



**Mémoire présenté devant le jury de l'EURIA en vue de l'obtention  
du diplôme d'Actuaire EURIA  
et de l'admission à l'Institut des Actuaire  
le 8 septembre 2022**

Par : Juliette Platel

Titre : Risque tempête : refléter la densité d'évènements dommageables à l'aide d'un indice construit sur de l'open data

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


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

*Membres présents du jury de l'Institut  
des Actuaire :*  
Romain LAILY  
Yann MILOE

*Entreprise :*  
Nom : Prim'Act **PRIM'ACT SAS**  
Signature :   
42 av. de la Grande Armée  
75017 PARIS  
Tél. : 01 42 22 11 00  
R.C.S. PARIS 791 352 784

*Membres présents du jury de l'EURIA :*  
Françoise PENE

*Directeurs de Mémoire en entreprise :*  
Nom : Frédéric PLANCHET  
Signature :

Nom : Julie FABOUX  
Signature : 

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

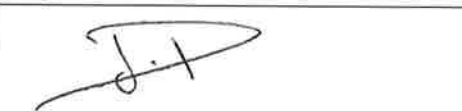
*Secrétariat :*

*Signature du responsable entreprise*



*Bibliothèque :*

*Signature du candidat*





## Résumé

---

La multiplication des évènements météorologiques qualifiés d'extrêmes fait du risque climatique un enjeu crucial pour les organismes d'assurance. Le dernier rapport du GIEC prévoit une augmentation de la fréquence de ces phénomènes qui risquent d'être d'une intensité accrue. Pour faire face aux impacts du changement climatique, parmi lesquels des dommages dont les coûts sont chaque année plus élevés, il est devenu essentiel pour les organismes d'assurance et de réassurance d'être en mesure d'appréhender ce nouveau risque.

Parmi le large panel d'évènements qui entrent dans la catégorie des phénomènes climatiques extrêmes, les tempêtes font partie des plus coûteux au monde mais également à l'échelle de la France métropolitaine. Dans le cadre de l'appréhension de risques tels que le risque tempête, et tout autre risque lié aux phénomènes climatiques, l'assurance paramétrique est une solution qui connaît un certain engouement. Le coeur de ce type d'assurance est le paramétrage d'un indice qui soit en mesure de capter au mieux le risque couvert.

Ce mémoire a pour but d'ouvrir la discussion sur le paramétrage d'un indice tempête qui permette de capter au mieux les évènements tempétueux dommageables. L'objectif est d'être en mesure de lier l'aspect exposition aux dommages avec l'aspect météorologique inhérent à ce type de risque. Après une première partie de présentation du risque climatique et d'étude de ce que sont les tempêtes, les différentes étapes menant au choix de l'indice adéquat seront présentées. Enfin, en se basant sur les données prospectives des vitesses de vent, l'indice tempête sera projeté afin d'estimer les évolutions possibles de ce risque.

---

*Mots-clés : risque climatique, indice tempête, GIEC, projections*

## Abstract

---

The increase in weather events described as extreme has made climate risk a crucial issue for insurance organizations. The latest Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) report predicts a rise in the frequency of these phenomena, which are likely to be of higher intensity. Therefore, it has become critical for insurance and reinsurance organizations to cope with the increasingly expensive impacts of climate change.

Among the wide range of events that fall into the category of extreme weather events, storms are among the most expensive worldwide as well as on the scale of metropolitan France. Parametric insurance is currently considered a solution of choice to address these wide range climate risks. Its purpose is to set up an index that best captures the risk to cover.

This master's thesis will discuss the parameterization of a storm index that best defines damaging stormy events. Its purpose is to link the exposure to damage with the meteorological aspect of the risk. After introducing the climate risk and defining storm concept, the reflection on the choice of the appropriate index will be debated. Finally, the storm index will be discussed using prospective wind speed data, leading to potential changes in the risk evaluation.

---

*Keywords : climate risk; storm index; IPCC; projections.*

# Note de Synthèse

Les tempêtes font partie des phénomènes météorologiques les plus dommageables. Il est donc essentiel pour les compagnies d'assurance et de réassurance d'être en mesure de fournir des couvertures qui soient adaptées. Dans le cas de la couverture des risques liés au climat, le modèle des assurances paramétriques semble être une solution envisageable. Le principe de ce type d'assurance est de verser un dédommagement dont le montant dépend de la valeur d'un indice. Par exemple, dans le cas d'une couverture contre le risque sécheresse pour des agriculteurs, l'indice serait lié au nombre de jours sans pluie. Le dédommagement serait versé à partir d'un certain nombre de jours sans pluie et serait ensuite croissant avec le nombre de jours de sécheresse consécutifs. La principale problématique de l'assurance paramétrique est de trouver l'indice adéquat, c'est-à-dire celui qui soit le plus en mesure de capter le risque couvert. Cet indice doit être en capacité de relier un paramètre météorologique, inhérent au risque climatique couvert, et un paramètre d'exposition qui permette d'évaluer les potentiels dommages. Ce mémoire présente une possibilité d'indice qui permet de capter le risque tempête, en se basant uniquement sur des données en libre accès.

## Le calibrage de l'indice

La littérature propose des exemples d'indice tempête qui ont déjà été mis en oeuvre. La thèse de A. MORNET (2015) en expose plusieurs dont deux sont particulièrement intéressants. Le premier, celui développé par A. MORNET (2015), est basé sur une construction en trois étapes. Tout d'abord est calculé un indice de vent, uniquement lié à un paramètre météorologique qui est la vitesse du vent. Cet indice de vent est défini par

$$I_w^d(s) = ([w^d(s) - w_q(s)])^\alpha,$$

avec :

- $I_w^d(s)$  l'indice de vent du jour  $d$  à l'échelle locale pour la station  $s$ ,
- $w^d(s)$  la vitesse maximale du vent enregistrée le jour  $d$  à l'échelle locale pour la station  $s$ ,
- $\alpha$  un exposant à déterminer pour contrôler l'influence des dépassements selon leur intensité,
- $w_q(s)$  le quantile à  $q\%$  sur l'ensemble des vitesses relevées à la station  $s$ .

À partir de cet indice de vent est estimé un premier indice tempête spécifique à chaque zone de risque homogène qui compose le territoire, ces zones étant préalablement établies par l'auteur. Cet indice propre à une zone est défini par

$$I_S(k) = \sum_{s \in \text{zone}_k} R(s) \times \max_{d \in E} \left( \frac{I_w^d(s)}{N^d} \right),$$

avec :

- $I_w^d(s)$  l'indice de vent pour la station  $s$ ,

- $R(s)$  l'exposition du portefeuille associée à la station  $s$ ,
- $E$  la période étudiée,
- $N^d$  le nombre de stations actives le jour  $d$ .

Enfin, depuis cet indice spécifique à une zone de risque homogène est calculé un indice tempête général défini par

$$I_S = \sum_{k=1}^6 P(k) \times I_S(k) \times \beta_k,$$

avec :

- $\beta_k$  un paramètre d'optimisation pour minimiser les écarts entre les coûts globaux et l'indice tempête lors des événements majeurs de la période prise pour historique,
- $P(k)$  le poids relatif de chaque zone dans le portefeuille.

Cet indice est spécifique au portefeuille d'Allianz avec lequel il a été construit. Dans le cadre de ce mémoire, qui a pour but la création d'un indice général basé sur l'open data, le paramètre d'exposition de la formule doit être indépendant de tout portefeuille. Un autre type d'indice tempête évoqué dans la thèse de A. MORNET (2015) est celui développé en Suède qui se définit par

$$\log(loss_i) = \alpha_0 + \sum_{j=1}^K \alpha_j p_j + \epsilon_i,$$

avec :

- $\log(loss_i)$  les dommages dans la région  $i$ ,
- $p_j$  la pression exercée au point  $j$ .

Dans ce cas, les paramètres  $\alpha$  et  $\epsilon$  sont déterminés par apprentissage sur une base de coûts liée à un portefeuille d'assurés. User d'une technique d'apprentissage n'est pas chose possible dans notre cas, les assureurs et réassureurs ne fournissant pas leurs bases de coûts engendrés par les tempêtes en open data.

Nous choisissons donc dans notre indice de mêler un paramètre météorologique, qui est la vitesse de vent supérieure à un certain quantile (afin de ne capter que les événements les plus extrêmes), et un paramètre d'exposition, qui est la densité de population. Les vitesses de vent sont celle fournies sur le portail DRIAS (2020a), ce sont des vitesses moyennes journalières mesurées en chacun des points de la grille Safran (points répartis de manière équidistante sur tout le territoire français, avec une résolution de 8 km). L'indice est calculé en chacun des points de la grille Safran, c'est donc un indice local. La densité prise en compte est la moyenne des densités communales entourant chacun des points de la grille. L'indice développé dans ce mémoire se calcule en deux étapes. Tout d'abord, un indice tempête journalier, défini par

$$I_{p,j} = [(v_{p,j} - v_{80\%}) \times \mathbf{1}_{\{v_{p,j} \geq v_{80\%}\}}]^2 \times \left(\frac{D_p}{10000} + 1\right),$$

avec :

- $v_{80\%}$  la vitesse du quantile à 80%, calculée à l'échelle nationale sur les vitesses moyennes journalières des années 2015 à 2019,
- $v_{p,j}$  la vitesse moyenne journalière du vent enregistrée au point  $p$  le jour  $j$ ,

- $D_p$  la densité de population moyenne de la zone entourant le point DRIAS  $p$ ,
- $\mathbb{1}_{\{v_{p,j} \geq v_{80\%}\}}$  une indicatrice qui permet de ne conserver que les indices associés à des vitesses de vent dépassant le quantile à 80% calculé sur l'historique.

Depuis cet indice journalier se calcule un indice tempête général défini par

$$I_p = \sum_{j=1}^N I_{p,j},$$

avec  $N$  qui peut prendre deux valeurs différentes :

- la durée de la tempête en nombre de jours, si l'on cherche à établir le montant d'un dédommagement dans le cadre de la couverture paramétrique,
- 365 si l'on cherche à travailler sur l'indice annuel.

Dans le cas où l'objectif est de définir le montant du dédommagement versé dans le cadre de la couverture paramétrique, ce dernier est directement lié à la valeur de l'indice. Comme cela a été présenté par F. RITLÉNG ET C. NGUYEN (2014), le tarif peut être fixé ainsi : en dessous d'un certain seuil  $A$ , il serait nul, car l'évènement tempétueux ne serait pas considéré comme extrême, et au dessus d'un certain seuil  $B$ , il atteindrait un plafond  $C$ , fixé au préalable. Entre les bornes  $A$  et  $B$  le montant serait défini par

$$Tarif = \frac{I-A}{B-A} \times C.$$

La figure 4 illustre ce mécanisme.

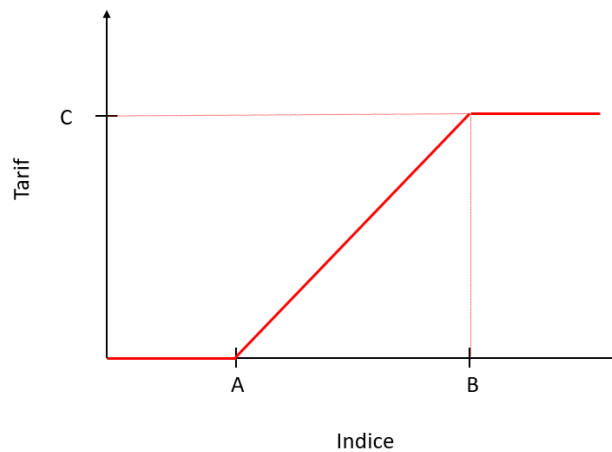


FIGURE 1 : Exemple d'évolution du tarif en fonction de la valeur de l'indice

La piste de la tarification d'une couverture paramétrique n'est pas approfondie dans ce mémoire, par absence de base coût, c'est donc l'indice annuel qui est étudié étant donné qu'il permet une vision globale sur l'année, notamment pour ce qui est des projections. Ainsi, la formule de l'indice tempête utilisé dans ce mémoire est

$$I_p = \sum_{j=1}^{365} I_{p,j},$$

## Projection de l'indice tempête

L'indice annuel permet d'avoir une vision globale sur l'année et donc de prévoir les coûts potentiels du risque tempête de l'année à venir pour les organismes d'assurance et de réassurance. Dans cette dynamique de provisionnement, seules des projections à très court terme sont nécessaires (à horizon un ou deux ans). L'évolution de l'indice est illustrée par les différents indicateurs exposés dans le tableau 5. Ces projections sont faites suivant deux scénarios du GIEC, le scénario RCP 2.6 et le scénario RCP 8.5.

Indicateur	2020	2021	2022		2023	
			RCP 2.6	RCP 8.5	RCP 2.6	RCP 8.5
Indice minimum	0	0	0	0	0	0
Indice maximum	61 985	60 673	76 535	72 815	78 772	66 588
Moyenne	3 781	2 473	3 772	4 247	5 764	3 807
Écart type	4 682	4 033	5 077	5 364	6 581	4 844

TABLE 1 : Indicateurs de l'indice tempête : évolution de 2020 à 2023

On constate ainsi que l'année 2022 devrait donner lieu à des indices tempête globalement plus élevés qu'en 2021. Dans le cas du scénario RCP 2.6, cette tendance à la hausse se confirme en 2023. Ce n'est pas le cas du scénario RCP 8.5, pour lequel l'année 2023 connaît des indices tempête globalement plus bas qu'en 2022.

Outre ces projections à court terme, il est également intéressant de regarder les projections à des horizons plus éloignés (2050 et 2100). En plus de permettre d'estimer l'évolution du risque tempête, de telles projections permettent également de savoir si l'indice deviendrait obsolète dans les années à venir ou s'il resterait utilisable. Le tableau 6 montre des indicateurs pour illustrer l'évolution de l'indice tempête. On constate qu'il y a une certaine stabilité temporelle ce qui montre que le risque tempête ne devrait pas connaître d'évolutions majeures dans les années à venir. On remarque toutefois l'indice tempête maximum assez élevé atteint pour le scénario RCP 2.6 en 2050 ainsi que la moyenne des indices tempêtes de l'année 2050 pour le scénario RCP 8.5 qui est également assez élevée. L'année 2050 pourrait donc être légèrement plus propice aux tempêtes sans toutefois que cette tendance s'inscrive dans le temps, l'année 2100 présentant des indices tempête moyens du même ordre qu'en 2020.

Indicateur	2020	2050		2100	
		RCP 2.6	RCP 8.5	RCP 2.6	RCP 8.5
Indice minimum	0	0	0	0	0
Indice maximum	61 985	73 575	57 227	59 621	53 935
Moyenne	3 781	3 670	4 638	3 394	3 103
Écart type	4 682	5 098	5 403	4 554	3 929

TABLE 2 : Indicateurs de l'indice tempête : comparaison des années 2020, 2050 et 2100

## Analyse de l'indice tempête : distribution et loi Gamma

La répartition des charges sinistres peut être assimilée à une loi Gamma. Il est intéressant d'observer l'évolution des paramètres de cette loi aux divers horizons de projection. Le portail DRIAS (2020a) met à disposition différents modèles d'estimation des vitesses de vent. Ainsi deux visions différentes ont été adoptées pour l'étude de la loi Gamma et de son adéquation à l'indice tempête : une vision en n'utilisant qu'un seul modèle (le modèle français ALADIN63) et une vision en agrégeant tous les modèles disponibles. Pour l'année 2020, l'adéquation de la loi Gamma à l'indice calculé à partir du



modèle ALADIN63 est illustrée par la figure 5 et celle de la loi Gamma avec l'indice calculé en vision multi-modèles est illustrée par la figure 6.

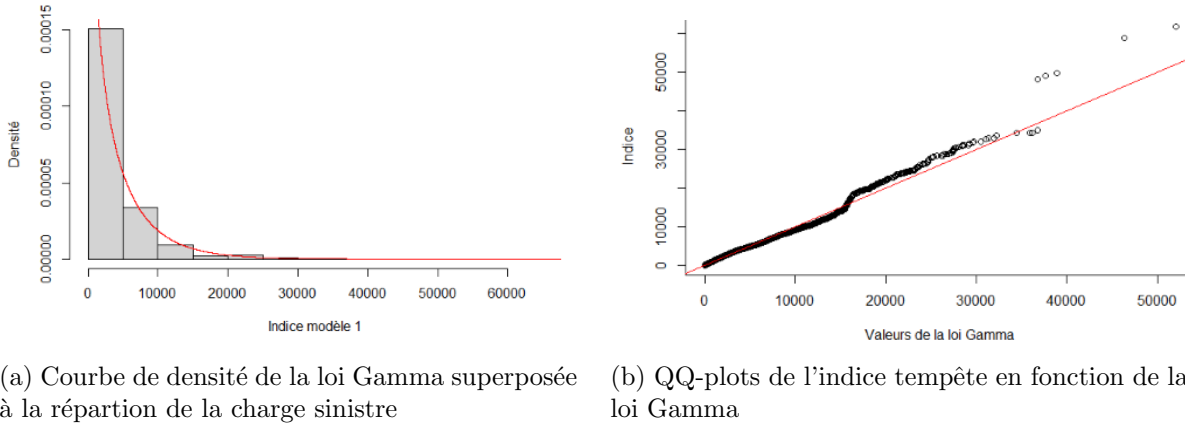


FIGURE 2 : Adéquation de la loi Gamma avec l'indice tempête calculé à partir du modèle ALADIN63

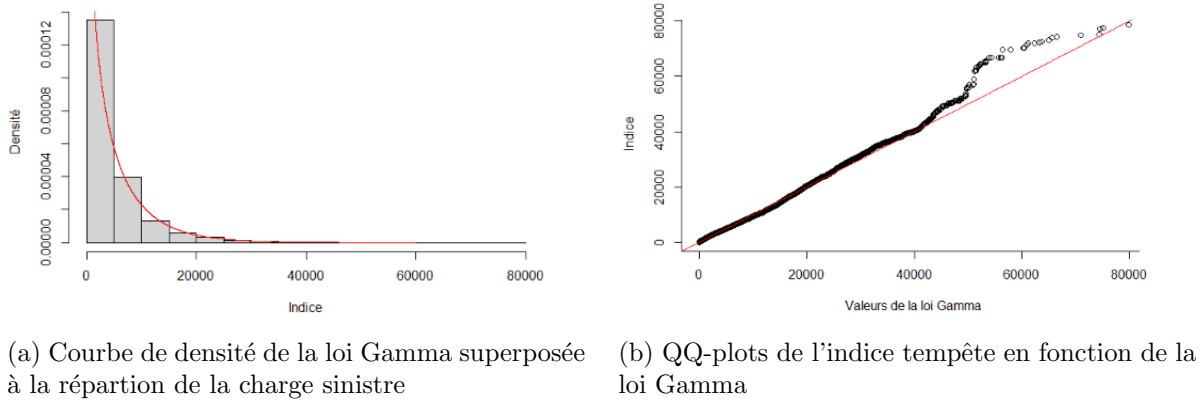


FIGURE 3 : Adéquation de la loi Gamma avec l'indice tempête calculé en vision multi-modèles

Dans les deux cas, la loi Gamma correspond, malgré une difficulté de cette loi à estimer les extrêmes de l'indice tempête, comme le montrent les graphiques quantile-quantile.

La fonction de répartition de la loi Gamma est

$$f_X : t \mapsto \begin{cases} \frac{1}{\Gamma(\nu)} \frac{t^{\nu-1}}{\lambda^\nu} e^{-\frac{t}{\lambda}} & \text{si } t > 0, \\ 0 & \text{sinon,} \end{cases}$$

avec  $\Gamma(\nu) = \int_0^\infty t^{\nu-1} e^{-t} dt$ , la fonction Gamma d'Euler. Le paramètre de forme est  $\nu$  et le paramètre d'échelle est  $\lambda$ . Le tableau 7 pour la vision modèle ALADIN63 et le tableau 8 pour la vision multi-modèles, exposent l'évolution de ces paramètres à divers horizons de projections, ainsi que l'évolution de la variance et de l'espérance de chacune des lois Gamma associées à l'indice tempête annuel de l'année observée.

	2020	2050		2100	
		RCP 2.6	RCP 8.5	RCP 2.6	RCP 8.5
Paramètre de forme ( $\nu$ )	0,51	0,52	0,75	0,56	0,63
Paramètre d'échelle ( $\lambda$ )	10 000	7 058	6 259	6 079	4 949
Moyenne ( $E(X)$ )	5 100	3 692	4 672	3 424	3 129
Écart type ( $\sigma(X)$ )	7 141	5 105	5 408	4 562	3 935

TABLE 3 : Paramètres de la loi Gamma pour les années 2020, 2050 et 2100, modèle ALADIN63

	2020	2050		2100	
		RCP 2.6	RCP 8.5	RCP 2.6	RCP 8.5
Paramètre de forme ( $\nu$ )	0,66	0,62	0,64	0,54	0,68
Paramètre d'échelle ( $\lambda$ )	7 311	6 046	6 386	6 903	7 776
Moyenne ( $E(X)$ )	4 829	3 746	4 070	3 704	5 265
Écart type ( $\sigma(X)$ )	5 942	4 759	5 098	5 057	6 398

TABLE 4 : Paramètres de la loi Gamma pour les années 2020, 2050 et 2100, agrégation de modèles

Dans le cas de la projection avec le modèle ALADIN63 exclusivement, on constate qu'il y a une légère tendance à la baisse du paramètre d'échelle et de la moyenne dans le temps et ce, quel que soit le scénario RCP. Dans le cas de la projection avec agrégation de tous les modèles, aucune tendance de la sorte ne ressort. Il y a une stabilité temporelle avec une tendance pour les moyennes du scénario RCP 2.6 à être systématiquement inférieures à celles du scénario RCP 8.5. Ces deux tableaux permettent donc de constater une relative stabilité (plus prononcée dans le cas de l'agrégation de modèles), quel que soit l'horizon de temps.

## Conclusion

L'assurance paramétrique est un moyen de couvrir des risques tels que ceux liés au climat. Le principal défi en lien avec ce type d'assurance est le paramétrage de l'indice adéquat. L'indice tempête défini dans ce mémoire prend en compte à la fois un paramètre d'exposition, la densité de population, et un paramètre météorologique, les vents dont la vitesse dépasse celle du quantile à 80 % calculée au niveau national sur un intervalle de 5 ans allant de 2015 à 2019. Cet indice, construit uniquement sur de l'open data, semble bien en mesure de capter le risque tempête.

Les projections à court, moyen et long terme, tendent à montrer une certaine stabilité de cet indice et donc du risque tempête, ce qui rejoindrait les conclusions de COVÉA (2022), qui, sur les mêmes données, avait établi que d'ici à 2050 il n'y aurait pas d'évolution, que ce soit en intensité ou en fréquence, des tempêtes en France métropolitaine.

Outre l'utilisation de l'indice dans le seul but d'estimer le montant d'un dédommagement, il est intéressant pour les assureurs et réassureurs de pouvoir le projeter afin d'avoir une idée de son évolution. Les projections à court terme répondent à des problématiques de provisionnement tandis que celles à des horizons plus lointain permettent une vision à long terme et montrent également la viabilité de l'indice tempête à de tels horizons.

# Synthesis note

Storms count among the most harmful weather events. It is therefore paramount for the insurance and reinsurance companies to provide an adapted coverage. The parametric insurance is regarded as a potential model for covering climate-related risks. Its purpose is to pay a compensation which amount is related to the value of an index. For instance, the index of the drought risk for farmers would be linked to the number of rain-free days. The indemnification would be paid from a defined number of rain-free days and then would increase with the actual number of additional dry days encountered. The main challenge with parametric insurance is to define the adequate index for a specific risk. It should link a climate parameter related to the risk covered to an exposure parameter that allows the potential damage to be evaluated. This master's thesis presents a potential index targeted to storm risks that uses only free-access data.

## The index calibration

Literature provides examples of already implemented storm index. Two of them, presented in the thesis of A. Mornet (2015) are of particular interest. The first one, developed by A. Mornet (2015), is based on a 3-step process. The wind index is first calculated from the wind speed as unique weather parameter. This index is defined as

$$I_w^d(s) = ([w^d(s) - w_q(s)])^\alpha,$$

with :

- $I_w^d(s)$  : wind index at day  $d$  at the local scale for the station  $s$ ,
- $w^d(s)$  : maximum wind speed recorded at day  $d$  at the local scale for the station  $s$ ,
- $\alpha$  : exponent to be specified to control the influence of excesses, based on their intensity,
- $w_q(s)$  : quantile at  $q\%$  on all the speeds recorded at station  $s$ .

A first storm index, specific to each homogenous risk area of the territory, is assessed from this wind index (the risk areas were established in advance by the author). This area-specific index is

$$I_S(k) = \sum_{s \in zone_k} R(s) \times \max_{d \in E} \left( \frac{I_w^d(s)}{N^d} \right),$$

with :

- $I_w^d(s)$  : the wind index for the station  $s$ ,
- $R(s)$  : portfolio's exposure associated with station  $s$ ,
- $E$  : evaluation period,
- $N^d$  : number of active stations at day  $d$ .

Finally, the following global storm index is calculated from the storm index specific to a homogeneous risk area

$$I_S = \sum_{k=1}^6 P(k) \times I_S(k) \times \beta_k,$$

with :

- $\beta_k$  : optimization parameter to minimize the gap between the global costs and the storm index during the major events of the referred period,
- $P(k)$  : relative weight of each area in the portfolio.

This index is specific to the Allianz portfolio with which it has been built. The exposure parameter in the formula must be independent from any portfolio since purpose of this master's thesis is to create a global index based on open data. The following, alternative storm index is referred to in Mornet's master's thesis developed in Sweden:

$$\log(loss_i) = \alpha_0 + \sum_{j=1}^K \alpha_j p_j + \epsilon_i,$$

with :

- $\log(loss_i)$  : damages in region  $i$ ,
- $p_j$  : pressure exerted at point  $j$ .

In that case, the  $\alpha$  and  $\epsilon$  parameters are determined by learning processes based upon costs associated with an insurance portfolio. Utilizing a learning technique is not possible here since the bases of the costs associated with the storms for insurers and reinsurers are not available with open data.

Therefore, our index will combine a weather parameter (wind speed when exceeding a defined quantile, in order to capture the most extreme events) and an exposure parameter (the population density). The wind speed is provided on the DRIAS (2020a) portal and corresponds to the mean daily speed measured on each point of the Safran grid (points distributed equidistantly over the French territory, with an 8-km resolution). The index is calculated on each point of the grid and is therefore a local index. The density considered is the average density of all the municipalities surrounding each point on the grid. The index used in this thesis is calculated in 2 steps. First, the daily storm index as shown below

$$I_{p,j} = [(v_{p,j} - v_{80\%}) \times \mathbf{1}_{\{v_{p,j} \geq v_{80\%}\}}]^2 \times \left(\frac{D_p}{10000} + 1\right),$$

with :

- $v_{80\%}$  : speed of the 80% quantile, calculated nationally using the daily mean values from 2015 to 2019,
- $v_{p,j}$  : average daily speed of the wind recorded at point  $p$  on day  $d$ ,
- $D_p$  : average population density of the area surrounding the DRIAS point  $p$ ,
- $\mathbf{1}_{\{v_{p,j} \geq v_{80\%}\}}$  : indicator that preserves only the indices associated to wind speeds that exceed the 80% quantile calculated on historic values.

Then, and from this daily index, the following, global storm index is implemented

$$I_p = \sum_{j=1}^N I_{p,j},$$

N can take different values:

- the storm duration in days, to calculate the cost of the indemnification using the parametric covering,
- 365 if the annual index is considered.

In case the objective would be to define the amount of the indemnification paid using the parametric coverage, this amount is directly correlated to the index value (F. RITLENG et C. NGUYEN, 2014). Below a certain threshold A there would be no indemnification because the stormy event would not be considered as extreme; above a certain threshold B, it would reach a ceiling value C, fixed in advance. Between the A and B milestones, the amount would be defined by

$$Price = \frac{I-A}{B-A} \times C.$$

The figure 4 shows the process.

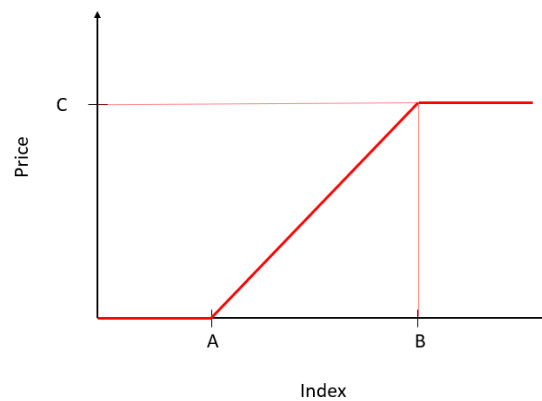


Figure 4: Example of price fluctuations according to the index value

The pricing of a parametric coverage was not studied further in this thesis due to the absence of any cost basis. The annual index is used instead as it allows a global view over the year, especially concerning the projections. Consequently, the storm index formula developed in this thesis is

$$I_p = \sum_{j=1}^{365} I_{p,j},$$

### Storm index projection

The yearly index gives access to a global annual view which allows the insurance and reinsurance companies to plan the potential costs of the storm index for the year to come. In this provisioning dynamic, only short-term projections are required (in a one to two years horizon). The index evolution is illustrated by different indicators as shown in table 5. These projections are done in accordance with two different scenarios from the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), the RCP 2.6 and the RCP 8.5.

