évènements

Enfin, la **charge totale** est modélisée à l'aide d'un **processus de Poisson composé** qui combine à la fois la fréquence et le coût des évènements :

$$T = X_1, \dots, X_N$$

avec :

- T la charge de sinistre totale
- N le nombre de sinistres se produisant durant une année, modélisé par une loi de Poisson
- X_i le montant du $i^{\text{ème}}$ sinistre, modélisé par une loi gaussienne inverse

La simulation est réalisée 10 000 fois afin d'obtenir un grand nombre d'échantillons de sinistres.

2.2.1.3. Avec dérive

La **même démarche** est effectuée pour le scénario incluant une dérive climatique. Les coefficients de dérive de fréquence et de coût, établis respectivement dans les parties 1.1.3.3 et 1.2.2.5 sont introduits.

Afin de montrer l'impact significatif d'une dérive sur un portefeuille non-vie et de mettre en exergue ce phénomène, il a été décidé de choisir la **borne supérieure** pour les hypothèses relatives à la dérive de coût.

Sécheresse	Horizon	Coefficients de dérive
Fréquence	2027	28%
Coût	2027	37,9%

Tableau II.28 : Hypothèses de dérive utilisées pour la modélisation du portefeuille exemple

La simulation a également été réalisée 10 000 fois afin d'obtenir un grand nombre d'échantillons de sinistres.

2.2.1.4. Comparaison des deux scénarios

Une fois que les deux simulations ont été effectuées, la **densité de distribution** des deux scénarios a été tracée afin de pouvoir comparer les résultats et mesurer l'impact de la dérive sur le portefeuille non-vie étudié.

La figure II.27 confirme un effet de la sinistralité sur la distribution des coûts dans le scénario incluant une future dérive climatique. En effet, dans ce scénario, la courbe de distribution est **décalée à droite** en raison d'une augmentation de la moyenne due à une sinistralité plus élevée. De plus, il y'a également un effet de réduction de la dispersion, qui entraîne un **aplatissement** de la courbe de distribution.

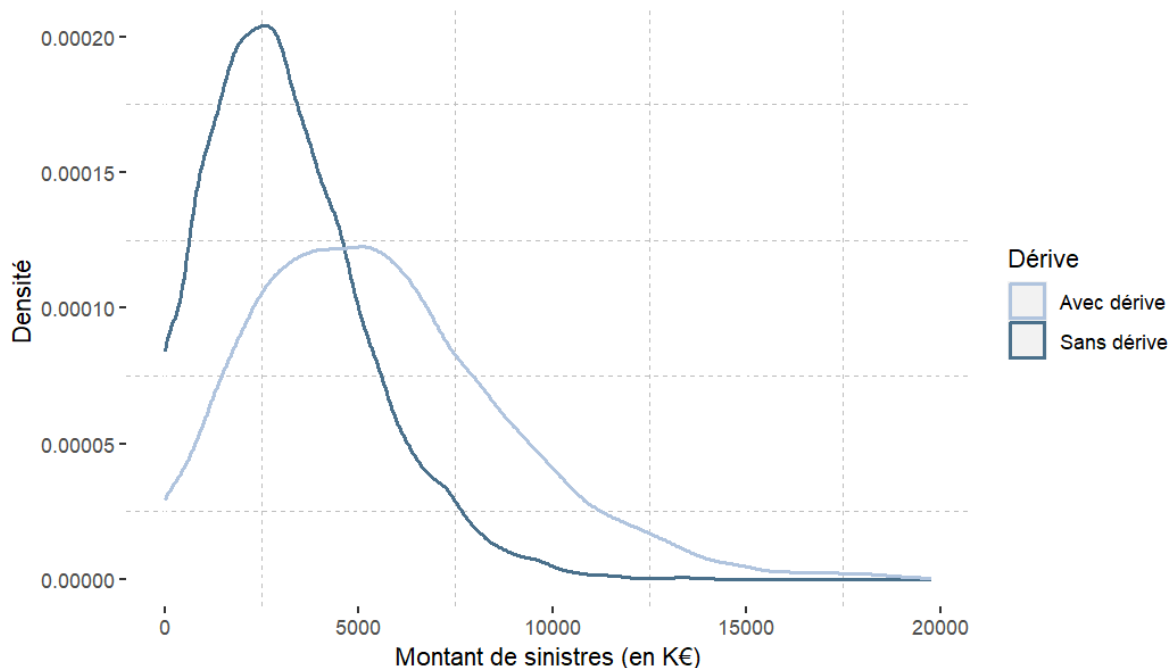


Figure II.27 : Densité de distribution dans les scénarios sans et avec dérive

2.2.2. Application du programme de réassurance

Après avoir observé les effets d'une dérive climatique sur la densité de distribution des sinistres, il est judicieux de s'intéresser à l'**efficacité** du programme de réassurance actuel.

2.2.2.1. Présentation du programme de réassurance actuel

Le programme de réassurance mis en place au sein de la structure combine deux traités de réassurance :

Programme Catastrophes Naturelles		
Quote part	Excédent de sinistre par évènement	
CCR	XL T1	XL T2
50%	<u>Cat Nat.</u>	<u>Cat Nat.</u>
	Priorité: 3 000 000€	Priorité: 7 000 000€
	Portée: 4 000 000€	Portée: 10 000 000€
	Taux 2,50%	Taux 3,50%
	2 Rec à 100%	1 Rec à 200%

Figure II.28 : Programme de réassurance de l'organisme fictif

2.2.2.2. Simulations des évènements à horizon 2027

Le nombre et le montant d'évènements associés a été simulé à partir des paramètres de lois utilisés en 2.2.1. jusqu'à horizon 2027. Les montants obtenus sont **agrégés** par année et présentés au tableau II.29.

Année	Nombre d'évènements dans le scénario sans dérive	Montants des évènements dans le scénario sans dérive (en M€)	Nombre de sinistres dans le scénario avec dérive	Montants d'évènements dans le scénario avec dérive (en M€)
2023	2	2,08	3	3,49
2024	3	2,00	4	3,55
2025	3	2,68	3	6,91
2026	2	2,92	2	5,41
2027	2	1,53	3	5,51

Tableau II.29 : Résultats des simulations à horizon 2027 pour le portefeuille exemple

Une **augmentation** de la fréquence et du coût des évènements est bien observée dans le scénario incluant une dérive climatique.

Néanmoins, les montants des évènements simulés correspondent à des évènements attritionnels, de faible montant et de fréquence élevée. Afin de représenter la sinistralité de l'organisme de manière plus réaliste, il a été décidé d'ajouter une simulation d'évènements graves, caractérisés par des montants importants et une faible fréquence.

Ayant peu de données dans l'échantillon du portefeuille, la calibration d'une loi relative aux évènements graves n'a pas été concluante. Afin de pallier ce problème, la modélisation de ces évènements a été effectuée en se basant sur les 10 000 simulations réalisées en 2.2.1. (voir figure II.27).

Pour la fréquence, il a été décidé de simuler ces évènements une fois maximum dans l'année, soit $\mathcal{P}(\lambda = 1)$ pour le scénario n'incluant pas de dérive climatique, afin de refléter au mieux la sinistralité d'un organisme non-vie. En utilisant les quantiles à 90% et 95%, les évènements dont les montants sont compris dans cet intervalle sont considérés comme graves. Ils sont ensuite générés de manière aléatoire pour chaque évènement.

La même démarche est effectuée pour le scénario avec dérive. Les coefficients de dérive de fréquence et de coût, établis respectivement dans les parties 1.1.3.3 et 1.2.2.5 sont utilisés.

Il est important de noter que cette démarche présente des limites. En effet, elle peut ne pas capturer les caractéristiques de la sinistralité grave dans le portefeuille. Un échantillon de données plus important permettrait de réaliser une simulation plus précise en modélisant de manière séparée les évènements attritionnels et graves.

Année	Nombre d'évènements graves dans le scénario sans dérive	Montants d'évènements graves dans le scénario sans dérive (en M€)	Nombre d'évènements graves dans le scénario avec dérive	Montants d'évènements graves dans le scénario avec dérive (en M€)
2023	0	0,00	1	10,33
2024	1	6,91	2	16,96
2025	1	7,53	1	11,65
2026	1	6,52	1	9,35
2027	2	13,00	1	9,76

Tableau II.30 : Résultats des simulations à horizon 2027 pour les évènements graves

2.2.2.3. *Reste à charge pour l'organisme d'assurance*

On s'intéresse maintenant à l'application du programme de réassurance de la structure pour les deux scénarios modélisés.

Scénario sans dérive de sinistralité

La figure II.29 représente l'application du programme de réassurance par année dans un cadre sans dérive de sinistralité.

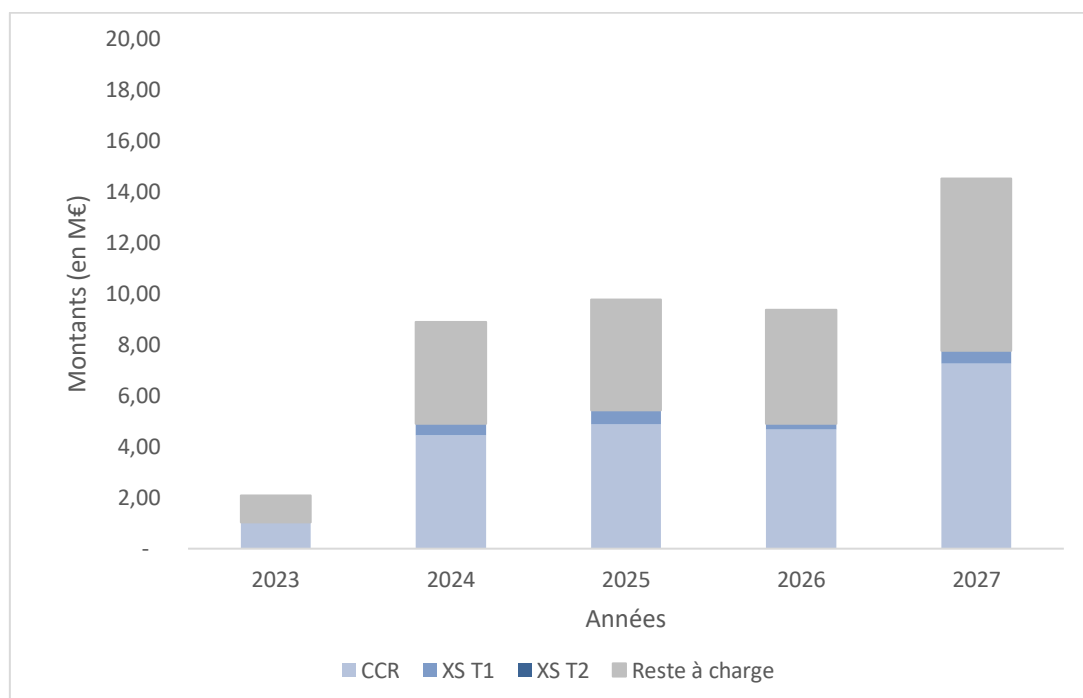


Figure II.29 : Application du programme de réassurance dans le scénario sans dérive

On note une certaine **stabilité** du reste à charge pour l'assureur avec un montant moyen de 4,12 M€. Au terme des cinq ans de projection, le reste à charge cumulé est de 20,60 M€.

Scénario avec dérive de sinistralité

La figure II.30 représente l'application du programme de réassurance par année dans un scénario incluant une dérive climatique future.

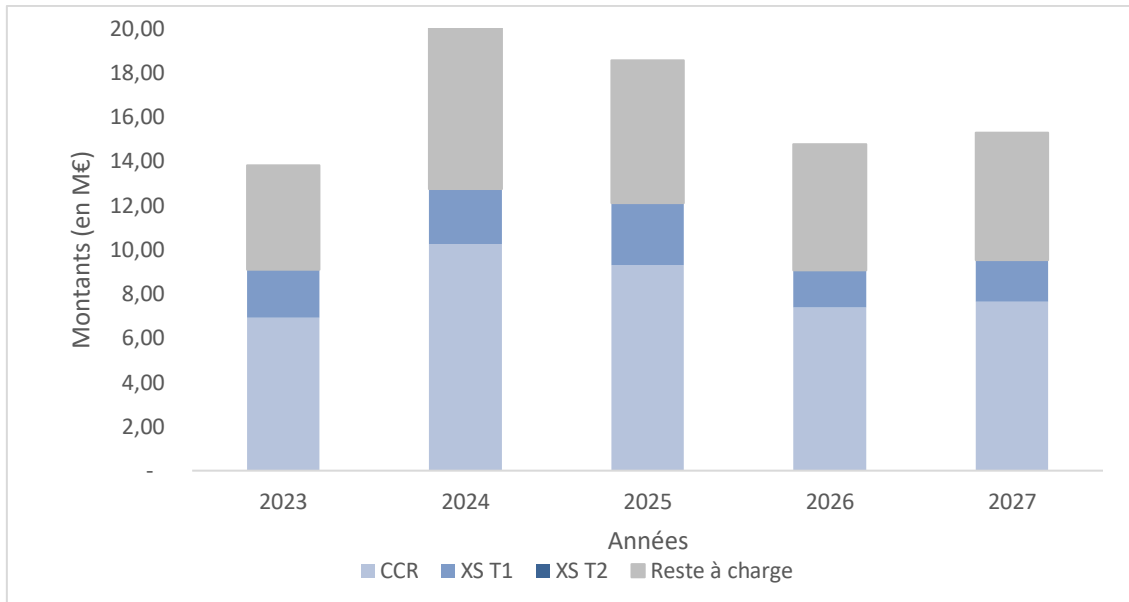


Figure II.30 : Application du programme de réassurance dans le scénario avec dérive

Une **dégradation** du reste à charge pour l'assureur est ainsi constatée avec un passage du montant moyen de 4,12 à 6,09 M€. Le reste à charge cumulé subit une **hausse** de 48%. Ces évolutions laissent penser que le programme de réassurance actuel **n'est plus suffisant** face à une dérive climatique.

2.2.3. Limites de la réassurance face à une dérive de sinistralité

L'étude réalisée dans ce présent mémoire a démontré l'existence d'une dérive de sinistralité future, entraînant une **hausse de la fréquence et des coûts** des sinistres climatiques.

Celle-ci a mis en lumière une **dégradation du reste à charge** pour les organismes d'assurance, mettant en péril leur stabilité financière. La hausse des coûts restants à charge pour la cédante est principalement liée au fait que les traités de réassurance sont calibrés selon une **sinistralité passée** qui n'aura plus la même allure durant les prochaines années.

Il apparaît alors essentiel pour ces organismes d'anticiper cette détérioration à travers une **revue** de leurs programmes de réassurance qui devra prendre en compte la **sinistralité**

future mais aussi le **coût** de ce procédé. Le principal enjeu sera de trouver un **compromis** entre un réassureur qui a tout intérêt à augmenter le prix de sa couverture et une cédante qui cherche à minimiser ses coûts.

2.3. Une dérive des sinistres graves

Cette sous-section s'intéresse à la dérive des **sinistres graves**, accentuée par l'accélération du réchauffement climatique.

La première partie expose les principes de la théorie des valeurs extrêmes et la seconde traite de l'impact de cette dérive sur le portefeuille exemple.

2.3.1. Théorie des valeurs extrêmes

La **théorie des valeurs extrêmes** s'intéresse à l'étude et l'analyse des distributions des observations rares d'une variable aléatoire.

En se plaçant dans le contexte d'une dérive de sinistralité future, cette branche statistique permet de modéliser la distribution des valeurs extrêmes **excédant** un seuil critique. L'objectif étant de montrer que ce seuil est amené à évoluer au fur et à mesure que la sinistralité s'accroît, entraînant in fine, une **dérive des sinistres graves**.

2.3.1.1. Méthode POT (Peaks-Over-Threshold)

L'approche classique pour déterminer à partir de quel seuil un sinistre est considéré comme extrême est la méthode **POT**. En effet, cette technique permet de conserver l'ensemble des valeurs dépassant un certain seuil et étudie la distribution de ces excès.

2.3.1.2. Rappels sur les lois limites des excès

Un **excès** peut se définir comme étant une valeur d'une variable aléatoire qui dépasse un certain seuil critique u .

Etude de la loi des excès

Soit X une variable aléatoire de fonction de répartition F et u un seuil fixé. Les excès de X au-dessus de u sont une variable aléatoire définie sur $\{X > u\}$ tel que :

$$Y_u = X - u$$

La **distribution des excès** au-delà du seuil u est définie par :

$$F_u(x) = \mathbb{P}(X - u \leq x | X > u) = \frac{F(u+x) - F(u)}{1 - F(u)}$$

Famille de lois limites des excès

Loi de Pareto généralisée

La **loi de Pareto généralisée**, appelée aussi GDP (Generalized Pareto Distribution) est caractérisée par trois paramètres :

- μ paramètre de **localisation**
- σ paramètre d'**échelle**
- ξ paramètre de **forme**

Elle est définie par sa fonction de répartition :

$$F_{\mu,\sigma,\xi} = \begin{cases} (1 - (1 + \xi \frac{x - \mu}{\sigma})^{\frac{-1}{\xi}}) \mathbb{1}_{x \in]\mu; \frac{\mu - \sigma}{\xi}[} & \text{si } \xi < 0 \\ (1 - (1 + \xi \frac{x - \mu}{\sigma})^{\frac{-1}{\xi}}) \mathbb{1}_{x \geq \mu} & \text{si } \xi > 0 \\ (1 - \exp(-\frac{x - \mu}{\sigma})) \mathbb{1}_{x \geq \mu} & \text{si } \xi = 0 \end{cases}$$

Théorème de Pickands-Balkema-De Haan

Le **théorème de Pickands** établit un lien essentiel entre le paramètre de la loi GEV et le comportement limite des valeurs excédentaires.

Une fonction de répartition F appartient au domaine d'attraction maximale G_ξ , si et seulement si, il existe une fonction positive σ_t telle que :

$$\lim_{u \rightarrow \infty} F_u(x) = F_{\mu,\sigma,\xi}^{GPD}(x)$$

Autrement dit, lorsque les valeurs au-dessus du seuil proviennent d'une distribution qui appartient à la classe du domaine d'attraction maximale, alors le comportement limite de ces excès suit une loi de Pareto généralisée. Ce théorème assure l'existence des paramètres d'échelle et de forme. La principale difficulté réside dans le **choix du seuil**.

2.3.1.3. Choix du seuil

En choisissant un seuil u adapté, il est possible de reproduire le comportement d'une GDP. L'enjeu est de trouver le bon **compromis** entre le biais et la variance.

En effet, un **seuil trop bas** est susceptible de **transgresser** le modèle asymptotique tandis qu'un **seuil trop élevé** diminue le nombre de valeurs excédentaires avec lesquelles le modèle peut être estimé et entraîne alors une augmentation de la variance et une **baisse de la précision**. Plusieurs méthodes permettent de déterminer ce seuil.

MRL (Mean Residual Life) plot

Il s'agit d'une première méthode **graphique** pour déterminer le seuil u de manière visuelle. Elle est réalisée à partir des simulations effectuées en 2.2.1.3 (voir figure II.27).

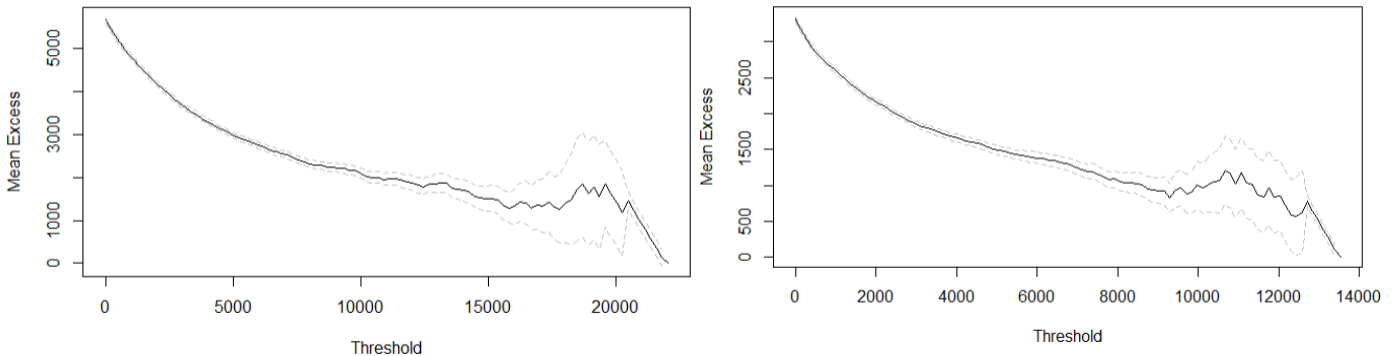


Figure II.31 : Mean residual life plot pour les simulations sans (à gauche) et avec (à droite) dérive

Le point où le « mean excess » se situe à la fin d'une zone de stabilisation est un candidat possible pour le seuil. D'après la figure II.31, on détermine les seuils candidats respectifs $u = 5\,000\text{ K€}$ pour et $u = 8\,000\text{ K€}$ pour les simulations sans et avec dérive de sinistralité du portefeuille exemple.

Quantiles d'une loi de Pareto généralisée

Les **quantiles extrêmes** peuvent être également vus comme des quantiles d'une GPD. Pour cela, il suffit d'inverser l'équation suivante de la GPD :

$$F_{\sigma, \xi}(x) = 1 - \left(1 + \xi \frac{x - u}{\sigma}\right)_+^{-\frac{1}{\xi}} \text{ avec } x > u$$

Le seuil x_m dépassé en moyenne toutes les m observations est donné par :

$$\mathbb{P}(X > x_m) = 1 - \frac{1}{m} \Leftrightarrow x_m = \begin{cases} u + \frac{\sigma}{\xi} ((m\zeta_u)^\xi - 1) & \text{pour } \xi \neq 0 \\ u + \sigma \log(m\zeta_u) & \text{pour } \xi = 0 \end{cases}$$

2.3.1.4. Estimation de l'indice des valeurs extrêmes

Le **paramètre de forme** ξ dans la loi GPD est crucial car il caractérise la queue de la distribution des valeurs extrêmes. Il détermine si la distribution a :

- Une **queue droite épaisse** avec $\xi > 0$
- Une **queue droite fine** avec $\xi < 0$
- Une **queue gauche épaisse** avec $\xi = 0$

2.3.1.5. Estimation des paramètres de la GPD

Une fois le seuil u choisi, il s'agit de déterminer les **paramètres** (μ, σ, ξ) de la distribution des excès, approchée par une GPD.

Estimateur du maximum de vraisemblance

La **log-vraisemblance** d'un échantillon suivant une GPD est donnée par :

$$\begin{cases} \mathcal{L}(Y, \xi, \sigma) = -n \ln(\sigma) - \left(\frac{1}{\xi} + 1\right) \sum_{i=1}^n \left(1 + \frac{\xi}{\sigma} y_i\right) & \text{avec } \xi \neq 0 \\ \mathcal{L}(Y, \sigma) = -n \ln(\sigma) - \frac{1}{\sigma} \sum_{i=1}^n y_i & \text{avec } \xi = 0 \end{cases}$$

avec :

- N le nombre d'excès de l'échantillon
- Y_i les excès indépendants et identiquement distribués

L'équation peut se réécrire en posant $\alpha = \frac{\xi}{\sigma}$:

$$\frac{1}{\alpha} = \frac{1}{n} \left(\frac{1}{\xi(\alpha)} + 1 \right) \sum_{i=1}^n \frac{Y_i}{1 + \alpha Y_i}$$

Il n'existe pas de solution analytique mais une **résolution numérique** permet de résoudre l'équation et d'obtenir l'estimateur du maximum de vraisemblance.

2.3.2. Vers une nouvelle segmentation des attritionnels et des graves

Après avoir brièvement rappelé les principes de la théorie des valeurs extrêmes, cette sous-section évalue **l'impact d'une dérive des sinistres graves** sur le portefeuille exemple.

2.3.2.1. Choix du seuil

Les simulations utilisées dans la partie 2.2.1.4 dans les scénarios sans et avec dérive de sinistralité future sont réutilisées dans cette sous-partie.

Une première idée du seuil u a été établie précédemment à l'aide de **MRL plot**. Une seconde approche reposant sur la **méthode des quantiles** est utilisée pour confirmer cette hypothèse. Un niveau de probabilité à **95%** est choisi.

	Seuil_{MRL} (en K€)	Seuil_{quantile 95%} (en K€)
Scénario sans dérive	6 500	7 038,73
Scénario avec dérive	8 000	11 682,16

Tableau II.31 : Choix du seuil pour le portefeuille exemple

Les seuils établis par la méthode des quantiles sont conservés pour la suite de l'étude en raison de leur précision.

Un **décalage du seuil des graves** est observé dans le scénario incluant une dérive climatique future. Celui-ci s'explique par une augmentation de la fréquence et des coûts des sinistres climatiques.

2.3.2.2. *Estimation des paramètres de la loi des excès*

Les paramètres (μ, σ, ξ) de la distribution des excès, approchée par une GPD, sont estimés à l'aide de la méthode du **maximum de vraisemblance**.

	Paramètre de localisation μ	Paramètre d'échelle σ	Paramètre de forme ξ
Scénario sans dérive	7 038,73	1376,46	-0,06
Scénario avec dérive	11 682,16	2079,21	-0,13

Tableau II.32 : Estimation des paramètres de la distribution des excès sur le portefeuille exemple

Le **paramètre de localisation** représente le point de seuil. Les montants de sinistre au-dessus de cette valeur sont considérés comme des excès. On constate une **hausse** du point de seuil dans le scénario avec dérive.

Le **paramètre d'échelle** quant à lui contrôle l'amplitude des excès. On observe une **augmentation** de ce paramètre dans la modélisation incluant une dérive de sinistralité. Cela signifie que les excès dans ce scénario sont beaucoup plus éloignés du seuil, indiquant la présence d'évènements encore plus intenses dans la distribution.

Enfin, pour le **paramètre de forme**, il est négatif dans les deux scénarios. Il indique une queue de distribution fine à droite, ce qui montre que les sinistres ont une probabilité plus élevée d'avoir un montant conséquent. Le paramètre **augmente** lorsqu'on se place dans un cadre avec dérive de sinistralité. Cela signifie que les montants des sinistres dans ce scénario ont une probabilité plus élevée de prendre des valeurs très élevées que dans le scénario sans dérive.

L'augmentation du paramètre de forme dans le scénario avec évolution de la sinistralité illustre parfaitement **l'effet** de la dérive des graves. En effet, celle-ci contribue à **épaissir** la queue de distribution à droite et montre que les évènements extrêmes deviennent **plus fréquents**. En d'autres termes, les sinistres graves d'hier ne sont pas nécessairement les mêmes que ceux de demain.

2.3.2.3. *Distribution des excès*

La représentation graphique de la **distribution des excès** dans les deux scénarios est illustrée à la figure II.32.

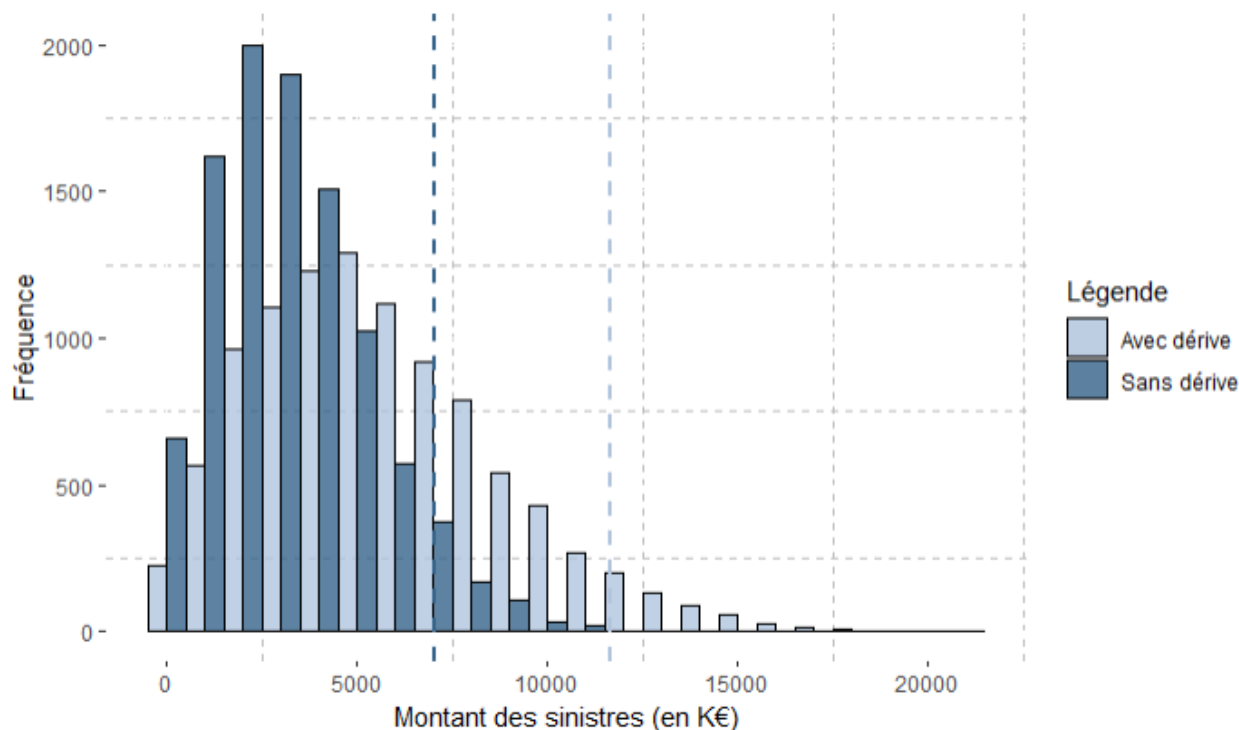


Figure II.32 : Distribution des excès dans les deux scénarios sur le portefeuille exemple

Les traits en pointillés représentent le **seuil** des sinistres graves pour les deux scénarios. On observe un **décalage** du seuil, qui entraîne une différence de positionnement de la queue de distribution.

Finalement, l'accélération du réchauffement climatique provoque une dérive de sinistralité marquée par une augmentation de la fréquence et de l'ampleur des catastrophes naturelles. Celle-ci peut entraîner une **nouvelle segmentation des sinistres** pour les assureurs, avec des évènements attritionnels et graves qui se produisent à des **fréquences ou des intensités différentes** par rapport aux schémas passés.

En d'autres termes, des montants de sinistre considérés auparavant comme des graves pourront après dérive être considérés comme attritionnels. Cette situation entraîne ainsi une réévaluation et une reclassification des sinistres. Les organismes d'assurance doivent prendre en compte cette **nouvelle réalité** et revoir leur **stratégie** afin de maintenir la viabilité de leur activité. En effet, si le réassureur décide d'augmenter ses seuils, l'assureur doit réfléchir à des mesures pour s'adapter comme l'ajustement des primes, l'amélioration des modèles ou encore le développement de partenariats avec d'autres cédantes pour garantir la stabilité de leur activité.

3. Conclusion : une dérive de sinistralité grandissante et une réassurance à revoir

Le présent chapitre a permis de proposer une démarche afin de modéliser l'évolution de la sinistralité due au changement climatique ainsi que les impacts potentiels en résultant pour un organisme d'assurance.

Une régression logistique a été réalisée à l'aide de données en *open data* afin de modéliser la fréquence de survenance des catastrophes naturelles liée aux risques d'inondation et de sécheresse en France. Les paramètres météorologiques du modèle ont ensuite été projetés à l'aide de séries temporelles afin de refléter de manière réaliste l'évolution future des conditions climatiques. Les prédictions du modèle ont permis de quantifier une dérive de sinistralité en fréquence à court terme. Pour la dérive en coût, un benchmark d'articles assurantiels traitant de l'évolution du coût des sinistres dû au réchauffement climatique a été réalisé.

Le second objectif de cette partie était d'évaluer les limites de cette dérive sur un portefeuille non-vie afin de mettre en évidence les difficultés auxquelles les assureurs pourraient être confrontés pour assurer la pérennité de leurs activités. La réassurance, utilisée comme technique d'atténuation du risque apparaît alors limitée. En effet, une dégradation du reste à charge pour la cédante est observée. Celle-ci a tout intérêt à revoir ses programmes en prenant en compte la sinistralité future et le coût de cette démarche. D'autre part, la dérive provoque un décalage du seuil des sinistres graves et un allègement de la queue de distribution. De ce fait, la définition actuelle de sinistres graves est destinée à évoluer. Les assureurs doivent tenir compte de cette nouvelle réalité pour assurer la viabilité de leur activité.

Ainsi, les différents organismes d'assurance se posent la même question, à savoir, **quelles solutions réalistes peuvent être mises en œuvre pour maintenir son activité face au défi climatique ?**

III. Cas pratique, impacts et solutions

Le précédent chapitre a permis de démontrer l'existence d'une dérive de sinistralité future pour les organismes d'assurance. Les résultats obtenus traduisent une augmentation de la fréquence et des coûts des sinistres climatiques, liée à l'accélération du réchauffement climatique. Ce phénomène met en exergue plusieurs limites. D'une part, l'efficacité des programmes de réassurance actuels est remise en question. De l'autre, la définition de sinistres « graves » est amenée à évoluer. De ce fait, les assureurs doivent prendre en considération cette nouvelle réalité et réévaluer leur approche et leur stratégie pour pérenniser leur activité.

Ce dernier chapitre a pour objectif d'illustrer de manière concrète l'impact d'une dérive de sinistralité future sur un assureur non-vie fictif à travers une **projection ORSA**. Diverses **solutions réalistes** seront proposées afin de maintenir l'activité face au défi climatique.

1. L'organisme d'assurance non-vie fictif étudié : Climatia

Il s'agit dans cette section de présenter l'organisme d'assurance non-vie étudié, appelé Climatia. Cette présentation inclut un rappel des **chiffres clés** caractérisant l'entité, ainsi que la projection prospective de son activité à travers une **approche ORSA**.

1.1. Présentation de l'organisme

Les données utilisées pour la création de l'organisme sont extraites de **données réelles** fournies par Actuelia, mais qui ont été rendues **anonymes** pour respecter la politique de confidentialité instaurée par le cabinet. Par conséquent, il est possible de considérer l'organisme comme étant **fictif**.

1.1.1. Le contrat de Climatia

Climatia aspire à représenter fidèlement la réalité du secteur des **compagnies d'assurances non-vie** commercialisant plusieurs types de contrats (Automobile, Santé, Habitation, Accidents de la Vie).

Ligne d'activité	Type de contrat	Lob
Responsabilité civile automobile	Contrats automobiles – Garantie de responsabilité civile Contrats automobiles – Autres garanties	4
Automobile autres	Contrats individuels de dommages corporels Garanties des catastrophes naturelles Contrats de protection juridique	5

Dommages aux biens	Contrats de dommage aux biens des particuliers	7
	Contrats de dommage aux biens des professionnels	
	Contrats de dommage aux biens agricoles	
	Garantie des catastrophes naturelles	
Responsabilité civile	Contrats de responsabilité civile générale	8
Protection juridique	Contrats de protection juridique	10
Santé	Santé	1
Pertes pécuniaires	Contrats de pertes pécuniaires	12

Tableau III.1 : Les différents contrats commercialisés par Climatia

L'analyse repose exclusivement sur la couverture de « **Dommage aux biens** » représentant **43%** du portefeuille, avec une attention particulière portée aux **sinistres climatiques** liés au péril « **Sécheresse** ». Toutefois, il est important d'exercer une vigilance à l'égard des résultats observés dans la suite du mémoire, qui sont susceptibles de varier avec d'autres organismes d'assurance.

1.1.2. Situation comptable au 31/12/2022

Les éléments qui suivent fournissent une vue simplifiée du bilan comptable ainsi que du compte de résultat pour l'exercice 2022.

1.1.2.1. Compte de résultat technique non-vie

L'exercice 2022 a été marqué pour Climatia par **une sinistralité climatique exceptionnelle** de 13,32 M€ principalement en lien avec le risque de sécheresse. En effet, cette année est désignée comme ayant été la plus chaude jamais enregistrée en France selon les spécialistes. Cette situation a entraîné la survenue de 2845 arrêts ainsi que 3 événements générateurs de sinistres (voir figure II.5).

Poste	Montant (en k€)
Cotisations brutes	33 979
Cotisations nettes	17 651
Charge de prestations brute	19 566
Charge de prestations nette	12 572
Frais	6 898
Commissions de réassurance	2 063
Autres produits techniques	0
Résultat technique non-vie net	-1 014

Tableau III.2 : Compte de résultat technique non-vie

Ainsi, le résultat technique non-vie a diminué en 2022 en raison de cette sinistralité atypique. Avec un réchauffement climatique croissant, Climatia se **questionne** alors sur la **viabilité** de son activité face à cette situation.

1.1.2.2. Compte de résultat non technique

Les investissements de l'entité conduisent à un **résultat non technique** de 309 k€, grâce à un bénéfice financier de 1 267 k€.

Poste	Montant (en k€)
Résultat technique non-vie net	-1 014
Résultat financier	1 267
Autres produits non techniques	0
Autres charges non techniques	0
Résultat exceptionnel	56
Impôt	0
Résultat net	309

Tableau III.3 : Compte de résultat non technique

1.1.2.3. Bilan comptable

Le **bilan comptable** de Climatia au 31/12/2022 est illustré à travers les tableaux III.4 et III.5. Le montant total s'élève à 90 138 k€.

Actif	Montant (en k€)
Placements	31 883
Provisions cédées non-vie	31 430
Créances	8 185
Autres actifs	18 640
Total Actif	90 138

Tableau III.4 : Actif

Passif	Montant (en k€)
Fonds propres comptables	19 047
Provisions	62 133
Autres dettes	8 958
Total Passif	90 138

Tableau III.5 : Passif

1.1.3. Situation prudentielle au 31/12/2022

Après avoir rappelé la situation comptable de Climatia pour l'exercice 2022, il s'agit désormais de s'intéresser à **l'évaluation de la solvabilité** de l'organisme au 31/12/2022.

Celle-ci est traitée dans le Pilier 1 de la Directive Solvabilité II visant à calculer le montant des capitaux propres économiques de Climatia après avoir passé les actifs et les passifs en valeur économique. Les deux niveaux d'exigences réglementaires, MCR et SCR, sont également définis.

1.1.3.1. *Bilan prudentiel*

Le **bilan prudentiel** de Climatia au 31/12/2022 est établi en utilisant le bilan comptable comme base, auquel des ajustements sont apportés.

Poste	Montant (en k€)
Valeur de marché de placements	34 992
Impôts différés actif	827
Best Estimate cédé Non-Vie	32 242
Best Estimate cédé Vie	0
Créance	8 185
Trésorerie	23 274
Autres actifs	207
Impôts différés passif	1 548
Best Estimate Non-Vie	52 061
Risk Margin	2 000
Autres provisions	219
Dettes et autres dettes	8 058
Dépôt des réassureurs	8 608
Fonds propres économiques	27 233
Fonds propres éligibles (yc passifs subordonnés)	27 233

Tableau III.6 : Bilan prudentiel

Les **actifs** sont comptabilisés en valeur de marché. Les **provisions**, au passif, sont estimées à leur meilleure estimation : le *Best Estimate*. De plus, l'organisme comptabilise un **impôt différé passif**, signifiant que le *Best Estimate* est inférieur aux provisions comptables. Climatia doit alors de l'argent à l'Etat. Enfin, les **fonds propres économiques** sont obtenus par différence entre l'actif et le passif économique.