Indicator	2020	2021	2022		2023	
			RCP 2.6	RCP 8.5	RCP 2.6	RCP 8.5
Minimum index	0	0	0	0	0	0
Maximum index	61 985	60 673	76 535	72 815	78 772	66 588
Mean value	3 781	2 473	3 772	4 247	5 764	3 807
Standard deviation	4 682	4 033	5 077	5 364	6 581	4 844

Table 5: Storm index indicators: evolution from 2020 to 2023

Thus, year 2022 should lead to an overall higher storm index as compared with 2021. In the case of scenario RCP 2.6, the trend is still rising in 2023. The picture is different for scenario RCP 8.5, with a 2023 storm index generally lower than in 2022.

In addition to the short-term projections, looking at projections over longer-term periods (2050 and 2100) is also interesting, as it indicates whether the index would become obsolete in years to come or would remain valid. Table 6 specifies the indicators that reflect the evolution of the storm index. It evidences a certain degree of stability over time, meaning that the storm risk should not evolve significantly in the next years.

Indicator	2020	2050		2100	
		RCP 2.6	RCP 8.5	RCP 2.6	RCP 8.5
Minimum index	0	0	0	0	0
Maximum index	61 985	73 575	57 227	59 621	53 935
Mean value	3 781	3 670	4 638	3 394	3 103
Standard deviation	4 682	5 098	5 403	4 554	3 929

Table 6: Storm index indicators: comparison of the years 2020, 2050 and 2100

### Analysis of the storm index: distribution and Gamma law

The claims expense sharing can be treated as a Gamma law. The DRIAS (2020a) portal provides various models for assessing the wind speed, making it possible to study the evolution of the parameters of this law at different projection horizons. Thereby, two strategies have been considered to evaluate the adequacy of the Gamma law with the storm index in 2020: one using the single French ALADIN63 model (figure 5 below), the other one aggregating all the available models (figure 6 below).

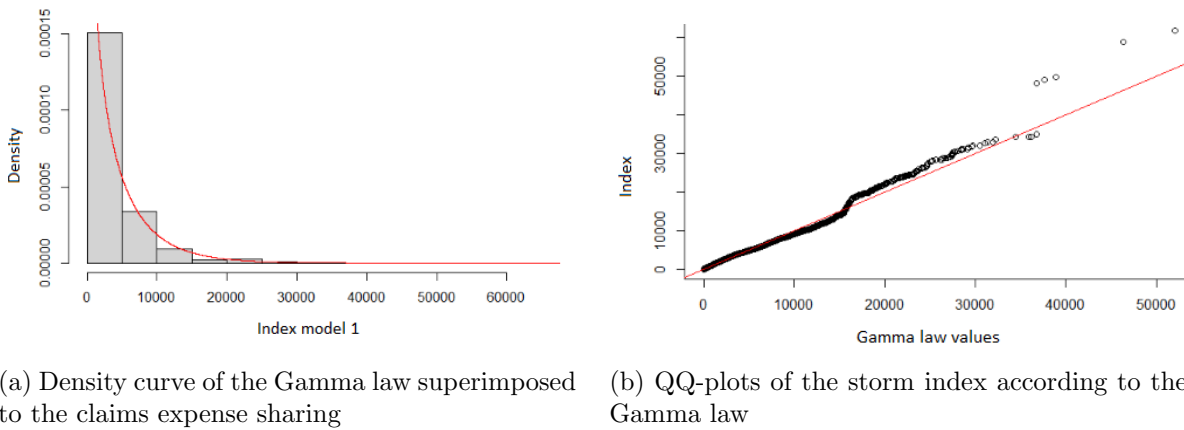


Figure 5: Adequacy of the Gamma law with the storm index calculated with the ALADIN63 model

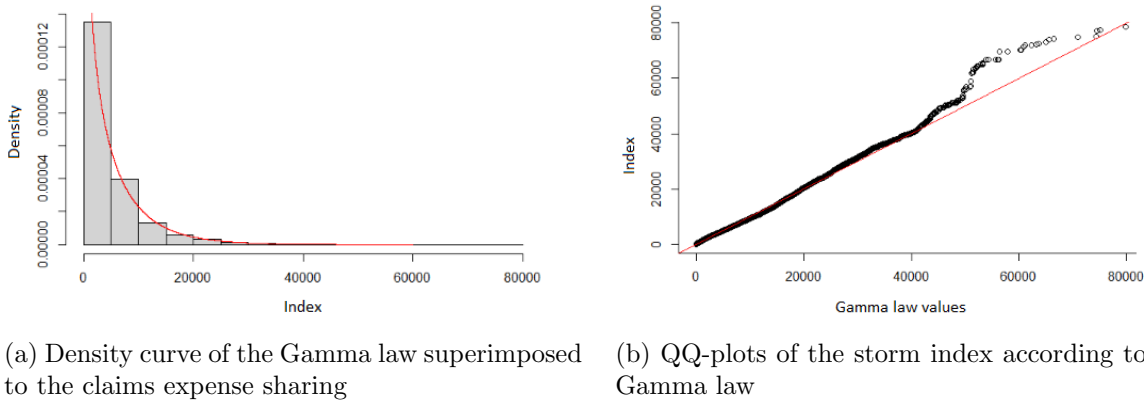


Figure 6: Adequacy of the Gamma law with the storm index calculated with the multi-models scheme

In both cases, Gamma law fits with the index values, even if there is some difficulties to predict the extreme values as it is shown by the QQ-plots. The distribution function of the Gamma law is

$$f_X : t \mapsto \begin{cases} \frac{1}{\Gamma(\nu)} \frac{t^{\nu-1}}{\lambda^\nu} e^{-\frac{t}{\lambda}} & \text{if } t > 0, \\ 0 & \text{otherwise,} \end{cases}$$

with  $\Gamma(\nu) = \int_0^\infty t^{\nu-1} e^{-t} dt$ , Euler's Gamma function. The shape parameter is  $\nu$  and the scale parameter is  $\lambda$ . The table 7 for the ALADIN63 model and the table 8 for the multi-models scheme depict the evolution of these parameters to diverse horizon projections as well as the variance and mean evolution of each of these Gamma laws associated to the yearly storm index of the year observed.

	2020	2050		2100	
		RCP 2.6	RCP 8.5	RCP 2.6	RCP 8.5
Shape parameter ( $\nu$ )	0,51	0,52	0,75	0,56	0,63
Scale parameter ( $\lambda$ )	10 000	7 058	6 259	6 079	4 949
Mean ( $E(X)$ )	5 100	3 692	4 672	3 424	3 129
Standard deviation ( $\sigma(X)$ )	7 141	5 105	5 408	4 562	3 935

Table 7: Parameters of the Gamma law for years 2020, 2050 and 2100, ALADIN63 model

	2020	2050		2100	
		RCP 2.6	RCP 8.5	RCP 2.6	RCP 8.5
Shape parameter ( $\nu$ )	0,66	0,62	0,64	0,54	0,68
Scale parameter ( $\lambda$ )	7 311	6 046	6 386	6 903	7 776
Mean ( $E(X)$ )	4 829	3 746	4 070	3 704	5 265
Standard deviation ( $\sigma(X)$ )	5 942	4 759	5 098	5 057	6 398

Table 8: Parameters of the Gamma law for years 2020, 2050 and 2100, aggregation of models

The two tables make it possible to confirm a relative stability whatever the time frame.

## Conclusion

The parametric insurance is a means to cover risks such as those related to climate. The main challenge to overcome is to define the proper setting of the appropriate index. The storm index presented in this thesis comprises an exposure setting, the population density, and a weather parameter, namely the wind speed which exceeds that of the 80 % quantile measured at a national level over a 5-years interval, from 2015 to 2019. That index, built on the open data only, seems to rightfully mirror the storm risk.

Short-, medium- and long-term projections suggest a certain stability of this index and hence of the storm risk, which is in line with the conclusions of Covéa (2022); using the same data, they determined that by 2050, storms in metropolitan France should change neither in frequency nor in intensity.

Besides the utilization of the index for assessing the amount of the indemnifications, insurers and reinsurers are interested in the index projection over time to evaluate its evolution. Short-term projections respond to provisioning issues, while longer-range projections allow a long-term perspective and validate the viability of the storm index over such long periods.



# Remerciements

Je souhaite en premier lieu remercier Frédéric PLANCHET et Quentin GUIBERT pour m'avoir encadrée et accompagnée tout au long de mon travail sur ce mémoire. Je leur suis reconnaissante du temps qu'ils m'ont accordé et de leurs conseils qui m'ont permis d'avancer et d'enrichir mon travail.

Je remercie également l'ensemble du cabinet Prim'Act pour m'avoir offert un cadre idéal à la réalisation de ce travail. Je tiens en particulier à remercier ma tutrice Julie FABOUX pour son aide et pour le temps qu'elle a consacré à relire ce mémoire.

Merci à tous les membres du corps enseignant de l'EURIA ainsi qu'à Isabelle RIVOLAEN pour ses nombreuses relectures et ses encouragements.

Et enfin merci à tous mes proches pour leur soutien indéfectible et pour m'avoir apporté leur aide autant qu'ils le pouvaient.



# Table des matières

<b>Résumé</b>	<b>3</b>
<b>Abstract</b>	<b>4</b>
<b>Note de Synthèse</b>	<b>5</b>
<b>Synthesis note</b>	<b>11</b>
<b>Remerciements</b>	<b>17</b>
<b>Table des matières</b>	<b>19</b>
<b>Introduction</b>	<b>21</b>
<b>1 Contexte</b>	<b>23</b>
1.1 Risque climatique et couvertures . . . . .	23
1.2 Risque tempête . . . . .	33
1.3 Étude de la force du vent . . . . .	38
<b>2 Le calibrage de l'indice</b>	<b>45</b>
2.1 Présentation des bases de données à disposition . . . . .	45
2.2 Mise en place de l'indice tempête . . . . .	52
2.3 Calibrage de l'indice . . . . .	55
<b>3 Projections et distribution</b>	<b>83</b>
3.1 Les projections de l'indice . . . . .	85
3.2 Les différents modèles . . . . .	88
3.3 Encadrement bootstrap . . . . .	90

3.4	Distribution de l'indice . . . . .	91
3.5	Réflexions sur le choix du modèle . . . . .	105
3.6	Présentation d'autres pistes d'utilisation de l'indice tempête . . . . .	106
3.7	Limites et ouvertures . . . . .	108
	<b>Conclusion</b>	<b>109</b>
	<b>Bibliographie</b>	<b>111</b>
	<b>A Annexes</b>	<b>113</b>
A.1	Les données libre accès Météo France (SYNOP) . . . . .	113
A.2	Liste des tempêtes historiques . . . . .	115
A.3	Distribution de l'indice . . . . .	117

# Introduction

La France métropolitaine a déjà été marquée plusieurs fois par le passage de tempêtes sur son territoire. Les "tempêtes du siècle", Lothar le 26 décembre 1999 suivie de Martin le 28 décembre, se sont démarquées par leur extrême violence avec des rafales de près de 180 km/h pour Lothar et de plus de 160 km/h pour Martin. Elles sont responsables d'importants dégâts matériels et humains, avec un bilan de 92 morts et un coût estimé entre 8 et 13 milliards d'euros (LA CHAÎNE MÉTÉO, 2019). D'autres tempêtes, comme Klaus en 2009, ont également un lourd bilan avec 11 morts et environ 1,4 milliards d'euros de dégâts matériels causés par des vents ayant atteint les 192 km/h (LA CHAÎNE MÉTÉO, 2015).

Outre ces grands événements climatiques qui ont marqué les mémoires, la France est balayée plusieurs fois par an par des tempêtes ayant des rafales de vent dépassant les 100 km/h. Dans ce contexte météorologique où la France est régulièrement frappée par des vents violents, les assureurs doivent trouver des couvertures qui soient adaptées et être en mesure d'évaluer le niveau de risque auquel ils sont exposés. Parmi les solutions envisagées pour la gestion des risques liés au climat, l'assurance paramétrique connaît un certain engouement, favorisée par l'essor des techniques de récupération et de gestion des données. Le choix d'un indice adéquat est au cœur de la mise en place de ce type d'assurances.

Le premier objectif de ce mémoire sera donc de quantifier la vulnérabilité au risque de tempête à l'aide d'un indice, calibré de sorte à illustrer le plus précisément possible les zones géographiques domageables sous l'effet du vent, et ce, en utilisant exclusivement des données en libre accès.

Les risques météorologiques, étroitement liés au risque climatique, sont aujourd'hui au cœur des préoccupations. Le premier groupe de travail du sixième rapport du GIEC (2022) vient d'exposer ses conclusions qui ne sont guère optimistes. Le réchauffement climatique est sur le point d'atteindre une augmentation de 1,5 degrés.

Déjà en 2014, le GIEC annonçait dans son cinquième rapport (GIEC, 2014) que "l'évolution du climat modifie la fréquence, l'intensité, l'étendue, la durée et le moment d'apparition des phénomènes météorologiques et climatiques extrêmes, et peut porter ces phénomènes à des niveaux sans précédents." Par ailleurs le coût lié à ces catastrophes naturelles est en constante augmentation, atteignant en 2021 un record avec des dommages économiques mondiaux estimés à 280 milliards de dollars (SWISS RE, 2015-2021).

L'évolution des phénomènes tempétueux est difficile à prédire, les scientifiques n'étant arrivés à aucun consensus. Toutefois, d'après le sixième rapport d'évaluation du GIEC, les tempêtes risquent de se caractériser par une intensité et une fréquence accrues.

Ainsi le second objectif de ce mémoire sera de mener une étude sur l'évolution de l'indice dans différents scénarios de changement climatique. Des tests à court (2022 et 2023), moyen (2050) et long

termes (2100) seront menés afin d'établir quelles seront les potentielles zones à risque dans les années à venir.

Ce mémoire s'articule en trois parties. Dans un premier temps une large analyse sera menée afin d'établir le contexte climatique actuel et de définir les phénomènes tempétueux et leurs incidences. Dans la deuxième partie, une discussion sera faite autour du choix de l'indice afin d'établir la formule qui capte au mieux le risque tempête. Enfin, l'indice tempête sera étudié sous deux angles :

- d'abord sous un angle prospectif, avec l'analyse de son évolution à différents horizons ;
- ensuite sous un angle plus probabiliste avec une analyse de sa distribution et de son adéquation avec une loi paramétrique.

# Chapitre 1

## Contexte

### 1.1 Risque climatique et couvertures

#### 1.1.1 Définition du risque climatique

L'existence d'un risque est conditionnée par la notion d'aléa : un phénomène dont la réalisation est incertaine et qui pourrait entraîner des dégâts humains (décès ou blessures) ou matériels.

Comme décrit dans le Rapport au Premier ministre et au Parlement, rédigé par l'Observatoire national sur les effets du réchauffement climatique (ONERC, 2019), dans le cadre du risque climatique, cet aléa est lié au danger inhérent au passage d'une catastrophe naturelle. En plus des attributs inhérents à tout risque, qui sont la fréquence et la sévérité, le risque climatique peut être caractérisé par deux autres facteurs : la vulnérabilité et l'exposition.

Dans ce rapport de l'ONERC, la vulnérabilité est définie comme étant le "degré par lequel un système risque de subir ou d'être affecté négativement par les effets néfastes des changements climatiques, y compris la variabilité climatique et les phénomènes climatiques extrêmes". Elle va donc dépendre directement de tous les processus qui auront été mis en place pour augmenter la résistance du système aux événements climatiques.

L'exposition traduit la susceptibilité du système de subir le risque. Certaines zones sont ainsi plus susceptibles de subir un phénomène météorologique extrême du fait de leur situation géographique. C'est par exemple le cas de certaines villes côtières qui subissent chaque année d'importantes rafales. D'autres paramètres tels que la densité de population, la répartition du portefeuille d'assurés, ou encore les mécanismes de prévention mis en place, ont également une influence sur le degré d'exposition.

Ainsi l'étude du risque climatique nécessite une vision globale de plusieurs aspects. En plus de la vulnérabilité et de l'exposition du système, il faut prendre en compte le climat ainsi que les mesures mises en place pour impacter son évolution et pour s'adapter aux catastrophes. La figure 1.1 récapitule les différents éléments à prendre en compte ainsi que leurs interactions.

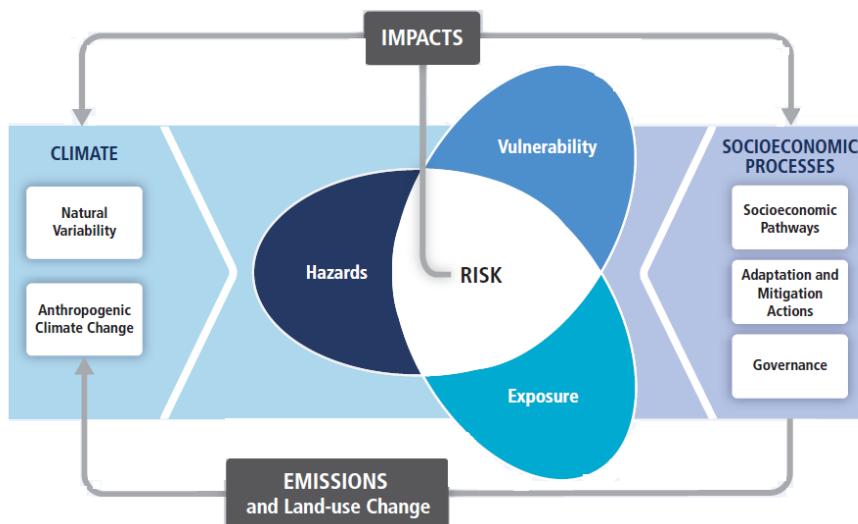


FIGURE 1.1 : Analyse de l'impact de l'exposition et de la vulnérabilité aux phénomènes météorologiques et climatiques sur les conséquences et la probabilité d'une catastrophe (GIEC, 2011)

Cette notion de risque climatique vise à appréhender les phénomènes climatiques extrêmes qui sont de plus en plus fréquents et violents. L'expression "phénomènes climatiques extrêmes" englobe tous les événements climatiques pour lesquels une variable météorologique dépasse ou passe en-dessous d'un certain seuil. Ce seuil est fixé proche de la limite, inférieure ou supérieure, de la plage des valeurs observées pour cette variable.

### 1.1.2 Le changement climatique et les rapports du GIEC

En août 2021, le premier volet du sixième rapport du GIEC (2021) annonçait que le réchauffement climatique était sur le point d'atteindre une augmentation de 1,5 degrés. Il qualifiait la responsabilité de l'Homme dans ce phénomène de "sans équivoque".

Les implications d'un tel réchauffement sont nombreuses, la plus préoccupante, outre la montée des eaux, est l'augmentation des phénomènes météorologiques extrêmes définis par le GIEC comme étant des "phénomènes rares se produisant en un endroit donné et à un moment particulier de l'année". L'emploi du terme "rare" peut interroger, c'est pourquoi l'ONERC dans son rapport apporte les précisions suivantes : "un phénomène météorologique extrême devrait normalement se produire rarement, les seuils étant fixés de telle manière que moins de 10 % des phénomènes observés soient qualifiés d'extrêmes" (ONERC, 2019).

Le GIEC travaille sur les impacts de l'action de l'Homme sur le climat et sur les démarches à entreprendre pour inverser la tendance de réchauffement climatique actuelle. Le GIEC (2014) avait donné quatre scénarios représentatifs de l'évolution de la concentration des gaz à effet de serre dans l'atmosphère. Ce sont les scénarios RCP (*Representative Concentration Pathways*), cités ci-après du plus pessimiste au plus optimiste :

- RCP 8.5 (pour un forçage radiatif s'élevant à 8,5 W/m<sup>2</sup>);
- RCP 6.0 (pour un forçage radiatif s'élevant à 6,0 W/m<sup>2</sup>);



- RCP 4.5 (pour un forçage radiatif s'élevant à  $4,5 \text{ W/m}^2$ );
- RCP 2.6 (pour un forçage radiatif s'élevant à  $2,6 \text{ W/m}^2$ ).

Le forçage radiatif désigne la différence entre l'énergie radiative émise (dont les gaz à effet de serre comme le dioxyde de carbone) et celle reçue. Un forçage radiatif positif induit une hausse des températures. Les courbes de la figure 1.2 illustrent l'évolution possible de ces différents scénarios RCP à horizon 2100. Ce graphique montre que pour se trouver dans le scénario le plus positif, il faudrait une diminution drastique des émissions de gaz à effet de serre.

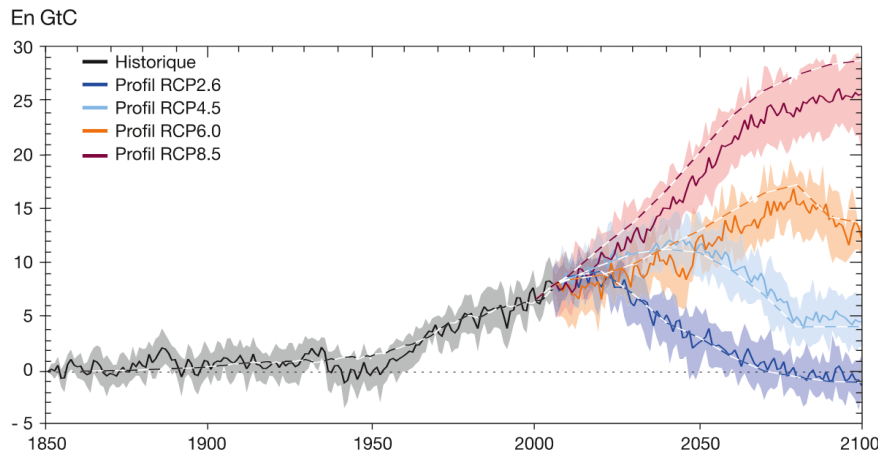


FIGURE 1.2 : Scénarios RCP (GIEC, 2014)

Récemment, le rapport du GIEC (2022) fait état de cinq nouveaux scénarios qui viennent en complément des scénarios RCP : les scénarios SSP (*Shared Socioeconomic Pathways*). Ils reflètent divers aspects de développement socioéconomique et différentes stratégies d'adaptation. Ces scénarios ont pour objectif de refléter l'implication des sociétés dans la cause climatique et d'évaluer les différentes évolutions sociétales possibles. Ils mettent en avant le rôle essentiel de l'implication des états dans la cause climatique et de leur cohésion. La question de l'impact des inégalités est également prise en compte dans ces scénarios ainsi que celui des conflits. L'aspect sociétal est d'autant plus mis en avant par la considération de l'investissement des états dans l'éducation, la santé et les nouvelles technologies. Ces différents scénarios et leur description sont exposés dans le tableau 1.1.

	Défi d'acceptation	Défi d'atténuation	Scénario
<b>SSP1</b>	Faible	Faible	Monde caractérisé par une forte coopération internationale donnant la priorité au développement durable.
<b>SSP2</b>	Moyen	Moyen	Monde caractérisé par la poursuite des tendances actuelles.
<b>SSP3</b>	Élevé	Élevé	Monde caractérisé par la compétition entre pays, une croissance économique lente, des politiques orientées vers la sécurité et la production industrielle, et peu soucieuses de l'environnement.
<b>SSP4</b>	Élevé	Faible	Monde caractérisé par de grandes inégalités entre les pays et au sein des pays. Une minorité sera responsable de l'essentiel des émissions de gaz à effet de serre (GES) et la grande partie de la population restera pauvre et vulnérable au changement climatique.
<b>SSP5</b>	Faible	Élevé	Monde caractérisé par le développement traditionnel et rapide des pays en voie de développement avec une forte consommation d'énergie. La hausse du niveau de vie permettra d'augmenter la capacité d'adaptation grâce au recul de l'extrême pauvreté.

TABLE 1.1 : Description des différents scénarios SSP (GIEC, 2022)

Ainsi, plus la cohésion internationale sera grande et plus les différents pays agiront conjointement, plus les chances de diminuer les émissions à l'échelle mondiale seront importantes. On constate que le scénario SSP 1, avec une vision très idéaliste, dépeint un monde où l'ensemble des nations agiraient ensemble pour donner la priorité à l'environnement. Au contraire, dans le scénario SSP 4, les nations continueraient de se développer sans tenter de remédier aux inégalités, au détriment des impacts sur l'environnement. Il est maintenant possible de combiner les scénarios RCP avec les scénarios SSP pour obtenir différentes prévisions possibles pour les années à venir. Ainsi, ce nouveau rapport du GIEC (2022) met en avant la nécessité d'une coopération internationale, en plus d'un travail pour limiter les émissions de gaz à effet de serre à l'échelle nationale.

### Les prévisions du GIEC concernant le vent et les tempêtes

Dans le chapitre 12 du GIEC (2022) consacré à l'évaluation régionale du changement climatique et à la gestion des risques, le GIEC établit quelques hypothèses concernant les potentielles évolutions des phénomènes venteux. Tout d'abord le constat est fait que sur les 4 dernières décennies la vitesse moyenne du vent en surface a tendance à décroître avec un léger accroissement constaté sur la dernière décennie. Cet accroissement ne fait pas l'unanimité de la communauté scientifique et est contesté par certaines études citées dans le rapport du GIEC (2022). La puissance du vent en Europe a une tendance générale à diminuer. De plus la remontée du *jet stream* vers le Nord devrait contribuer à diminuer la vitesse moyenne autour de la Méditerranée. Néanmoins, malgré la tendance à la baisse

des vents moyens observable dès l'horizon 2050, les *clusters* de tempêtes en Europe devraient quant à eux augmenter. Ce phénomène est prédit avec une confiance assez relative. Il devrait également y avoir une augmentation de la fréquence et de l'amplitude des vents forts et des tempêtes en Europe du Nord et de l'Ouest ainsi qu'en Europe Centrale. Pour ce qui est des côtes méditerranéennes, elles devraient connaître une diminution de la fréquence et une augmentation de l'amplitude des tempêtes. Pour résumer, le GIEC (2022) prévoit une augmentation en fréquence et en intensité des phénomènes tempétueux en Europe tandis que les vents moyens eux seront globalement plus bas. Ces hypothèses sont toutefois très incertaines, le GIEC lui même dit que le niveau de confiance envers ces résultats est assez faible. D'autant que d'autres études comme celle menée par COVÉA (2022), stipulent qu'il n'y a aucun signe pouvant prédire une quelconque évolution de la fréquence et de l'intensité des tempêtes en France, et ce, à horizon 2050.

### 1.1.3 La nécessité pour les assureurs de prendre en compte le risque climatique

Le changement climatique est un sujet au cœur de l'actualité. Il est indubitable que le climat change et les conséquences de ce phénomène ont un impact direct sur nos sociétés. En 2021, le coût des dommages économiques totaux dus aux catastrophes naturelles a battu un nouveau record en atteignant 280 milliards de dollars, dépassant ainsi le précédent record de 273 milliards de dollars en 2017. La figure 1.3 illustre l'évolution du coût des dommages économiques engendrés par les phénomènes climatiques depuis l'année 2015. Les estimations de ces coûts sont faites annuellement par Swiss Re dans ses études sigma (SWISS RE, 2015-2021). On constate que les coûts ont globalement tendance à augmenter ce qui coïncide avec l'augmentation du nombre de catastrophes naturelles.

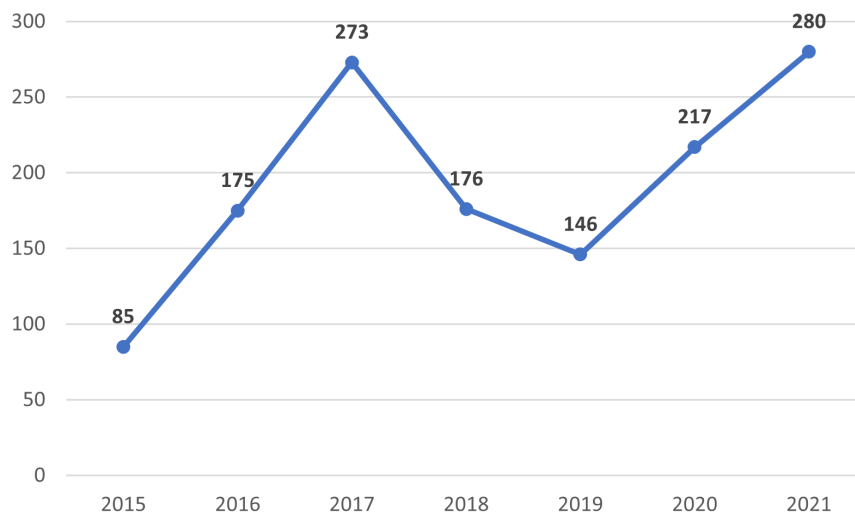


FIGURE 1.3 : Évolution du coût des catastrophes naturelles pour les assureurs et réassureurs mondiaux, en milliards de dollars (SWISS RE, 2015-2021)

La société doit donc tout mettre en oeuvre pour atteindre un double objectif : faire en sorte que l'augmentation de la température mondiale n'excède jamais les 2 degrés et maintenir les efforts déjà entrepris pour que cette augmentation reste à 1,5 degrés. Dans ce contexte, il est essentiel pour les assureurs d'appréhender le risque climatique mais également de s'impliquer pour contribuer au déficit sociétal que représente la lutte contre le réchauffement climatique.

## **Les recommandations de l’Autorité européenne des assurances et des pensions professionnelles (EIOPA)**

En décembre 2020, l’EIOPA annonçait sa volonté d’inclure les risques de ”durabilité ” dans le cadre de la révision de Solvabilité 2 (EIOPA, 2020). De plus, elle recommandait déjà de travailler sur la disponibilité et la qualité des informations concernant la prise en compte des critères ESG (environnementaux, sociaux et de gouvernance) dans le processus de valorisation des actifs ainsi que dans les politiques d’investissement.