1.1.3.2. SCR et ratios de couverture

Le tableau III.7 synthétise les résultats obtenus à l'issue du Pilier 1 pour l'exercice 2022. Au 31/12/2022, le **montant de SCR** de Climatia est de 13,43 M€, composé principalement du SCR Non-Vie et du SCR Marché.

Au 31/12/2022, les **ratios de couverture** du SCR et du MCR s'élèvent respectivement à 203% et 736%.

SCR	13 425 528
BSCR	12 595 108
SCR Vie	0
SCR Non-Vie	8 337 093
SCR Santé	82 375
SCR Marché	5 037 500
SCR Contrepartie	3 050 085
Opérationnel	1 543 626
Ajustement	-713 206
Fond propres	27 232 640
Ratio SCR	203%
Ratio MCR	736%

Tableau III.7 : Résultats du Pilier 1 au 31/12/2022

1.1.4. Présentation du programme de réassurance

Climatia possède de nombreux **traités de réassurance**, en raison de ses différentes lignes d'activité.

1.1.4.1. Programme de réassurance des garanties de catastrophes naturelles (Lob 7)

Dans le cadre du présent mémoire, une attention particulière est accordée au programme de réassurance des **garanties de catastrophes naturelles** pour la Lob n°7 « Dommages aux biens », qui a déjà été présenté dans le chapitre 2 (voir figure II.28).

En reprenant la simulation qui a été réalisée 10 000 fois afin d'obtenir un grand nombre d'échantillons de sinistres dans le précédent chapitre (voir figure II.27), il est intéressant de regarder à quel **niveau de probabilité** se situe le programme de réassurance actuel, notamment pour la partie **non-proportionnelle**, après cession en quote-part.

Une priorité à 3 M€ et un plafond à 10 M€ correspondent respectivement aux quantiles à 90% et 100%. Autrement dit, toute la queue de distribution à droite est prise en compte par le traité de réassurance actuel.

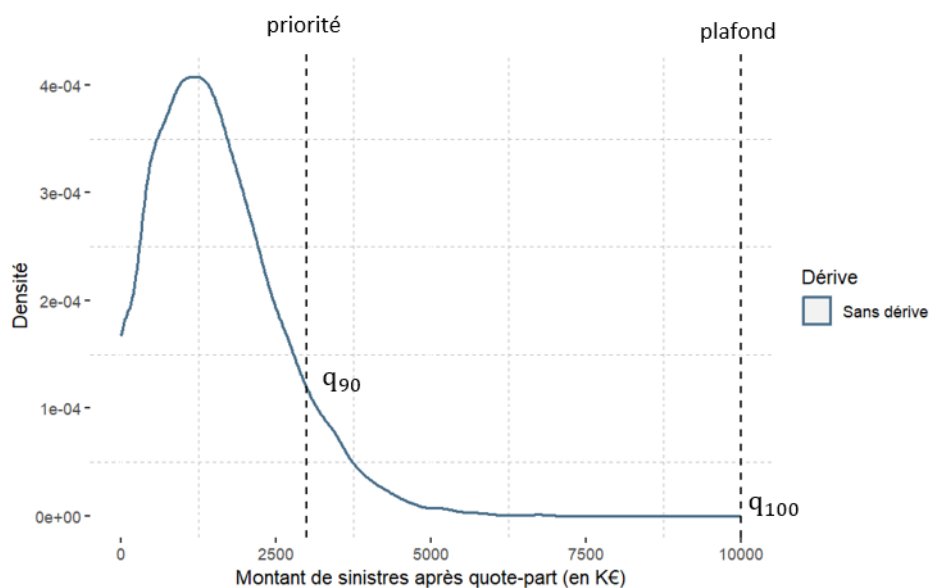


Figure III.1 : Excédent de sinistre après quote-part dans le scénario sans dérive

1.1.4.2. Programmes de réassurance des autres lignes d'activité

Pour les autres traités, des hypothèses de **taux de cession de primes et sinistres** sont établies par le Conseil d'Administration de Climatia et détaillées dans les tableaux III.8 et III.9.

Ligne d'activité	Taux de cession des primes en 2022
Responsabilité civile automobile	51,2%
Automobiles Autres	45,8%
Domages aux biens	51,8%
Responsabilité civile	40,4%
Protection juridique	63,7%
Santé	7,0%
Pertes pécuniaires	24,5%

Tableau III.8 : Taux de cession des primes en 2022

Ligne d'activité	Taux de cession des sinistres en 2022
Responsabilité civile automobile matérielle	67,1%
Responsabilité civile automobile corporelle	80,5%
Automobile Autres – Domages aux biens	81,0%
Automobiles Autres – Catastrophe naturelle	100%
Automobile Autres – Protection juridique	0,0%
Domages aux biens hors CatNat	38,7%
Catastrophe naturelle	65,7%
Responsabilité civile	18,6%
Protection juridique	0,0%
Santé	0,0%
Pertes pécuniaires	0,0%

Tableau III.9 : Taux de cession des sinistres en 2022

1.2. Projection de l'activité de Climatia

Comme mentionné précédemment, Climatia se questionne quant à la durabilité de son activité à mesure que les changements climatiques s'intensifient. Il s'agit alors dans cette partie d'étudier la projection de l'activité de l'organisme à travers une **approche ORSA**.

Le choix des **hypothèses** de prévision ainsi que les **résultats** obtenus pour le scénario central n'incluant pas de dérive de sinistralité sont explicités.

1.2.1. Choix des hypothèses de projection ORSA

L'objectif d'une approche ORSA est d'évaluer la pertinence de la **stratégie** de l'organisme tout en vérifiant le maintien des **exigences de solvabilité**. Un *business plan* sur 5 ans a été élaboré par le Conseil d'Administration de Climatia en projetant les différents indicateurs.

1.2.1.1. Croissance du chiffre d'affaires

Une **croissance du chiffre d'affaires** de 2% est retenue pour les cinq années de projection sur toutes les lignes d'activité à l'exception de « Dommage aux biens ».

Une hypothèse d'évolution de 10% est retenue pour celle-ci afin de faire face à l'augmentation des sinistres climatiques.

Ligne d'activité	2022	2023	2024	2025	2026	2027
Responsabilité civile automobile	8 819 k€	2,0%	2,0%	2,0%	2,0%	2,0%
Automobile autres	8 608 k€	2,0%	2,0%	2,0%	2,0%	2,0%
Dommages aux biens	14 996 k€	10%	10%	10%	10%	10%
dont catastrophe naturelle	1586 k€	10%	10%	10%	10%	10%
Responsabilité civile	1 505 k€	2,0%	2,0%	2,0%	2,0%	2,0%
Protection juridique	483 k€	2,0%	2,0%	2,0%	2,0%	2,0%
Santé	424 k€	2,0%	2,0%	2,0%	2,0%	2,0%
Pertes pécuniaires	254 k€	2,0%	2,0%	2,0%	2,0%	2,0%

Tableau III.10 : Hypothèse d'évolution des primes acquises brutes

1.2.1.2. Evolution des S/P

Les hypothèses de **ratio S/P** à l'ultime établies dans le cadre des calculs des *Best Estimate* de sinistres sont utilisés pour la projection de la sinistralité brute de Climatia. Ils concernent les sinistres attritionnels.

Ligne d'activité	Ligne d'activité	2022	2023	2024	2025	2026	2027
Responsabilité civile automobile	Matériel	75,4%	75,4%	75,4%	75,4%	75,4%	75,4%
	Corporel	139,2 %	139,2 %	139,2 %	139,2 %	139,2 %	139,2 %
Automobile Autres	Dommages	86,5%	98,5%	56,7%	73,2%	73,2%	73,2%
	Catastrophe naturelle	31,1%	98,5%	56,7%	73,2%	73,2%	73,2%
	Protection juridique	0,0%	98,5%	56,7%	73,2%	73,2%	73,2%
Dommages aux biens	Dommages	52,2%	69,0%	64,3%	65,3%	65,3%	65,3%
	Catastrophe naturelle	76,9%	69,0%	64,3%	65,3%	65,3%	65,3%
Responsabilité civile	Responsabilité civile	46,1%	69,0%	69,0%	69,0%	69,0%	69,0%
Protection juridique	Protection juridique	3,0%	64,3%	64,3%	64,3%	64,3%	64,3%
Santé	Santé	68,7%	40,0%	40,0%	40,0%	40,0%	40,0%
Pertes pécuniaires	Pertes pécuniaires	0,0%	14,8%	14,8%	14,8%	14,8%	14,8%

Tableau III.11 : Hypothèse d'évolution des S/P

Les ratios se détériorent en 2023 en raison du développement de l'activité sauf pour la Lob « Santé » qui est réduite. Sur le reste des années de projections, les ratios se stabilisent et reviennent à des niveaux plus historiques.

Enfin, la modélisation des sinistres climatiques de Climatia qui a été réalisée dans le précédent chapitre (voir tableau II.29 et II.30) est intégrée dans l'outil ORSA.

1.2.1.3. Taux de cession des primes

En ce qui concerne les primes, le **taux de cession** correspond au taux de cession comptable.

Afin de renforcer sa protection en réassurance, Climatia met en place un **nouveau plan de réassurance**.

De ce fait, dès 2023, le taux de cession des primes augmente pour la Lob « Dommage aux biens ». Les lignes d'activité « Santé », « Protection juridique » et « Pertes pécuniaires » ne sont plus intégrées dans le nouveau programme de réassurance de l'organisme.

Ligne d'activité	2022	2023	2024	2025	2026	2027
Responsabilité civile automobile	51,2%	51,2%	51,2%	51,2%	51,2%	51,2%
Automobile Autres	83,9%	83,9%	83,9%	83,9%	83,9%	83,9%
Dommages aux biens	51,8%	57,5%	57,5%	57,5%	57,5%	57,5%
Responsabilité civile	40,4%	40,4%	40,4%	40,4%	40,4%	40,4%
Protection juridique	63,7%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Santé	7,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%

Pertes pécuniaires	24,5%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
---------------------------	-------	------	------	------	------	------

Tableau III.12 : Hypothèse d'évolution du taux de cession des primes global

1.2.1.4. Taux de cession des sinistres

Pour les sinistres, le **taux de cession** appliqué est celui utilisé pour calculer les Best Estimate de sinistres cédés. L'évolution du programme de réassurance est également visible sur l'évolution du taux de cession des sinistres.

Ligne d'activité	2022	2023	2024	2025	2026	2027
Responsabilité civile automobile matérielle	67,1%	67,1%	67,1%	67,1%	67,1%	67,1%
Responsabilité automobile corporelle	80,5%	80,5%	80,5%	80,5%	80,5%	80,5%
Automobile Autres - Dommages aux biens	87,9%	87,9%	87,9%	87,9%	87,9%	87,9%
Automobile Autres - Catastrophe naturelle	87,9%	87,9%	87,9%	87,9%	87,9%	87,9%
Automobile Autres - Protection juridique	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Dommages aux biens hors catastrophe naturelle	38,7%	41,2%	41,2%	41,2%	41,2%	41,2%
Catastrophe naturelle	58,9%	65,7%	65,7%	65,7%	65,7%	65,7%
Responsabilité civile	41,2%	41,2%	41,2%	41,2%	41,2%	41,2%
Protection juridique	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Santé	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Pertes pécuniaires	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%

Tableau III.13 : Hypothèse d'évolution du taux de cession des sinistres

1.2.1.5. Frais

Les taux de frais **d'acquisition/administration** et de **sinistres** représentent respectivement 20% des cotisations et 2% et sont considérés constants sur l'ensemble de la période de projection.

1.2.1.6. Allocation d'actifs

Climatia a mis en place une nouvelle politique de placements, à travers une nouvelle **allocation d'actifs** dès 2023. L'organisme prévoit de ne plus posséder de titres structurés. Une baisse de la part d'actions et une augmentation de la part d'obligations est également prévue.

Allocation d'actifs (valeur S1)	2022	2023	2024	2025	2026	2027
Immobilisations corporelles usage propre	24,0%	24,0%	24,0%	24,0%	24,0%	24,0%
Biens immobiliers	76,0%	76,0%	76,0%	76,0%	76,0%	76,0%
Actions – cotées	6,2%	3,0%	3,0%	3,0%	3,0%	3,0%
Actions – non cotées	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%
Obligations d'État	10,7%	10,7%	10,7%	10,7%	10,7%	10,7%
Obligations d'entreprise	47,1%	60,0%	60,0%	60,0%	60,0%	60,0%

Titres structurés	2,6%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Organismes de placement collectif	9,5%	4,0%	4,0%	4,0%	4,0%	4,0%
Dépôts autres que les équivalents de trésorerie	23,9%	22,2%	22,2%	22,2%	22,2%	22,2%
Produit des placements	5,5%	3,0%	3,0%	3,0%	3,0%	3,0%

Tableau III.14 : Hypothèse d'allocation d'actifs

1.2.2. Scénario central n'incluant pas la dérive climatique

Une fois que les différentes hypothèses de projection ont été définies, il s'agit maintenant de projeter l'activité de Climatia selon un scénario central, n'incluant pas de dérive de sinistralité.

1.2.2.1. Projection de la rentabilité

Pour établir la projection de la **rentabilité**, les hypothèses du *Business Plan* sont utilisées pour étendre les éléments comptables liés aux primes et aux frais.

Ratio S/P

Le **ratio S/P** permet de mesurer la rentabilité d'une entreprise. Un ratio élevé indique que l'organisme ne garde qu'une faible proportion des primes, le reste étant dépensé pour couvrir les sinistres. Il peut également indiquer une mauvaise gestion des risques.

	2022	2023	2024	2025	2026	2027
S/P brut	46%	57%	84%	85%	80%	94%
S/P net	86%	65%	100%	100%	97%	112%

Tableau III.15 : Projection du S/P pour la Lob 7 en scénario central

Tout au long de la projection, le ratio S/P brut de la Lob 7 est plutôt stable avec un **S/P moyen** de **80%**. Il est beaucoup plus bas en 2023 en raison d'une très faible sinistralité de 2,08 M€. Il augmente en 2025 et 2027 à cause de montants d'indemnisation élevés de 9,76 M€ et 14,53 M€.

Résultat de l'assureur

L'**augmentation des cotisations** en 2023 est principalement due au développement par Climatia de ses activités. Cette augmentation continue sur tout l'horizon de projection

tandis que le résultat net augmente du fait de la modification de la réassurance. La **diminution du résultat net** en 2025 et 2027 s'explique également par une sinistralité climatique élevée. Il est beaucoup plus élevé en 2023 en raison d'une très faible sinistralité climatique de 2,08 M€.

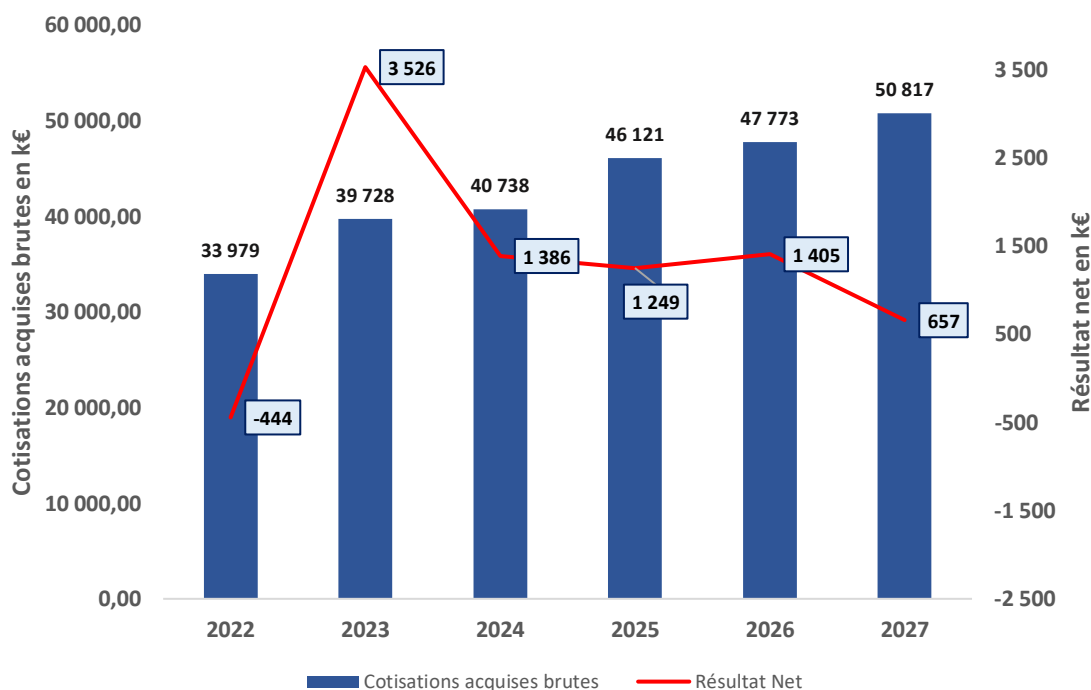


Figure III.2 : Evolution des cotisations acquises brutes et du résultat net en scénario central

1.2.2.2. Projection des indicateurs de solvabilité

La dernière étape de l'exercice ORSA consiste à vérifier le **respect permanent des exigences réglementaires**. Celle-ci est effectuée à travers la projection des indicateurs de solvabilité.

Les SCR Santé et Non-Vie sont déterminés conformément au Règlement Délégué de la Directive Solvabilité II. Ces calculs intègrent à la fois les projections des primes nettes ainsi que les estimations des provisions *Best Estimate* pour les sinistres nets. Le SCR Opérationnel est également calculé conformément à la Directive.

Une approche simplifiée a été adoptée pour le calcul des SCR Marché et Contrepartie. Leur calcul est proportionnel à l'évolution de la valorisation économique des placements et des autres actifs. Quant au SCR Ajustement, il correspond aux impôts différés passifs projetés.

La **diminution du SCR** en 2023 s'explique par la **baisse importante du SCR Marché** résultant de la modification de l'allocation d'actifs des placements financiers et notamment la cession de la plupart des titres structurés. Elle est également expliquée par une **diminution du SCR Contrepartie** en raison de l'arrêt du programme de réassurance sur certaines lignes d'activité. Le **SCR Non-Vie baisse** également.

Une **hausse du SCR** est attendue pour le reste des années de projection principalement due à l'augmentation de la sinistralité et du SCR Non-Vie.