C’est ensuite en avril 2021 que l’EIOPA a confirmé l’importance que représentent les risques liés au climat par la publication d’un papier (EIOPA, 2021b) dans lequel elle présente les scénarios climatiques pour l’ORSA et dans lequel elle exige des différents acteurs de l’assurance, une prise en compte poussée de tous ces nouveaux risques. L’EIOPA y annonçait l’intégration du risque climatique à l’ORSA sous la nomination ”risques physiques et de transition liés au changement climatique”. À travers ce papier, l’EIOPA supervise l’introduction des différents scénarios de changement climatique à l’ORSA, en précisant que ce risque doit être considéré à court terme (5 à 10 ans) mais aussi à long terme (80 ans, soit une projection d’ici à la fin de ce siècle).

Dans ce papier les risques climatiques sont séparés en deux catégories, les risques de transition et les risques physiques. Les risques de transition regroupent tous les risques inhérents à une transition vers une société qui limite fortement les émissions de gaz à effet de serre et s’organise de façon à respecter l’environnement. Cette catégorie comprend par exemple le risque politique, dans le cas où les politiques décideraient de sur-taxer les matières polluantes comme le carburant, faisant ainsi augmenter fortement leur prix. Elle comprend également le risque de réputation, dans le cas où les investissements de l’entreprise seraient en faveur d’une économie destructrice de l’environnement. La deuxième catégorie de risques liés au changement climatique concerne les risques physiques. Dans cette catégorie on retrouve les risques directement liés aux événements météorologiques extrêmes, comme les tempêtes, ainsi que les risques de long terme liés au changement climatique comme la montée des températures ou encore la montée du niveau de la mer.

La publication de l’EIOPA (2021b) enjoint aux organismes d’assurance d’élargir leur vision du risque climatique, notamment en effectuant des projections à long terme. Il est maintenant clair pour les compagnies qu’elles doivent évaluer la matérialité de ces risques et qu’elles doivent également soumettre les risques considérés comme importants à deux scénarios long terme minimum. Une conclusion détaillée quant à la sensibilité et l’exposition au risque climatique est désormais attendue de la part de chaque compagnie.

Dans la continuité de cette démarche, le 27 janvier 2022, l’EIOPA a publié une méthodologie détaillée (EIOPA, 2022) pour l’élaboration de divers tests de résistance prenant en compte le risque climatique. Ce nouveau papier rentre dans le détail en décrivant chaque risque et en insistant sur les principes généraux de la construction des stress tests climatiques. Plusieurs points sont détaillés, notamment l’importance du choix de l’horizon de projection. Une nouvelle fois l’accent est mis sur la nécessité de projeter sur le long terme.

## **L’exercice pilote conduit par l’Autorité de contrôle prudentiel et de résolution (ACPR)**

En juillet 2020, l’ACPR a lancé un exercice inédit en France, présenté dans le rapport de l’ACPR (2020), afin de mobiliser les assureurs et les banques français. Cet exercice qui s’est déroulé entre juillet 2020 et avril 2021 avait pour but d’amener les différents acteurs à se questionner sur leur sensibilité et leur exposition au risque climatique, notamment en prenant en compte les scénarios RCP établis

par le GIEC dans son cinquième rapport (GIEC, 2014).

Cet exercice était inédit par plusieurs aspects. Tout d'abord, pour la première fois, les groupes bancaires et organismes d'assurances ont travaillé conjointement sous la supervision de l'ACPR. Ensuite, cet exercice employait des méthodologies nouvelles pour lesquelles l'horizon de temps considéré était bien supérieur à celui considéré habituellement (30 ans au lieu de 1 an). De plus, c'était pour les assureurs une nouveauté que de prendre en compte le risque climatique comme un risque majeur. Ces différents points illustrent le caractère novateur de cette expérience. Cette démarche de l'ACPR s'inscrit dans la continuité de l'adoption de la Loi sur la transition énergétique et la croissance verte et de la signature des Accords de Paris en 2015. Le principal objectif de cette initiative de l'ACPR était de faire une première mesure de la vulnérabilité au risque climatique des diverses institutions financières françaises.

En conclusion de cet exercice, comme exposé dans le rapport de l'ACPR (2021), le constat est que l'exposition des banques et assurances françaises au risque climatique est relativement modérée, mais il faut tout de même tenir compte des incertitudes à la fois sur la vitesse et l'impact de l'évolution du climat. Le rapport de l'ACPR signale également que des efforts importants seront à fournir pour limiter significativement les émissions de gaz à effet de serre d'ici à 2050. Un exercice de la sorte sera très certainement effectué à nouveau en 2023 ou 2024.

#### 1.1.4 Couvertures du risque climatique

##### **Le contrat d'assurance multirisque habitation**

Comme indiqué par la DIRECTION GÉNÉRALE DE LA CONCURRENCE, DE LA CONSOMMATION ET DE LA RÉPRESSION DES FRAUDES (2018), le contrat d'assurance multirisque habitation (ou contrat MRH) permet à l'assuré de couvrir, contre les dommages, les bâtiments ainsi que leurs aménagements (grenier, cave, abri de jardin, garage et autre), le mobilier personnel et tous les biens à usage professionnel. Dans le cas particulier des biens à usage professionnel, il est nécessaire d'ajouter une garantie optionnelle, souvent incluse dans des contrats faits spécifiquement pour les professionnels. Ce contrat permet de couvrir les dommages que l'assuré soit responsable ou victime du sinistre.

En cas de sinistre, l'assuré doit alors suivre différentes étapes pour être couvert. Tout d'abord le sinistre doit être déclaré sous cinq jours et seulement deux si le sinistre en question est un vol. L'assuré doit ensuite être en mesure de fournir divers justificatifs qui permettront d'évaluer le plus précisément possible le montant des pertes. Les pièces justificatives généralement demandées doivent permettre de prouver l'existence et la valeur des biens endommagés, il faut également pouvoir attester que le sinistre rentre bien dans le cadre de la garantie. Il est également possible pour l'assuré de lancer des mesures d'urgence dès la déclaration du sinistre afin de pouvoir limiter l'extension des dégâts. Outre le cas de la mise en place de mesures d'urgence, la procédure traditionnelle d'indemnisation nécessite le passage d'un expert et d'un contre-expert en cas de désaccord. L'indemnité est ensuite calculée en fonction du verdict de l'expert avant d'être versée à l'assuré.

Le contrat multirisque habitation comprend de nombreuses garanties, certaines optionnelles et d'autres obligatoires. Des exemples de garanties typiquement associées au contrat MRH sont : la garantie bris de glace, la garantie dégâts des eaux, la garantie vol ou encore la garantie incendie-explosion. Dans le cadre de ce mémoire qui porte exclusivement sur les dégâts pouvant être engendrés par les vents violents, on s'intéresse en particulier à deux garanties du contrat MRH qui sont la garantie catastrophe naturelle et la garantie tempête-grêle-neige. Ces deux garanties vont être détaillées dans

les paragraphes qui suivent.

### **Le régime Catastrophe Naturelle**

La garantie catastrophe naturelle, appelée garantie Cat-Nat, est une garantie obligatoire du contrat multirisque habitation. Cette garantie a été créée le 13 juillet 1982 par le parlement de l'époque à la suite d'une année de fortes précipitations qui avaient provoqué d'importantes inondations. Elle repose sur le principe de mutualisation des dommages causés par des risques considérés comme étant "non-assurables", c'est-à-dire des risques peu connus ou difficiles à estimer. Ce régime est géré par l'État par le biais de la Caisse centrale de réassurance, société publique de réassurance.

D'après l'article L125-1 du code des assurances, la garantie catastrophe naturelle couvre les "dommages matériels directs non assurables ayant eu pour cause déterminante l'intensité anormale d'un agent naturel, lorsque les mesures habituelles à prendre pour prévenir ces dommages n'ont pas pu empêcher leur survenance ou n'ont pas pu être prises". Afin de pouvoir déclencher cette garantie, les communes touchées par la catastrophe naturelle doivent faire une demande de reconnaissance. Cette demande doit être effectuée dans les 24 mois suivants le début de la catastrophe naturelle. Un arrêté interministériel va ensuite déterminer les zones touchées, ainsi que la période durant laquelle est survenu l'évènement. Cet arrêté définit également la nature des dommages. Son contenu doit ensuite être rendu public dans un journal officiel, et ce dans un délai de 3 mois suivants la date de dépôt de la demande à la préfecture.

Les tempêtes ne sont généralement pas prises en compte dans le régime Cat-Nat. En effet, selon l'article L122-7 du code des assurances, la garantie catastrophe naturelle prend en compte les dégâts causés par les vents violents uniquement s'ils entrent dans la catégorie des vents cycloniques. Si les vents ne correspondent pas à cette définition, ils entrent dans le domaine de couverture de la garantie TGN décrite à la section 1.1.4. On considère qu'un vent entre dans la catégorie des vents cycloniques lorsque la vitesse moyenne sur 10 min atteint au moins 145 km/h ou lorsque les rafales atteignent le seuil de 215 km/h. Ces critères correspondent aux cyclones de catégorie 4, très courants dans le Sud de l'Océan Pacifique, l'Océan Indien, l'Océan Atlantique et la Mer des Caraïbes.

Depuis le début du XXème siècle le nombre de sinistres entrant dans la catégorie des catastrophes naturelles n'a cessé d'augmenter, notamment à cause du développement des activités humaines responsables du réchauffement climatique. Par conséquent le coût de la garantie Cat-Nat a connu une forte augmentation depuis sa création. Suite à l'augmentation du nombre de catastrophes naturelles, une proposition de réforme du régime Cat-Nat a été déposée en 2019 et acceptée par le Sénat en 2020 (ASSEMBLÉE NATIONALE, 2019). Cette réforme met l'accent sur la prévention, notamment grâce à la mise en place de dispositifs visant à limiter l'ampleur des dégâts engendrés par les potentiels phénomènes météorologiques dommageables entrant dans la catégorie de la couverture Cat-Nat. Elle vise également à garantir une plus grande transparence du processus d'indemnisation ainsi qu'un meilleur accompagnement des communes.

### **La garantie Tempête-Grêle-Neige**

La garantie Tempête-Grêle-Neige, ou garantie TGN, fait elle aussi partie des garanties obligatoires du contrat d'assurance multirisque habitation. Cette garantie permet de couvrir les dommages causés par l'action des vents violents, mais également par la grêle, par le poids de la neige ou par l'humidité due à la neige ou à la pluie. Dans le cas des vents violents, la garantie TGN couvre les dommages engendrés par les vents uniquement lorsque leur vitesse dépasse les 100km/h comme indiqué par le ministère de

l'intérieur dans les Journaux Officiels des questions du Sénat le 16 mai 2018.

Comme indiqué par la DIRECTION GÉNÉRALE DE LA CONCURRENCE, DE LA CONSOMMATION ET DE LA RÉPRESSION DES FRAUDES (2018), cette garantie nécessite le passage d'un expert avant d'être versée. De plus les assurés sont dans l'obligation de mettre en place des "mesures conservatoires" pour limiter au maximum l'extension des dégâts. Il faut également noter que l'assureur a le droit de demander un "certificat d'intempérie", délivré en général directement par Météo France pour prouver qu'un évènement météorologique extrême a bien eu lieu dans la zone où se trouve le bien assuré. Dans le cas des entreprises, il existe un complément à la garantie TGN nommé garantie "pertes d'exploitation". Cette garantie permet de prendre en charge une partie des éventuelles pertes causées par les évènements météorologiques qui entrent dans le cadre de la couverture de la garantie TGN. Cette prise en charge est effective uniquement s'il y a constatation par un expert d'un arrêt d'activité découlant d'un tel évènement.

### L'assurance paramétrique

L'assurance paramétrique, ou assurance indicielle, est une méthode assez récente qui a fait son apparition dans les années 2000 et connaît depuis quelques années un certain engouement. Elle se base sur un indice qui va déterminer le niveau du dédommagement. Ce type d'assurance est utilisé principalement pour couvrir les risques liés au climat. Elle se déclenche lorsque l'indice dépasse un certain seuil, par exemple, lorsque la quantité de pluie tombée dépasse un certain niveau, ou au contraire lorsque le nombre de jours sans pluie excède un certain seuil fixé au préalable. Un indice statistique doit donc être mis au point, il doit permettre de refléter au mieux les écarts à la normale et les dommages pouvant en découler.

Les premières utilisations à grande échelle de l'assurance indicielle ont été faites dans les pays de l'ACP (Groupe des États d'Afrique, des Caraïbes et du Pacifique) suite à un projet lancé par le GIIF (*Global Index Insurance Facility* ou Mécanisme Mondial pour l'Assurance Indicielle) pour soutenir les pays en développement face aux phénomènes météorologiques. Ce projet du GIIF a pour but d'aider les pays en développement qui subissent les changements climatiques. De 2009 à 2015, 1,3 millions de personnes avaient bénéficié de cette aide. Outre le fait d'aider des populations plus défavorisées dans la lutte contre les effets du changement climatique, ce projet a aussi permis de mettre en avant l'efficacité de l'assurance paramétrique pour couvrir les risques climatiques. Cette expérience à grande échelle permet d'analyser les performances de ce type d'assurance. Ainsi sur la figure 1.4, on constate qu'au fil du temps, le nombre d'assurés augmente fortement tandis que le nombre de sinistres lui reste relativement stable, ce qui permet à la marge de connaître une forte augmentation.

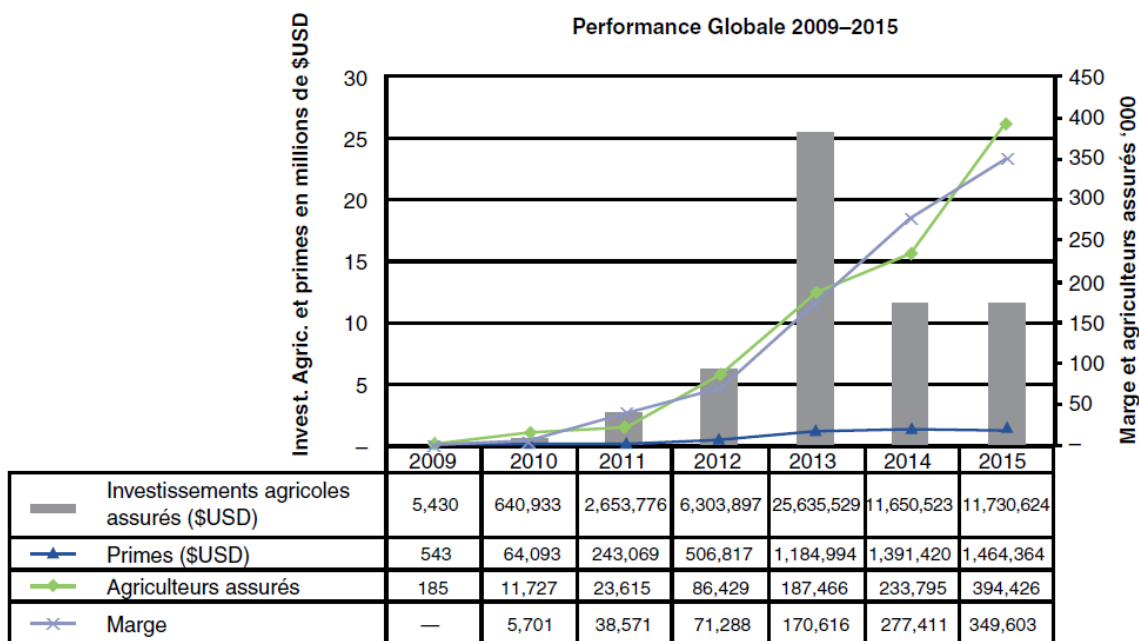


FIGURE 1.4 : Performance de l’assurance paramétrique dans les pays de l’ACP entre 2009 et 2015 (GROUPE DE LA BANQUE MONDIALE, 2015)

Il existe également des exemples d’assurances paramétriques contre les dommages causés par les événements climatiques extrêmes, comme celle mise en place par l’organisme *Caribbean Catastrophe Risk Insurance Facility* (CCRIF SPC, 2018). Cet organisme est le premier regroupement de plusieurs pays à lancer un ”fonds catastrophe” commun pour le dédommagement des dégâts matériels dus aux ouragans et aux tremblements de terre. Les différents gouvernements des Caraïbes sont ainsi tous couverts par un contrat d’assurance paramétrique en cas d’ouragan ou de tremblement de terre qui soit reconnu comme extrême et entre ainsi dans les limites de la couverture.

L’assurance paramétrique semble être une solution viable pour protéger les cultures des aléas climatiques qui s’intensifient à cause du réchauffement planétaire. Elle est également une option déjà utilisée dans le cas des assurances dommages comme le montre le deuxième exemple. C’est à l’aspect assurance dommage contre le risque tempête que nous allons nous intéresser. Il semble que le modèle de l’assurance paramétrique soit une solution dans le cas de la couverture des risques climatiques. La principale difficulté est de paramétrer un indice adéquat, capable de capter au mieux le phénomène climatique et les dommages qu’il engendre. La démarche du paramétrage d’un indice doit prendre en compte à la fois un paramètre d’exposition et les paramètres météorologiques caractéristiques de l’évènement climatique à couvrir. Ainsi ce mémoire propose une réponse possible à la question suivante : quel indice, construit sur de l’open data, est le plus à même de capter au mieux le risque tempête et de quantifier les potentiels dommages engendrés ?



## 1.2 Risque tempête

### 1.2.1 Définition d'une tempête

La définition proposée par Le Robert est la suivante : "Violente perturbation atmosphérique; vent rapide qui souffle en rafales, souvent accompagné d'orage." Il faut maintenant définir la notion de rafales, qui est donnée comme ci-après par Le Robert : "Coup de vent soudain et brutal". Météo France indique que l'on peut parler de rafales "lorsque la vitesse du vent instantané dépasse celle du vent moyen de plus de 10 nœuds (soit 18 km/h)".

Les tempêtes sont des phénomènes météorologiques qui se forment lorsqu'une dépression barométrique entre en interaction avec le courant jet. Le courant jet aussi appelé "jet stream" désigne un courant d'air qui se déplace à une vitesse élevée sur plusieurs milliers de kilomètres. Ce phénomène est le résultat de la rotation de la Terre à laquelle s'ajoute le réchauffement inégal de l'atmosphère, les températures à l'équateur étant plus élevées qu'aux pôles. La trajectoire de ce courant est représentée en orange sur la figure 1.5.

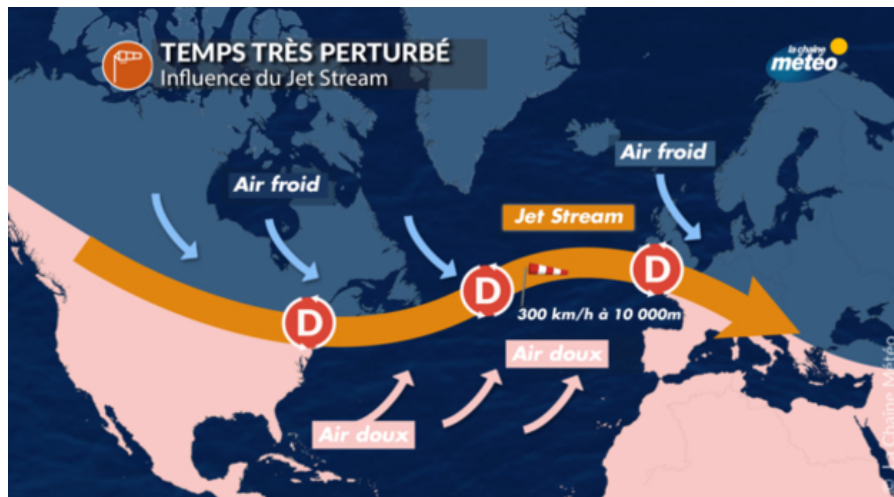


FIGURE 1.5 : Formation du Jet Stream (C. DUCHESNE, 2019)

Les tempêtes, décrites dans le rapport de MÉTÉO FRANCE (2021), se forment principalement en automne et en hiver car ce sont les saisons les plus propices à un décalage de températures important entre l'équateur et le pôle Nord. En France métropolitaine elles sont généralement de diamètre inférieur à 1 000 kilomètres. Elles sont souvent caractérisées par des rafales aux alentours de 100 km/h dans les terres et 120 km/h sur les côtes. Elles ne durent que très rarement plus d'une semaine car une fois sur terre elles s'affaiblissent vite, leur énergie étant absorbée rapidement par mécanisme de frottements avec la surface terrestre. En France on ne parle de tempête que lorsque les rafales atteignent au moins 100 km/h et touchent au minimum 2 % du territoire métropolitain.

L'échelle de Beaufort décrite dans le tableau 1.2 permet de catégoriser les vents en fonction de leur vitesse et de leurs impacts sur terre et en mer. La notion de tempête n'apparaît qu'à partir du dixième degré. La description des degrés précédents n'a donc pas été conservée dans le tableau qui suit, n'étant pas utile dans le cadre de cette étude. Toutefois, cette description est donnée dans le rapport de MÉTÉO FRANCE (2021).

Degré de Beaufort	Terme descriptif	Vitesse moyenne en km/h	Observations en mer	Observations sur terre
10	Tempête	89 à 102	Très grosses lames déferlantes (9 mètres de haut) : écume en larges bancs formant des traînées blanchâtres, visibilité réduite par les embruns.	(Rarement observé à terre) Les adultes sont renversés, les arbres déracinés, les habitations subissent d'important dommages.
11	Violente tempête	103 à 117	Lames déferlantes d'une hauteur exceptionnelle, mer couverte d'écume blanche, visibilité réduite.	(Très rarement observé à terre) Ravages étendus.
12	Ouragan	118 et plus	Lames déferlantes énormes (les creux atteignent 14 mètres), mer entièrement blanche, air plein d'écume et d'embruns, visibilité très réduite.	(En principe degré non utilisé) Ravages désastreux : violence et destruction.

TABLE 1.2 : Échelle de Beaufort (MÉTÉO FRANCE, 2021)

Il est important de distinguer vitesse moyenne et vitesse instantanée. Le vent instantané est mesuré à un instant donné, s'il excède la vitesse moyenne mesurée sur un certain intervalle de temps, on parle alors de rafale. Dans ce mémoire, on s'intéresse au vent instantané, mesuré à un moment donné et en un lieu précis. Il faut noter que dans ce tableau les valeurs données sont des vitesses moyennes. À titre d'exemple, un vent moyen de 89 km/h peut entraîner des rafales de 136 km/h (la méthode d'estimation des rafales est expliquée à la section 2.3.2). Il n'est donc pas étonnant que dès le dixième degré de l'échelle de Beaufort, les tempêtes soient capables de renverser des êtres humains adultes. À noter également que les degrés supérieurs au dixième sont quasiment impossibles à observer sur le territoire terrestre de France métropolitaine. Les tempêtes les plus violentes qu'a connu la France à ce jour (notamment les tempêtes Lothar et Martin de 1999 déjà évoquées précédemment) appartiennent au dixième degré de l'échelle de Beaufort.

La majorité des tempêtes suivent chaque année les mêmes trajectoires, ce sont les "rails de dépression" (ou "*storm-track*"). Ces rails sont les zones préférentielles des trajectoires des dépressions des moyennes latitudes. Les positions géographiques de ces deux rails sont indiquées sur la figure 1.6.

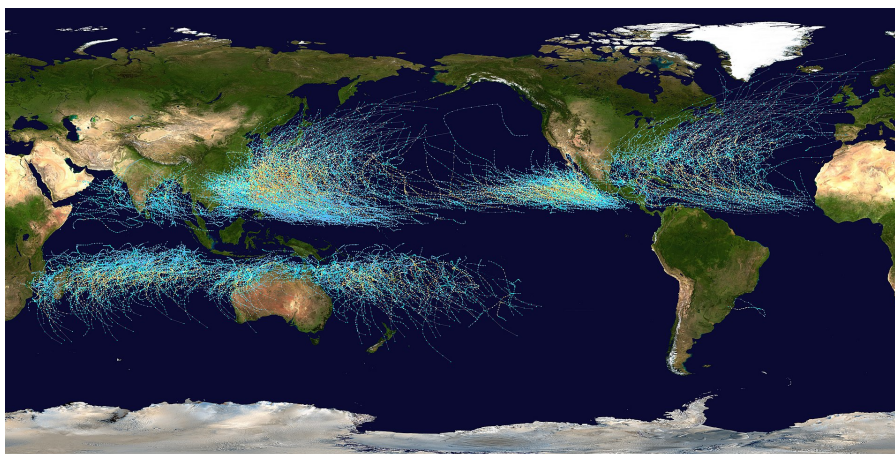


FIGURE 1.6 : Illustration des rails de dépression (CLIMATE PREDICTION CENTER (USA), 2014)

Les tempêtes sont généralement suivies ou précédées de fortes pluies. Aux dommages causés par les vents violents peuvent donc s'ajouter ceux entraînés par les inondations. De plus sur les côtes, les tempêtes peuvent déclencher des phénomènes de vagues submersives. Le risque de tempête est donc très souvent lié à d'autres risques, cependant dans ce mémoire nous nous concentrons exclusivement sur les vitesses de vent.

### 1.2.2 Historique des tempêtes en France métropolitaine

Météo France a réalisé de nombreuses études sur l'historique des tempêtes qui ont touché le territoire métropolitain (MÉTÉO FRANCE, 2021). Le constat a été fait que la France était en moyenne touchée par neuf tempêtes par an avec une forte variabilité du nombre de tempêtes d'une année à l'autre. Les zones les plus touchées se trouvent majoritairement dans la partie Nord du territoire, avec une forte prédominance des zones littorales.

Les tempêtes sont donc un phénomène fréquent en France métropolitaine. Chaque année le territoire est traversé par des rafales de vent dépassant les 100 km/h, et ce en moyenne neuf jours par an comme illustré par la figure 1.7.

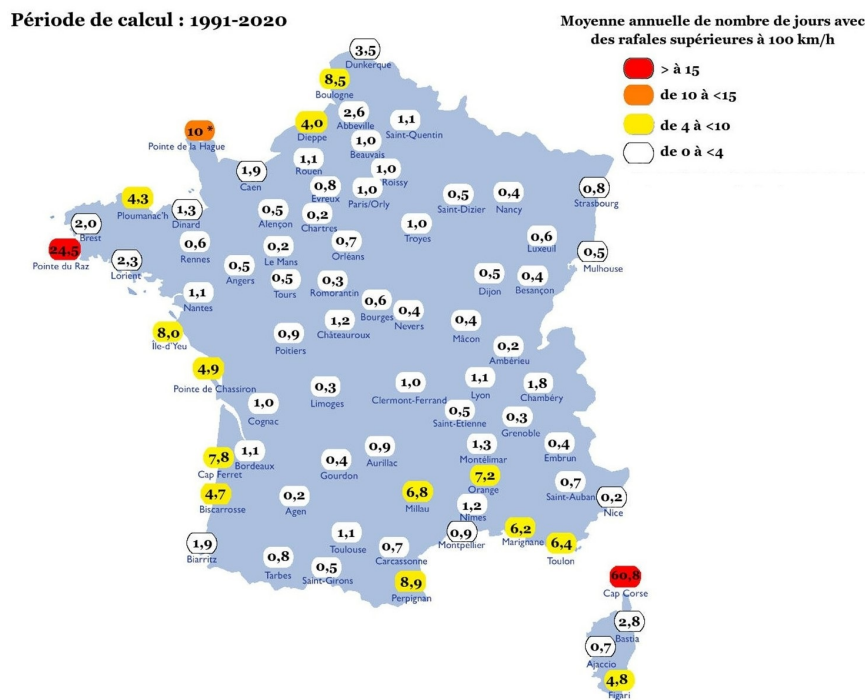


FIGURE 1.7 : Nombre de jours avec rafales supérieures à 100 km/h (MÉTÉO FRANCE, 2021)

L'étude des tempêtes sur les cinquante dernières années ne permet pas de mettre en évidence une éventuelle tendance évolutive, que ce soit pour la fréquence ou pour l'amplitude des tempêtes. Il est difficile de dire si ces phénomènes météorologiques vont s'amplifier à l'avenir. Le cinquième rapport du GIEC (2014) n'a exprimé aucune certitude quant à l'évolution des tempêtes dans l'hémisphère Nord, il est donc très difficile d'avoir une idée du paysage climatique à venir. La seule prédiction qu'il est raisonnable de faire est que les trajectoires des tempêtes vont globalement se déplacer vers le Nord. En effet, le cinquième rapport du GIEC (2014) met en avant le fait qu'avec le réchauffement

climatique global, le *jet stream* risque de passer légèrement plus au Nord. Le sixième rapport du GIEC (2022) émet quant à lui l'hypothèse d'une augmentation de la fréquence et de l'intensité des tempêtes dans l'hémisphère Nord. Cependant cette hypothèse est contestée (COVÉA, 2022), notamment par l'analyse faite par Covéa dans son livre blanc dont la conclusion est qu'il n'y aura probablement pas de changements majeurs à horizon 2050, que ce soit dans la fréquence ou dans l'intensité des tempêtes.

Comme le montre la figure 1.8, l'amplitude des tempêtes connaît une variabilité importante d'une année à l'autre et il semble difficile de faire ressortir un quelconque schéma évolutif si ce n'est que les tempêtes extrêmement violentes (avec des vents dépassant les 160 km/h) semblent plus fréquentes (11 ces 20 dernières années, moitié moins les 20 années précédentes). La fréquence des tempêtes dites "majeures" semble par contre diminuer. Une légère tendance d'augmentation de l'intensité semble se profiler mais cela reste difficile à déterminer par manque d'historique.