D'autre part, une **baisse des fonds propres économiques** est constatée en 2023 en raison d'une chute des provisions. Celle-ci s'explique par la **liquidation** des provisions restantes sur les sinistres et par la faible sinistralité observée. Une **augmentation** des fonds propres économiques est attendue pour le reste de la projection.

en k€	2022	2023	2024	2025	2026	2027
SCR Marché	5 038	4 523	4 893	5 086	5 222	5 300
SCR Contrepartie	3 050	2 624	2 931	3 012	3 025	3 002
SCR Vie	0	0	0	0	0	0
SCR Santé	82	100	102	104	107	109
SCR Non-Vie	8 337	7 850	7 947	8 664	8 922	9 386
BSCR	12 595	11 559	12 084	12 894	13 216	13 664
SCR Opérationnel	1 544	1 314	1 533	1 572	1 570	1 551
Ajustement	-713	0	0	0	0	0
SCR	13 426	12 873	13 617	14 466	14 787	15 215
MCR	3 700	4 000	4 000	4 000	4 000	4 000
Fond propres économiques	27 233	27 303	29 070	30 472	31 987	32 737
Ratio de couverture du SCR	203%	212%	213%	211%	216%	215%
Ratio de couverture du MCR	736%	683%	727%	762%	800%	818%

Tableau III.16 : Projection des indicateurs de solvabilité en scénario central

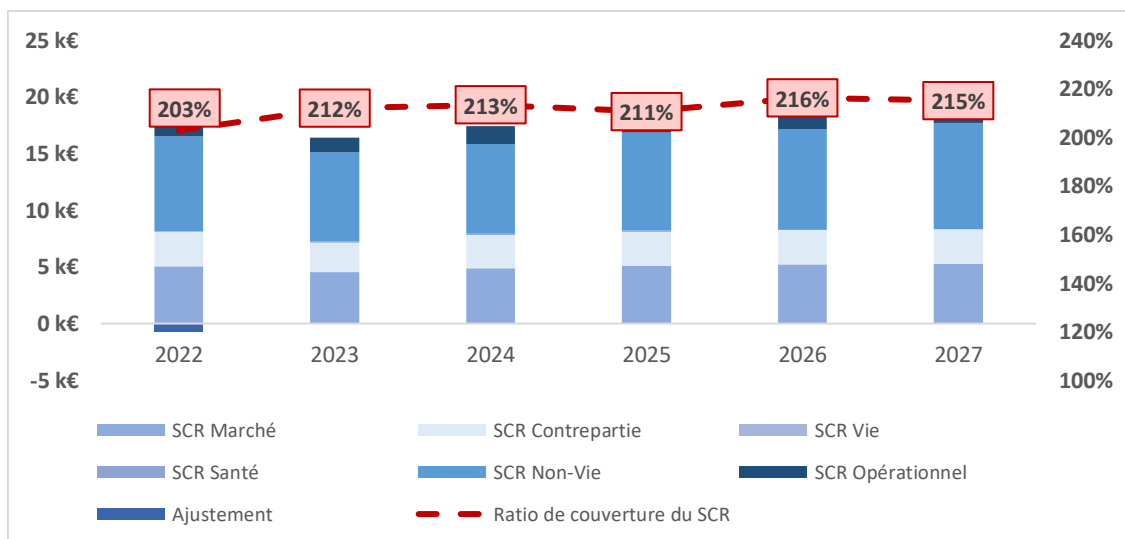


Figure III.3 : Evolution du ratio de couverture du SCR en scénario central

Par conséquent, en 2023 les fonds propres économiques baissent tandis que le SCR diminue encore plus. De ce fait, le **ratio de solvabilité augmente**, passant de 203% en 2022 à

212% en 2023. La hausse du ratio se **stabilise** sur le reste de la projection à l'exception des années 2025 et 2027 où une légère baisse est observée. Celle-ci s'explique par une **sinistralité climatique exceptionnelle** de 9,76 M€ et 14,53 M€.

1.2.3. Stress-test incluant la dérive climatique

Les résultats obtenus dans le chapitre précédent indiquent une augmentation de la fréquence et des coûts d'indemnisation des sinistres climatiques. Ils traduisent l'existence d'une **dérive de sinistralité future** pour les assureurs.

Après avoir obtenu un résultat technique plutôt dégradé sur l'année 2022 en raison de la survenance d'une sinistralité climatique importante, Climatia se questionne quant à la pérennité de son activité face à la dérive climatique.

Afin d'évaluer les conséquences de cette évolution, un *stress-test* est réalisé le but d'étudier **l'impact de ce scénario** sur la rentabilité et solvabilité de l'organisme à moyen terme.

1.2.3.1. *Hypothèses du stress-test*

Pour cela, l'approche ORSA est réitérée. Les hypothèses sont conservées à l'exception de la **projection de la sinistralité climatique** et des **coûts de réassurance**.

Modélisation des événements climatiques dans un scénario de dérive

Pour rappel, la simulation des événements dans un scénario incluant une dérive de sinistralité a été réalisée dans le précédent chapitre.

La **charge totale** des événements climatiques a été modélisée en utilisant un processus de Poisson composé. Le modèle intègre à la fois la fréquence des événements et leurs coûts, qui sont respectivement représentés par une distribution de Poisson et une distribution gaussienne inverse.

Les **coefficients de dérive**, définis respectivement dans les sections 1.1.3.3 et 1.2.2.5, ont été introduits. Afin d'accentuer le phénomène de dérive, la borne supérieure a été choisie pour les hypothèses relatives à la dérive de coût. Les coefficients sont fixés à **28%** pour l'évolution de la **fréquence** et **37,9%** pour l'augmentation des **coûts** d'indemnisation.

Une hausse de la fréquence et du coût des événements est bien observée dans le scénario incluant une dérive climatique. Le lecteur est invité à se référer aux tableaux II.29 et II.30 pour une vision plus détaillée des résultats des simulations.

Augmentation des coûts de réassurance

La dérive de sinistralité est caractérisée par une augmentation de la fréquence et des coûts d'indemnisation des événements climatiques. De ce fait, les réassureurs ont tout intérêt à **augmenter les tarifs de leur couverture** non-proportionnelle puisqu'ils vont prendre en charge des risques encore plus fréquents et coûteux.

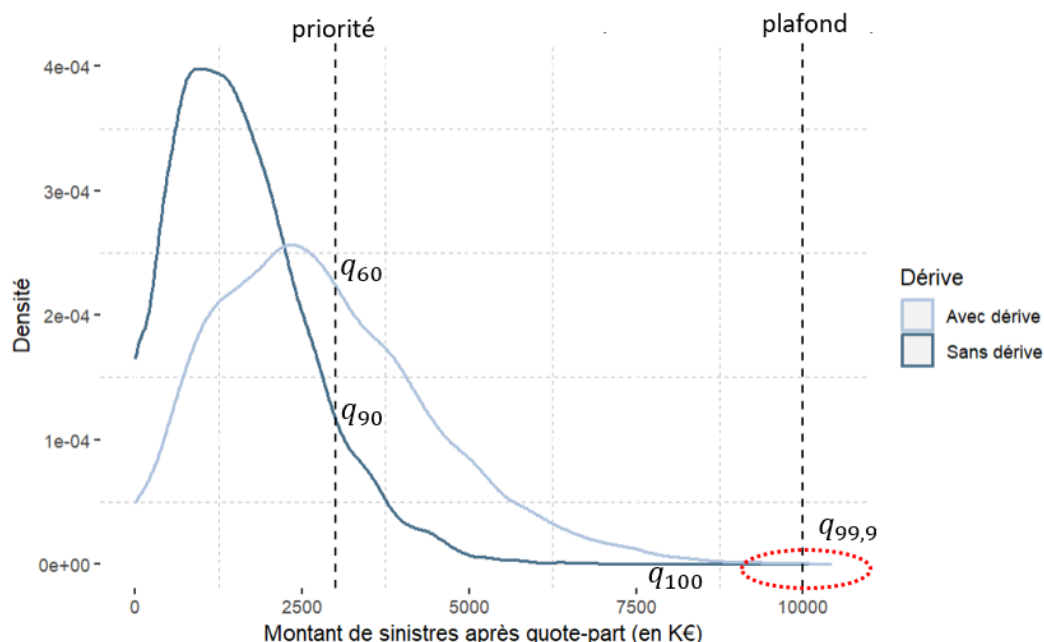


Figure III.4 : Limites du programme de réassurance dans le scénario avec dérive

La figure III.3 reprend la distribution de sinistralité établie dans le chapitre précédent pour les scénarios avec et sans dérive. Les montants des sinistres après une quote-part à 50% sont représentés. En **conservant** une priorité à 3 M€ et un plafond à 10 M€, le réassureur prend en charge **40%** des sinistres de Climatia dans le scénario avec dérive contre 10% auparavant.

Programme Catastrophes Naturelles		
Quote part	Excédent de sinistre par évènement	
CCR	XL T1	XL T2
50%	<u>Cat Nat.</u>	<u>Cat Nat.</u>
	Priorité: 3 000 000€	Priorité: 7 000 000€
	Portée: 4 000 000€	Portée: 10 000 000€
	Taux 10,00%	Taux 15,60%
	2 Rec à 100%	1 Rec à 200%

Figure III.5 : Programme de réassurance de Climatia pour le *stress-test*

Ainsi, le **prix** de la couverture de réassurance est **multiplié par quatre**, puisque le réassureur couvre quatre fois plus de sinistres dans un scénario incluant une dérive de sinistralité. La figure III.4 représente le nouveau programme de réassurance utilisé dans le *stress-test*.

1.2.3.2. *Résultats et comparaison avec le scénario central*

Cette sous-section s'intéresse à la présentation des résultats obtenus. Une comparaison avec le scénario central est également réalisée.

Projection de la rentabilité

Ratio S/P

Une forte **dégradation** du ratio S/P est constaté dans le scénario stressé avec un S/P moyen de 115%, contre 80% dans le scénario central.

	2022	2023	2024	2025	2026	2027
S/P brut	46%	116%	138%	122%	100%	97%
S/P net	86%	103%	139%	120%	108%	104%

Tableau III.17 : Projection du ratio S/P de la Lob 7 en scénario stressé

La hausse du S/P de la Lob n°7 remet en question la stabilité financière de l'organisme observée dans le scénario central.

Résultat de l'assureur

L'impact de la dérive climatique se traduit par une **baisse** considérable du **résultat net** dans le scénario stressé. Cette diminution est très importante pour les années 2024 et 2025 en raison d'une sinistralité climatique moyenne de 20,51 M€ et 18,56 M€.

Climatia est **déficitaire** sur plus de la moitié de l'horizon de projection. L'augmentation des coûts d'indemnisation entraîne une **baisse des bénéfices**. N'étant pas préparé à la dérive climatique, l'organisme n'a pas provisionné suffisamment et voit ses **réserves épuisées** en raison de la survenance de ces sinistres. De plus, n'ayant pas ajusté ses tarifs en conséquence, Climatia ne perçoit **plus assez de primes** pour faire face à cette nouvelle réalité. Le programme de réassurance actuel est alors **inadapté**.

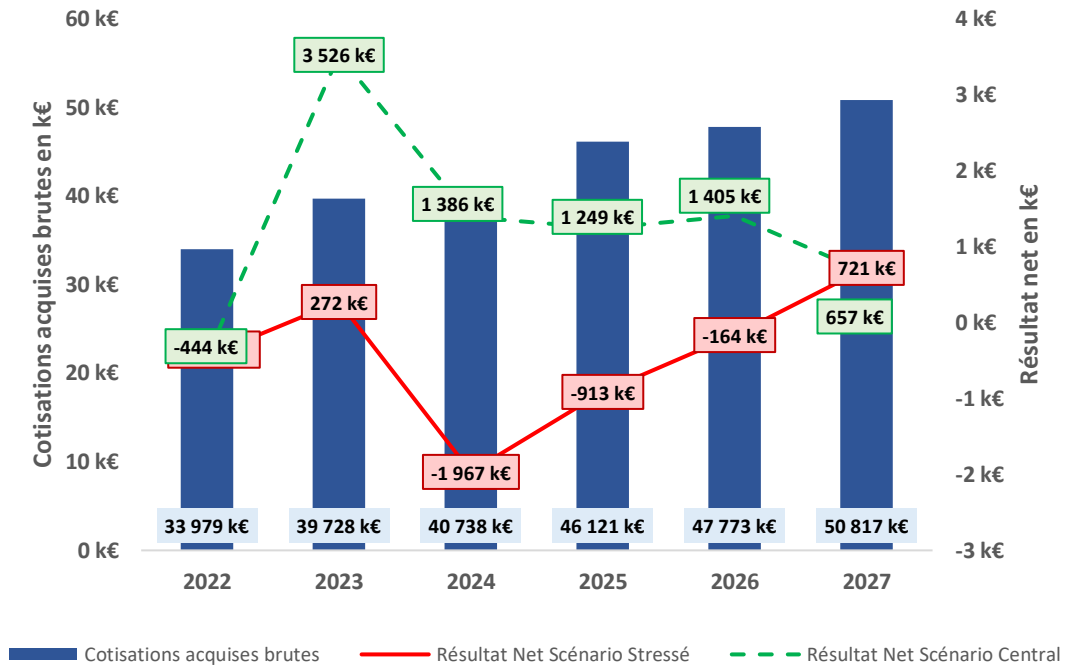


Figure III.6 : Evolution des cotisations acquises et du résultat net dans le scénario stressé

Résultat du réassureur

Contrairement à l'assureur, l'impact d'une dérive climatique se traduit par une **hausse du résultat** du réassureur. En effet, dans un scénario où la fréquence et le coût des sinistres climatiques augmentent, les cessions sont alors plus importantes. Par conséquent, les primes payées par l'assureur le sont également. De plus, l'augmentation du prix des couvertures contribue également à accroître les revenus du réassureur.

Projection des indicateurs de solvabilité

La dérive climatique a également un impact sur la projection des indicateurs de solvabilité de Climatia.

Une **hausse du SCR** est constatée dans le scénario stressé. Celle-ci s'explique par l'augmentation de la sinistralité entraînant la **hausse** respective du **BE**, du **SCR Non-Vie** et du **SCR Contrepartie**. Les fonds propres économiques **diminuent** à cause de la **liquidation** des provisions et des réserves pour absorber le pic de sinistralité.

De ce fait, le **ratio de couverture du SCR** baisse globalement sur tout l'horizon de projection. La diminution est d'autant plus importante sur les années les plus sinistrées à savoir 2024, 2025.

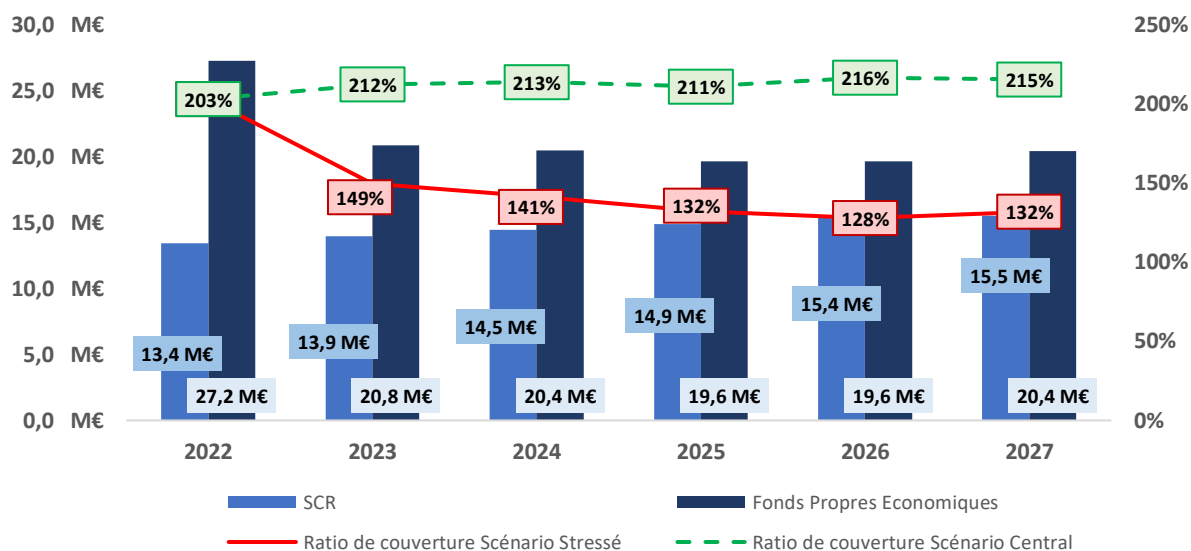


Figure III.7 : Evolution du ratio de couverture du SCR en scénario stressé

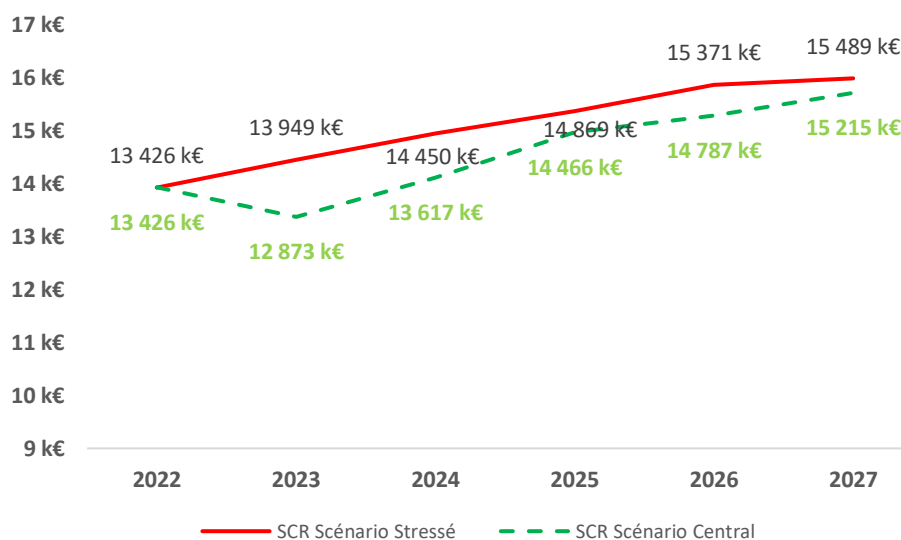


Figure III.8 : Projection du SCR en scénario stressé

Par ailleurs, le Conseil d'Administration de Climatia a fixé **l'appétence globale** de l'organisme à un ratio de couverture de 130%. Autrement dit, les activités de la société devront être conduites de telle façon que l'impact d'un scénario défavorable ne puisse pas conduire à une diminution du taux de couverture du SCR inférieur à 130%.

Dans le scénario stressé, le ratio de couverture atteint 128% en 2026. L'appétence globale de Climatia n'est alors **plus respectée**. Il est possible d'imaginer que si l'organisme ne met pas en place des stratégies pour pérenniser son activité face à la dérive climatique, ce ratio diminue encore plus, jusqu'à entraîner la perte de l'agrément qui lui permet d'exercer son activité.

2. Modification des stratégies d'atténuation du risque et managements actions

La projection prospective de l'activité de Climatia par le biais d'un exercice ORSA a été réalisée dans la section précédente. L'organisme étudié apparaît plutôt robuste et stable dans le scénario central n'incluant pas de dérive climatique. Néanmoins, la réalisation du *stress-test* a mis en évidence les **conséquences défavorables** d'un scénario de dérive de sinistralité future pour Climatia. L'impact se traduit par une **baisse** de la **rentabilité** et de la **solvabilité** de l'organisme avec un ratio de couverture ne respectant plus l'appétence globale de l'entité. Il est alors essentiel de mettre en place des mesures pour assurer la durabilité des activités de Climatia face au défi climatique.

Ainsi, cette partie vise à proposer plusieurs **solutions** et *management actions* pour pérenniser l'activité de l'organisme. La faisabilité et les **limites** de chaque stratégie sont explicitées.

2.1. Management actions

Les *management actions* ou décision de gestion peuvent être définies comme des **actions** mises en place par la Direction d'une entité face à une **situation défavorable** pour l'organisme.

Elles interviennent dans le cadre de l'exercice ORSA qui constitue un outil de pilotage stratégique pour l'entreprise. Elles permettent ainsi de **préserver** la solidité et la solvabilité de l'organisme dans une situation de *stress-test*.

2.1.1. *Management action n°1 : Augmentation des primes*

La dérive de sinistralité future est caractérisée par une augmentation de la fréquence et des coûts d'indemnisation des sinistres climatiques. Elle entraîne une **baisse des bénéfiques** pour l'assureur car les primes perçues ne suffisent plus à couvrir l'intégralité des sinistres, ce qui entraîne une diminution des réserves disponibles.

De ce fait, la 1^{ère} *management action* consiste à **augmenter le prix des primes** d'assurance. En effet, en optant pour cette stratégie, l'assureur peut maintenir sa stabilité financière. L'ajustement des primes permettrait à l'organisme de préserver sa solvabilité et d'honorer ses engagements envers les assurés.

2.1.1.1. Choix du pourcentage d'augmentation des primes pour Climatia

Il s'agit désormais pour la Direction de Climatia de fixer le **pourcentage d'augmentation** des primes. L'objectif étant à la fois de diminuer le ratio S/P de la Lob n°7 du scénario stressé mais aussi d'augmenter la rentabilité de l'organisme à travers le résultat net afin qu'il ne soit plus déficitaire.