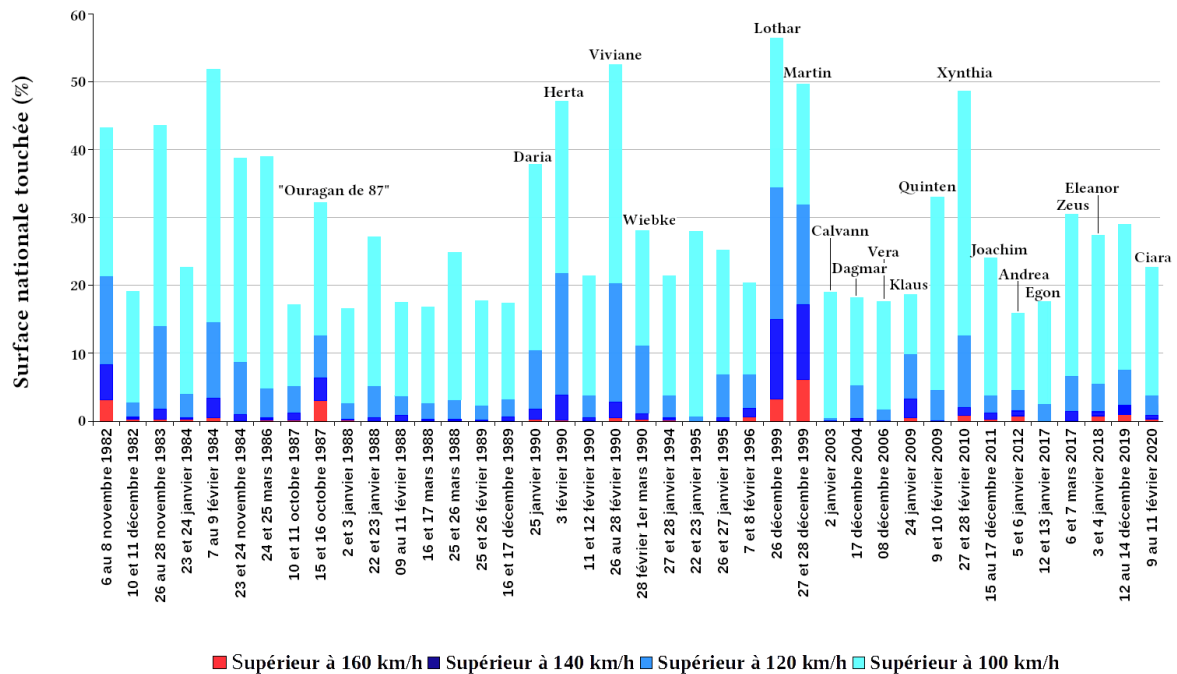


FIGURE 1.8 : Les 40 tempêtes majeures en France métropolitaine de 1980 à juin 2021, rafales supérieures à 100 km/h (MÉTÉO FRANCE, 2021)

Les deux tempêtes les plus violentes ont eu lieu en 1999, marquant les mémoires. Le manque d'historique sur le sujet ne permet pas d'affirmer que de telles catastrophes étaient inédites. Le même problème se pose pour la fréquence. Après une diminution du nombre de tempêtes au début des années 2000, la fréquence a de nouveau augmenté, sans atteindre de record significatif, comme le montre la figure 1.9.

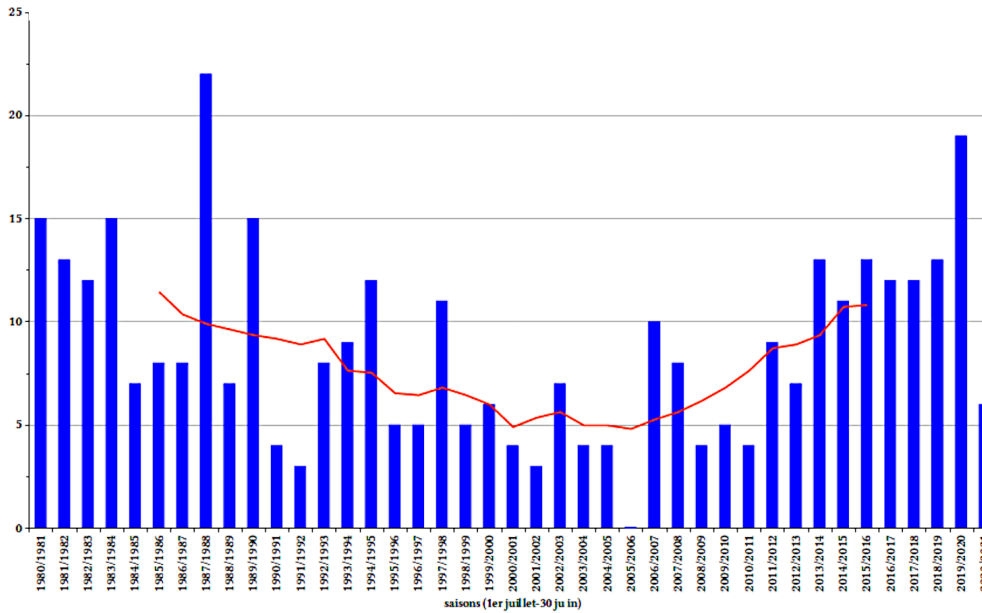


FIGURE 1.9 : Évolution annuelle du nombre de tempêtes (MÉTÉO FRANCE, 2021)

**Coût des tempêtes : dégâts matériels**

Le gouvernement français donne libre accès à différentes données et études statistiques concernant les catastrophes naturelles qui touchent la France, notamment dans le rapport du COMMISSARIAT GÉNÉRAL AU DÉVELOPPEMENT DURABLE (2018). Ainsi, les tempêtes sont le deuxième évènement le plus fréquent, juste derrière les inondations. La figure 1.10 montre que si les phénomènes atmosphériques (tempêtes, cyclones et ouragans) ne représentent que 19 % des phénomènes climatiques dommageables, ils sont en revanche responsables de 62 % des décès. Ces chiffres prennent en compte tous les évènements dommageables ayant lieu sur le territoire français (y compris en Outre Mer) et ne tiennent pas compte des vagues de chaleur. Les tempêtes font donc partie de la catégorie des évènements les plus meurtriers et également de celle des évènements météorologiques les plus coûteux comme indiqué dans le rapport de COVÉA (2022).

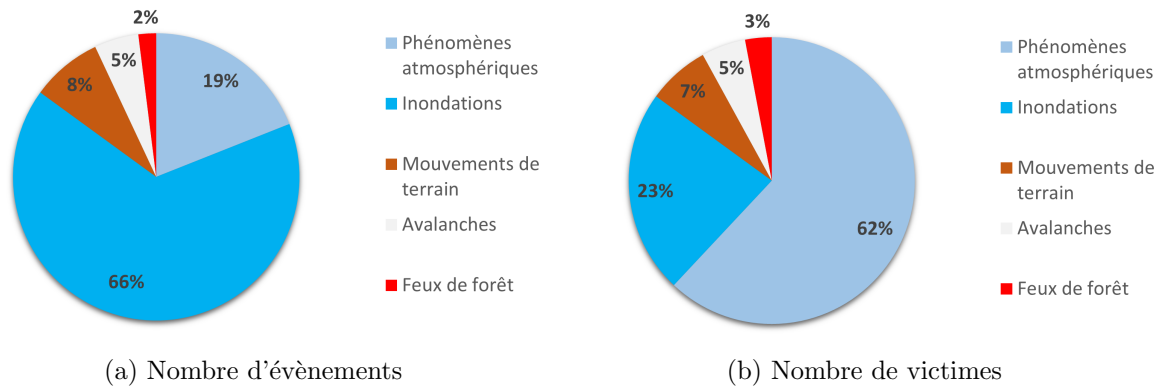


FIGURE 1.10 : Analyse des évènements naturels dommageables entre 1900 et 2017 (COMMISSARIAT GÉNÉRAL AU DÉVELOPPEMENT DURABLE, 2018)

Depuis 1940, les tempêtes européennes ont déjà coûté plusieurs milliards d'euros de dégâts matériels, Lothar et Martin en 1999 ont à elles seules eu un coût estimé entre 10 et 14 milliards d'euros (LA CHAÎNE MÉTÉO, 2019), la tempête Klaus a coûté 1,4 milliards d'euros en 2009 (LA CHAÎNE MÉTÉO, 2015), les tempêtes Carmen et Eleanor de janvier 2018 ont elles coûté 362 millions d'euros et plus récemment, en février 2022, les tempêtes Eunice et Franklin ont coûté 415 millions d'euros (L'ARGUS DE L'ASSURANCE, 2022). Ces tempêtes européennes ont entraîné la mort de nombreuses personnes, à titre d'exemple Lothar et Martin ont fait 92 victimes, la tempête Klaus en a fait 11 et les tempêtes Eunice et Franklin en ont fait 16. Les vents violents sont généralement la cause de multiples dégâts parmi lesquels des toitures et des arbres arrachés, des véhicules déportés ou encore des coupures d'électricité. À titre d'exemple, les tempêtes Lothar et Martin de 1999 ont privé d'électricité un foyer sur quatre. Ce fut la pire crise énergétique qu'a connue la France, un quart du réseau électrique ayant été détruit. Les réparations ont nécessité le déploiement de 55 000 hommes, dont une partie est venue en renfort d'autres pays européens.

En plus des coûts directement imputables aux diverses destructions, il faut aussi prendre en compte l'impact sur les transports et l'industrie, notamment les perturbations ferroviaires lorsque les voies sont endommagées, ainsi que les pertes que peuvent connaître certaines industries forcées de cesser quelque temps leurs activités. Le coût de la perte d'activité, ainsi que le coût des diverses réparations nécessaires (notamment sur les infrastructures publiques) font des tempêtes des catastrophes naturelles au bilan économique très lourd.

### 1.3 Étude de la force du vent

Pour ce paragraphe, toutes les données, informations et hypothèses sont tirées du rapport "Actions du vent sur les bâtiments selon l'Eurocode 1 Partie 1.4" (D. CLAVAUD, 2014). Les Eurocodes regroupent les normes européennes de construction et prédominent sur les normes nationales. Ils permettent une harmonisation des normes au niveau européen et facilitent ainsi le travail des entreprises de construction sur le sol européen. L'Eurocode 1 intitulé "Actions sur les structures" regroupe les effets de divers éléments extérieurs sur les bâtiments. La partie 4 de l'Eurocode 1 est dédiée aux effets de l'action du vent, c'est donc cette partie en particulier qui apporte les informations nécessaires pour comprendre l'impact de la force du vent généré par les tempêtes.

Une première approche est de considérer une structure parallélépipédique à angles droits subissant sur l'une de ses faces une force extérieure perpendiculaire due à une rafale de vent. La figure 1.11 explique de manière rudimentaire l'effet du vent sur une telle structure.

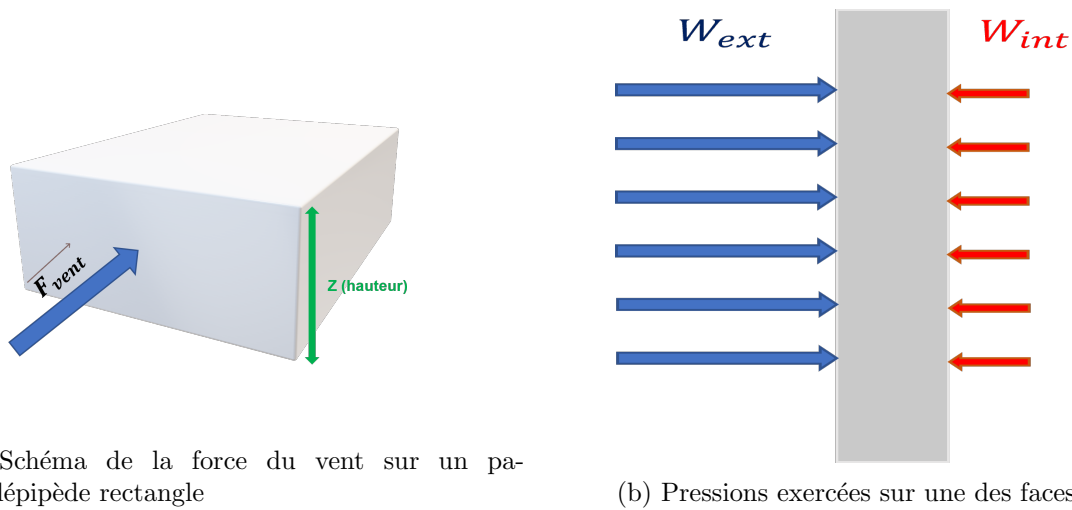


FIGURE 1.11 : Schémas explicatifs des effets de la force du vent sur une structure parallélépipédique, fait à partir des informations de l'Eurocode 1 (D. CLAVAUD, 2014)

Comme illustré sur le deuxième schéma, la face qui subit la force du vent a donc une pression venue de l'extérieur qui s'exerce sur elle. Lors d'une tempête avec de violentes rafales, les murs sont soumis à une surpression extérieure et une dépression intérieure ce qui fait que la pression totale exercée sur la paroi devient plus ou moins fortement positive en fonction de la force du vent. Cette pression se traduit par

$$W_{\text{paroi}} = W_{\text{ext}} - W_{\text{int}} .$$

C'est ainsi que commencent à apparaître des "points de pressions" qui, au fur et à mesure du temps (on parle ici de plusieurs tempêtes qui se succèdent sur des dizaines d'années), fragilisent le mur. Il est de ce fait quasiment impossible qu'une maison récente construite dans le respect des normes européennes s'écroule à cause d'une seule tempête du type de celles qui frappent le territoire de France métropolitaine (cette assertion exclut tous les phénomènes de glissement de terrain qui fragilisent les structures en amont des tempêtes).

Il faut maintenant faire le lien entre la pression extérieure exercée par la force du vent et la vitesse de celui-ci. Toujours tirées de l'Eurocode 1, les formules des pressions intérieure et extérieure sont

$$\begin{aligned} \text{pression extérieure : } W_{\text{ext}} &= q_p(z) \times C_{pe}, \\ \text{pression intérieure : } W_{\text{int}} &= q_p(z) \times C_{pi}, \end{aligned}$$

avec :

- $C_{pi}$  le coefficient de pression intérieure,
- $C_{pe}$  le coefficient de pression extérieure,
- $z$  la hauteur des murs,



- $q_p(z)$  la pression dynamique de pointe.

Les coefficients de pression intérieure et extérieure sont des constantes directement données par l'Eurocode. La pression dynamique de pointe est définie comme étant "une mesure de l'énergie cinétique d'un fluide par unité de volume". L'énergie cinétique est "l'énergie que possède un corps du fait de son mouvement par rapport à un référentiel donné". La formule de la pression dynamique de pointe donnée par l'Eurocode 1 est

$$q_p(z) = C_e(z) \frac{1}{2} \rho V_b^2,$$

avec :

- $C_e(z)$  le coefficient d'exposition,
- $\rho$  la masse volumique de l'air (elle dépend de la température atmosphérique et vaut  $1,293 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$  à 0 degré),
- $V_b$  vitesse de base.

Le coefficient dépend de deux paramètres : la hauteur du mur exposé ainsi que la rugosité du terrain environnant pour déterminer si le vent est freiné ou si le mur est directement exposé. Il est donné dans l'Eurocode grâce aux courbes présentées par la figure 1.12. Les différentes catégories de terrain pour lesquelles sont tracées ces courbes sont regroupées dans le tableau 1.3.

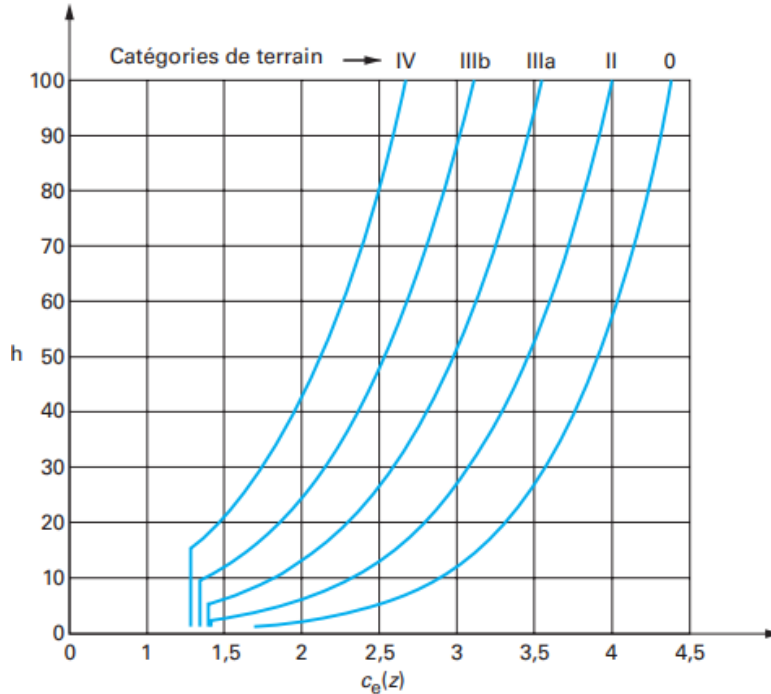


FIGURE 1.12 : Coefficient d'exposition pour différentes catégories de terrain (D. CLAVAUD, 2014)



Catégories de terrain
0 - Mer, ou zone côtière, exposée aux vents de mer ; lacs et plans d'eau parcourus par le vent sur une distance d'au moins 5 km.
II - Rase campagne, avec, ou non quelques obstacles isolés (arbres, bâtiments,...) séparés les uns des autres de plus de 40 fois leur hauteur.
IIIa - Campagne avec des haies ; des vignobles ; bocage ; habitat dispersé.
IIIb - Zones urbaines ou industrielles ; bocage dense ; vergers.
IV - Zones urbaines, dont au moins 15% de la surface est recouvert de bâtiments dont la hauteur moyenne est supérieure à 15 m.

TABLE 1.3 : Catégories de terrain, Source : D. CLAUD, 2014

Ainsi, d'après les courbes, moins l'espace environnant contient d'obstacles (comme par exemple avec la catégorie de terrain 0) et plus le mur est haut, plus le coefficient d'exposition sera élevé. Il faut maintenant définir la notion de vitesse de base qui apparaît dans la formule de la pression dynamique de pointe. La vitesse de base est définie par

$$V_b = C_{\text{dir}} \cdot C_{\text{season}} \cdot V_{b,0},$$

avec :

- $C_{\text{dir}}$  un coefficient qui permet de prendre en compte la direction du vent,
- $C_{\text{season}}$  un coefficient qui permet de prendre en compte la saison (en effet il est pertinent de prendre en compte la saisonnalité en sachant que les vents violents sont des phénomènes majoritairement rencontrés en automne et en hiver),
- $V_{b,0}$  vitesse du vent de référence.

La vitesse du vent de référence dépend de la zone géographique. Le zonier donné par l'Eurocode 1 pour la France métropolitaine est illustré par la figure 1.13.

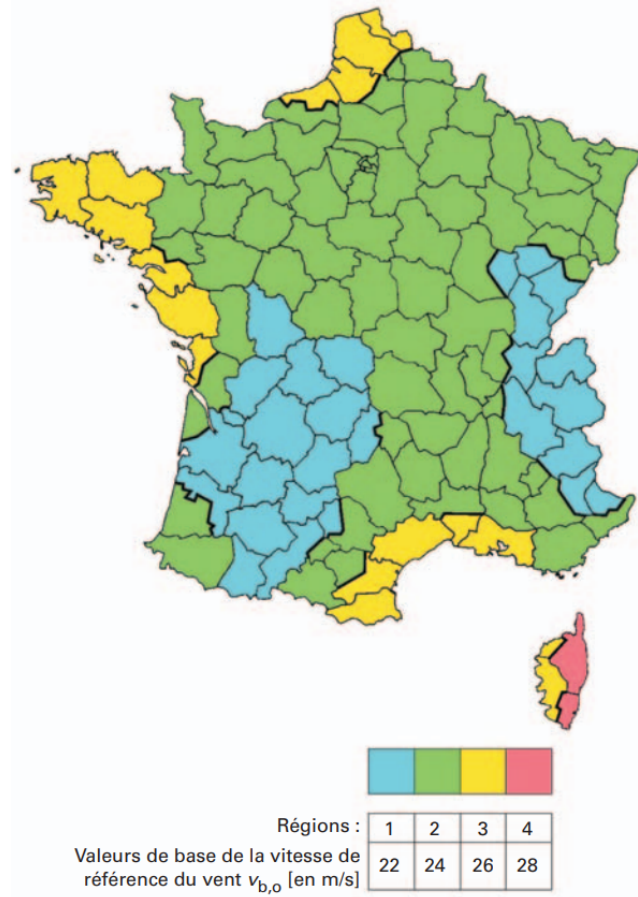


FIGURE 1.13 : Carte de zonage (D. CLAVAUD, 2014)

Ce découpage montre bien que l'Eurocode prend en compte le fait que certaines régions sont plus exposées que d'autres. Il est maintenant possible de tracer l'évolution de la pression dynamique de pointe  $q_p(z)$  en fonction de la hauteur des habitations. On se place pour l'exemple dans le cas d'habitations situées sur les côtes bretonnes, ce qui correspond d'après la figure 1.13 à une vitesse de référence de 26 m/s. On considère arbitrairement que les coefficients  $C_{dir}$  et  $C_{season}$  sont égaux à 1<sup>1</sup>, ce qui donne donc une vitesse de base  $V_b$  de 26 m/s. Le coefficient d'exposition peut se déterminer graphiquement à l'aide de la figure 1.12 ou à l'aide d'une formule. Les différentes étapes pour obtenir la forme littérale de ce coefficient sont détaillées dans l'Eurocode 1 (D. CLAVAUD, 2014). Dans la formule de la pression dynamique de pointe

$$q_p(z) = C_e(z) \frac{1}{2} \rho V_b^2 ;$$

le coefficient d'exposition peut donc être exprimé par sa forme littérale

$$C_e(z) = [1 + 7 \times I_v(z)] \times kr \times \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \times c_0(z),$$

avec :

<sup>1</sup>pour plus de détails sur le calcul du coefficient se référer à D. CLAVAUD (2014)

- $I_v(z)$  l'intensité de turbulence, que l'on fixe arbitrairement à 1 par souci de simplification (pour plus de détails sur ce paramètre voir l'Eurocode 1 (D. CLAVAUD, 2014)),
- $\rho$  la densité volumique de l'air (fixée à  $1,292 \text{ kg/m}^3$ ),
- $kr$  le facteur de terrain, fixé à 0,162 dans le cas d'un terrain de catégorie 0 (mer ou zone côtière),
- $z_0$  la "longueur de rugosité" du terrain fixée à 0,005 m dans le cas d'un terrain de catégorie 0,
- $z$  la hauteur considérée en m,
- $c_0(z)$  le coefficient d'orographie qui prend en compte les reliefs, fixé à 1 dans notre cas car on considère pour l'exemple qu'il n'y a pas de pente supérieure à 3 degrés dans la zone considérée.

La figure 1.14 illustre l'évolution de la pression dynamique de pointe pour des bâtiments d'une hauteur allant de 1 à 50 m. À partir d'une certaine hauteur la pente diminue, ce qui montre que passé un certain seuil il n'y a plus de grande différence au mètre près.

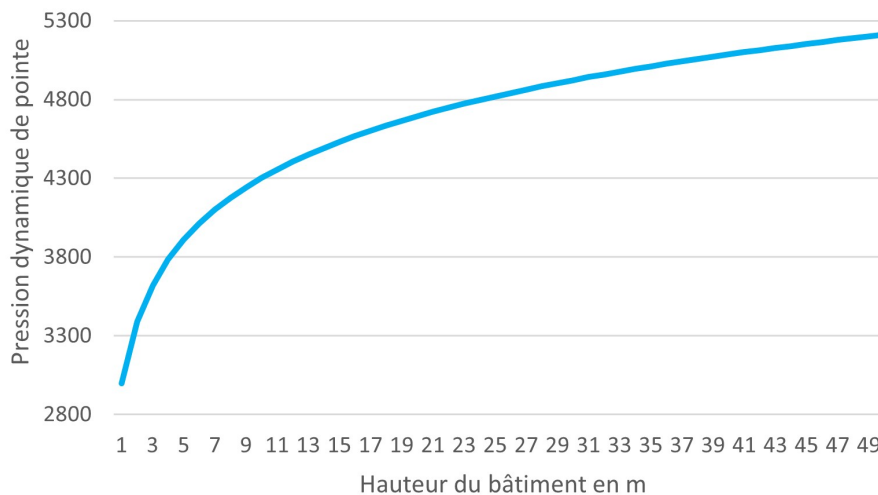


FIGURE 1.14 : Pression dynamique de pointe en fonction de la hauteur du bâtiment, fait à partir des données de l'Eurocode 1 (D. CLAVAUD, 2014)

Pour conclure, les dégâts causés par le vent sur des structures sont directement liés à la surpression extérieure qu'il exerce lorsqu'il souffle en violentes rafales. Cette pression exercée par le vent dépend de nombreux paramètres parmi lesquels le paysage environnant (rugosité du terrain), la hauteur de la structure, différents coefficients (coefficient de saisonnalité et de direction du vent) et la vitesse du vent au carré. Il est donc possible de conclure que la pression engendrée par la force du vent est proportionnelle au carré de la vitesse de ce dernier.

Ce premier chapitre a exposé la situation actuelle concernant le risque climatique. Le climat change et par conséquent les organismes d'assurance et de réassurance doivent s'adapter et appréhender ce nouveau risque. L'assurance paramétrique est une solution envisageable pour couvrir les dommages causés par des événements climatiques, tels que les tempêtes. De telles polices d'assurances nécessitent néanmoins l'utilisation d'un indice de référence qui capte au mieux le risque couvert. Ce sont les étapes de formulation et de calibrage d'un tel indice qui vont être présentées dans le chapitre suivant. L'objectif

de ce mémoire est de trouver l'indice qui pourra le plus justement possible capter le risque tempête en mêlant un paramètre d'exposition et un paramètre météorologique. Dans le cas du risque tempête, les dommages sont intrinsèquement liés au vent comme cela vient d'être démontré. La vitesse du vent sera donc un paramètre essentiel à prendre en compte. Cet indice, qui a pour objectif d'apporter une vision générale sur tout le territoire métropolitain, ne sera pas rattaché à un portefeuille en particulier. Il pourra ainsi être utilisé par n'importe qui et à des fins diverses et variées (visualisation des zones à risque, estimation de l'exposition d'un portefeuille donné en fonction de la répartition géographique des assurés, estimation de ratios d'ajustement des primes entre les différentes zones). Outre la problématique du paramétrage de l'indice, ce mémoire exposera également son évolution possible à court, moyen et long terme dans différents scénarios d'évolution.

## Chapitre 2

# Le calibrage de l'indice

L'objectif de cette partie est de présenter la méthode utilisée pour calibrer l'indice en utilisant exclusivement des données en libre accès. Un assureur spécialisé en couverture paramétrique des risques climatiques a certainement accès à des données beaucoup plus complètes. L'objectif ici est de construire un indice uniquement basé sur l'open data afin de démocratiser l'analyse de ce type de risque et de la rendre accessible. L'indice en question a pour but de refléter au mieux la densité d'évènements tempétueux dommageables en un point géographique donné. Dans le cas du risque tempête, l'indice doit refléter le niveau de risque associé à la vulnérabilité aux dégâts causés par la force du vent et à la possibilité de tempêtes à cet endroit. L'indice doit avoir une formulation assez générale, pour pouvoir être repris par n'importe quel organisme d'assurance ou de réassurance et doit permettre de bien capter le risque tempête. Le problème principal qui se pose dans le cadre de ce mémoire est l'accès aux données. En effet, les données en libre accès sont assez rares en ce qui concerne les coûts exacts engendrés par les tempêtes ainsi que les données météorologiques détaillées à une maille suffisamment fine. Il faut donc adapter la méthode avec les données à disposition. Cette partie présente dans un premier temps les différentes bases de données qui ont servi à cette étude avant de discuter du choix de la formule en se basant sur la littérature existante à ce sujet, pour enfin terminer par la mise en oeuvre de cette formule et l'analyse des différents résultats obtenus pour l'année 2020.

## 2.1 Présentation des bases de données à disposition

### 2.1.1 Les densités de population au niveau communal fournies par l'INSEE

L'INSEE établit régulièrement, en moyenne tous les cinq ans, la densité de population de chaque commune de France métropolitaine. La densité ne doit pas être confondue avec le nombre d'habitants, les villes les plus peuplées n'étant pas forcément les plus densément peuplées, comme le montrent les données du tableau 2.1 qui exposent la densité et le nombre d'habitants des 10 villes les plus peuplées de France métropolitaine.

Ville	Densité (en nombre d'habitants par km <sup>2</sup> )	Nombre d'habitants (en milliers)
Paris	20 641	2 176
Marseille	3 609	868
Lyon	10 834	519
Toulouse	4 115	487
Nice	4 742	341
Nantes	4 819	314
Montpellier	5 099	290
Strasbourg	3 638	285
Bordeaux	5 208	257
Lille	6 692	233

TABLE 2.1 : Comparaison du nombre d'habitants et des densités de population pour les 10 villes les plus peuplées (données INSEE datant de 2018)

Il est plus intéressant dans le cadre de l'indice de considérer la densité qui répertorie le nombre d'habitants à une maille de 1 km<sup>2</sup> plutôt que le nombre d'habitants par commune qui ne donne aucune indication sur la superficie occupée. En effet cette étude nécessite de connaître le nombre d'habitants présents dans chacune des mailles de la grille de points SAFRAN comme détaillé en section 2.3.1.

Comme expliqué par l'INSEE, le calcul de la densité de population se base sur le concept de population municipale qui comprend toutes les personnes dont la résidence principale se trouve sur le territoire de la commune, ainsi que toutes les personnes incarcérées dans une prison se trouvant sur ce territoire et également toutes les personnes sans-abri qui y ont été recensées. Les militaires et élèves internes hébergés dans la commune et n'ayant pas d'autres résidences sont également pris en compte (INSEE, 2018).

Le fichier de recensement de l'INSEE donne, pour l'année choisie, le code et le libellé de la commune ainsi que la densité associée en nombre d'habitants par km<sup>2</sup>. Un extrait de ce fichier est présenté dans le tableau 2.2.

Insee - Statistiques locales		
Référentiel géographique : France par commune		
		Indic1
		Densité de population
		(historique depuis
Code	Libellé	1876) 2018
01001	L'Abergement-Clémenciat	48,3
01002	L'Abergement-de-Varey	27,7
01004	Ambérieu-en-Bugey	577,4
01005	Ambérieux-en-Dombes	108
01006	Ambléon	19
01007	Ambronay	82,4
01008	Ambutrix	144,6
01009	Andert-et-Condon	46,7
01010	Anglefort	38

TABLE 2.2 : Extrait du fichier des densités 2018 de l'INSEE (2018)

Dans la suite de ce mémoire, la densité communale sera considérée constante dans le temps et les valeurs utilisées seront celles du dernier recensement datant de 2018. La France métropolitaine n'a pas connu de migration de population majeure depuis la seconde guerre mondiale. La figure 2.1

représente l'évolution de la densité de population au niveau communal de 10 villes parmi les plus densément peuplées de France métropolitaine (Paris, Saint-Mandé, Vincennes, Levallois-Perret, Le Pré Saint-Gervais, Clichy, Neuilly-sur-Seine, Montrouge, Asnières-sur-Seine et Boulogne-Billancourt) de 1954 à 2018.

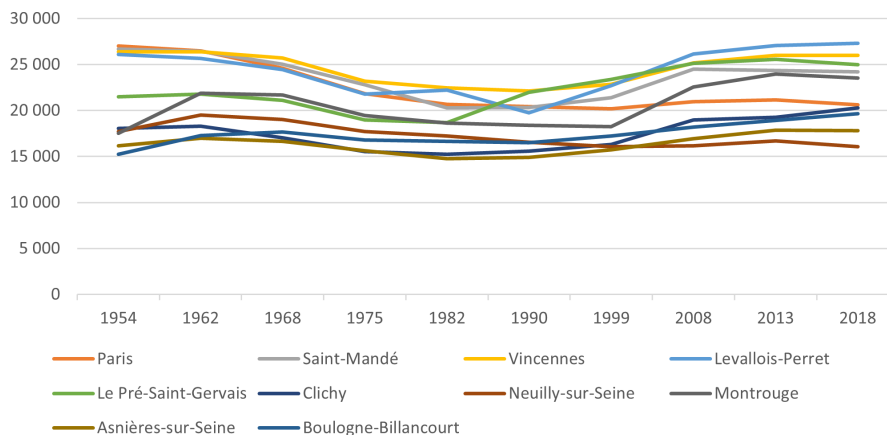


FIGURE 2.1 : Évolution de la densité de population en nombre d'habitants par km<sup>2</sup>, fait à partir des données de l'INSEE (2018)

Sur ce graphique, on constate que la densité de population de ces 10 communes n'a pas connu d'évolution majeure entre 1954 et 2018. Il est également intéressant de voir comment se comporte l'évolution de la densité des 5 villes les plus peuplées de France. La figure 2.2 ne fait pas apparaître de brusque changement de densité. La densité de population parisienne décroît de 1936 à 1982 mais reste tout de même de loin la plus élevée et elle se stabilise de 1982 à 2018.

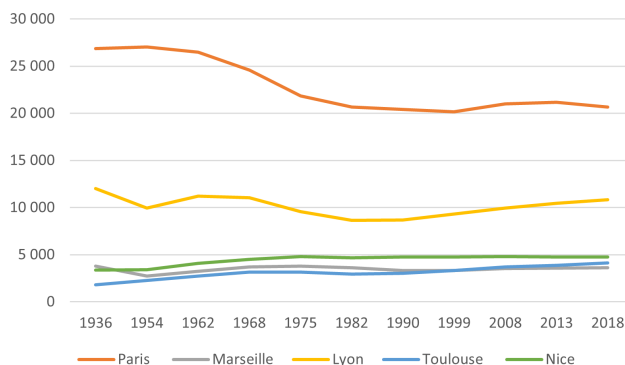


FIGURE 2.2 : Évolution de la densité de population, en nombre d'habitants par km<sup>2</sup>, des 5 villes les plus peuplées, fait à partir des données de l'INSEE (2018)

Outre l'augmentation générale de la population sur le territoire français, avec un passage de 43 millions d'habitants en 1954 à 67 millions en 2018, il n'y a pas de mouvements notables de population. Les territoires les plus densément peuplés sont les mêmes d'une année à l'autre, avec une tendance qui montre une concentration des Français dans les grandes villes.

La figure 2.3 montre deux cartes créées par l'OBSERVATOIRE DES TERRITOIRES (2018), et qui

confirment une absence d'exode significatif. La carte de gauche illustre la répartition de la population sur le territoire français en 1968 (sachant que cette année, la population française s'élevait à 51 millions d'habitants) et celle de droite donne la même information en 2018.

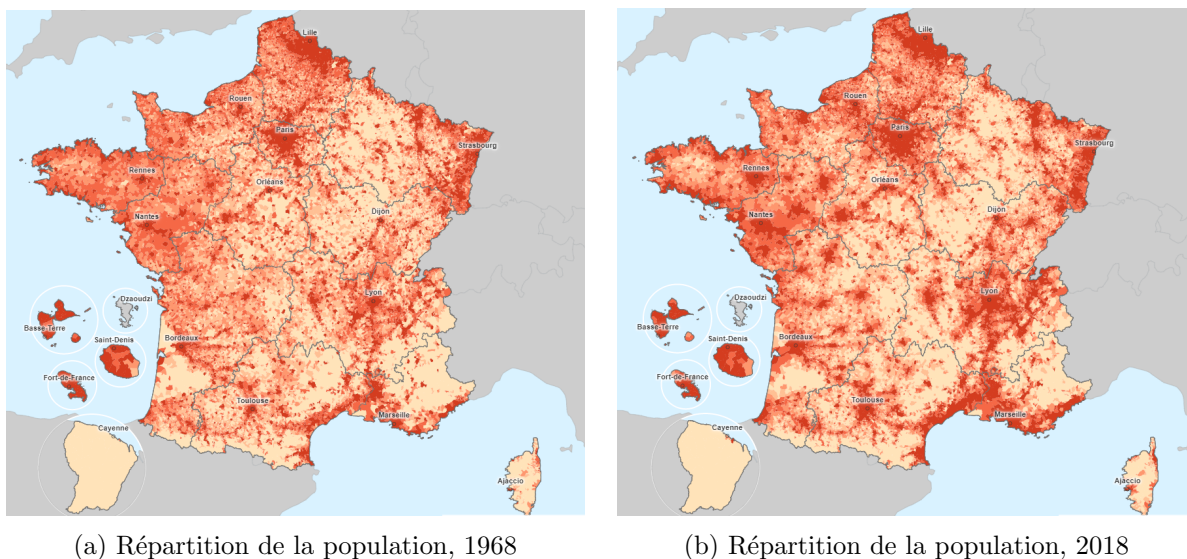


FIGURE 2.3 : Évolution de la répartition de la population française sur le territoire entre 1968 et 2018 (OBSERVATOIRE DES TERRITOIRES, 2018)

Dans l'idéal, il faudrait utiliser des modèles de projections démographiques afin d'avoir un indice qui soit le plus précis possible. Or de tels modèles ne sont pas disponibles en libre accès à la maille communale. Au vu des historiques, il semble peu probable que la tendance des populations à se concentrer dans les grandes villes s'inverse drastiquement dans les années à venir, il n'est donc pas incohérent de considérer le paramètre de densité comme constant, faute de pouvoir faire plus précis. Dans un souci d'exactitude, il faudrait également être en mesure de capter les mouvements de population qui résulteront de la montée des eaux et de l'inhabitabilité à venir de certains territoires. N'ayant aucun modèle à disposition et par souci de simplification, ce mémoire se basera sur l'hypothèse d'absence de mouvements majeurs de population.

### 2.1.2 La base de données DRIAS

DRIAS est un portail interactif (DRIAS, 2020a) qui permet un libre accès à des données de projections de différents paramètres climatiques. Ce portail est une initiative de Météo France, qui a travaillé en collaboration avec trois laboratoires français : CERFACS, CNRM-GAME et l'Institut Pierre Simon Laplace (PSL). Ce projet a été lancé en 2009, avec l'appui du ministère du Développement durable. Il donne accès aux résultats des simulations issus de différents modèles. Toutes les sorties de ces simulations ont été corrigées en 2020 et forment maintenant un nouveau jeu de données "DRIAS-2020". Les modèles se basent sur un historique de données allant de 1951 à 2005 et permettent des projections jusqu'à l'année 2100.

Les impacts à venir du changement climatique sur notre société dépendent majoritairement de deux éléments : de la réaction de notre environnement à l'augmentation du forçage radiatif et des changements socio-économiques qui seront entrepris. Les premiers scénarios mis en place par le GIEC



dans les années 1990, les SRES (*Special Report on Emissions Scenarios*), étaient générés par des modèles d'impact intégré dans lesquels divers facteurs comme l'évolution de la population mondiale, le développement de l'industrie et de l'agriculture et l'économie étaient pris en compte. Suite à l'évolution des différents facteurs ainsi que des connaissances sur le phénomène du changement climatique, le GIEC a développé les scénarios RCP (*Radiative Concentration Pathways*) en 2014. Ce sont ces scénarios qui sont utilisés actuellement pour les projections sur le portail DRIAS. Le dernier rapport du GIEC étant encore très récent (2022), les scénarios SSP (*Shared Socioeconomic Pathways*) n'entrent pas encore dans les méthodes de projection utilisées sur le portail DRIAS.

Le portail permet de projeter différents paramètres (détaillés dans le tableau 2.3) comme la température, le taux d'humidité et la vitesse du vent, à des horizons de temps plus ou moins proches et suivant trois scénarios tirés du rapport du GIEC : un scénario optimiste (le 2.6), un scénario intermédiaire (le 4.5) et un scénario pessimiste (le 8.5). Ces trois scénarios sont des entrées des modèles climatiques globaux, ou "Global Climate Model" (GCM). La base de données "DRIAS-2020" s'appuie sur ces modèles globaux qui ont été produits dans le cadre d'un exercice international, le CMIP 5 (*Coupled Model Intercomparison Project*, phase 5). C'est cet exercice qui a d'ailleurs servi de base à la rédaction du cinquième rapport du GIEC. Les modèles GCM ont une résolution de 150 à 200 kilomètres. Par conséquent, ce n'est pas une maille assez fine pour capter certains phénomènes météorologiques locaux, comme ceux ayant lieu dans certaines zones de montagne, ou sur des petites îles de diamètre inférieur à la maille. La méthode dite de "descente d'échelle dynamique" permet d'affiner les projections en passant à un niveau dit régional (par exemple à l'échelle de l'Europe). Ces nouveaux modèles, les RCM (*Regional Climate Models*), ont une résolution de 10 à 20 kilomètres. Ils sont construits de la même façon que les GCM mais se focalisent sur une seule région du monde.

Nom des variables	ECV	Unité
Température près de la surface	tas	K
Température maximale journalière près de la surface	tasmax	K
Température minimale journalière près de la surface	tasmin	K
Humidité spécifique près de la surface	huss	kg/kg
Précipitations totales	prtot	mm/jour
Flux de précipitations neigeuses	prsn	kg/m <sup>2</sup> /sec
Vitesse du vent horizontale en surface	sfcWind	m/sec

TABLE 2.3 : Liste des variables disponibles sur le portail DRIAS (DRIAS, 2020a)

Le programme CORDEX a permis une coopération internationale entre les différents centres de modélisations régionaux en fixant un cadre commun à l'établissement des différents scénarios de projection. À l'échelle européenne, l'Euro-CORDEX a choisi de ne se concentrer que sur les scénarios RCP 2.6, RCP 4.5 et RCP 8.5, n'en choisissant ainsi que trois parmi les quatre existants.

Pour les modélisations à l'échelle de la France, le choix a été fait de sélectionner 12 couples GCM-RCM pour composer le jeu de données DRIAS-2020. Ces 12 couples ont été choisis en fonction de leur pertinence mais aussi de la disponibilité des données. Ce sont les modèles des centres français qui ont été privilégiés (les modèles ALADIN et WRF) lors de la composition des couples. Comme décrit dans la figure 2.4, l'exercice CMIP 5 a donné comme résultat 34 GCM parmi lesquels seulement 6 ont été sélectionnés. L'Euro-CORDEX a par la suite créé 34 couples GCM/RCM et le jeu DRIAS-2020 n'en a conservé que 12.

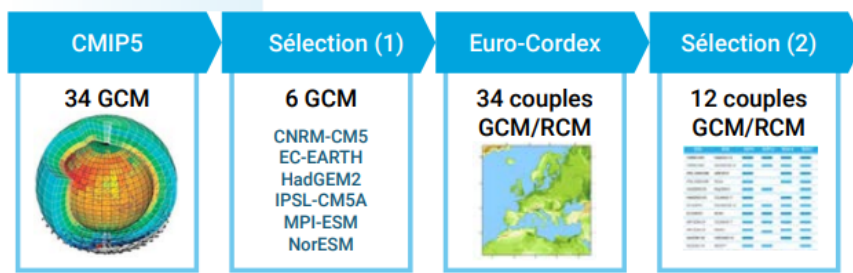


FIGURE 2.4 : Sélection des modèles pour la création du jeu de données DRIAS-2020 (CERFACS, CNRS, IPSL, 2020)

Les 12 couples de modèles GCM/RCM sont détaillés dans le tableau 2.4.

GCM	RCM	HISTO	RCP2.6	RCP4.5	RCP8.5
CNRM-CM5	Aladin63 V2	■	■	■	■
CNRM-CM5	Racmo22E v2	■	■	■	■
IPSL-CM5A-MR	WRF381P	■		■	■
IPSL-CM5A-MR	RCA4	■		■	■
HadGEM2-ES	RegCM4-6	■	■		■
HadGEM2-ES	CCLM4-8-17	■		■	■
EC-EARTH	Racmo22E v2	■	■	■	■
EC-EARTH	RCA4	■	■	■	■
MPI-ESM-LR	CCLM4-8-17	■	■	■	■
MPI-ESM-LR	REMO*	■	■	■	■
NorESM1-M	HIRHAM5 v3	■		■	■
NorESM1-M	REMO**	■	■		■

\* REMO 2009 ; \*\* REMO 2015

TABLE 2.4 : Description des couples GCM/RCM (CERFACS, CNRS, IPSL, 2020)

Chacun des couples peut être projeté avec au moins deux scénarios RCP. La bande bleue indique si le couple a donné lieu aux projections pour le scénario en question. Par exemple les projections pour le scénario 2.6 n'ont pas été effectuées pour le couple IPSL-CM5A-MR / WRF381P.

Pour une étude d'impact à l'échelle locale, de la France par exemple, il est nécessaire de corriger les projections climatiques. Pour cela, les modélisateurs DRIAS ont choisi d'utiliser la méthode Adamont (CERFACS, CNRS, IPSL, 2020) sur le jeu de données DRIAS-2020. La première étape est de choisir une période de référence, ici de 1976 à 2005. La méthode Adamont va ensuite corriger les simulations brutes issues des 12 couples combinant les modèles GCM et RCM. C'est une méthode de correction statistique qui corrige les différentes variables en fonction des biais saisonniers observés sur la période de référence.

Pour résumer, le jeu de données DRIAS-2020 est constitué grâce aux couples GCM/RCM obtenus en sortie de la descente d'échelle dynamique, méthode qui permet de passer de l'échelle globale à l'échelle régionale. Les données issues des simulations de ces couples sont ensuite corrigées à l'aide d'une méthode statistique, la méthode Adamont, pour obtenir des projections à l'échelle locale. La figure 2.5 illustre ces différentes étapes.

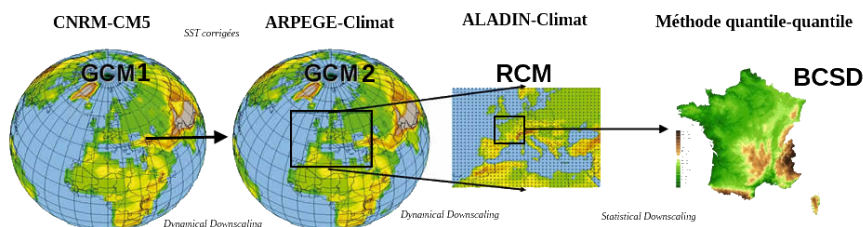


FIGURE 2.5 : Les différentes étapes pour passer de l'échelle globale à l'échelle de la France (CERFACS, CNRS, IPSL, 2020)

Ces 12 couples utilisent donc différents modèles régionaux. Parmi eux il y a deux modèles français : les modèles ALADIN63 et IPSL-WRF381P. Dans la suite de ce mémoire, ce sont les projections obtenues à partir du modèle ALADIN63 qui seront utilisées dans un premier temps (les autres modèles seront également étudiés). Ce modèle a été développé en partenariat avec Météo France, c'est donc par souci de cohérence avec les données historiques pour 2020, fournies elles aussi par Météo France (utilisées à titre informatif en section 2.3.2), qu'il a été choisi pour calibrer l'indice.

Sur le portail DRIAS, les projections des paramètres météorologiques se font en différents points de l'espace répartis sur une grille appelée la grille de points Safran. Cette grille est composée d'un ensemble de points équidistants partant de la position 41,4 degrés Nord et 4,1 degrés Ouest. Elle permet une résolution de 8 km. Parmi tous les points de la grille, 8 981 tombent sur le territoire terrestre français, les points tombant dans les mers et océans ne sont pas considérés dans le cadre de ce mémoire.

### 2.1.3 La base de données de La Poste pour les coordonnées géographiques des communes

En comptant les territoires d'outre-mer, il y a aujourd'hui 39 193 communes françaises. La Poste fournit un fichier (LA POSTE GROUPE, 2022) qui recense toutes ces communes (dont les communes d'Outre Mer) avec leur nom, leur code de commune, leur code postal et leurs coordonnées gps. Ce fichier correspond à la base officielle des codes postaux, mise à jour le 21 mars 2022.

### 2.1.4 Les relevés de vent de l'année 2020

La seule base de données de Météo France en libre accès est la base de données SYNOP (DONNÉES PUBLIQUES MÉTÉO FRANCE, 2020). Elle a l'avantage d'être accessible gratuitement mais ne contient les relevés météorologiques qu'en certains points, seulement 42 stations en France métropolitaine, et qui ne sont donc pas répartis sur l'ensemble des départements français. Le détail des postes et des différentes variables est donné en annexe A.1. De plus ces relevés n'ont pas été retraités par Météo

France, les données doivent donc être observées avec prudence. Les données SYNOP fournissent une vitesse de vent moyenne sur 10 min. Cette moyenne est calculée plusieurs fois par jour sur chacune des 42 stations et est restituée dans des fichiers mensuels. Les données sont assez minces avec des relevés qui ne sont pas quotidiens et pour certains postes, il n'y a qu'une seule moyenne de vent sur 10 min pour une journée entière. Cette base sera donc utilisée à titre indicatif seulement.

Pour information, Météo France donne également accès à toutes ses bases de données provenant de ses 544 stations placées en métropole et de ses 67 placées en Outre-Mer. Ces stations permettent d'obtenir les relevés du vent à une hauteur de 10 mètres. Ces relevés sont composés de la vitesse moyenne sur 10 min, tout comme les données SYNOP. Ce sont des données très complètes qui ont pour seul désavantage d'être payantes.

## 2.2 Mise en place de l'indice tempête

Il existe déjà dans la littérature des exemples d'indice tempête. La majorité est basée sur des méthodes d'apprentissage en utilisant les coûts générés par les tempêtes sur un portefeuille d'assurés. Ce n'est pas ici l'approche choisie. Ne disposant pas de base de coûts, l'intérêt est de concevoir un indice qui capte le risque tempête en arrivant à prendre en compte l'exposition de la zone géographique et en prenant également en compte les caractéristiques météorologiques inhérentes à ce risque. Deux indices ont déjà pu être développés et testés, ils serviront ainsi de base.

### Indice 1

Dans la thèse de A. MORNET (2015) est présentée une formule d'indice tempête. L'indice tempête se compose d'un indice vent et d'un coefficient d'exposition propre au portefeuille d'Allianz étudié dans cette thèse. L'indice de vent est défini par

$$I_w^d(s) = ([w^d(s) - w_q(s)])^\alpha,$$

avec :

- $I_w^d(s)$  l'indice de vent du jour  $d$  à l'échelle locale pour la station  $s$ ,
- $w^d(s)$  la vitesse maximale du vent enregistrée dans le jour  $d$  à l'échelle locale pour la station  $s$ ,
- $\alpha$  un exposant à déterminer pour contrôler l'influence des dépassements selon leur intensité,
- $w_q(s)$  le quantile à  $q\%$  sur l'ensemble des vitesses relevées à la station  $s$ .

Le territoire français est ensuite découpé en 6 zones tempêtes dans lesquelles le vent présente des comportements similaires. Ce sont des zones de risque homogène préalablement établies par l'auteur. Pour chacune de ces zones est établi un indice tempête spécifique défini par

$$I_S(k) = \sum_{s \in zone_k} R(s) \times \max_{d \in E} \left( \frac{I_w^d(s)}{N^d} \right),$$

avec :

- $I_w^d(s)$  l'indice de vent pour la station  $s$ ,
- $R(s)$  l'exposition du portefeuille associée à la station  $s$ ,
- $E$  la période étudiée,
- $N^d$  le nombre de stations actives le jour  $d$ .

Cette formule amène l'exposition aux risques spécifique au portefeuille d'Allianz par le biais du paramètre  $R(s)$ , et fait le lien avec les données météorologiques fournies par l'indice de vent. À partir de cet indice spécifique, l'indice tempête global est défini par

$$I_S = \sum_{k=1}^6 P(k) \times I_S(k) \times \beta_k,$$

avec :

- $\beta_k$  un paramètre d'optimisation pour minimiser les écarts entre les coûts globaux et l'indice tempête lors des événements majeurs de la période prise pour historique,
- $P(k)$  le poids relatif de chaque zone dans le portefeuille.

Cet indice apporte l'idée intéressante d'étudier les vitesses de vent en les comparant à un quantile préalablement fixé; approche classique en réassurance et en théorie des valeurs extrêmes. En effet, l'indice ayant pour but d'identifier les événements dommageables exceptionnels de par leur puissance, il est pertinent de ne considérer que les vitesses de vent extrêmes, dépassant un certain quantile. Cependant, cette formule implique d'avoir connaissance d'un portefeuille précis, le paramètre exposition étant spécifique au portefeuille d'Allianz. Les paramètres  $\alpha$  et  $\beta$  sont ajustés en comparant coûts réels et coûts prédits, ce qui n'est possible qu'à condition d'avoir accès à une base de coûts ayant un historique assez important.

## Indice 2

Ce deuxième indice issu de la littérature et également présenté dans la thèse de A. MORNET (2015), est un indice suédois. Il estime les dommages en se basant uniquement sur un paramètre météorologique : la pression exercée par le vent. Les dommages sont définis par

$$\log(loss_i) = \alpha_0 + \sum_{j=1}^K \alpha_j p_j + \epsilon_i,$$

avec :

- $\log(loss_i)$  les dommages dans la région  $i$ ,
- $p_j$  la pression exercée au point  $j$ .

Les dommages sont estimés pour chaque région en calculant à chaque fois la pression exercée sur les  $K$  points du maillage utilisé. Les paramètres  $\alpha$  et  $\epsilon$  sont ensuite déterminés par apprentissage. Cette méthode est impossible à appliquer dans notre cas car nous ne disposons pas de base de coûts pour déterminer les paramètres  $\alpha$  et  $\epsilon$  par apprentissage.

### Choix de la formule

Le principal obstacle dans notre cas est l'absence d'une base de données de coûts, ce qui empêche toute possibilité de déterminer certains paramètres par apprentissage. Le choix a été fait de garder un indice très général qui illustre au mieux le risque tempête sans être rattaché à un portefeuille en particulier et qui n'est construit que sur des données disponibles en libre accès. Deux paramètres sont essentiels dans la composition de l'indice : l'exposition au risque et un paramètre météorologique qui caractérise la violence de la tempête. Comparer la vitesse maximale enregistrée à un certain quantile permet de capter le caractère exceptionnel de l'évènement météorologique.

Pour ce qui est de l'exposition, il est intuitif de se dire qu'une tempête passant dans une zone peuplée causera des dégâts plus importants qu'une tempête passant dans une zone à faible densité de population. On se place dans notre cas du point de vue d'une assurance dommage, l'analyse serait inversée en cas d'assurance forestière par exemple. Une ville densément peuplée implique un plus grand nombre d'habitations et d'infrastructures diverses et un plus grand nombre d'habitants ce qui induit un nombre d'assurés potentiellement plus élevé. Le paramètre densité doit donc être également pris en compte et servira à capter l'exposition au risque tempête.

L'indice journalier calculé au point  $p$  est donc défini par

$$I_{p,j} = [(v_{p,j} - v_q) \times \mathbb{1}_{\{v_{p,j} \geq v_q\}}]^\alpha \times D_p,$$

avec :

- $v_q$  la vitesse du quantile à  $q\%$ ,
- $v_{p,j}$  la vitesse moyenne journalière du vent enregistrée au point  $p$  le jour  $j$ ,
- $\alpha \in \{1, 2, 3\}$  un paramètre pour ajuster le poids du dépassement du quantile dans la formule,
- $D_p$  la densité de population moyenne de la zone entourant le point DRIAS  $p$ ,
- $\mathbb{1}_{\{v_{p,j} \geq v_q\}}$  une indicatrice qui permet de ne conserver que les indices associés à des vitesses de vent dépassant un certain quantile.

Cette formule que nous proposons de façon empirique en s'inspirant des travaux de A. MORNET (2015), sera par la suite validée, ou invalidée, par l'analyse de la cohérence des résultats obtenus. L'indice journalier  $I_{p,j}$  est calculé en chacun des points DRIAS à partir de la vitesse moyenne journalière relevée. La vitesse au quantile quant à elle dépend de l'approche choisie (vision nationale, vision par zone de risque homogène ou vision locale comme détaillé en section 2.3). L'indice annuel est ensuite obtenu en sommant les indices journaliers en chacun des points DRIAS. Ainsi, en plus de l'intensité, l'indice capte l'éventuelle récurrence des phénomènes tempétueux sur une année. Une fréquence plus élevée des tempêtes engendrant des coûts plus élevés pour les organismes d'assurance et de réassurance, il est important que ce paramètre soit capté par l'indice. L'indice annuel calculé en un point  $p$  est donc défini par

$$I_p = \sum_{j=1}^{365} I_{p,j}.$$

## 2.3 Calibrage de l'indice

Dans cette partie vont être présentées toutes les étapes, décrites par la figure 2.6, nécessaires pour calibrer l'indice et parvenir au résultat pour l'année de référence fixée à 2020. Cette année de référence a été fixée ainsi en raison de la disponibilité des données SYNOP (DONNÉES PUBLIQUES MÉTÉO FRANCE, 2020) qui, au moment de la rédaction de ce mémoire, ne sont complètes et disponibles que jusqu'en 2020. Le premier paragraphe abordera l'étude du paramètre d'exposition choisi qui est la densité de population. Le deuxième paragraphe quant à lui consistera en une analyse purement informative des données SYNOP. Enfin, les paragraphes suivants permettront d'évaluer le comportement de l'indice en fonction du paramètre  $\alpha$  et du choix du quantile selon trois visions différentes : d'abord à l'échelle nationale, puis à l'échelle des zones de risque homogène et enfin à l'échelle locale des points DRIAS.