L'évolution des primes de la garantie catastrophes naturelles a été fixée à **60%** dès 2023. Représentant environ 11% de la Lob n°7, cela équivaut à une hausse de **7,6%** de la prime commerciale totale en 2023. L'hypothèse de croissance du chiffre d'affaires est maintenue à 10% par an.

Il est intéressant de comparer ce choix aux hypothèses établies par le régulateur français. En effet, dans le compte-rendu de son 1^{er} pilote climatique, l'ACPR annonce une progression des primes de dommages aux biens « de 130% à 200% d'ici 2050, soit une évolution de 2,8% à 3,7% par an ». Une telle hausse « dépasserait la croissance du PIB » et augmenterait par conséquent les inégalités.

Le choix de Climatia apparaît **plus élevé** que ces estimations. Il convient de rappeler que les hypothèses de dérive ont été choisies **à la hausse** en prenant la borne supérieure, afin de mettre en exergue le phénomène de dérive (voir tableau II.28). De ce fait, une augmentation des primes de 7,6% par rapport à une hausse des coûts d'indemnisation des sinistres de 38% ne semble pas totalement **décorrélée**. Il est alors important d'exercer une prudence à l'égard des résultats observés dans la suite du mémoire, qui sont susceptibles de varier avec d'autres organismes d'assurance et d'autres hypothèses de dérive.

2.1.1.2. *Résultats et comparaison avec le scénario stressé et central*

Cette sous-partie vise à présenter les résultats obtenus après application de la 1^{ère} *management action*. Une comparaison avec le scénario stressé est également effectuée.

Projection de la rentabilité

Ratio S/P

Une **large diminution** du ratio S/P est observé dans le scénario intégrant la *management action* n°1 avec un S/P moyen de **96%**, contre 115% dans le scénario stressé et 80% dans le scénario central.

	2022	2023	2024	2025	2026	2027
S/P brut	46%	97%	115%	102%	84%	81%
S/P net	86%	95%	127%	110%	99%	95%

Tableau III.18 : Projection du ratio S/P de la Lob 7 en scénario MA n°1

Elle traduit l'amélioration de la situation financière de Climatia, ayant désormais plus de primes pour couvrir les sinistres.

Résultat de l'assureur

La mise en place de cette décision de gestion s'avère **bénéfique** pour Climatia. En effet, le résultat net **augmente** en raison de la hausse des cotisations. L'organisme est de nouveau

bénéficiaire sur l'ensemble des années de projection à l'exception de 2024 en raison d'une forte sinistralité climatique de 20,51 M€.

Néanmoins, cette hausse du résultat n'atteint pas la rentabilité du scénario central de 2023 à 2025. Les années 2026 et 2027 s'avèrent très bénéficiaires puisque le résultat après l'augmentation des primes est supérieur au résultat du scénario central. Cela peut s'expliquer par une faible sinistralité de 14,76 M€ et 15,26 M€.

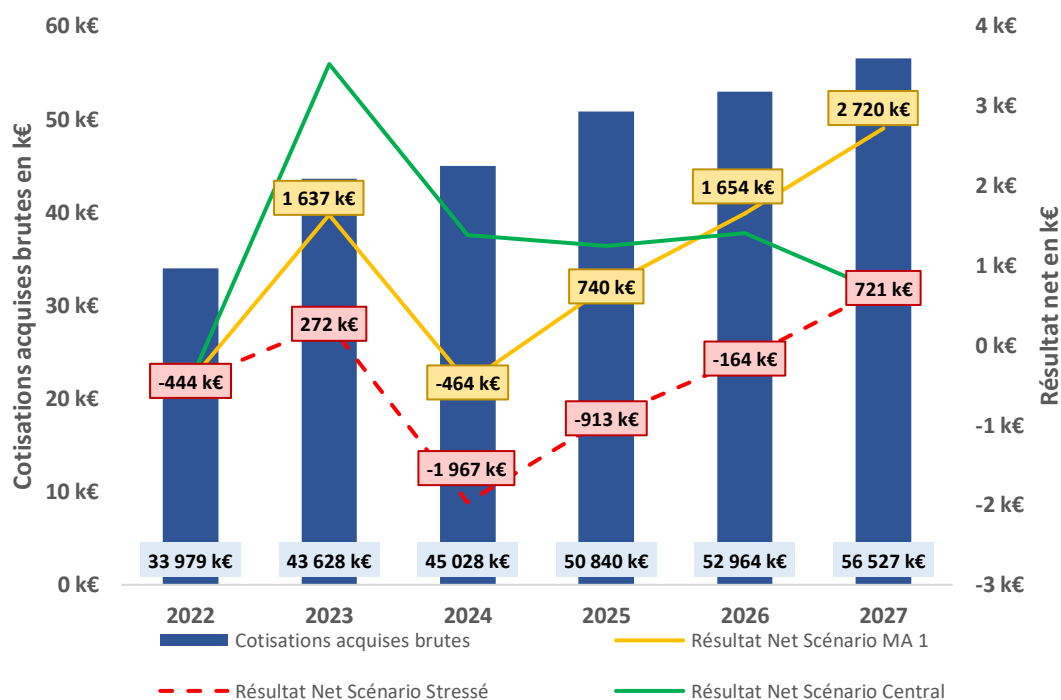


Figure III.9 : Evolution des cotisations acquises brutes et du résultat net en scénario MA 1

Résultat du réassureur

Tout comme l'assureur, la mise en place de cette *management action* est aussi avantageuse pour le réassureur et se traduit par une **hausse de son résultat**. En effet, pour le traité en excédent par évènement, le réassureur bénéficie toujours de l'augmentation du prix de sa couverture et de l'augmentation des cessions. D'autre part, pour le traité quote-part, puisque l'assureur perçoit plus de primes il cède une plus grosse part au réassureur. Celui-ci voit alors sa rentabilité augmenter.

Projection des indicateurs de solvabilité

La *management action* entraîne également des répercussions sur l'évolution des indicateurs de solvabilité de Climatia.

Une **légère hausse** du SCR est observée après la mise en place de la décision de gestion. Celui-ci est encore plus important que dans le scénario stressé. Le SCR Non-Vie croît en raison de la hausse du SCR de primes et réserves car les volumes de primes sont encore plus

conséquents. Parallèlement, les fonds propres économiques **augmentent** puisque les nouvelles cotisations viennent alimenter les réserves de l'organisme.

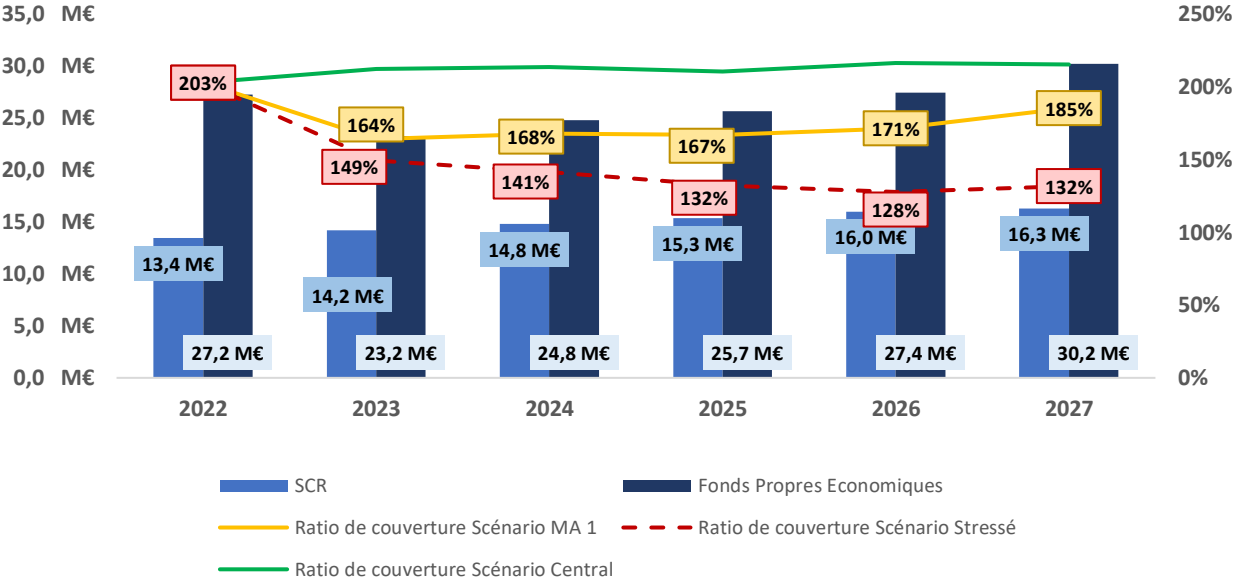


Figure III.10 : Evolution du ratio de couverture du SCR en scénario MA 1

Par conséquent, le ratio de couverture du SCR **augmente** sur tout l'horizon de projection. Néanmoins, il n'atteint pas son niveau historique par rapport au scénario central.

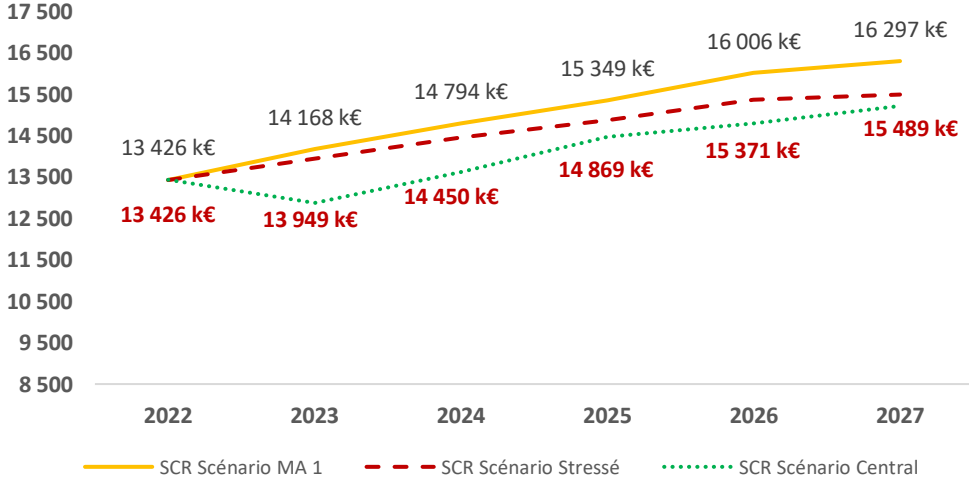


Figure III.11 : Projection du SCR en scénario MA 1

2.1.1.3. Limites de la management action

Bien que les résultats obtenus soient **satisfaisants**, il convient de souligner les **limites** de la mise en place de cette *management action*.

En effet, une augmentation trop importante des primes peut **restreindre l'accès à l'assurance** pour les foyers ayant de faibles revenus. De ce fait, ces personnes pourraient choisir de ne pas souscrire à un contrat d'assurance ou à ne pas le renouveler s'ils sont déjà assurés.

D'autre part, la hausse du niveau des primes peut accentuer le phénomène d'**antisélection** qui se traduit par une augmentation de la part des mauvais risques dans le portefeuille. En raison de primes trop élevées, les bons risques pourraient choisir de ne pas s'assurer.

Enfin, la mise en place de cette stratégie pourrait ternir l'image de Climatia et pousser ses assurés à se rediriger vers des **concurrents** qui auront tout intérêt à proposer des primes plus compétitives. Il faut donc considérer cette stratégie avec prudence afin de maintenir son activité tout en restant concurrentiel sur le marché.

2.1.2. *Management action* n°2 : Modification de la réassurance non-proportionnelle

La 1^{ère} *management action* consistant à **augmenter le prix des primes** d'assurance a permis à Climatia de se rétablir à la suite de la mise en place du *stress-test* de dérive climatique. En effet, la mise en place de cette décision de gestion a permis l'augmentation de la rentabilité et de la solvabilité de l'organisme. Elle a également été bénéfique pour le réassureur qui a vu son résultat s'améliorer. Néanmoins, elle n'a pas permis un retour à la situation initiale.

Cela peut s'expliquer par une sinistralité climatique très importante à la charge de Climatia, notamment au niveau de la **queue de distribution à droite** des sinistres. Le plafond de l'excédent de sinistre par évènement actuel à 10 M€ correspond à un quantile à 99,9% dans le scénario avec dérive. Autrement dit, l'organisme prend en charge des sinistres aux coûts d'indemnisation très élevés alors qu'ils étaient couverts par le traité de réassurance dans le scénario sans dérive.

De ce fait, conserver ce programme dans des conditions de dérive climatique ne semble **pas optimal**. De plus, si le réassureur veut conserver les mêmes quantiles de risque que dans le scénario central, il a tout intérêt à **modifier les bornes** de l'excédent de sinistre par évènement. La révision du programme de réassurance non-proportionnel constitue alors la 2^e *management action* mise en place par Climatia.

2.1.2.1. Hypothèses de la 2nd *management action*

L'exercice ORSA est une nouvelle fois répété. Les hypothèses relatives à la projection **de la sinistralité climatique** en cas de dérive sont conservées. La structure du traité de réassurance non-proportionnel et les coûts de réassurance sont modifiés.

Choix des nouvelles bornes du traité de réassurance

Dans le scénario incluant une dérive de sinistralité future, un **décalage vers la droite** de la courbe de distribution est observé. Celui-ci s'explique par une augmentation de la moyenne résultant d'une fréquence plus élevée des sinistres.

De ce fait, une priorité à 3 M€ ne représente plus le quantile à 90% mais plutôt le quantile 60% dans ce nouveau scénario. De même pour le plafond, qui passe d'un quantile à 100% à un quantile à 99,9% (voir figure III.3). Le choix des **nouvelles bornes** du traité de réassurance non-proportionnel est fait de telle manière à **conserver les mêmes quantiles** de risques dans le scénario avec dérive. Les nouvelles valeurs de priorité et plafond sont alors respectivement de 5 M€ et 12 M€ (contre 3 M€ et 10 M€).

Diminution des coûts de réassurance

En modifiant les bornes de l'excédent de sinistre par évènement, le réassureur prend en charge le **même pourcentage de risque** que dans le scénario central.

De ce fait, l'augmentation des prix de couverture mis en place dans le *stress-test* n'est **plus nécessaire**. Les prix du programme initial sont alors maintenus. La figure III.11 représente le nouveau programme de réassurance utilisé dans la mise en place de cette 2^e décision de gestion.

Programme Catastrophes Naturelles		
Quote part	Excédent de sinistre par évènement	
CCR 50%	XL T1	XL T2
	<u>Cat Nat.</u>	<u>Cat Nat.</u>
	Priorité: 5 000 000€	Priorité: 7 000 000€
	Portée: 2 000 000€	Portée: 12 000 000€
	Taux 2,50%	Taux 3,50%
	2 Rec à 100%	1 Rec à 200%

Figure III.12 : Programme de réassurance de Climatia pour le MA n°2

2.1.2.2. *Résultats et comparaison avec le scénario stressé et central*

Cette sous-section a pour objectif d'exposer les résultats obtenus à la suite de la mise en œuvre de la 2nd décision de gestion. Une analyse comparative est également réalisée en confrontant ces résultats au scénario stressé et centré.

Projection de la rentabilité

Ratio S/P

Tout comme le 1^{ère} *management action*, la mise en place de cette 2nd décision de gestion a un effet bénéfique sur Climatia. En effet, une **baisse** du ratio S/P est observée un S/P moyen de **98%**, contre 115% dans le scénario stressé et 80% dans le scénario central.

L'amélioration de la stabilité financière de Climatia est maintenue. Celle-ci dispose dorénavant de primes supplémentaires pour faire face aux sinistres.

	2022	2023	2024	2025	2026	2027
P/C brut	46%	100%	118%	105%	86%	83%
P/C net	86%	106%	141%	119%	104%	101%

Tableau III.19 : Projection du ratio S/P de la Lob 7 en scénario MA n°2

Résultat de l'assureur

L'implémentation de cette décision de gestion se révèle **avantageuse** pour Climatia. En effet, le changement du traité de réassurance non-proportionnel couplé à la hausse des cotisations entraînent une **augmentation** du résultat net. L'organisme est bénéficiaire sur tout l'horizon de projection.

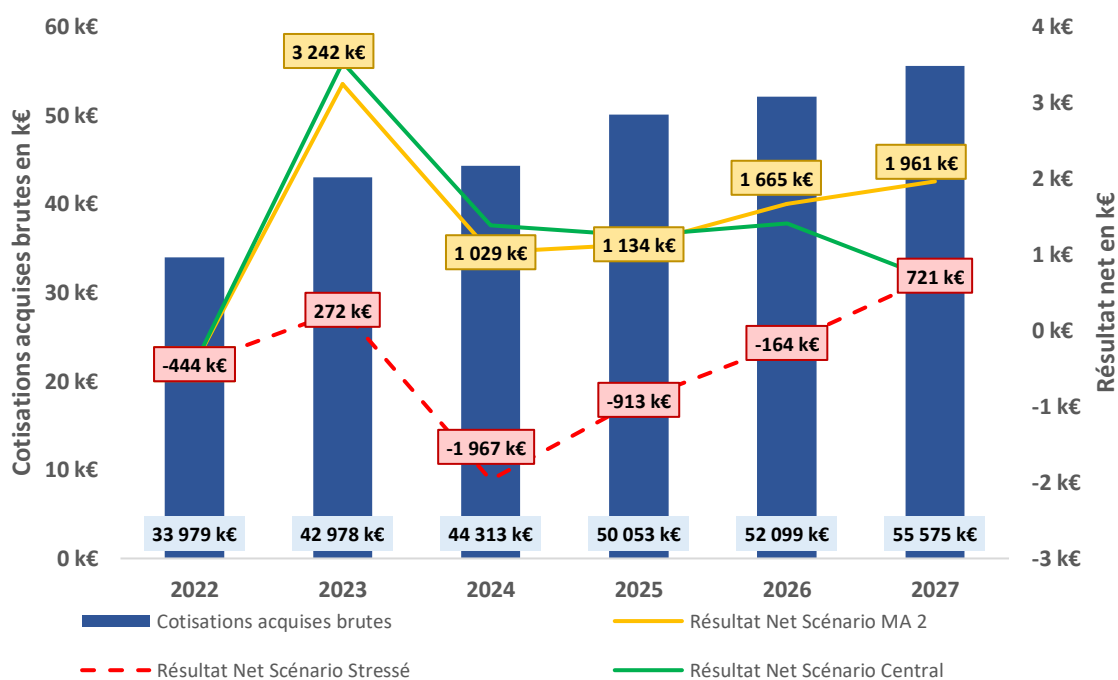


Figure III.13 : Evolution des cotisations acquises brutes et du résultat net en scénario MA 2

De plus, la revue du programme de réassurance permet à Climatia d'atteindre sa rentabilité historique sur les années 2023, 2024 et 2025. Sur le reste de la projection, la hausse du résultat net dépasse celle du scénario central. Cela peut s'expliquer par une faible sinistralité de 14,76 M€ et 15,26 M€.

Résultat du réassureur

Contrairement à l'assureur, la mise en place de cette *management action* ne s'avère pas bénéfique pour le réassureur et se traduit par une **baisse de son résultat**. En modifiant les bornes de l'excédent de sinistre par évènement, le réassureur conserve le même pourcentage de risque qu'en scénario central, à savoir 10%. Les **cessions diminuent** alors fortement et concernent des évènements encore **plus coûteux** qu'auparavant. De plus, le cessionnaire ne bénéficie plus de l'augmentation du prix de sa couverture. Cette situation se traduit par une **diminution** de sa **rentabilité**.

Projection des indicateurs de solvabilité

La mesure de gestion entraîne également des conséquences sur l'évolution des indicateurs de solvabilité de Climatia.

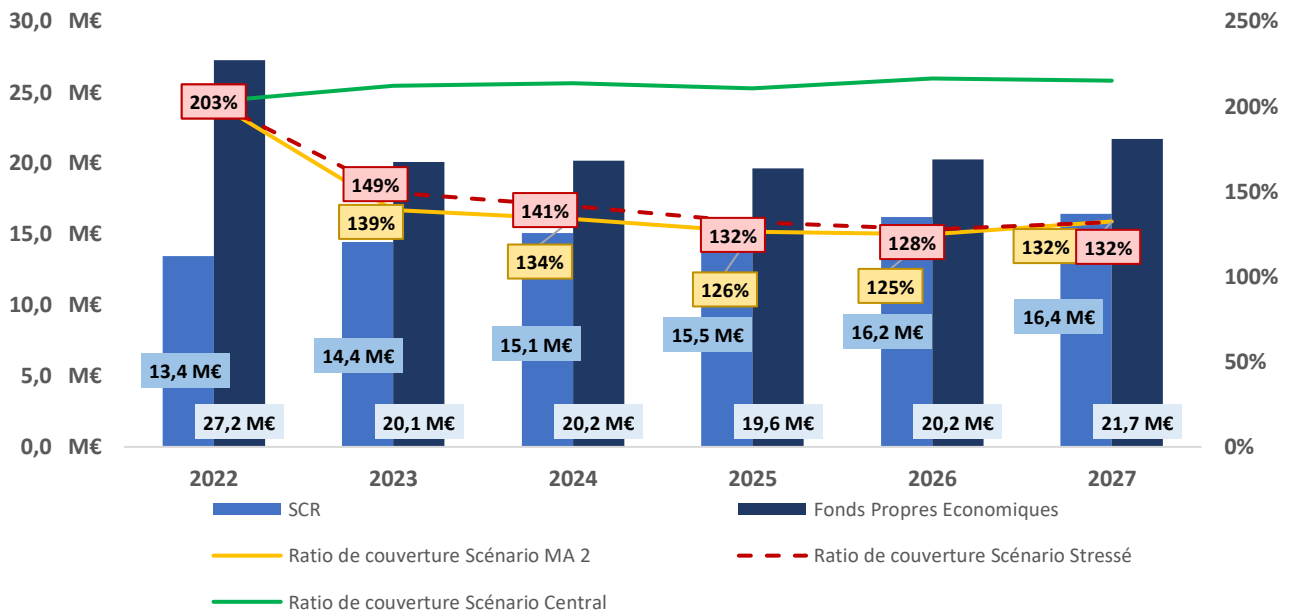


Figure III.14 : Evolution du ratio de couverture du SCR en scénario MA 2

Une **augmentation** du SCR est observée après la revue du traité de réassurance non-proportionnel. D'une part, l'augmentation des sinistres et des cessions se traduit par une **hausse** respective du **SCR Non-Vie** et du **SCR Contrepartie**. D'autre part, la croissance des cotisations entraîne la **hausse** du **SCR de primes et réserves**.

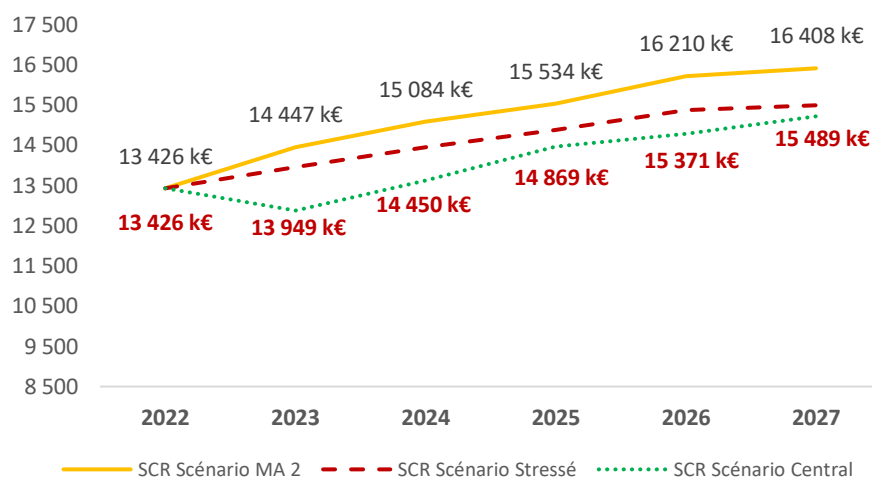


Figure III.15 : Projection du SCR en scénario MA 2

Les fonds propres économiques **diminuent** par rapport au scénario central car les sinistres sont plus fréquents et coûteux. Ils sont un peu plus élevés que dans le scénario stressé étant donné que la hausse des cotisations contribue à renforcer les réserves de l'organisme.

De ce fait, le ratio de couverture du SCR **diminue** sur tout l'horizon de projection. Il est inférieur au ratio de couverture du scénario stressé. Par conséquent, la mise en place de cette stratégie n'est **pas avantageuse** pour Climatia sur le plan prudentiel, bien qu'elle ait permis d'augmenter la rentabilité de l'organisme.

2.1.2.3. *Limites de la management action*

Malgré l'amélioration de la rentabilité de l'organisme, il est important de mettre en évidence les **limites** inhérentes à la mise en œuvre de cette *management action*.

En effet, l'augmentation de la fréquence et des coûts des sinistres climatiques peut entraîner la **réticence des réassureurs** à couvrir le risque. Ces derniers pourraient **rehausser** les **tarifs** des couvertures et modifier leurs conditions la dérive de sinistralité continue dans les prochaines années. Le défi principal résidera dans la recherche d'un **compromis** entre un réassureur qui a un intérêt à accroître le tarif de sa couverture et un assureur qui aspire à minimiser ses coûts. La modification des traités peut aussi altérer la relation avec les réassureurs.

Par ailleurs, la revue des programmes de réassurance peut nécessiter des **modifications** dans les systèmes internes de l'assureur et entraîner de lourdes tâches opérationnelles.

De plus, la mise en place de cette décision de gestion peut avoir un impact sur la **rentabilité** et la **solvabilité** de l'organisme. Il est nécessaire d'analyser en amont la capacité financière de l'assureur à supporter les nouvelles conditions contractuelles.

Enfin, un tel changement s'accompagnera d'une hausse des primes d'assurance, ce qui pourrait influencer la **satisfaction** des assurés.

2.2. Comparaison de la dérive au stress-test climatique à court terme de l'ACPR

En prolongement de son 1^{er} pilote climatique, l'ACPR a initié le 7 juillet 2023 les principaux scénarios et hypothèses de son **nouvel exercice climatique**. Ce nouveau pilote est spécifiquement ciblé sur le **secteur de l'assurance** et a pour intention de pallier les limitations identifiées lors du 1^{er} exercice. En effet, l'ACPR a décidé d'inclure la **solvabilité** des organismes d'assurance en introduisant un nouveau cadre au travers d'un scénario à **court terme**.

De ce fait, cette sous-section a pour objectif de comparer le *stress-test* effectué dans la partie 1.2.3 au *stress-test* climatique à court terme initié par l'ACPR relatif au risque de sécheresse.

2.2.1. Hypothèses du scénario court-terme

Avant de réaliser le *stress-test* climatique à court terme, il est essentiel de rappeler les hypothèses sous-jacentes.

2.2.1.1. Prérogatives de l'ACPR

Le *stress-test* est à réaliser uniquement sur les années 2023 et 2024. Les sinistres simulés liés au risque de sécheresse doivent être **représentatifs** de l'épisode de sécheresse intense constaté en 2022. Ils doivent également tenir compte des **ajustements** liés à **l'inflation** et à **l'évolution** du nombre de risques assurés.

2.2.1.2. Application sur Climatia

Climatia a été marquée en 2022 par une sinistralité climatique **exceptionnelle** qui a atteint un montant de 13,32 M€ avec la survenance de trois événements climatiques.

Afin de refléter cette vague de sécheresse observée, ces montants sont **repris** pour les années 2023 et 2024. Les **coefficients** du tableau III.16 sont appliqués pour tenir compte de l'inflation et de l'évolution du portefeuille assuré.

	2023	2024
Inflation	3,86%	1,85%
Evolution du nombre de risques assurés	33%	25%

Figure III.16 : Coefficients utilisés pour le *stress-test* climatique à court terme de l'ACPR

La **sinistralité projetée** sur 2023 et 2024 selon cette méthode est respectivement de 18,40 M€ et 16,96 M€. Dans le *stress-test* réalisé dans la partie 1.2.3, les événements climatiques simulés dans le scénario avec dérive étaient de 13,82 M€ et 20,51 M€. Les autres hypothèses du stress-test incluant une dérive climatique sont **conservées**.

2.2.2. Résultats et comparaison avec le scénario stressé

Les résultats obtenus à la suite de la réalisation du *stress-test* climatique à court terme de l'ACPR sont présentés ci-dessous. Une mise en parallèle avec le scénario stressé est également effectuée.

2.2.2.1. Projection de la rentabilité

Ratio S/P

Comme dans le scénario stressé n°1, une **augmentation du ratio S/P** est constatée avec un S/P moyen de **130%** contre 122% dans le scénario stressé et 71% dans le scénario central.

	2022	2023	2024
S/P brut	46%	139%	122%
S/P net	86%	143%	147%

Tableau III.20 : Projection du ratio S/P de la Lob 7 en scénario stressé 2

La projection du S/P confirme l'impact négatif d'une dérive sur Climatia, mettant en péril sa rentabilité.

Résultat de l'assureur

De la même manière que le scénario stressé incluant une dérive climatique, le *stress-test* proposé par l'ACPR dans son nouveau pilote climatique entraîne une **baisse importante du résultat net**. Climatia est **déficitaire** sur les deux années de projection.

Un **écart conséquent** est constaté avec le 1^{er} scénario stressé. En effet, en 2023, l'organisme apparaît déficitaire alors qu'il ne l'était pas dans le scénario central. Cela peut s'expliquer par une **sinistralité plus importante** dans le *stress-test* initié par l'ACPR (18,40 M€ contre 13,82 M€). Puisque les coûts de réassurance sont augmentés, cette mesure d'atténuation du risque coûte encore plus cher à l'entité. En 2024, l'écart entre les deux scénarios est moins important. Le 2^e scénario stressé est légèrement moins pénalisant pour Climatia en raison de coûts d'indemnisation moins conséquents (16,96 M€ contre 20,51 M€).

Il est essentiel de rappeler que la sinistralité projetée dans le *stress-test* court terme de l'ACPR se veut être **représentative** de la sécheresse constatée en 2022. Cette sinistralité

exceptionnelle pour Climatia a entrainé une **baisse du résultat technique non-vie**. Il apparaît donc **cohérent** que les sinistres simulés pour 2023 et 2024 aient un impact encore plus **défavorable** pour l'organisme que le 1^{er} stress-test.

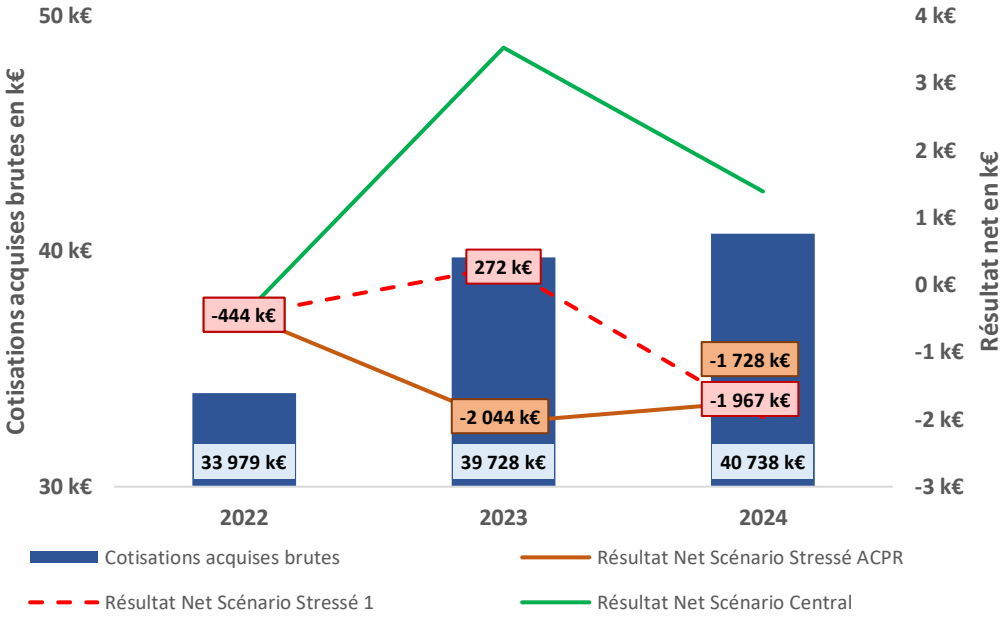


Figure III.17 : Evolution des cotisations acquises brutes et du résultat net en scénario stressé 2

2.2.2.2. Projection des indicateurs de solvabilité

De manière similaire, la réalisation du scénario court terme du pilote climatique a aussi un **impact négatif** sur la projection des indicateurs de solvabilité de l'entité.

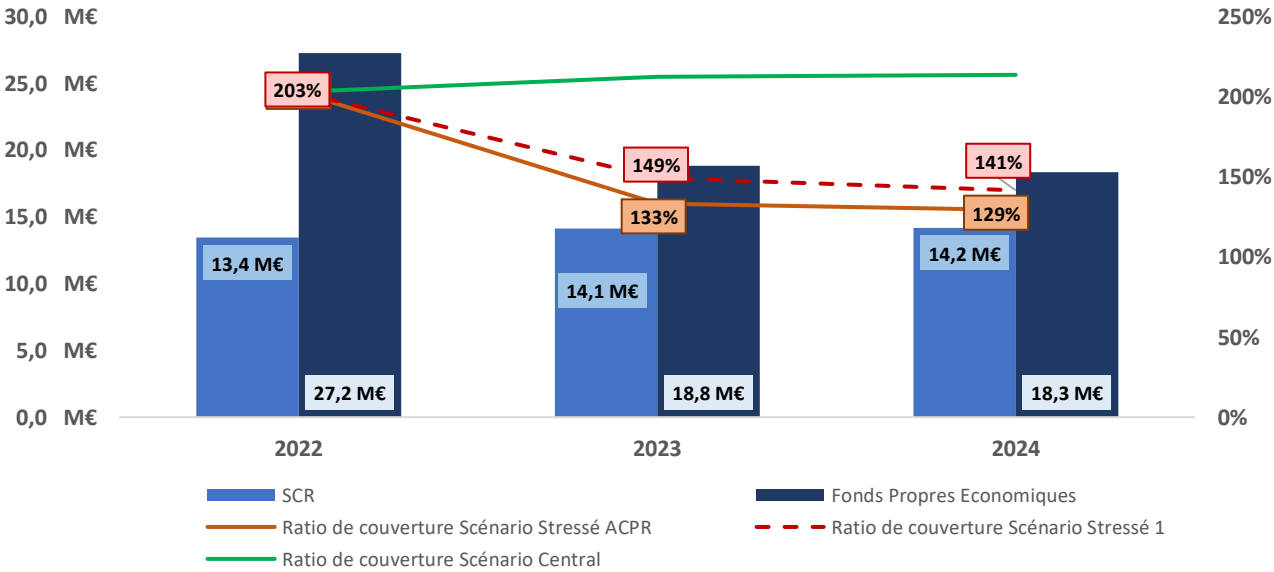


Figure III.18 : Evolution du ratio de couverture du SCR en scénario stressé 2

L'écart de sinistralité à la hausse entre les deux scénarios stressés se traduit par l'augmentation du SCR Non-Vie et du SCR Contrepartie, entraînant la hausse du SCR. Les fonds propres diminuent comme dans le 1^{er} scénario stressé.

Par conséquent, une baisse du ratio de couverture est constatée sur l'horizon de projection. Cette diminution est encore plus importante que dans le scénario de *stress-test* incluant une dérive climatique, en raison d'une sinistralité encore plus forte.

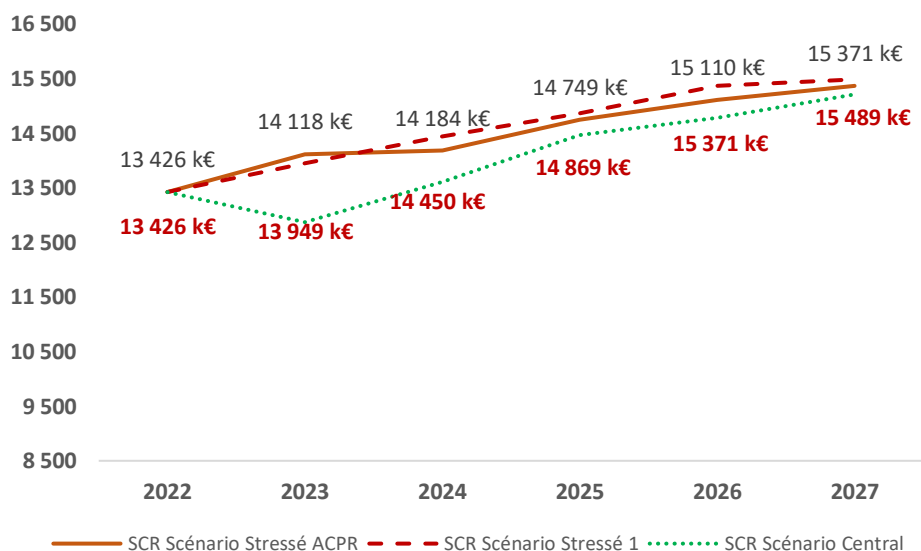


Figure III.19 : Projection du SCR en scénario stressé 2

3. Conclusion : vers une intervention inévitable de l'Etat ?

Ce dernier chapitre a permis à travers une projection ORSA d'illustrer l'impact d'une dérive de sinistralité future sur un organisme non-vie fictif. Plusieurs *management actions* ont également été suggérées pour garantir la pérennité de l'activité face au défi climatique.

Dans le scénario central, n'incluant pas de dérive climatique, Climatia semble stable à la fois sur le plan de la rentabilité et de la solvabilité. Un *stress-test* est réalisé afin d'évaluer les conséquences d'une dérive sur l'organisme. Pour cela, l'approche ORSA est réitérée en intégrant la simulation des événements climatiques dans un scénario incluant une dérive de sinistralité, réalisée dans le précédent chapitre. Les coûts de réassurance sont augmentés. L'impact sur le réassureur se traduit par une hausse de son résultat. L'assureur quant à lui voit sa rentabilité et sa solvabilité diminuer, conduisant à un ratio de couverture ne correspondant plus à l'appétence globale. Par conséquent, il devient impératif d'introduire des mesures visant à garantir la durabilité de l'activité de Climatia.

L'augmentation des primes d'assurance constitue la 1^{ère} *management action* mise en place par l'organisme. L'impact sur le réassureur se manifeste par la hausse de son résultat. L'implémentation de cette décision de gestion s'avère également bénéfique pour Climatia avec l'augmentation de son résultat et de sa solvabilité. Néanmoins, elle n'a pas permis un retour à la situation initiale.

Cela peut s'expliquer par le traité non-proportionnel qui n'est plus adapté à la nouvelle distribution de sinistralité. De ce fait, la 2^e *management action* consiste à modifier les bornes de l'excédent de sinistre par événement en plus de l'augmentation des cotisations. Les prix du programme initial sont maintenus par rapport au scénario central. Cette décision entraîne la baisse du résultat du réassureur en raison d'une diminution des cessions. La revue du programme de réassurance permet à Climatia d'atteindre sa rentabilité historique et même de la dépasser sur la fin de la projection. Cependant, sur le plan prudentiel, le ratio de couverture diminue encore plus que dans le scénario stressé.

Finalement, la dérive climatique se traduit par une augmentation de la sinistralité. Elle modifie la rentabilité des assureurs et incite à la revue des traités de réassurance. Cette stratégie améliore leur profitabilité mais entraîne une baisse de la solvabilité.