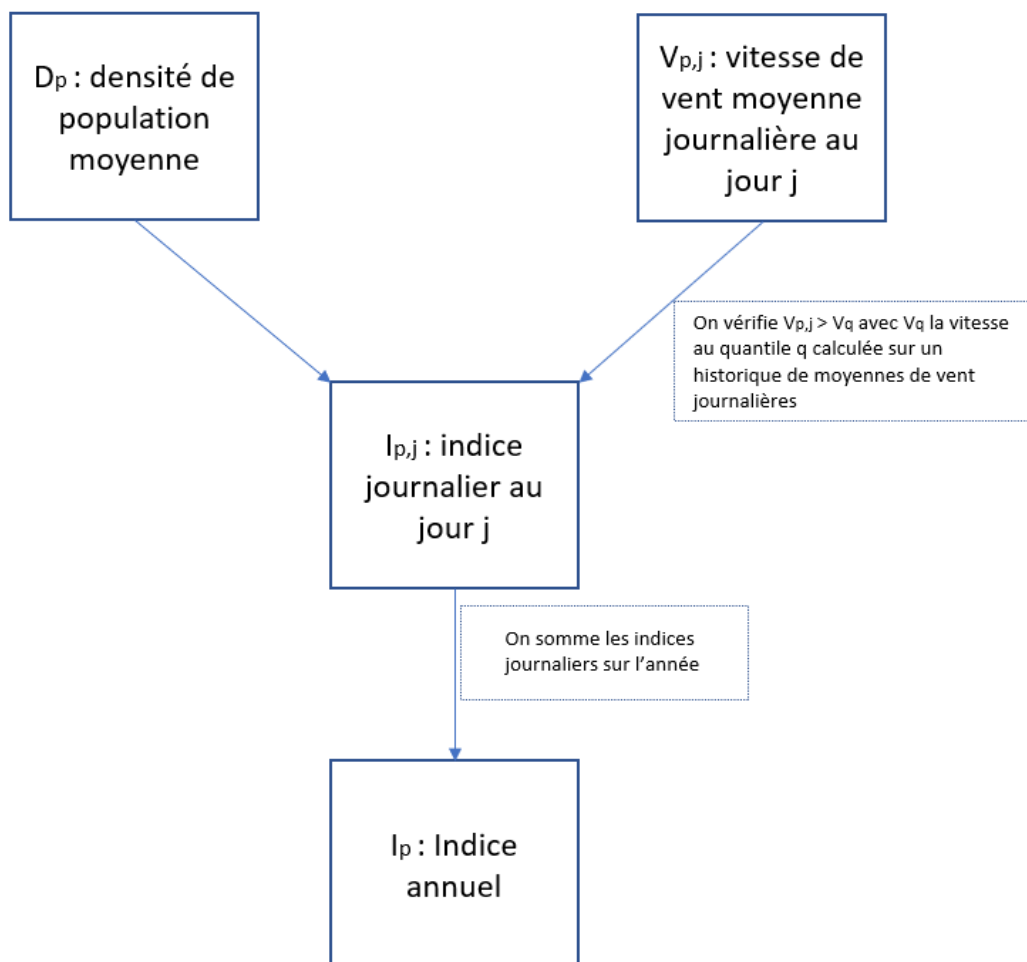


FIGURE 2.6 : Organigramme illustrant la mise en place de l'indice

Les différentes étapes décrites par cet organigramme seront effectuées en chacun des points  $p$  ( $p \in [1 : 8332]$ ) de la grille de points Safran décrite en section 2.1.2.

### 2.3.1 Estimation des densités de population

Dans ce paragraphe est détaillée la réflexion menée autour du paramètre d'exposition. La première intuition a été d'utiliser le prix des logements selon la zone géographique. En effet, plus un bien immobilier a de la valeur plus le coût sera élevé pour l'assureur ou le réassureur en cas de dommages.

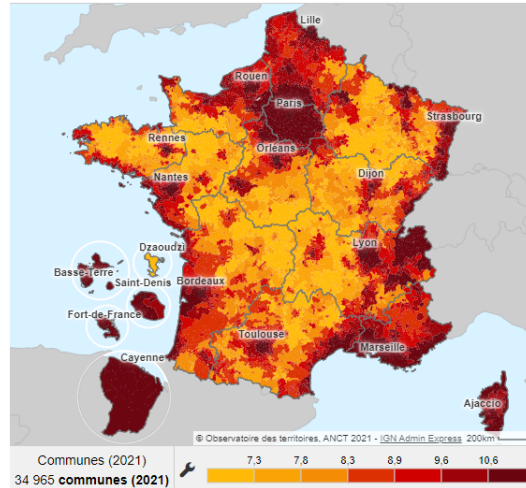


FIGURE 2.7 : Prix en euros des loyers au m<sup>2</sup> en 2021 (MINISTÈRE DE LA TRANSITION ÉCOLOGIQUE ET DE LA COHÉSION DES TERRITOIRES, 2021)

Cette carte du prix du m<sup>2</sup> illustre la disparité de la valeur des biens immobiliers sur le territoire. Les données ayant servi à la conception de cette carte ne sont pas accessibles et il est difficile d'obtenir des données à une maille assez fine pour pouvoir les utiliser. Les données, de la base des notaires notamment (IMMO DATA, 2022), sont relativement incomplètes et ne couvrent pas tout le territoire à une maille suffisamment fine. C'est pourquoi c'est la densité qui a été choisie pour capter l'exposition. Ce n'est pas forcément le paramètre le plus précis étant donné qu'il ne reflète pas la notion de valeur des biens immobiliers mais il permet tout de même de capter cette notion d'exposition en faisant la distinction entre les zones les moins peuplées et celles qui au contraire le sont plus densément et qui sont donc potentiellement plus exposées à un grand nombre de dommages en cas de tempête.

Nous disposons de la base de l'INSEE décrite en section 2.1.1, qui fournit la densité pour chaque commune de France. Il nous faut associer ces densités à la base de données de points DRIAS pour lesquels nous avons les vitesses de vent. Nous avons plus de 39 000 communes avec leur densité de population et leurs coordonnées géographiques respectives que nous devons associer aux 8 981 points de la grille Safran pour lesquels nous avons également les coordonnées géographiques. Pour cela chaque commune va être associée au point de la grille Safran le plus proche. La distance entre les points Safran et les communes est calculée à l'aide de la formule donnée dans le rapport de l'INSTITUT NATIONAL DE L'INFORMATION GÉOGRAPHIQUE ET FORESTIÈRE (2019)

$$d_{ab} = R \times \arccos(\sin(\text{lat}_a) \times \sin(\text{lat}_b) + \cos(\text{lat}_a) \times \cos(\text{lat}_b) \times \cos(\Delta_{lon})),$$

où :

- $\text{lat}_a$  correspond à la latitude du point  $a$ ,
- $\text{lat}_b$  correspond à la latitude du point  $b$ ,



- $\Delta_{\text{lon}}$  correspond à la différence entre la longitude du point  $a$  et la longitude du point  $b$ ,
- $R$  correspond au rayon de la Terre qui est de 6 371 km.

Une fois que chaque point DRIAS s'est vu attribuer les communes les plus proches géographiquement, on calcule la densité moyenne de ces communes pour obtenir la densité moyenne de la zone géographique entourant chacun des points DRIAS. Certains points DRIAS se trouvent dans des zones totalement inhabitées comme des massifs montagneux, au milieu des lacs ou encore au milieu du bassin d'Arca-chon. Aucune commune ne se retrouve rattachée à ces points. Étant donné que ce mémoire se focalise sur les dégâts matériels pouvant être engendrés par les tempêtes, il n'est pas pertinent de garder ces points qui se trouvent loin de toutes zones habitées. Seuls 8 332 points de la grille Safran, auxquels sont attribuées 8 332 densités moyennes, sont conservés pour la suite de l'étude.

La formule de l'indice telle qu'elle a été définie en section 2.2, donne un poids trop important à la densité créant donc un biais par lequel les régions très fortement peuplées sont trop pénalisées. Le poids du paramètre exposition domine le poids du paramètre météorologique. Ce biais est d'autant plus problématique qu'il y a un écart très important entre la région Île-de-France et les autres régions. La commune la plus densément peuplée hors Île-de-France est Lyon avec une densité de 10 834 habitants par km<sup>2</sup>, tandis que la densité atteint 27 310 habitants par km<sup>2</sup> pour Levallois-Perret qui est la commune française avec la densité de population la plus importante.

De plus, on constate que la densité moyenne autour de chaque point de mesure de vent de la grille Safran est drastiquement diminuée dès que l'on quitte la région Ile de France. Le tableau 2.5 donne les dix positions géographiques de la grille ayant les densités les plus importantes.

Département	Région	Latitude	Longitude	Densité
75	Île de France	48,8954	2,28268	17 277
94	Île de France	48,8235	2,39164	14 489
92	Île de France	48,8235	2,28276	13 714
93	Île de France	48,8954	2,39172	13 223
69	Rhône Alpes	45,7731	4,85737	8 437
93	Île de France	48,8953	2,50076	7 627
94	Île de France	48,8234	2,50053	7 417
92	Île de France	48,9673	2,28261	6 061
91	Île de France	48,7515	2,28283	5 867
78	Île de France	48,8953	2,17364	5 238

TABLE 2.5 : Densités de population moyennes attribuées aux points DRIAS

Il est clair que la région Île-de-France est sur-représentée (en rouge dans le tableau 2.5). L'écart entre le premier point DRIAS et le dixième est de 12 039 ce qui est conséquent. La moyenne des densités associées à chaque point de la grille Safran est de 119 habitants par km<sup>2</sup> et la médiane de 40 habitants par km<sup>2</sup> ce qui confirme la prédominance de quelques zones beaucoup plus peuplées que les autres.

La densité conservée telle quelle pénalise donc l'Île-de-France et en fait la zone la plus à risque et donc potentiellement la plus coûteuse alors qu'elle n'est pas la plus exposée aux vents violents. Si l'on regarde, à titre d'exemple, les coûts moyens de la garantie Tempête-Grêle-Neige pour l'année 2019 présentés dans le tableau 2.6, on voit que l'Île-de-France (départements en rouge) est loin d'être la région la plus touchée. Sur 68 départements présentés ici, le plus coûteux d'Île-de-France est la

Seine-et-Marne qui n'arrive qu'en quarantième position. Cela confirme qu'il faut diminuer le poids de la densité dans le calcul de l'indice.

Position	Numéro de département	Nom du département	Particuliers - coût moyen en euros	
			2019	Cumul 1987-2019
1	26	DROME	4 763	3 667
2	42	LOIRE	2 816	2 476
3	63	PUY DE DOME	2 740	2 621
4	90	TERRITOIRE DE BELFORT	2 622	2 466
5	2	AISNE	2 399	2 476
6	73	SAVOIE	2 372	2 692
7	20	CORSE	2 338	2 719
8	38	ISERE	2 270	2 314
9	7	ARDECHE	2 202	2 143
10	74	SAVOIE (HAUTE)	2 185	2 744
<b>40</b>	<b>92</b>	<b>HAUTS DE SEINE</b>	<b>1 566</b>	<b>2 951</b>
<b>59</b>	<b>77</b>	<b>SEINE ET MARNE</b>	<b>1 424</b>	<b>2 864</b>
60	50	MANCHE	1 398	2 574
61	40	LANDES	1 394	2 583
<b>62</b>	<b>95</b>	<b>VAL D'OISE</b>	<b>1 394</b>	<b>2 698</b>
63	23	CREUSE	1 391	2 541
64	46	LOT	1 389	2 434
65	62	PAS DE CALAIS	1 344	1 859
66	87	VIENNE (HAUTE)	1 331	2 906
67	11	AUDE	1 321	2 289
<b>68</b>	<b>78</b>	<b>YVELINES</b>	<b>1 315</b>	<b>2 713</b>

TABLE 2.6 : Coût moyen d'un sinistre de la garantie TGN par département (FÉDÉRATION FRANÇAISE DE L'ASSURANCE - DIRECTION DES ÉTUDES ÉCONOMIQUES ET DES STATISTIQUES, 2020)

Pour illustrer le déséquilibre causé par les densités moyennes associées aux différents points DRIAS, la figure 2.8 montre la répartition de l'indice qui serait obtenue sans ajustement (en vision locale avec un  $\alpha$  de 2 et pour un quantile à 80 %). Ce n'est pas une carte exploitable, à défaut d'illustrer le risque tempête, elle illustre seulement les pôles de densités de population massives.

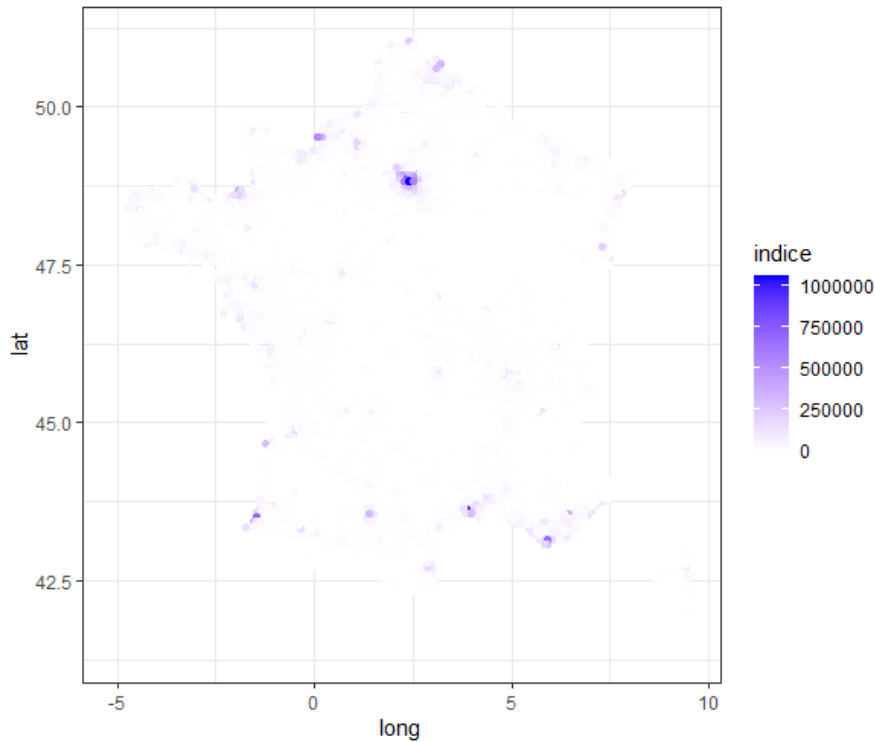


FIGURE 2.8 : Répartition de l'indice sans ajustement de la densité

Afin de favoriser le poids de la force du vent par rapport à la densité, la formule de calcul de l'indice journalier est modifiée et devient

$$I_{p,j} = [(v_{p,j} - v_q) \times \mathbb{1}_{\{v_{p,j} \geq v_q\}}]^\alpha \times \left(\frac{D_p}{10000} + 1\right).$$

On divise par 10 000 car c'est l'ordre de grandeur des densités des villes les plus densément peuplées, toutes en Île-de-France. Il a été fait le choix d'ajouter 1 afin qu'aucune densité ne soit inférieure à 1 et ne vienne diviser l'effet de la force du vent. La plus petite densité, une fois divisée par 10 000 étant très proche de 0 (de l'ordre de  $10^{-3}$ ), ajouter 1 permet que les zones très faiblement peuplées aient un indice équivalent au carré de la vitesse du vent. Ainsi la densité n'a une incidence sur l'indice que pour l'augmenter afin de refléter le risque plus important d'avoir des dégâts dans une zone plus habitée.

### 2.3.2 Analyse à but informatif des données SYNOP

Comme présentée en section 2.2, la conception de l'indice nécessite de comparer la vitesse maximale enregistrée avec la vitesse correspondant à un certain quantile. Ce quantile doit être choisi de façon à capter au mieux les événements dommageables qui représentent un coût pour les assureurs et réassureurs. Afin d'avoir une première idée du comportement des vents, une analyse des données SYNOP pour l'année 2020 est menée dans ce paragraphe. Ces données fournissent des vitesses moyennes sur 10 min, contrairement aux données DRIAS qui fournissent des moyennes journalières et qui sont par conséquent plus basses et moins précises.

Aujourd'hui, dans la garantie Tempête-Grêle-Neige (TGN) en particulier, les dommages causés

par les tempêtes sont couverts par les assureurs uniquement lorsque les rafales franchissent le seuil des 100 km/h. Il est cependant possible de constater des dégâts, majoritairement sur les toitures, dès que les rafales atteignent 80 km/h. En effet comme indiqué par Météo France dans un de ses rapports (MÉTÉO FRANCE, 2022), "un vent est estimé violent donc dangereux lorsque sa vitesse atteint les 80km/h". Météo France indique également que lorsqu'un vent peut être caractérisé comme violent, des dégâts tels que "les toitures et cheminées endommagées, les arbres arrachés, les véhicules déportés sur les routes, les coupures d'électricité et de téléphone" peuvent être constatés. L'indice allant être utilisé avec les données de vent DRIAS, qui sont des moyennes journalières, il n'est pas possible de les comparer à une vitesse instantanée de 80 km/h. Par conséquent, nous allons regarder à quel quantile des données SYNOP de Météo France correspond ce seuil de 80 km/h. Les différents quantiles des données SYNOP brutes pour l'année 2020 sont les suivants :

- le quantile à 80 % est de 23,76 km/h,
- le quantile à 90 % est de 30,96 km/h,
- le quantile à 95 % est de 38,16 km/h,
- le quantile à 98 % est de 48,24 km/h.

Les quantiles sont tous bien inférieurs à 80 km/h. Ceci est dû au fait que les données SYNOP contiennent des moyennes sur 10 min. Or, le seuil de 80 km/h correspond à une vitesse instantanée (une vitesse de rafale de vent). Le lien entre la vitesse des rafales et la vitesse moyenne sur 10 min a déjà fait l'objet de différentes études. De nombreuses méthodes existent pour calculer les vitesses de vents extrêmes comme celles présentées dans le rapport de JP. PALUTIKOF, BB. BRABSON, DH. LISTER ET ST. ADCKOCK (1999). Outre l'étude des vents extrêmes, le travail de L. CVITAN (2003) établit un lien direct entre la vitesse instantanée des rafales et la vitesse moyenne mesurée sur 10 min par le biais d'un "facteur de rafales" (*gusts factor*). La vitesse de la rafale est estimée par

$$V_g = k_g \times V_{mean}$$

avec :

- $V_g$  la vitesse de la rafale qui correspond à une vitesse maximale instantanée mesurée sur 2 secondes,
- $k_g$  le facteur de rafales,
- $V_{mean}$  la vitesse moyenne mesurée sur 10 minutes.

Le facteur de rafales est défini par

$$k_g = 1 + \frac{2.28}{\ln(\frac{z}{z_0})}^1,$$

avec :

- $z$  la hauteur par rapport au sol considérée,

---

<sup>1</sup>Les étapes de l'estimation du facteur de rafales sont détaillées dans le rapport de L. CVITAN (2003)

- $z_0$  le coefficient de rugosité de la surface qui est le même que celui utilisé dans l'Eurocode 1 (D. CLAVAUD, 2014).

Ainsi il a été démontré que la vitesse d'une rafale pouvait être estimée à partir d'une vitesse de vent moyenne sur 10 min. Plus récemment, un mémoire (N. BEDI, 2018) a redémontré le lien entre les vitesses moyennes sur 10 min et les vitesses des rafales. Ce mémoire avait pour objectif l'étude et la modélisation du risque tempête en utilisant un modèle catastrophe. La construction d'un modèle de ce type a nécessité de travailler sur trois modules distincts : le module aléa, le module vulnérabilité et le module financier. Ces trois modules sont illustrés par la figure 2.9.

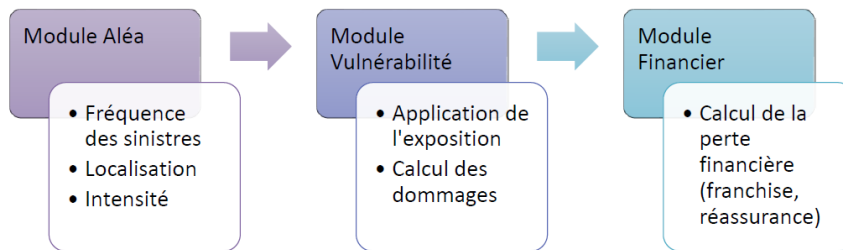


FIGURE 2.9 : Description des trois modules du modèle catastrophe (N. BEDI, 2018)

La construction du module aléa a conduit à l'étude du lien entre la vitesse moyenne sur 10 min et la vitesse des rafales. Dans ce mémoire est étudiée la corrélation entre la vitesse moyenne sur 10 min et la rafale la plus élevée enregistrée au même endroit sur le même intervalle de temps. Une régression linéaire permet d'obtenir la relation entre ces deux notions<sup>1</sup>. Cette relation se traduit par

$$r = 1.52 \times v + 0.86,$$

avec :

- $r$  la vitesse de la rafale,
- $v$  la vitesse moyenne du vent sur 10 min.

C'est cette formule qui va être utilisée, étant donné qu'elle peut être appliquée sur tout le territoire sans dépendre du coefficient de rugosité. C'est une formule largement simplifiée en comparaison avec les autres modèles qui peuvent être utilisés (comme celui de L. CVITAN (2003)). Néanmoins, la simulation des rafales ne servant qu'à estimer à quel quantile correspond le seuil des 80 km/h sur les données SYNOP et n'étant donc pas utilisée à un titre autre qu'indicatif dans le calcul de l'indice, une formule simplifiée est suffisante. Les données utilisées dans mémoire de N. BEDI (2018) pour parvenir à cette formule sont également les données SYNOP de Météo France. Ainsi en reprenant cette formule, il est possible de retrouver les vitesses des rafales en se basant sur les relevés de l'année 2020. La répartition des rafales qui ont traversé la France métropolitaine au cours de l'année 2020 est représentée par la figure 2.10. Le seuil de 80km/h correspond sur ces données modifiées à un quantile à 98 %.

<sup>1</sup>Pour plus de détails sur ce module ou les autres, se référer à son mémoire (N. BEDI, 2018)

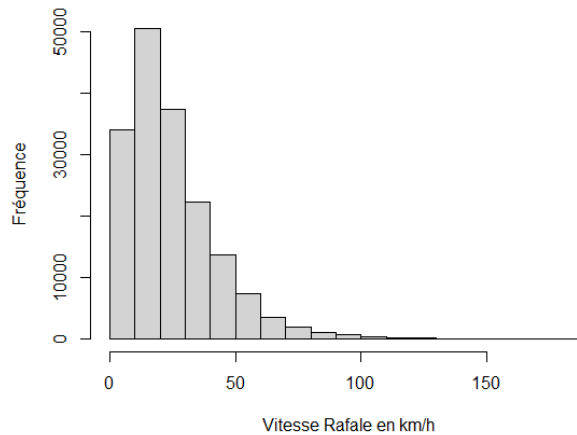


FIGURE 2.10 : Répartition des vitesses des rafales en 2020

L'étude des vents extrêmes ne nécessite pas de modéliser les rafales. Ayant, pour ce mémoire, choisi de travailler sur les données DRIAS qui présentent l'avantage d'être accessibles gratuitement à une maille fine, les rafales ne seront pas simulées. En effet, les différentes méthodes de calcul des rafales se basant sur des vitesses moyennes sur 10 min, rien ne permet d'appliquer ces formules à des vitesses moyennes journalières. Une telle simplification pourrait être une source d'erreur impossible à estimer. De plus, il est tout à fait cohérent de travailler directement sur les moyennes journalières pour capter les phénomènes extrêmes comme cela a déjà été fait par S. OUTTEN ET S. SOBOLOWSKI (2021) qui ont travaillé sur les changements à venir dans le comportement des vents extrêmes en se basant sur les données de l'Euro-CORDEX. L'analyse des rafales sur les données SYNOP permet toutefois d'estimer le quantile qu'il est intéressant de regarder (98 %). Dans la suite, les vitesses moyennes journalières de vent DRIAS sont comparées à des quantiles à 80 %, 90 %, 95 % et 98 %. Ainsi, il sera possible d'étudier l'impact du choix du quantile sur l'indice tempête.

### 2.3.3 Le choix des données DRIAS pour 2020

Avant de commencer à calculer l'indice, il faut choisir les données DRIAS qui vont être utilisées pour l'année 2020 de référence. Le portail DRIAS (2020a) donne le choix entre 3 scénarios différents pour l'année 2020 (le 8.5, le 4.5 et le 2.6). Comme le montre la figure 2.11, le scénario est lié à la quantité de gaz à effet de serre émise dans l'atmosphère, exprimée ici en partie par millions (ppm). Il est visuellement difficile de voir une grande différence entre les trois scénarios pour l'année 2020 sur le graphique. Néanmoins, le scénario RCP 8.5 étant le plus pessimiste, il est cohérent de se baser sur celui-ci sachant que malgré la crise du Covid-19, l'émission de gaz à effet de serre a atteint un record en 2020, atteignant les 413,2 ppm, avec un taux d'augmentation annuel dépassant ainsi la moyenne de la dernière décennie. Dans le chapitre 3 sont étudiées les projections selon les deux scénarios les plus extrêmes (le RCP 2.6 et le RCP 8.5) afin d'établir s'ils ont une incidence sur l'indice tempête et sur l'évolution du risque tempête.

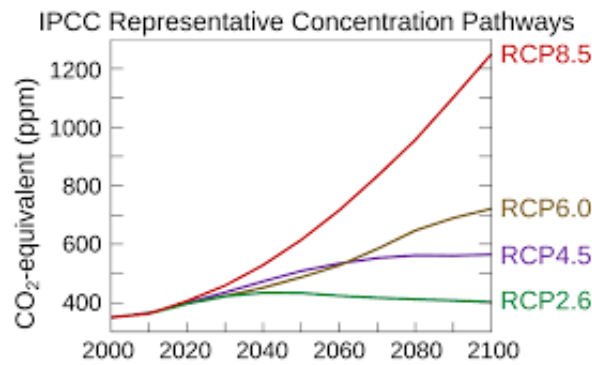


FIGURE 2.11 : Projection des scénarios RCP du GIEC (GIEC, 2014)

Différents modèles sont disponibles sur le portail DRIAS. Pour cette partie de calibration de l'indice, c'est le modèle français ALADIN63 qui est utilisé. En sortie de la simulation est fourni un fichier texte contenant, pour chaque jour et chaque point de la grille, la vitesse moyenne journalière de vent en km/h, ainsi que la latitude et la longitude du point. Un exemple de sortie est donné par le tableau 2.7.

Date	Latitude	Longitude	Vitesse en km/h
01/01/2020	41.33720	9.14986	7.24
02/01/2020	41.33720	9.14986	21.55
03/01/2020	41.33720	9.14986	7.74
04/01/2020	41.33720	9.14986	8.90
05/01/2020	41.33720	9.14986	8.99
06/01/2020	41.33720	9.14986	23.40
07/01/2020	41.33720	9.14986	20.80
08/01/2020	41.33720	9.14986	14.15
09/01/2020	41.33720	9.14986	16.85
10/01/2020	41.33720	9.14986	7.60

TABLE 2.7 : Extrait d'une sortie de simulations du portail DRIAS, année 2020, scénario RCP 8.5

La construction de l'indice tempête se base sur les données DRIAS qui sont des moyennes journalières et sont donc des valeurs relativement basses comme le montre la figure 2.12 qui illustre la répartition des vitesses de vent sur la France en 2020 avec le scénario RCP 8.5. La moyenne est à 9,80 km/h (représentée par le trait en rouge sur l'histogramme) et le maximum à 76 km/h. La grande majorité des vitesses se trouvent en dessous des 20 km/h, ce n'est pas étonnant étant donné que ce sont des moyennes journalières qui sont donc forcément inférieures aux moyennes sur 10 min fournies par SYNOP. Dans le calcul de l'indice, ce sont les quantiles à 80 %, 90 %, 95 % et 98 % sur les vitesses moyennes journalières DRIAS qui vont être observés. Il sera donc normal de constater des valeurs aux quantiles assez basses.

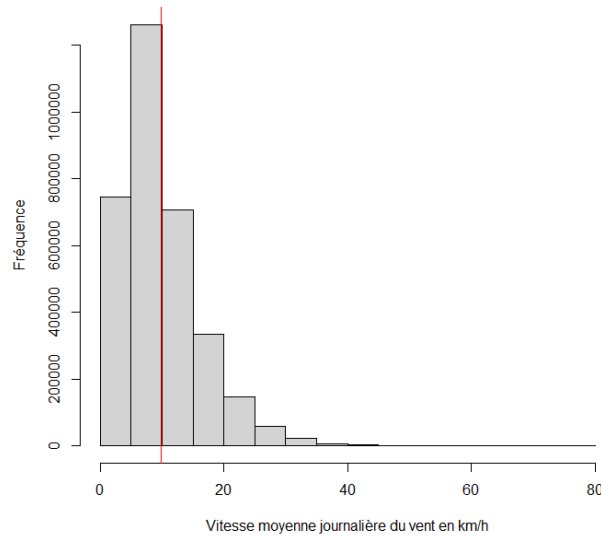


FIGURE 2.12 : Répartition des vitesses de vent DRIAS sur l'année 2020

Le fait de travailler sur des moyennes journalières implique un certain biais. En effet une tempête ne dure localement que quelques heures et même si elle est précédée par des vents violents (MÉTÉO FRANCE, 2021), la durée totale sur une journée risque de ne pas suffisamment augmenter la moyenne journalière dans les zones où le vent est habituellement très faible. L'indice tempête construit sur les moyennes journalières DRIAS risque donc de ne pas capter certains phénomènes tempétueux dans les régions où le vent est habituellement très faible. C'est pour pallier ce biais que le quantile sera calculé suivant différentes visions. Ainsi le fait de travailler en prenant les vitesses moyennes journalières extrêmes au niveau local (niveau d'un point DRIAS) permettra de capter des événements tempétueux qui n'apparaîtraient pas forcément en travaillant avec un quantile calculé à l'échelle nationale.

### 2.3.4 Calcul de l'indice : vision nationale

Dans cette partie, l'objectif est d'avoir une vision à l'échelle nationale, c'est-à-dire de comparer toutes les vitesses moyennes journalières de vent obtenues sur l'année 2020 en chacun des points DRIAS à une vitesse à un certain quantile calculée sur les données historiques nationales. Ainsi toutes les vitesses de vent sont comparées à la même valeur ce qui permet de comparer tous les points géographiques les uns avec les autres. Il est ainsi possible d'identifier les zones qui dépassent le plus le quantile national, et qui sont donc plus extrêmes en terme de vulnérabilité au risque tempête.

#### Calcul du quantile sur l'historique

Le choix arbitraire est fait de se baser sur des quantiles tirés de l'historique DRIAS afin de voir l'évolution de l'indice en fonction de ces valeurs passées. Lors des projections, se baser sur les quantiles de l'année de projection en question permettrait de mettre en avant les événements extrêmes par rapport aux autres événements de l'année mais ne permettrait pas de faire ressortir l'évolution de l'intensité de ces événements par rapport à l'historique. Cette étude ayant comme objectif de donner



des pistes quant à l'évolution du risque tempête, il est plus pertinent de garder ce point d'attache comparatif avec l'historique. Par conséquent, lors de toute l'étude, les calculs de quantiles se feront sur un historique de 5 ans précédant l'année de référence 2020.

Dans le cas de la vision globale, toutes les valeurs de vitesses de vent des 5 années de projections, ce qui représente un panel de 16 399 306 valeurs, sont mélangées pour analyser leur répartition et déterminer les quantiles à 80%, 90%, 95% et 98%. Les vitesses de vent sont réparties comme illustré par la figure 2.13.

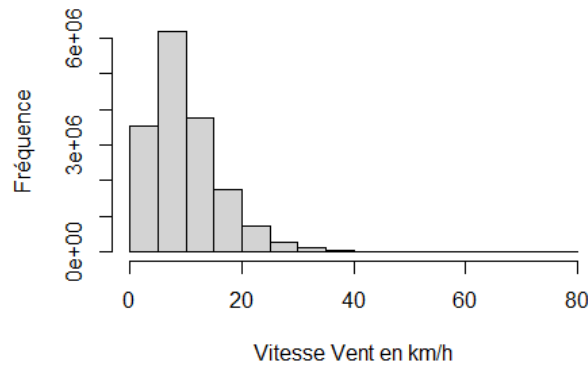


FIGURE 2.13 : Répartition des vitesses des rafales en 2020

On constate que la grande majorité des valeurs sont situées en-dessous des 20km/h. Pour rappel ce sont des moyennes journalières, il n'est donc pas étonnant que les valeurs soient relativement basses. Les différents quantiles sont les suivants :

- le quantile à 80% est de 14,33 km/h,
- le quantile à 90% est de 18,18 km/h,
- le quantile à 95% est de 21,88 km/h,
- le quantile à 98% est de 26,72 km/h.

Une fois les valeurs des différents quantiles calculées, on s'intéresse maintenant au paramètre  $\alpha$ .

### Étude du paramètre $\alpha$

La formule de l'indice a été fixée comme étant

$$I_p = \sum_{j=1}^{365} I_{p,j}.$$

Et l'indice journalier a été défini comme étant

$$I_{p,j} = [(v_{p,j} - v_q) \times \mathbb{1}_{\{v_{p,j} \geq v_q\}}]^\alpha \times \left(\frac{D_p}{10000} + 1\right)$$

L'introduction de la notion de pression exercée par le vent comme dans le modèle suédois présenté en section 2.2 permet de capter les dommages potentiels sur les habitations et infrastructures. Comme démontré dans le paragraphe 1.3, c'est la pression exercée par la force du vent qui est responsable des dommages aux biens immobiliers. Cette pression est proportionnelle au carré de la vitesse du vent. Par conséquent, le paramètre  $\alpha$  est fixé à 2. Nous testerons également à titre informatif les résultats obtenus pour  $\alpha = 1$  et  $\alpha = 3$ . Pour effectuer ces différents tests, le calcul de l'indice se base sur le quantile à 80 %. Le tableau 2.8 indique l'évolution d'indicateurs tels que la moyenne ou l'écart type en fonction du paramètre  $\alpha$  choisi et la figure 2.14 donne une représentation visuelle de l'impact de ce paramètre sur l'indice tempête.

Indicateur	$\alpha = 1$	$\alpha = 2$	$\alpha = 3$
Indice minimum	0	0	0
Indice maximum	3 197	61 985	1 518 392
Moyenne	380	3 781	53 036
Écart type	339	4 682	89 343

TABLE 2.8 : Différents indicateurs de l'indice tempête en fonction du paramètre  $\alpha$

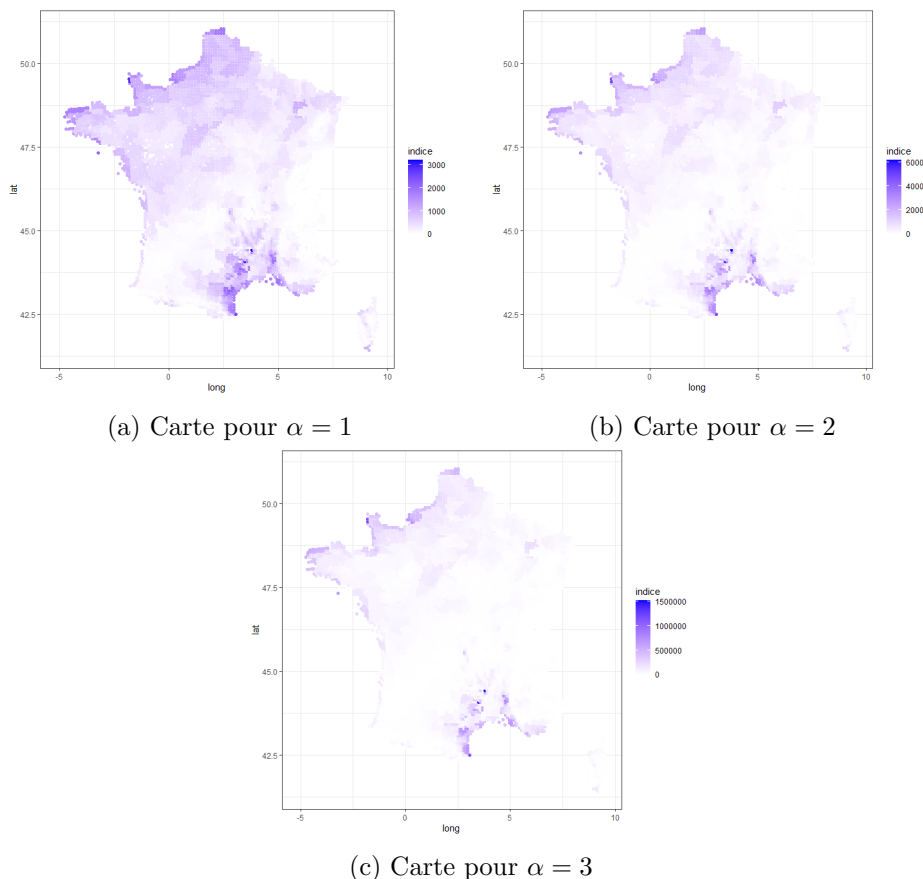


FIGURE 2.14 : Comparaison des résultats pour différentes valeurs de  $\alpha$

La valeur du paramètre  $\alpha$  n'induit pas de différences dans la hiérarchie des zones à risque. Plus sa valeur est élevée, plus les territoires proches du quantile ont tendance à s'effacer dans la représentation

cartographique. On constate également que plus le paramètre  $\alpha$  est élevé, plus les indicateurs (moyenne, écart type et maximum) augmentent. Ceci est dû au fait qu'augmenter la valeur du paramètre  $\alpha$  revient à augmenter le poids accordé à l'écart entre la vitesse moyenne journalière et la vitesse au quantile. Ainsi, plus cet écart a de poids, plus la valeur de l'indice tempête augmente. On remarque également les différences d'amplitude de l'indice ; amplitude qui s'accroît considérablement lorsque la valeur du paramètre  $\alpha$  augmente.

### Analyse des résultats obtenus pour différents quantiles

Après avoir étudié l'impact du paramètre  $\alpha$ , il faut maintenant étudier l'incidence du choix du quantile. La figure 2.15 et le tableau 2.9 illustrent les différents résultats obtenus.

Indicateur	80%	90%	95%	98%
Indice minimum	0	0	0	0
Indice maximum	61 985	40 894	26 407	14 013
Moyenne	3 781	1 705	762	251
Écart type	4 682	2 676	1 521	695

TABLE 2.9 : Différents indicateurs de l'indice tempête en fonction du quantile

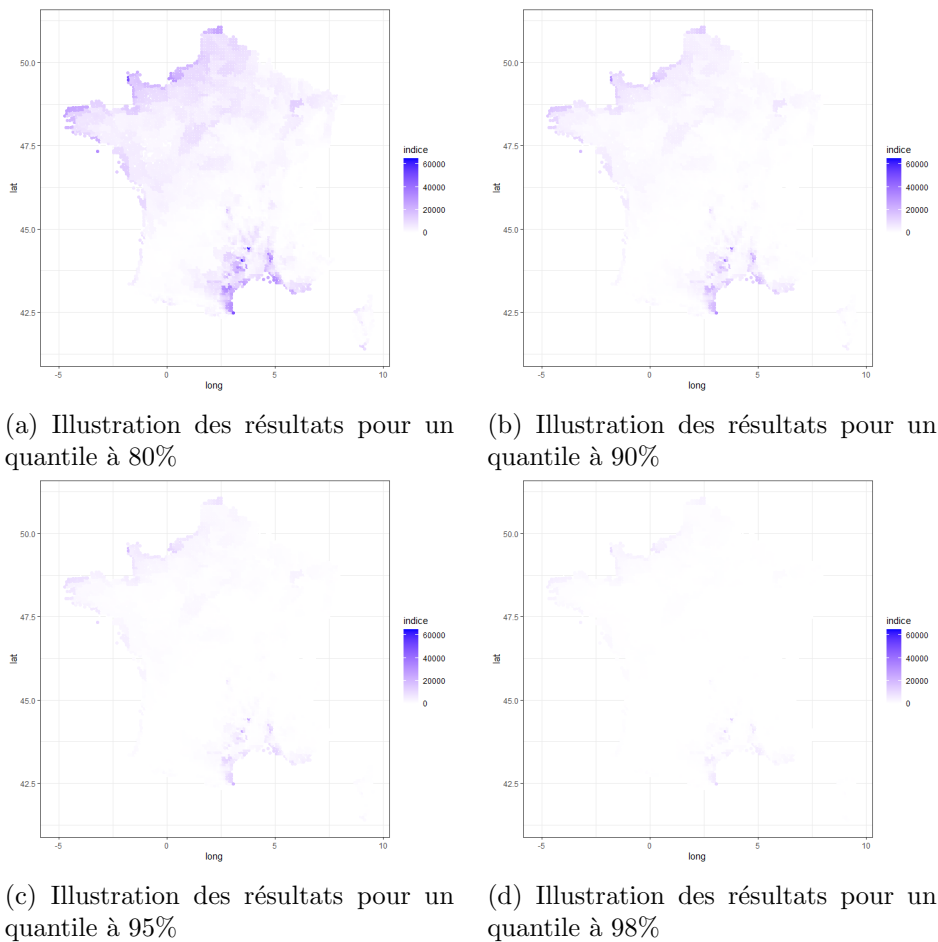


FIGURE 2.15 : Comparaison des résultats obtenus avec différents quantiles

Les valeurs de l'indice diminuent considérablement lorsque la valeur du quantile augmente. Ainsi, à échelles égales entre toutes les cartes, on constate qu'il est difficile de distinguer quoi que ce soit sur les cartes de quantiles élevés (à 95 % et à 98 %). Il est cependant intéressant de voir quelles sont les zones qui s'effacent lorsque le quantile augmente. En effet, on constate bien que les zones les plus à risque (les côtes bretonnes, les côtes du Nord de la France et le bassin méditerranéen) sont les dernières à disparaître ce qui montre la cohérence entre toutes les cartes. Pour ce qui est des indicateurs du tableau 2.9, plus le quantile est élevé, plus les valeurs baissent, ce qui est cohérent étant donné que les vitesses moyennes journalières sont filtrées à des valeurs de plus en plus élevées, diminuant ainsi l'écart avec le quantile et donc la valeur de l'indice tempête.

### 2.3.5 Calcul de l'indice : vision par zone de risque homogène

#### Le découpage de la France en zones de risque homogène

Cela a déjà été utilisé dans la thèse de A. MORNET (2015) et redémontré en détails dans le mémoire de N. BEDI (2018), il est possible de découper le territoire français métropolitain en zones de risque homogène en analysant le comportement du vent. Dans chacune de ces zones ont été identifiés des phénomènes similaires relatifs au vent. Partant du postulat que le vent se comporte de manière homogène dans chaque zone, c'est sur ce découpage que va se fonder le calcul des quantiles. Dans cette partie, nous allons nous baser sur le même historique de 5 ans que pour la vision nationale pour estimer la valeur des différents quantiles dans chacune des zones. Le découpage repris sera celui présenté dans le mémoire de N. BEDI (2018) comme illustré par la figure 2.16.

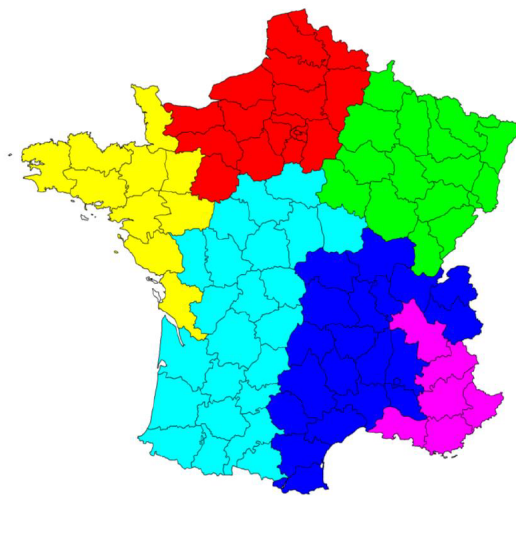
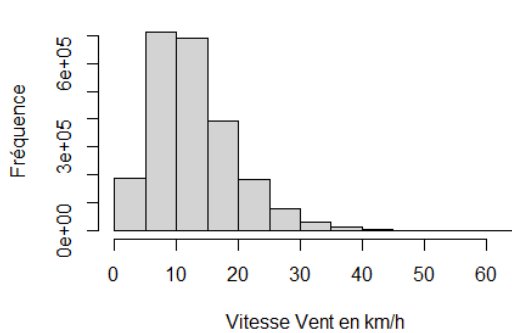


FIGURE 2.16 : Découpage en zones de risque homogène (N. BEDI, 2018)

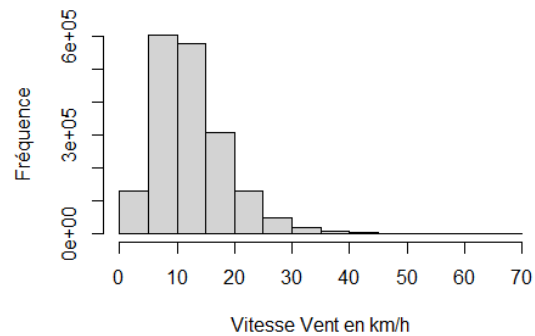
Les 6 zones peuvent être séparées en deux groupes : les zones jaune, violette et rouge sont les zones les plus sujettes au risque tempête, les zones bleu clair, bleu foncé et verte sont quant à elles moins exposées à ce risque. La zone jaune est celle qui connaît les rafales supérieures à 100km/h les plus fréquentes et les plus violentes. Il est possible, d'après les résultats de N. BEDI (2018) de faire la hiérarchie suivante en allant de la zone la plus exposée à celle qui l'est le moins :

- la zone jaune a une fréquence élevée de rafales dépassant les 100 km/h, certaines pouvant atteindre les 130 km/h,
- la zone violette a des rafales pouvant dépasser les 110 km/h,
- la zone rouge a des rafales qui atteignent les 110 km/h, avec une fréquence de rafales équivalente à celle de la zone violette,
- la zone bleu foncé a des rafales qui peuvent quelque fois dépasser les 100 km/h,
- la zone bleu clair a des rafales ne dépassant que très rarement les 100 km/h,
- la zone verte a des rafales qui ne dépassent jamais le seuil des 100 km/h.

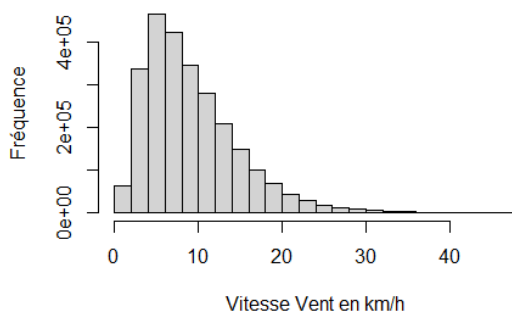
La figure 2.18 illustre la répartition des vitesses moyennes journalières de vent enregistrées sur les années 2015 à 2019 en fonction de la zone.



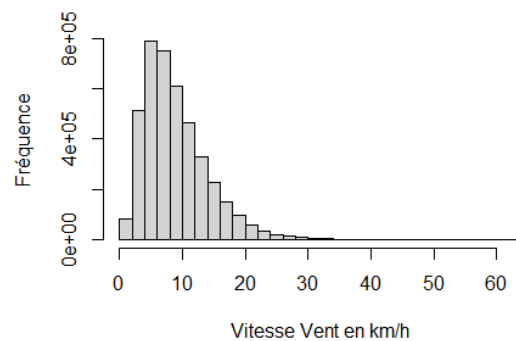
(a) Répartition des vitesses de vent de la zone rouge de 2015 à 2019



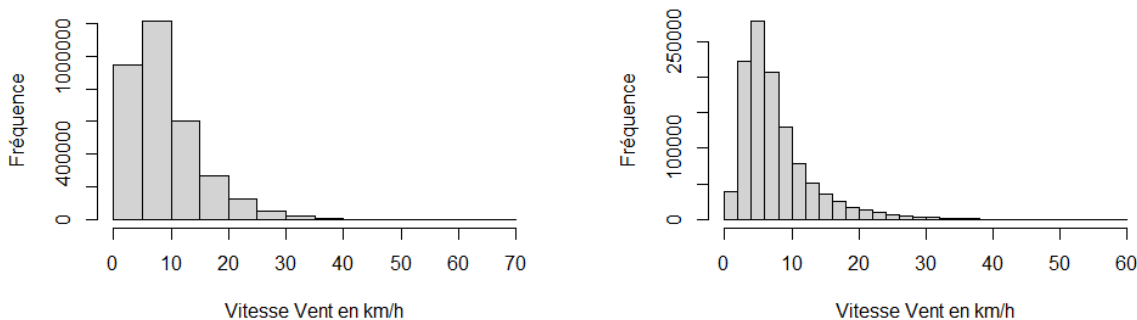
(b) Répartition des vitesses de vent de la zone jaune de 2015 à 2019



(c) Répartition des vitesses de vent de la zone verte de 2015 à 2019



(d) Répartition des vitesses de vent de la zone bleu clair de 2015 à 2019



(a) Répartition des vitesses de vent de la zone bleu foncé de 2015 à 2019      (b) Répartition des vitesses de vent de la zone violette de 2015 à 2019

FIGURE 2.18 : Répartition des vitesses de vent sur l'historique en fonction de la zone

Quelle que soit la zone, les vitesses moyennes journalières sont majoritairement réparties dans les valeurs basses (inférieures à 20km/h). La Zone 3, qui correspond au Nord Est de la France (en vert sur la figure 2.16), n'a aucune valeur au-dessus des 40km/h. Les zones 4 (en bleu clair) et 5 (en bleu foncé) ont la grande majorité de leurs valeurs en dessous des 20 km/h. Les zones 1 (en rouge), 2 (en jaune) et 6 (en violet), se distinguent car elles comptent un nombre de valeurs non négligeables au-dessus des 20 km/h. Ce sont les zones qui ressortent comme étant à risque dans l'analyse en vision nationale faite en section 2.3.4. Les répartitions des vitesses moyennes journalières de vent par zone semblent donc assez cohérentes, avec des valeurs plus élevées sur le bassin méditerranéen, le Nord de la France et la Bretagne.

### Calcul des quantiles

Le paragraphe 2.3.4 présente les résultats obtenus en calculant les différentes vitesses aux quantiles à l'échelle nationale, en confondant tous les points DRIAS. Dans ce paragraphe, on calcule les vitesses aux quantiles pour chaque zone distincte, et par conséquent l'écart sera calculé entre la vitesse moyenne journalière relevée en un point DRIAS et la vitesse au quantile de la zone correspondante. Les valeurs des différents quantiles calculés pour chaque zone en se basant sur les vitesses moyennes journalières historiques (de 2015 à 2019) sont exposées dans le tableau 2.10.

Zone	80%	90%	95%	98%
Zone 1 (Rouge)	17,67	21,66	25,42	29,94
Zone 2 (Jaune)	17,00	20,71	24,32	29,18
Zone 3 (Vert)	13,26	16,66	19,94	24,21
Zone 4 (Bleu Clair)	12,60	15,72	18,55	22,19
Zone 5 (Bleu Foncé)	13,13	17,33	21,28	26,18
Zone 6 (Violet)	10,69	14,69	18,98	24,80

TABLE 2.10 : Valeurs de la vitesse moyenne journalière à différents quantiles par zone de risque homogène

### Analyse des effets du paramètre $\alpha$

Le paramètre  $\alpha$  a été fixé à 2. Toutefois il est intéressant de regarder s'il n'y a pas d'effet notable en changeant ce paramètre sur le découpage par zone. Ainsi les valeurs 1 et 3 sont à nouveau testées afin de pouvoir comparer avec la valeur 2. Les résultats pour un quantile à 80 % sont illustrés par la figure 2.19 ainsi que par le tableau 2.11. L'analyse du paramètre  $\alpha$  est faite à chaque fois sur le quantile à 80 % car c'est celui qui permet de mieux observer les changements étant donné qu'il laisse passer plus de valeurs. Les autres quantiles n'illustrent pas assez clairement les différences induites par les différentes valeurs de  $\alpha$ .

Indicateur	$\alpha = 1$	$\alpha = 2$	$\alpha = 3$
Indice minimum	0	0	0
Indice maximum	3 508	70 027	1 755 789
Moyenne	376	3 675	50 556
Écart type	318	4 654	91 935

TABLE 2.11 : Différents indicateurs de l'indice tempête en fonction du paramètre  $\alpha$

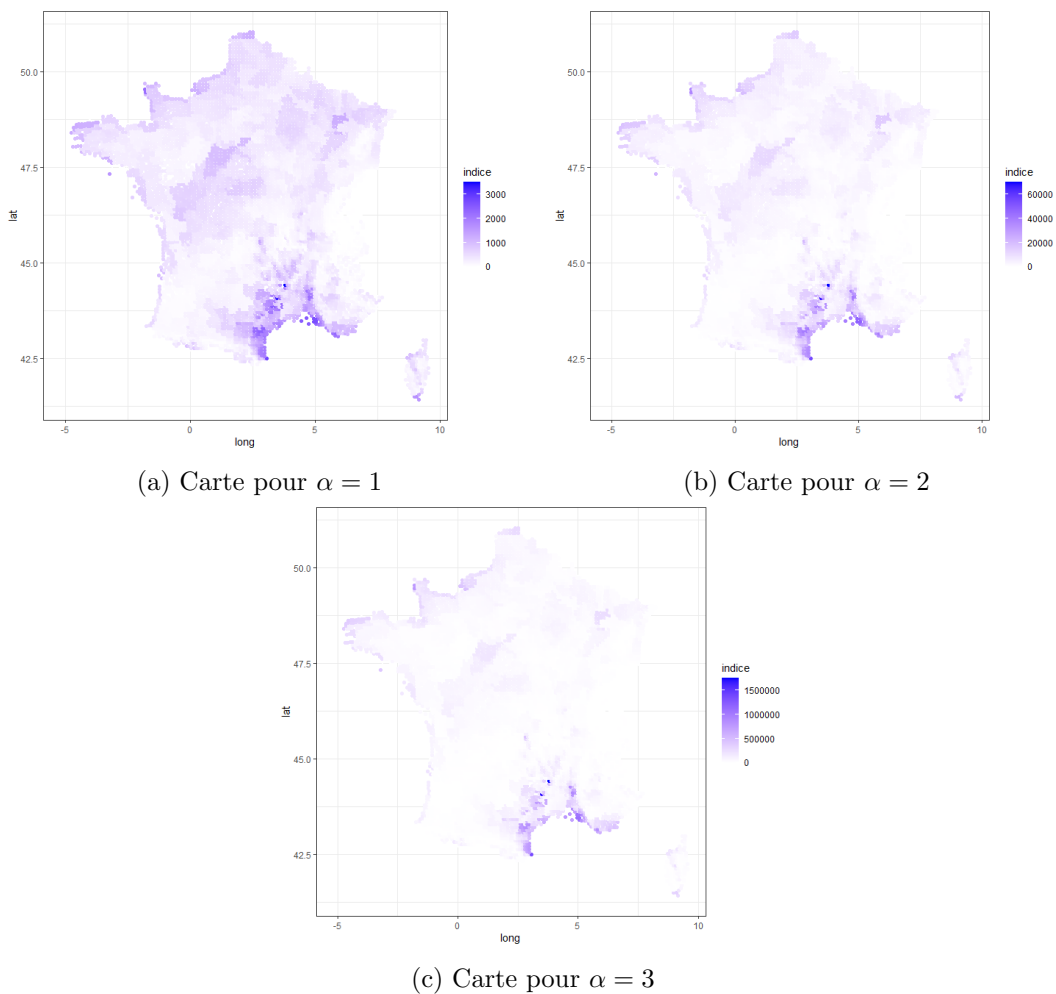


FIGURE 2.19 : Comparaison des résultats pour différentes valeurs de  $\alpha$

Le phénomène constaté sur les cartes est le même qu'en section 2.3.4, augmenter la valeur du  $\alpha$  donne beaucoup de poids à l'écart vitesse moyenne journalière / quantile, ce qui augmente considérablement la valeur de l'indice tempête pour les zones les plus exposées et par conséquent, graphiquement, l'amplitude de l'indice est telle que seules les zones pour lesquelles il est le plus haut ressortent. Pour ce qui est des indicateurs du tableau 2.11 ils sont très proches de ceux obtenus en section 2.3.4. La comparaison avec des quantiles liés à la zone de risque homogène ne semble pas apporter de résultats qui diffèrent d'une comparaison avec un quantile unique au niveau national.

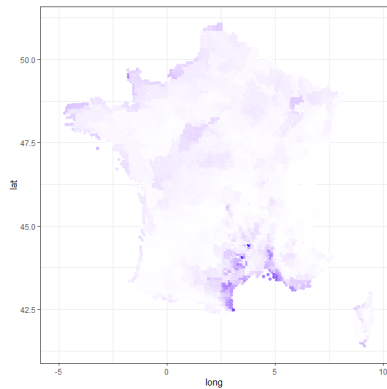
### Analyse des résultats obtenus pour les différents quantiles

Il faut maintenant calculer les valeurs des indices pour chacun des quantiles. La figure 2.20 et le tableau 2.12 permettent d'illustrer les différents résultats obtenus. Les indicateurs sont très proches de ceux obtenus en vision nationale (tableau 2.9). Les cartes illustrent le même phénomène d'effacement progressif, pour arrive à une carte où aucune zone à risque ne ressort (quantile à 98 %). On constate toutefois une allure légèrement différente de la carte illustrant les résultats pour un quantile à 80 % : à la différence de la vision nationale, cette fois-ci, l'intérieur des terres au Nord Ouest ne ressort plus autant.

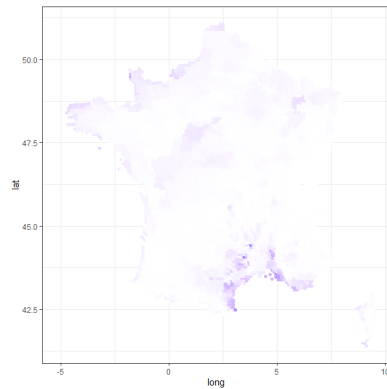
Indicateur	80%	90%	95%	98%
Indice minimum	0	0	0	0
Indice maximum	70 027	44 979	28 423	15 098
Moyenne	3 675	1 680	761	254
Écart type	4 654	2 676	1 498	669

TABLE 2.12 : Différents indicateurs de l'indice tempête en fonction du quantile

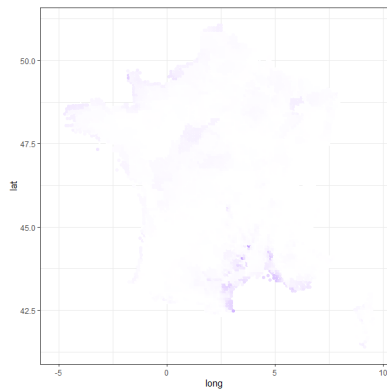




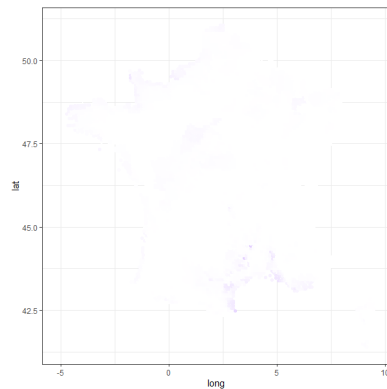
(a) Illustration des résultats pour un quantile à 80%



(b) Illustration des résultats pour un quantile à 90%



(c) Illustration des résultats pour un quantile à 95%



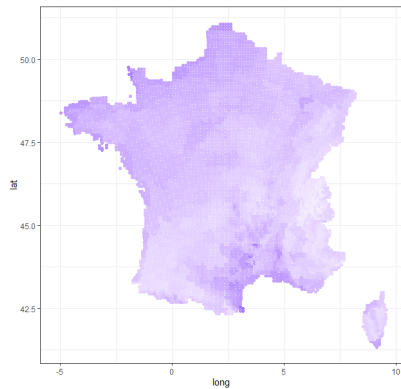
(d) Illustration des résultats pour un quantile à 98%

FIGURE 2.20 : Comparaison des résultats obtenus avec différents quantiles

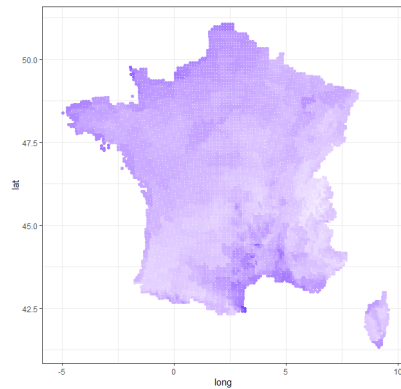
### 2.3.6 Calcul de l'indice : vision locale

#### Calcul des quantiles

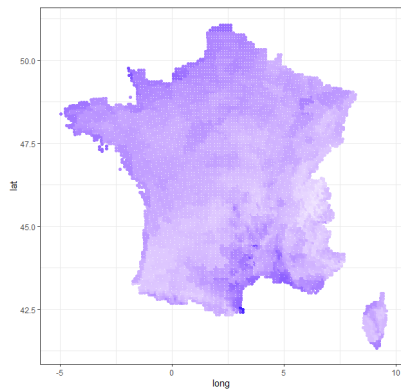
Il est maintenant intéressant d'affiner cette étude en faisant les calculs de quantiles à une maille encore plus fine que les zones de risque homogène. Cette fois, les quantiles sont calculés propres à chacun des 8 332 points DRIAS, toujours sur l'historique des moyennes journalières de 2015 à 2019. En faisant cela, il est possible de capturer des phénomènes très locaux d'anomalies du comportement des vents. La figure 2.21 montre la valeur des vitesses aux quantiles pour chacun des points DRIAS.