Ainsi, les différents acteurs se posent la même question, à savoir, **est-ce que le marché pourra y répondre en augmentant les fonds propres des assureurs ? Une intervention de l'Etat est-elle inévitable ?**

Conclusion générale

L'accélération du réchauffement climatique constitue l'une des préoccupations majeures de ces dernières années et entraîne de nombreuses conséquences. Parmi elles, la multiplication des événements climatiques extrêmes qui compromet la stabilité financière des assureurs. Cette sinistralité exceptionnelle est déjà observée chez de nombreux organismes d'assurance qui doivent faire face à une hausse de la fréquence et de la sévérité des sinistres climatiques. Selon plusieurs études, cette matérialisation du risque climatique physique est amenée à progresser pour les prochaines années. Dans ce contexte inédit, ce mémoire avait pour objectif de mesurer la dérive de sinistralité future et d'évaluer ses conséquences sur un organisme d'assurance non-vie. Plusieurs solutions sont proposées afin de permettre le maintien de l'activité face au dérèglement climatique.

Pour ce faire, il a été nécessaire d'établir une démarche visant à quantifier la dérive de sinistralité future à la fois en termes de fréquence et de coût. Pour la fréquence, celle-ci repose sur une modélisation de la fréquence de survenance des catastrophes naturelles en France pour les risques d'inondation et de sécheresse. La base de données s'appuie sur de l'*Open Data* afin de pallier la difficulté de la récolte de données en entreprise. Plusieurs données météorologiques sont utilisées pour alimenter une régression logistique dont le but est de prédire la survenance d'une catastrophe naturelle à une date donnée. Un modèle de séries temporelles, ARIMA saisonnier, a été utilisé pour projeter l'évolution des différents indicateurs météorologiques dans le temps et constituer l'input de prédiction du GLM. La dérive en coût quant à elle a été évaluée à l'aide d'un *benchmark* d'articles assurantiels qui traitent de l'évolution des coûts de dédommagements liés au changement climatique. Les résultats obtenus traduisent une augmentation de la fréquence et des coûts des événements climatiques pour les cinq années à venir.

L'approche proposée a permis de confirmer l'existence d'une dérive de sinistralité future pour les organismes d'assurance. Il a ensuite été possible d'identifier les impacts qui en résultent sur un portefeuille d'assurance non-vie.

Tout d'abord, une revue des programmes de réassurance apparaît nécessaire. En effet, la sinistralité sur laquelle sont calibrés les traités est modifiée. Les sinistres sont désormais plus fréquents et plus coûteux. La conservation des programmes de réassurance actuels entraînerait alors une dégradation du reste à charge pour l'assureur, fragilisant de ce fait sa stabilité financière. Il convient de souligner que le coût de ce procédé est également à prendre en compte et à négocier avec le réassureur afin de minimiser ses coûts tout en protégeant son résultat.

Ensuite, l'augmentation de la sinistralité climatique provoque un décalage du seuil des sinistres graves et un allègement de la queue de distribution. Des montants de sinistre considérés auparavant comme des graves pourront après dérive être considérés comme attritionnels. Les assureurs doivent alors prendre en compte cette nouvelle segmentation des sinistres afin d'améliorer leurs modèles et garantir la pérennité de leur activité.

Enfin, le mémoire aborde une illustration concrète de l'impact d'une dérive de sinistralité sur Climatia par le biais d'un exercice ORSA. La réalisation du *stress-test* en intégrant les sinistres modélisés dans un scénario incluant une dérive se traduit par une baisse de la rentabilité et de la solvabilité de l'organisme. Le réassureur quant à lui bénéficie de l'augmentation du coût de sa couverture et voit son résultat augmenter. Pour faire face à cette problématique, plusieurs solutions ont été proposées pour permettre le maintien de l'activité de Climatia.

L'augmentation des primes d'assurance constitue la 1^{ère} *management action* mise en place par l'assureur. Celle-ci se traduit par une hausse du résultat du réassureur. La rentabilité et la solvabilité de Climatia augmentent également. L'implémentation de cette décision de gestion a néanmoins certaines limites. En effet, une hausse trop importante du niveau des primes peut entraîner un phénomène d'antisélection et restreindre l'accès à l'assurance. Il convient alors de considérer cette stratégie avec prudence afin de garantir la durabilité de son activité tout en étant compétitif sur le marché. Malgré son impact bénéfique, celle-ci n'a pas permis un retour à la situation initiale.

De ce fait, la 2^e solution consiste à ajouter une modification du traité de réassurance non-proportionnel qui n'est plus adapté à la nouvelle distribution de sinistralité. Le choix des nouvelles bornes est effectué de façon à conserver les mêmes quantiles de risque que dans le scénario central, n'incluant pas de dérive de sinistralité. La mise en place de cette *management action* entraîne la diminution du résultat du réassureur puisque les cessions sont moins importantes. Néanmoins, elle permet à Climatia de dépasser sa rentabilité historique. Cependant, sa solvabilité diminue encore plus que dans le scénario stressé. Dès lors, cette situation met en lumière la difficulté pour les assureurs de disposer de fonds propres suffisamment conséquents pour respecter leurs engagements envers les assurés. **Une intervention de l'Etat est-elle alors inévitable ?**

Ainsi, les études réalisées ont permis de proposer des stratégies concrètes pour permettre aux assureurs non-vie de garantir la durabilité de leur activité face au défi climatique.

Afin de poursuivre et développer les démarches initiées dans le présent mémoire, il pourrait être intéressant d'améliorer le modèle permettant d'évaluer la dérive en fréquence, notamment en enrichissant les sources de données et en élargissant la plage temporelle

choisie. Cela permettrait d'améliorer sa qualité prédictive et d'obtenir des résultats plus précis. De plus, il serait possible de challenger et comparer les résultats obtenus avec des méthodes de *Machine Learning* plus puissantes. Par ailleurs, l'évolution des variables météorologiques a été réalisée à l'aide de séries temporelles, reposant sur une hypothèse de linéarité et ne prenant pas en compte des facteurs externes et la dimension spatiale. De ce fait, il pourrait être intéressant d'utiliser des modèles alternatifs intégrant des variables exogènes ou des informations spatiales pour améliorer la précision des prévisions. Enfin, il est également nécessaire de tenir compte de l'actualité et des caractéristiques du régime des catastrophes naturelles susceptibles d'évoluer et de faire varier les résultats obtenus.

Ce mémoire a permis de soulever les limites auxquelles les assureurs vont se heurter face au défi climatique. Il souligne l'urgence de prendre des mesures face à cette situation inédite afin de maintenir son activité. Les organismes d'assurance doivent alors s'atteler à enrichir leur modélisation, à intégrer le changement climatique dans leur gestion des risques et à comprendre ses impacts afin de ne pas se diriger vers une fragilisation du système d'assurance pour les risques climatiques.

Bibliographie

Textes règlementaires

EIOPA (2009), « Directive 2009/138/CE sur l'accès aux activités de l'assurance et de la réassurance et leur exercice (Solvabilité II) ».

EIOPA (2014), « Règlement délégué (UE) 2015 /35 ».

ACPR (2015), « Notice « Solvabilité II » – Évaluation interne des risques et de la solvabilité (ORSA) ».

EIOPA (2022), « Directive 2022/2464 modifiant le règlement (UE) n°537/2014 et les directives 2004/109/CE, 2006/43/CE et 2013/34/UE en ce qui concerne la publication d'informations en matière de durabilité par les entreprises ».

EIOPA (2021), « Règlement délégué (UE) 2021/1256 modifiant le règlement délégué (UE) 2015/35 n ce qui concerne l'intégration des risques en matière de durabilité dans la gouvernance des entreprises d'assurance et de réassurance ».

EIOPA (2014), « Directive 2014/95/UE modifiant la directive 2013/34/UE en ce qui concerne la publication d'informations non financières et d'informations relatives à la diversité par certaines grandes entreprises et certains groupes ».

LEGIFRANCE (2019), « Loi n°2019-1147 du 8 novembre 2019 relative à l'énergie et au climat ».

EIOPA (2019), « Règlement (UE) 2019/2088 sur la publication d'informations en matière de durabilité dans le secteur des services financiers ».

EIOPA (2020), « Règlement (UE) 2020/852 sur l'établissement d'un cadre visant à favoriser les investissements durables et modifiant le règlement (UE) 2019/2088 ».

EIOPA (2022), « Directive 2022/2464/UE modifiant le Règlement (UE) n°537/2014 et les directives 2004/109/CE, 2006/43/CE et 2013/34/UE en ce qui concerne la publication d'informations en matière de durabilité par les entreprises ».

CEIOPS (2010), « Solvency II – Calibration paper ».

Articles, ouvrages et mémoires

ACPR (2022), « La gouvernance des risques liés au changement climatique dans le secteur de l'assurance ».

Institut des Actuaire (2022), « Guide réglementaire Durabilité ».

CCR/Météo France (2018), « Conséquences du changement climatique sur le coût des catastrophes naturelles en France à horizon 2050 ».

EIOPA (2022), « Document de travail - Traitement prudentiel des risques de durabilité ».

Institut des Actuaire (2023), « Journées d'études IARD - De l'ORSA classique et à l'ORSA climatique ».

ACPR (2021), « Les principaux résultats de l'exercice pilote climatique 2020. »

HELOUA T. (2020), « Etude des impacts et enjeux de la réassurance non-vie à travers le prisme de Solvabilité II ».

COVEA (2022), « Livre blanc – Changement climatique et assurance : quelles conséquences sur la sinistralité à horizon 2050 ? ».

SINONVIRGULE (2023), « *Livre blanc – Peut-on assurer un monde qui s’effondre ?* ».

BEJI F. (2022), « *Lancement d’une assurance voyage au Royaume-Uni : Tarification et prise en compte de la spécificité de ce nouveau marché* ».

BOUTTIER F. (2020), « *Construction de modèles prédictifs pour déterminer l’inflation des pièces automobiles* ».

ACPR (2022), « *Les principaux résultats de l’exercice pilote climatique 2020* ».

ACPR (2023), « *Scénarios et hypothèses principales de l’exercice de stress test climatique 2023* ».

AILLIOT P. (2022-2023), « *Cours de séries temporelles, Support de cours M2 EURIA* »

THOMAS M. (2022-2023), « *Cours de théorie des valeurs extrêmes, Support de cours M2 ISUP* »

THOMAS M. (2021-2022), « *Cours d’assurance non-vie, Support de cours M1 ISUP* »

LACOSTE P. (2022-2023), « *Cours de réassurance, Support de cours M2 ISUP* »

Annexe A

Modèle « Sécheresse »

	Base <i>train</i>	Base <i>test</i>
RMSE	35,89%	30,62%
MAE	22,53%	19,37%

Tableau A.1 : Métriques d'erreur du modèle « Sécheresse »

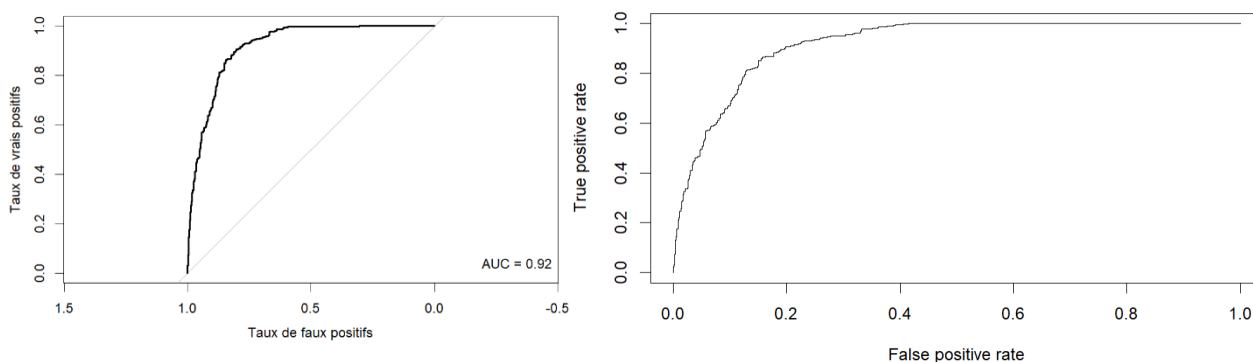


Figure A.1 : Courbe ROC et *recall curve* du modèle "Sécheresse"

Mesure de performance	Résultat
<i>AUC</i>	0,92
<i>Accuracy</i>	0,87
<i>F1-Score</i>	0,92

Tableau A.2 : Mesures de performance du modèle "Sécheresse"

	0	1
0	TP : 16 528	FP : 1 146
1	FN : 1 625	TN : 2 046

Tableau A.3 : Matrice de confusion du modèle "Sécheresse"

Annexe B

Séries temporelles

1. Observations des séries temporelles pour la variable « Température »

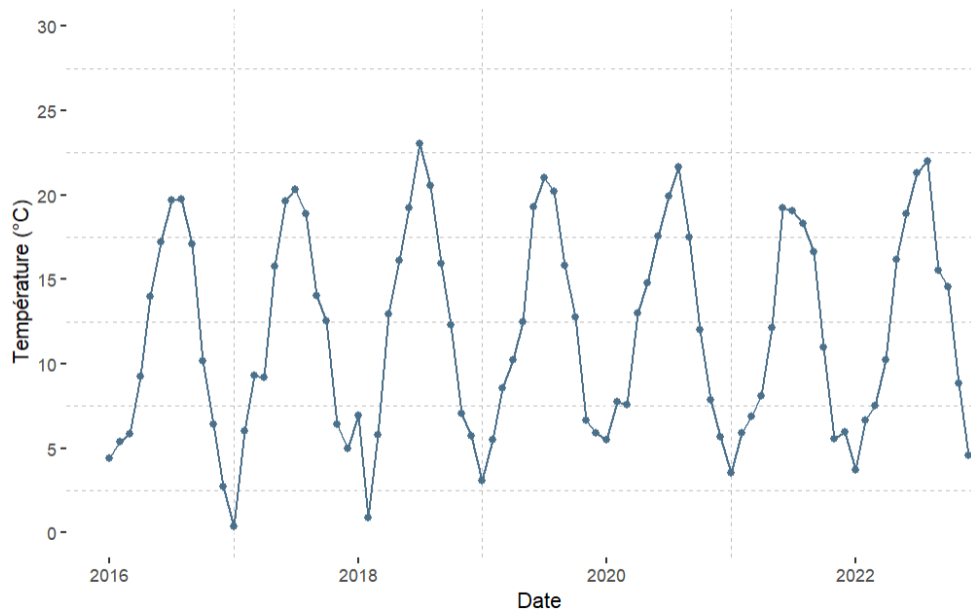


Figure A.2 : Evolution de la température pour la station de Reims entre 2016 et 2022

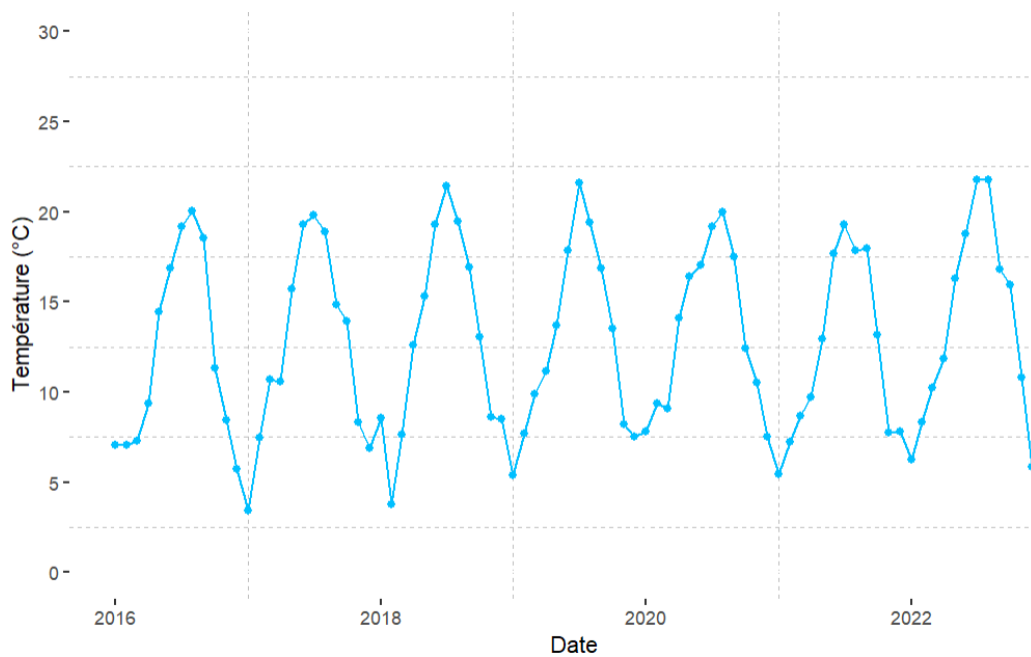


Figure A.3 : Evolution de la température pour la station de Rennes entre 2016 et 2022



Figure A.4 : Evolution de la température pour la station de Gourdon entre 2016 et 2022

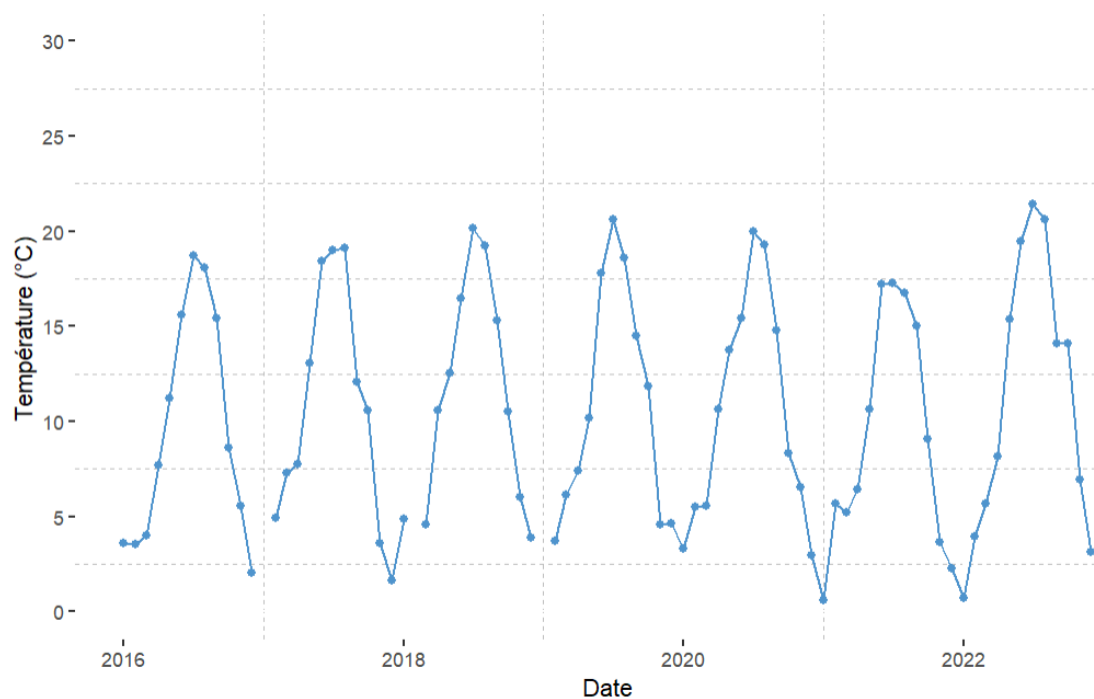


Figure A.5 : Evolution de la température pour la station de Loudes entre 2016 et 2022

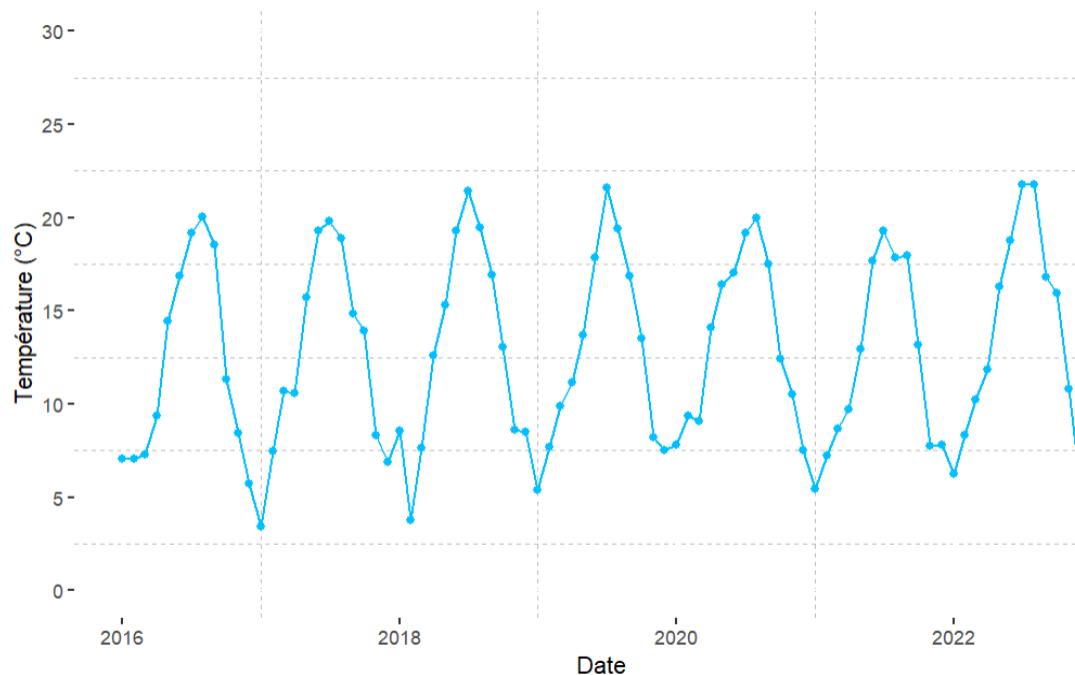


Figure A.6 : Evolution de la température pour la station de Nice entre 2016 et 2022

2. Prédications à horizon 2027 pour les autres variables météorologiques

Station	Humidité moyenne sur la période 2016-2022	Humidité moyenne prévue sur la période 2023-2027	Evolution	Ecart
Reims	76.84%	76.66%	- 0,24%	- 0,18%
Rennes	78.17%	76.98%	- 1,52%	- 1,19%
Gourdon	73.73%	72.33%	- 1,89%	- 1,4%
Loude	72.89%	71.59%	- 1,78%	- 1,3%
Nice	66.37%	66.51%	+ 0,21%	+ 0,14%

Tableau A.4 : Mesures d'évolution de l'humidité à horizon 2027

Station	Pression moyenne sur la période 2016-2022	Pression moyenne prévue sur la période 2023-2027	Evolution	Ecart
Reims	1005.60 hPa	1006.36 hPa	0,07%	0,76 hPa
Rennes	1012.82 hPa	1013.49 hPa	0,07%	0,67 hPa
Gourdon	987.17 hPa	987.53 hPa	0,04%	0,36 hPa
Loude	921.83 hPa	922.32 hPa	0,05%	0,49 hPa
Nice	1012.41 hPa	1012.90 hPa	0,05%	0,49 hPa

Tableau A.5 : Mesures d'évolution de la pression à horizon 2027

Station	Volume de pluie sur 24h moyen sur la période 2016-2022	Volume de pluie sur 24h moyen prévu sur la période 2023-2027	Evolution	Ecart
Reims	1,52 mL	1,66 mL	9,6%	0,14 mL
Rennes	1,82 mL	1,87 mL	2,48%	0,05 mL
Gourdon	2,12 mL	2,01 mL	-5,84%	0,10 mL
Loudes	1,78 mL	1,50 mL	-15,86%	-0,28 mL
Nice	1,76 mL	1,42 mL	-19,37%	-0,34 mL

Tableau A.6 : Mesures d'évolution du volume de pluie sur 24h à horizon 2027

Annexe C

Matrices de corrélation de la formule standard

Corrélation	Prime & Réserve	Rachat	CAT Non-Vie
Prime & Réserve	100%	0%	25%
Rachat	0%	100%	0%
CAT Non-vie	25%	0%	100%

Tableau A.7 : Matrice de corrélation du SCR Non-Vie

Corrélation	Lob 4	Lob 5	Lob 7	Lob 8	Lob 10	Lob 12
Lob 4	100%	50%	25%	50%	50%	50%
Lob 5	50%	100%	25%	25%	50%	50%
Lob 7	25%	25%	100%	25%	25%	25%
Lob 8	50%	25%	25%	100%	50%	50%
Lob 10	50%	50%	25%	50%	100%	50%
Lob 12	50%	50%	25%	50%	50%	100%

Tableau A.8 : Matrice de corrélation pour le risque de Prime & Réserve en Non-Vie

Coefficients	Avec réassurance		Sans réassurance	
	σ_{prime}	$\sigma_{réserve}$	σ_{prime}	$\sigma_{réserve}$
Lob 1	5,0%	5,7%	5,0%	5,7%
Lob 4	8,0%	9,0%	10,0%	9,0%
Lob 5	8,0%	8,0%	8,0%	8,0%
Lob 7	6,4%	10,0%	8,0%	10,0%
Lob 8	11,2%	11,0%	14,0%	11,0%
Lob 10	8,3%	5,5%	8,3%	5,5%
Lob 12	13,0%	20,0%	13,0%	20,0%

Tableau A.9 : Ecart-types pour le risque de Prime & Réserve en Non-Vie

Corrélation	Santé Non-SLT	Santé SLT	Catastrophe
Santé Non-SLT	100%	50%	25%
Santé SLT	50%	100%	25%
Catastrophe	25%	25%	100%

Tableau A.10 : Matrice de corrélation du SCR Santé

Corrélation	Taux	Action	Immobilier	Spread	Change	Concentration
Taux	100%	0%	0%	0%	25%	0%
Action	0%	100%	75%	75%	25%	0%
Immobilier	0%	75%	100%	50%	25%	0%
Spread	0%	75%	50%	100%	25%	0%
Change	25%	25%	25%	25%	100%	0%
Concentration	0%	0%	0%	0%	0%	100%

Tableau A.11 : Matrice de corrélation du SCR Marché

Corrélation	Actions cotées	Actions non cotées
Actions cotées	100%	75%
Actions non cotées	75%	100%

Tableau A.12 : Matrice de corrélation du risque Action

Corrélation	Vie	NonVie	Santé	Marché	Contrepartie
Vie	100%	0%	25%	25%	25%
Non Vie	0%	100%	0%	25%	50%
Santé	25%	0%	100%	25%	25%
Marché	25%	25%	25%	100%	25%
Contrepartie	25%	50%	25%	25%	100%

Tableau A.13 : Matrice de corrélation du SCR

Annexe D

Hypothèses sur l'inflation pour le *stress-test* court terme ACPR

Année	Taux d'inflation en France	Période
2022	3,149%	Q1
2022	4,855%	Q2
2022	5,879%	Q3
2022	6,201%	Q4
2023	5,599%	Q1
2023	4,942%	Q2
2023	4,273%	Q3
2023	3,858%	Q4
2024	3,637%	Q1
2024	2,717%	Q2
2024	2,112%	Q3
2024	1,847%	Q4
2025	1,801%	Q1
2025	1,837%	Q2
2025	1,880%	Q3
2025	1,861%	Q4
2026	1,752%	Q1
2026	1,574%	Q2
2026	1,387%	Q3
2026	1,255%	Q4
2027	1,188%	Q1
2027	1,180%	Q2
2027	1,221%	Q3
2027	1,297%	Q4

Tableau A.14 : Taux d'inflation pour le scénario court terme du pilote climatique ACPR

Liste des figures

Figure 1 : Démarche pour la mesure de dérive en fréquence.....	3
Figure 2 : Densité de distribution dans les scénarios sans et avec dérive de sinistralité.....	6
Figure 3 : Limite du programme de réassurance non-proportionnel dans le scénario avec dérive	8
Figure 4 : Comparaison avec le <i>stress-test</i> climatique ACPR.....	8
Figure 5 : Résultats de la MA n°2	9
Figure 6 : Procedure for measuring frequency drift.....	11
Figure 7 : Distribution density in scenarios with and without claims drift.....	14
Figure 8 : Non-proportional reinsurance program limit in the drift scenario	16
Figure 9 : Comparison with ACPR climatic stress test	16
Figure 10 : Results of MA n°2	17
Figure I.1 : Le nombre de sinistres CatNat indemnisés en France de 1982 à 2021 [CCR].....	6
Figure I.2 : Le coût des sinistres CatNat de 1982 à 2021 en France (en millions d'euros) [CCR]	6
Figure I.3 : Evolution de la température de surface mondiale de 1950 à 2100 [GIEC]	7
Figure I.4 : Nombre de points de bascule atteints à l'horizon 2100 [GIEC].....	8
Figure I.5 : Evolution des coûts des sinistres CatNat dans le monde [SwissRe].....	9
Figure I.6 : Evolution des coûts de sinistres CatNat en France [FA]	10
Figure I.7 : Phénomène du retrait-gonflement des argiles	12
Figure I.8 : Les trois catégories de risques de durabilité	13
Figure I.9 : Calendrier des réglementations vertes en vigueur et à venir	15
Figure I.10 : Les trois piliers de la Directive Solvabilité II	21
Figure I.11 : Passage du bilan comptable au bilan économique	22
Figure I.12 : Risques pris en compte dans la formule standard	23
Figure I.13 : Structure du pilier 2.....	24
Figure I.14 : Structure du module catastrophe en non-vie	28
Figure I.15 : Calendrier des projets intégrant la notion de durabilité dans la Directive Solvabilité II.....	31
Figure II.1 : Schéma représentatif de la construction de la base de données "Météo"	38
Figure II.2 : Répartition des arrêtés par famille de risque de 2016 à 2022	40
Figure II.3 : Evolution temporelle du nombre d'arrêtés et faits générateurs (inondation)	40
Figure II.4 : Nombre d'arrêtés par département (inondation).....	41
Figure II.5 : Evolution du nombre d'arrêtés et faits générateurs (sécheresse).....	42
Figure II.6 : Nombre d'arrêtés par département depuis 2016 (sécheresse)	43
Figure II.7 : Association d'une station météorologique à chaque commune.....	44
Figure II.8 : Schéma représentatif de la construction de la base finale	44
Figure II.9 : Courbe ROC	49
Figure II.10 : Recall curve	50
Figure II.11 : Répartition de la variable d'intérêt	53
Figure II.12 : Test de Pearson pour les variables numériques.....	53
Figure II.13 : Courbe ROC et <i>recall curve</i> du modèle construit	55
Figure II.14 : Clustering des stations météorologiques	63
Figure II.15 : Observations des séries temporelles	64
Figure II.16 : Observation des fonctions d'autocorrélation.....	66
Figure II.17 : Décompositions STL des données	67
Figure II.18 : Séries temporelles désaisonnalisées	68
Figure II.19 : Séries temporelles différenciées	69
Figure II.20 : ACF et PACF des séries stationnaires	71
Figure II.21 : Prédications pour la base test	72

Figure II.22 : Résultats des prédictions pour le GLM inondation	75
Figure II.23 : Prévision linéaire au-delà de 2027 (inondation)	75
Figure II.24 : Résultats des prédictions pour le GLM sécheresse	76
Figure II.25 : Prévision linéaire au-delà de 2027 (sécheresse)	76
Figure II.26 : Modélisation du coût des sinistres sur le portefeuille exemple.....	86
Figure II.27 : Densité de distribution dans les scénarios sans et avec dérive	89
Figure II.28 : Programme de réassurance de l'organisme fictif.....	89
Figure II.29 : Application du programme de réassurance dans le scénario sans dérive	91
Figure II.30 : Application du programme de réassurance dans le scénario avec dérive	92
Figure II.31 : Mean residual life plot pour les simulations sans (à gauche) et avec (à droite) dérive	95
Figure II.32 : Distribution des excès dans les deux scénarios sur le portefeuille exemple	98
Figure III.1 : Excédent de sinistre après quote-part dans le scénario sans dérive	105
Figure III.2 : Evolution des cotisations acquises brutes et du résultat net en scénario central	110
Figure III.3 : Evolution du ratio de couverture du SCR en scénario central.....	111
Figure III.4 : Limites du programme de réassurance dans le scénario avec dérive.....	113
Figure III.5 : Programme de réassurance de Climatia pour le <i>stress-test</i>	113
Figure III.6 : Evolution des cotisations acquises et du résultat net dans le scénario stressé	115
Figure III.7 : Evolution du ratio de couverture du SCR en scénario stressé.....	116
Figure III.8 : Projection du SCR en scénario stressé	116
Figure III.9 : Evolution des cotisations acquises brutes et du résultat net en scénario MA 1	119
Figure III.10 : Evolution du ratio de couverture du SCR en scénario MA 1	120
Figure III.11 : Projection du SCR en scénario MA 1	120
Figure III.12 : Programme de réassurance de Climatia pour le MA n°2	122
Figure III.13 : Evolution des cotisations acquises brutes et du résultat net en scénario MA 2.....	123
Figure III.14 : Evolution du ratio de couverture du SCR en scénario MA 2	124
Figure III.15 : Projection du SCR en scénario MA 2	125
Figure III.16 : Coefficients utilisés pour le <i>stress-test</i> climatique à court terme de l'ACPR.....	126
Figure III.17 : Evolution des cotisations acquises brutes et du résultat net en scénario stressé 2	128
Figure III.18 : Evolution du ratio de couverture du SCR en scénario stressé 2.....	128
Figure III.19 : Projection du SCR en scénario stressé 2.....	129
Figure A.1 : Courbe ROC et <i>recall curve</i> du modèle "Sécheresse"	136
Figure A.2 : Evolution de la température pour la station de Reims entre 2016 et 2022	137
Figure A.3 : Evolution de la température pour la station de Rennes entre 2016 et 2022	137
Figure A.4 : Evolution de la température pour la station de Gourdon entre 2016 et 2022.....	138
Figure A.5 : Evolution de la température pour la station de Loudes entre 2016 et 2022.....	138
Figure A.6 : Evolution de la température pour la station de Nice entre 2016 et 2022	139

Liste des tableaux

Tableau 1 : Métriques d'erreur du modèle construit.....	4
Tableau 2 : Mesures de performance du modèle inondation.....	4
Tableau 3 : Résultats sur l'évolution de la température à horizon 2027	4
Tableau 4 : Extrait du <i>benchmark</i> réalisé pour la dérive de coût.....	5
Tableau 5 : Estimation des paramètres de la distribution des excès sur le portefeuille exemple.....	7
Tableau 6 : Model error metrics.....	12
Tableau 7 : Flood model performance measurements.....	12
Tableau 8 : Results on temperature trends to 2027	12
Tableau 9 : Extract from the cost drift benchmark	13
Tableau 10 : Estimation of the parameters of the excess distribution on the example portfolio	15
Tableau II.1 : Données Géorisques.....	36
Tableau II.2 : Données Météo France	37
Tableau II.3 : Données INSEE.....	37
Tableau II.4 : Données DATA GOUV	37
Tableau II.5 : Regroupement en famille de risques.....	39
Tableau II.6 : Exemples de fonctions de lien	46
Tableau II.7 : Paramètres d'une régression logistique	47
Tableau II.8 : Matrice de confusion	48
Tableau II.9 : Informations de la base initiale utilisée pour la modélisation.....	51
Tableau II.10 : Distribution de la variable "Température" avant traitement.....	51
Tableau II.11 : Distribution de la variable "Température" avant traitement.....	52
Tableau II.12 : Pourcentage de valeurs manquantes par variable	52
Tableau II.13 : Métriques d'erreur du modèle construit.....	54
Tableau II.14 : Matrice de confusion du modèle construit	55
Tableau II.15 : Stations de référence après clustering.....	63
Tableau II.16 : Résultats des tests de stationnarité	70
Tableau II.17 : Résultats des prédictions sur la base test.....	72
Tableau II.18 : Ecart entre les stations de Bâle et Reims.....	73
Tableau II.19 : Mesures d'évolution de la température à horizon 2027	74
Tableau II.20 : Mesures d'évolution de la température à horizon 2050	74
Tableau II.21 : Hypothèses CCR - Météo France	78
Tableau II.22 : Hypothèses France Assureurs.....	78
Tableau II.23 : Hypothèses ACPR.....	78
Tableau II.24 : Hypothèses Covéa	79
Tableau II.25 : Hypothèses choisies pour la dérive de coût	79
Tableau II.26 : Données du portefeuille exemple étudié	85
Tableau II.27 : Résultats des tests pour la modélisation du coût des sinistres sur le portefeuille exemple	87
Tableau II.28 : Hypothèses de dérive utilisées pour la modélisation du portefeuille exemple	88
Tableau II.29 : Résultats des simulations à horizon 2027 pour le portefeuille exemple.....	90
Tableau II.30 : Résultats des simulations à horizon 2027 pour les événements graves	91
Tableau II.31 : Choix du seuil pour le portefeuille exemple	96
Tableau II.32 : Estimation des paramètres de la distribution des excès sur le portefeuille exemple.....	97
Tableau III.1 : Les différents contrats commercialisés par Climatia.....	101
Tableau III.2 : Compte de résultat technique non-vie.....	101
Tableau III.3 : Compte de résultat non technique.....	102
Tableau III.4 : Actif.....	102

Tableau III.5 : Passif.....	102
Tableau III.6 : Bilan prudentiel	103
Tableau III.7 : Résultats du Pilier 1 au 31/12/2022	104
Tableau III.8 : Taux de cession des primes en 2022	105
Tableau III.9 : Taux de cession des sinistres en 2022	105
Tableau III.10 : Hypothèse d'évolution des primes acquises brutes	106
Tableau III.11 : Hypothèse d'évolution des S/P.....	107
Tableau III.12 : Hypothèse d'évolution du taux de cession des primes global.....	108
Tableau III.13 : Hypothèse d'évolution du taux de cession des sinistres	108
Tableau III.14 : Hypothèse d'allocation d'actifs.....	109
Tableau III.15 : Projection du S/P pour la Lob 7 en scénario central.....	109
Tableau III.16 : Projection des indicateurs de solvabilité en scénario central	111
Tableau III.17 : Projection du ratio S/P de la Lob 7 en scénario stressé.....	114
Tableau III.18 : Projection du ratio S/P de la Lob 7 en scénario MA n°1.....	118
Tableau III.19 : Projection du ratio S/P de la Lob 7 en scénario MA n°2.....	123
Tableau III.20 : Projection du ratio S/P de la Lob 7 en scénario stressé 2.....	127
Tableau A.1 : Métriques d'erreur du modèle « Sécheresse »	136
Tableau A.2 : Mesures de performance du modèle "Sécheresse"	136
Tableau A.3 : Matrice de confusion du modèle "Sécheresse"	136
Tableau A.4 : Mesures d'évolution de l'humidité à horizon 2027.....	139
Tableau A.5 : Mesures d'évolution de la pression à horizon 2027.....	139
Tableau A.6 : Mesures d'évolution du volume de pluie sur 24h à horizon 2027	140
Tableau A.7 : Matrice de corrélation du SCR Non-Vie	141
Tableau A.8 : Matrice de corrélation pour le risque de Prime & Réserve en Non-Vie.....	141
Tableau A.9 : Ecarts-types pour le risque de Prime & Réserve en Non-Vie	141
Tableau A.10 : Matrice de corrélation du SCR Santé	141
Tableau A.11 : Matrice de corrélation du SCR Marché	142
Tableau A.12 : Matrice de corrélation du risque Action	142
Tableau A.13 : Matrice de corrélation du SCR	142
Tableau A.14 : Taux d'inflation pour le scénario court terme du pilote climatique ACPR	143