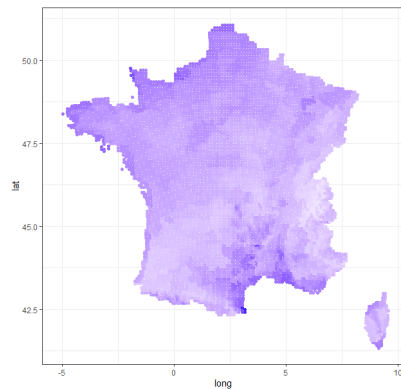
(a) Illustration des résultats pour un quantile à 80%



(b) Illustration des résultats pour un quantile à 90%



(c) Illustration des résultats pour un quantile à 95%



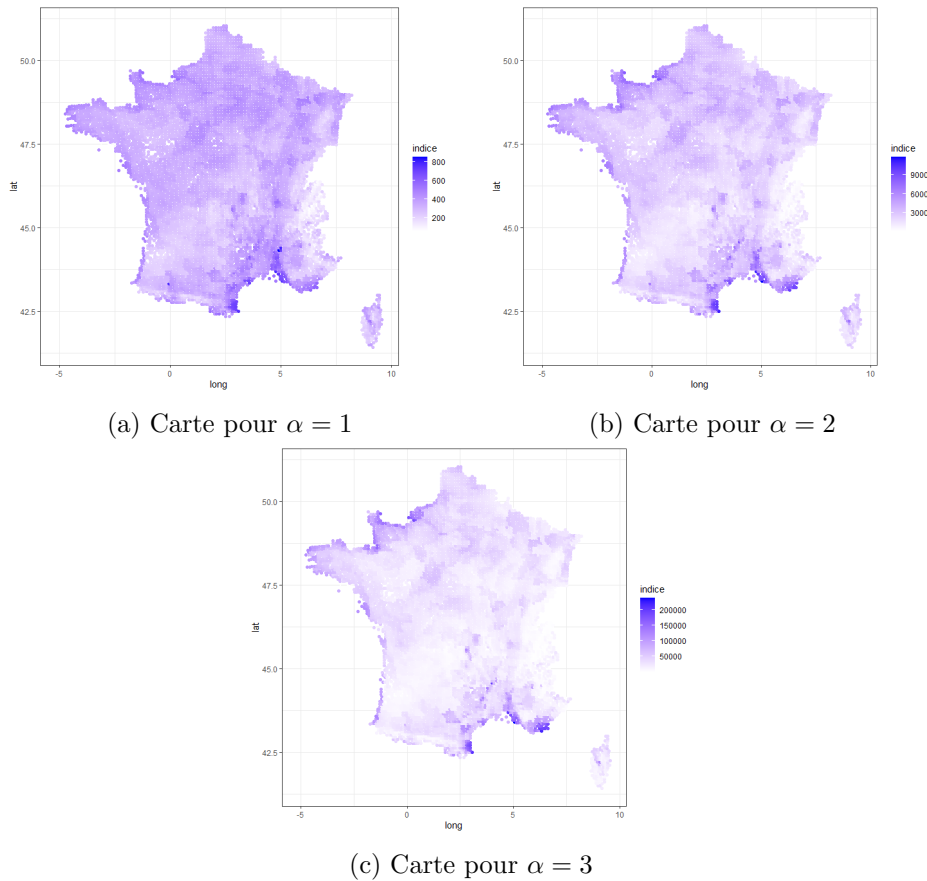
(d) Illustration des résultats pour un quantile à 98%

FIGURE 2.21 : Illustration des valeurs des vitesses aux quantiles

### Analyse des effets du paramètre $\alpha$

La figure 2.22 et le tableau 2.13 illustrent les effets du paramètre  $\alpha$  sur le calcul de l'indice en vision locale. Les cartes ont été faites pour un quantile à 80 %. Cette comparaison ne fait pas ressortir d'anomalies, les zones les plus à risque restent les mêmes quel que soit le  $\alpha$  (bassin méditerranéen, côtes Nord et Atlantique et Nord de la Corse). Ce paramètre influe uniquement sur la mise en avant, ou non, de phénomènes médians, dont la vitesse de vent dépasse celle du quantile sans toutefois être extrême. Ce phénomène est causé par un effet d'échelle, l'amplitude de l'indice étant augmentée lorsque le paramètre  $\alpha$  augmente lui aussi. Il est intéressant de noter que les indicateurs du tableau 2.13 sont cette fois-ci bien différents de ceux obtenus précédemment. Le minimum n'est plus nul, ce qui est normal étant donné que l'on compare la vitesse moyenne journalière locale au quantile obtenu en ce même point.

Indicateur	$\alpha = 1$	$\alpha = 2$	$\alpha = 3$
Indice minimum	60	156	521
Indice maximum	853	11 778	237 167
Moyenne	327	2 746	31 683
Écart type	78	1 248	23 234

TABLE 2.13 : Différents indicateurs de l'indice tempête en fonction du paramètre  $\alpha$ FIGURE 2.22 : Comparaison des résultats pour différentes valeurs de  $\alpha$ 

### Analyse des résultats obtenus pour les différents quantiles

On calcule maintenant les indices et on observe sur la figure 2.23 et grâce aux indicateurs du tableau 2.14 les comportements à l'échelle locale.

Indicateur	80%	90%	95%	98%
Indice minimum	156	58	9	0
Indice maximum	11 778	5 682	3 935	1 507
Moyenne	2 746	1 174	489	132
Écart type	1 248	555	276	112

TABLE 2.14 : Différents indicateurs de l'indice tempête en fonction du quantile

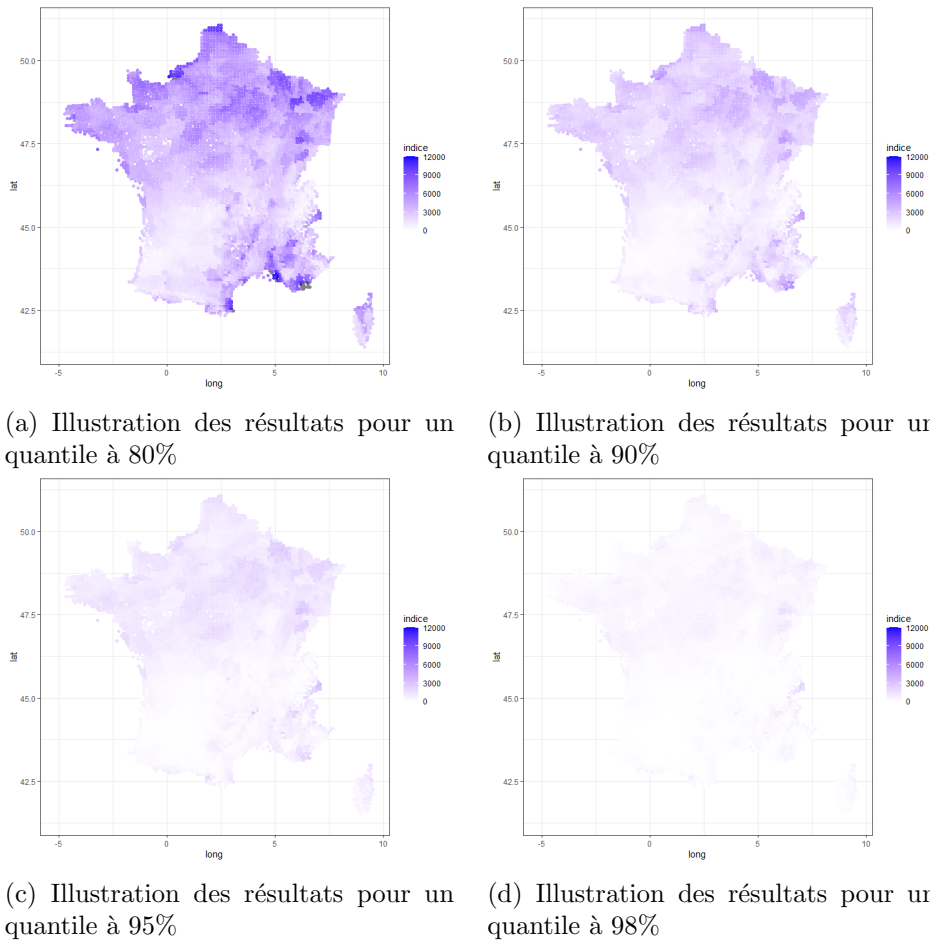


FIGURE 2.23 : Comparaison des résultats obtenus avec différents quantiles

On retrouve le phénomène d'atténuation de certaines zones lorsque l'on regarde des quantiles plus élevés. La zone qui semble la moins risquée se trouve dans le Sud Ouest et apparaît comme moins risqué dès le quantile à 80 %. Il est intéressant d'observer qu'en vision locale il y a une forte distinction entre le nord et le sud de la France, les zones au nord apparaissant comme risquées, et ce même par rapport au quantile à 95 %. Dans le tableau 2.14 on constate que le minimum redevient nul pour le quantile à 98 %, ce qui signifie qu'en certains points les vitesses moyennes journalières sont inférieures aux extrêmes qui ont pu être enregistrés par le passé en ces mêmes points.

### 2.3.7 Comparaison des différentes visions

Chaque vision présente des avantages et des inconvénients. Le fait de calculer une seule vitesse au quantile à l'échelle nationale permet de faire ressortir les zones du territoire les plus exposées au risque tempête. Cela permet de comparer chaque partie du territoire à une même valeur et de considérer que l'habitat résiste de manière homogène aux vents. Cependant une telle méthode perd les caractéristiques locales. Certaines zones, habituées au passage de vents violents se seront probablement adaptées en conséquence dans la façon de construire les habitations et autres infrastructures, tandis qu'une zone moins souvent exposée aura potentiellement des dégâts plus importants au passage d'une tempête, les constructions étant moins adaptées. C'est en cela que le calcul d'un quantile par zone de risque homogène apporte un niveau d'information supplémentaire. Ainsi, dans une zone habituée à des vents aux alentours des 10 km/h, des vents à 20 km/h paraîtront comme exceptionnels et feront monter la valeur de l'indice, alors que cet écart serait passé presque inaperçu dans une vision nationale. Le principal problème est la fiabilité des zones. Dans le dernier chapitre de ce mémoire, l'indice est projeté à court, moyen et long terme pour analyser son comportement dans différents scénarios du GIEC. Or, rien ne garantit que les zones de risque homogène telles que celles déterminées en 2018 par N. BEDI (2018) seront les mêmes en 2050 et en 2100. Le climat étant actuellement changeant, il est impossible d'attester aujourd'hui de l'intemporalité de ces zones. De plus, au vu des résultats, il ne semble pas y avoir de grande différence entre la vision nationale et la vision par zone de risque homogène, il vaut donc mieux privilégier la vision nationale. Enfin, pour ce qui est du calcul d'un quantile par point DRIAS, cela permet de faire apparaître tous les phénomènes locaux à une maille extrêmement fine et donc de ne laisser passer aucun phénomène tempétueux. De cette façon ressortent en chaque point les valeurs extrêmes de l'indice. C'est intéressant pour faire ressortir les phénomènes venteux inhabituellement élevés par rapport aux valeurs locales usuelles. Cependant, un point DRIAS ayant un quantile très bas aura un indice potentiellement élevé pour une vitesse de vent qui est, certes exceptionnelle en ce point, mais en fait assez basse. Le but étant de capter le phénomène tempétueux, il faut nécessairement que la vitesse au quantile soit suffisamment élevée pour que l'indice ne prenne en compte que les phénomènes extrêmes, pouvant donner lieu à des dommages. La figure 2.24 montre les différences entre les trois visions pour un quantile à 80 %. On voit bien que sur la carte en vision locale, des régions comme la Nouvelle Aquitaine ont un indice plus élevé qu'en vision nationale. On constate le même phénomène pour l'Est de la France. Ce sont des régions qui connaissent relativement peu de tempêtes et se retrouvent donc trop mises en avant par la vision locale. Les différences entre la vision nationale et la vision par zone ne sont quant à elles pas flagrantes. On constate que certaines zones au nord semblent avoir un indice plus faible en vision par zone, ce qui s'explique par le quantile particulièrement élevé de la zone correspondante (en rouge sur la figure 2.16).

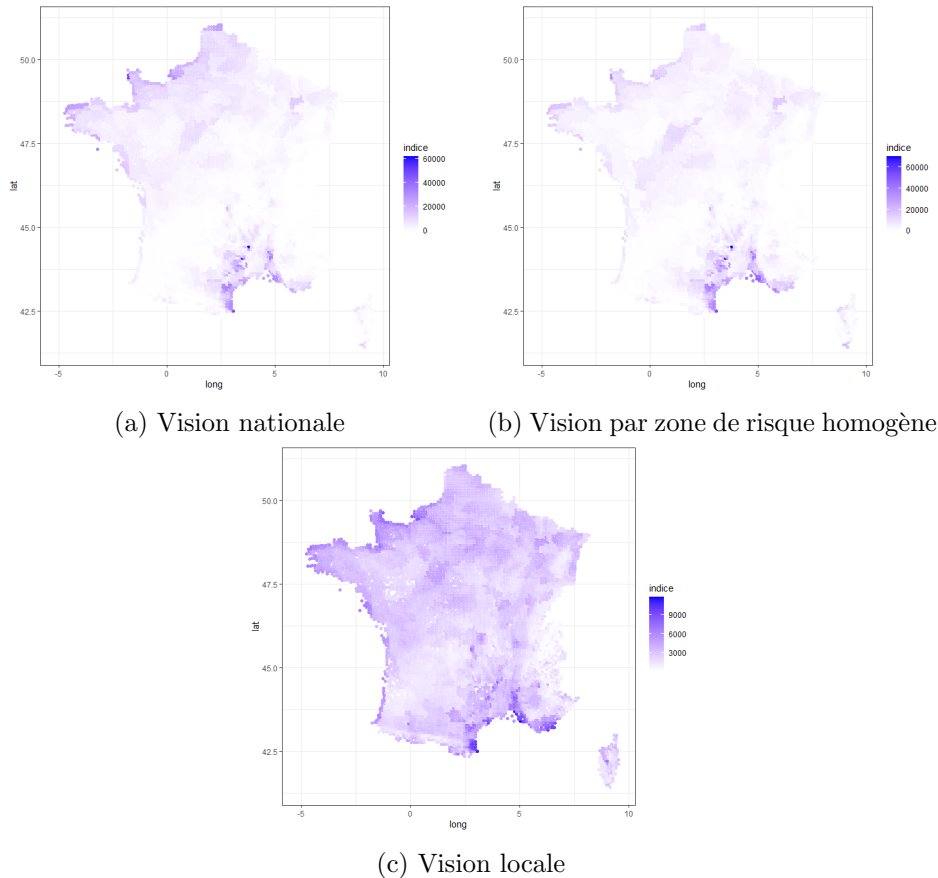


FIGURE 2.24 : Comparaison des résultats obtenus avec différentes visions pour un quantile à 80%

Pour conclure cette réflexion sur les différentes visions, elles sont toutes complémentaires et apportent chacune des informations différentes mais intéressantes. Dans le cadre de ce mémoire ayant pour objectif la conception d'un indice qui capte au mieux le risque tempête, la vision nationale semble la plus pertinente à conserver, notamment pour effectuer les projections. Ainsi, le quantile est fixé à un niveau national et devient une constante dans la formule, donc en le prenant suffisamment haut, seuls les événements les plus extrêmes sont captés. Il y aura une légère perte du niveau de détails et des différentes caractéristiques géographiques locales, mais l'indice permettra tout de même d'appréhender ce phénomène assez précisément. Afin d'avoir un indice tempête qui soit visuellement assez intéressant sur les cartes, le quantile est fixé à 80 %.

La formule de l'indice journalier devient donc

$$I_{p,j} = [(v_{p,j} - v_{80\%}) \times \mathbb{1}_{\{v_{p,j} \geq v_{80\%}\}}]^2 \times \left(\frac{D_p}{10000} + 1\right).$$

### 2.3.8 Comparaison avec d'autres cartes

#### Comparaison avec la carte obtenue pour l'année 2019

Il est intéressant d'étudier les résultats de l'indice tempête sur l'année 2019 afin de vérifier s'il y a une certaine stabilité dans le temps. La figure 2.25 et le tableau 2.15 permettent de faire la comparaison

entre les années 2019 et 2020.

Indicateur	2020	2019
Indice minimum	0	0
Indice maximum	61 985	66 014
Moyenne	3 781	4 311
Écart type	4 682	5 194

TABLE 2.15 : Différents indicateurs de l'indice tempête pour les années 2020 et 2019

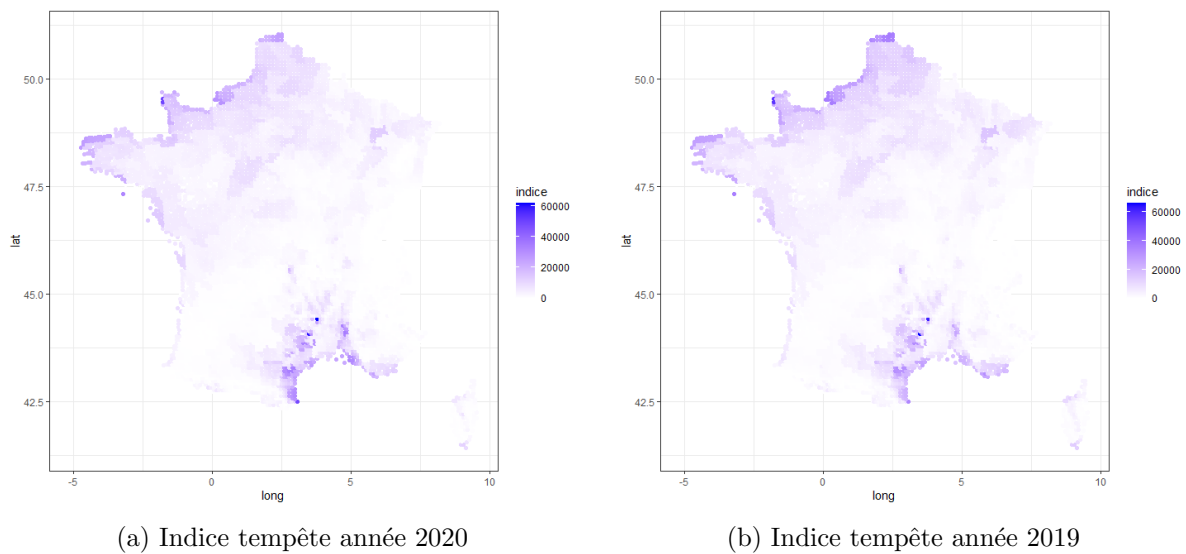


FIGURE 2.25 : Comparaison de l'indice tempête entre l'année 2020 et l'année 2019

Il n'y a pas d'évolution marquante entre l'année 2019 et l'année 2020. Du fait de cette stabilité temporelle, il semble possible de comparer la carte de l'indice tempête de 2020 avec les zoniers qui sont eux, plus anciens.

### Comparaison avec les zoniers de l'Eurocode 1 et de N. Bedi (2018)

Il est maintenant intéressant de comparer la carte obtenue pour l'indice avec les zoniers de D. CLAUD, 2014 et de N. BEDI, 2018 afin de vérifier qu'il n'y ait pas d'incohérence flagrante.

La figure 2.26 permet une comparaison entre la carte des indices pour l'année 2020 et le zonier établi dans le mémoire de N. BEDI (2018).

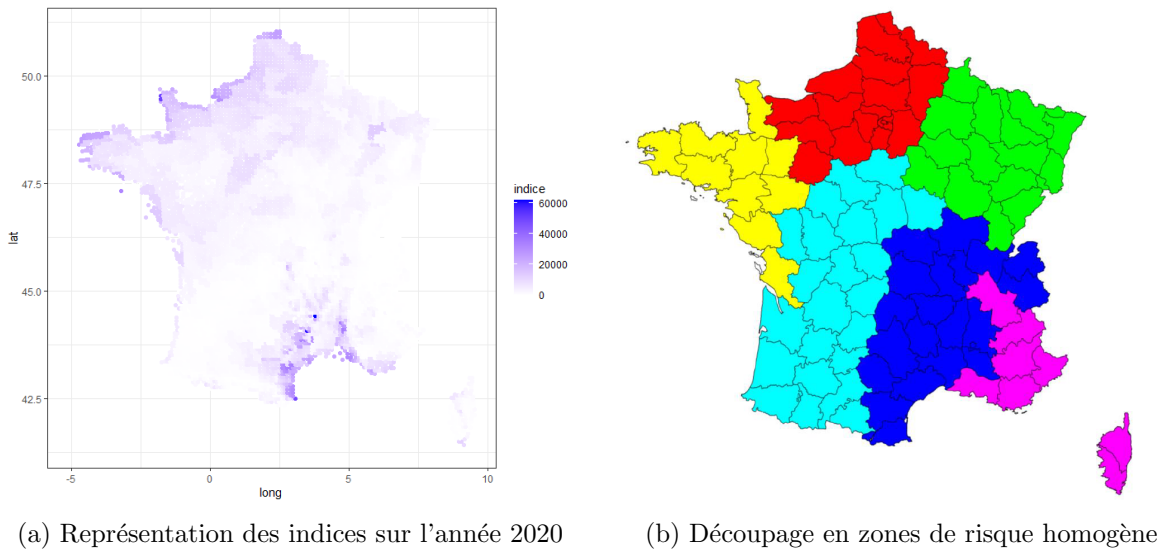


FIGURE 2.26 : Comparaison de la répartition géographique de l'indice avec le zonier établi par N. BEDI (2018)

Tout d'abord il faut noter que les deux cartes ne représentent pas la même chose. Le zonier a été construit en se basant sur les vitesses maximales (vitesse moyenne sur 10 min) enregistrées quotidiennement. Il regroupe ainsi les zones ayant un climat venteux similaire. La carte de l'indice tempête illustre les valeurs sur la France d'un indice dont l'objectif est de capter les phénomènes tempétueux extrêmes et les éventuels dommages qu'ils peuvent engendrer. Ainsi l'indice, en plus d'un paramètre météorologique, tient compte d'un paramètre d'exposition (la densité). La première différence majeure est que le zonier ne fait pas ressortir les côtes pourtant mises en avant par l'indice. Le zonier ne capte pas la décroissance du risque en entrant dans les terres. Décroissance qui se justifie par le ralentissement des tempêtes qui partent de l'océan et sont ensuite progressivement freinées par la surface terrestre comme cela a été expliqué en section 1.2.1. Il y a tout de même quelques similitudes. La zone rouge au nord de la France se retrouve comme étant une zone d'indices assez élevés tandis que la zone bleu clair qui couvre une partie du Sud-Ouest comprenant la région Nouvelle Aquitaine, et remonte jusqu'au centre, se retrouve comme une zone d'indices bas. Par contre, la distinction entre la zone en bleu foncé et celle en violet, sur le bassin méditerranéen, ne se retrouve pas sur la carte des indices. Pour conclure, les zones illustrées par le zonier comme étant le plus à risque (en jaune, violet et rouge) sont effectivement des zones où l'indice est élevé, excepté en ce qui concerne la Corse. Les zones les moins à risque dans le zonier (en bleu clair et en vert) sont également les zones où l'indice est le plus bas. La seule différence est pour l'Ouest du bassin méditerranéen qui ne ressort pas comme une zone à risque dans le zonier alors que les indices y sont du même ordre que sur l'Est du bassin.

On compare maintenant la carte indicielle avec le zonier de D. CLAUD (2014).



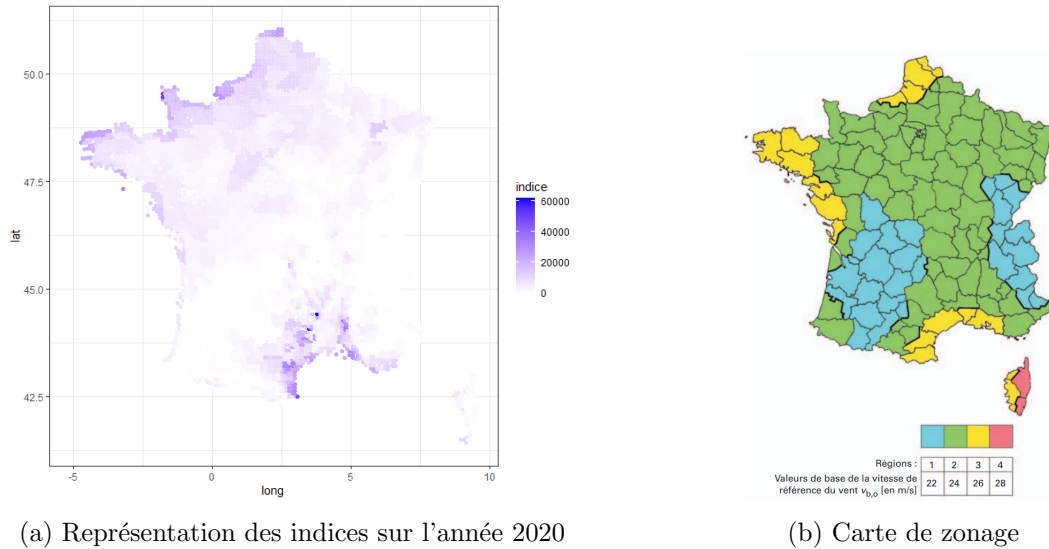


FIGURE 2.27 : Comparaison de la répartition géographique de l'indice avec le zonier de D. CLAVAUD (2014)

Cette fois-ci, le zonier de D. CLAVAUD (2014) fait bien ressortir les zones côtières à risque (Bretagne, bassin méditerranéen et les côtes les plus au Nord), ce qui est cohérent avec la carte indicielle sur laquelle les zones les plus foncées se trouvent bien sur les côtes. La distinction entre les zones verte et bleue du zonier ne se retrouve pas sur la carte des indices, et la zone verte est trop étendue au Nord alors que la carte des indices affiche une distinction entre la zone au Nord de l'Île de France et celle au Sud. Ces différences peuvent s'expliquer par la prise en compte de la densité de population dans la construction de l'indice, encore une fois le zonier n'a pas vocation à illustrer le même phénomène. Il faut également noter que cette carte date de 2014. Le GIEC a démontré que le réchauffement climatique remontait le *jet stream* vers le nord, ce qui modifie progressivement le climat de l'Europe de l'Ouest et de l'Amérique du Nord. Cela pourrait être une des raisons qui justifie que la carte indicielle faite pour l'année 2020 montre une plus forte exposition des côtes nord qu'une carte faite en 2014, même si sur un intervalle de 6 ans il est peu probable que le changement soit si conséquent. Il est difficile de comparer des zoniers qui n'ont pas vocation à faire état des événements tempétueux extrêmes aux résultats obtenus avec l'indice. Toutefois si certaines zones ne se retrouvent pas, d'autres peuvent se deviner de par la distinction entre les zones d'indices élevés et les zones d'indices bas.

Il peut maintenant être intéressant de comparer la carte indicielle avec une carte représentant les tempêtes historiques comme le fait la figure 2.28. Cette carte historique est construite à partir des données fournies par MÉTÉO FRANCE (2020b), qui a recensé toutes les tempêtes historiques depuis l'année 1940. Cette carte a simplement été construite en se basant sur le nombre de tempêtes qui a touché chaque département entre 1940 et 2020. Il faut noter que pour la constitution de son historique, Météo France n'a conservé que les tempêtes exceptionnelles de par leur violence. Seules les tempêtes les plus marquantes, par leur extrême violence, sont donc prises en compte dans la construction de la carte historique. Il faut également tenir compte du fait que le phénomène tempétueux n'est bien mesuré que depuis récemment, les données sont donc à étudier avec un certain recul et cette carte a pour seule vocation d'illustrer grossièrement les zones qui, par le passé, ont connu des tempêtes extrêmes. La notion même de "tempête extrême" reste assez abstraite, Météo France n'en donne pas la définition et ne partage pas les critères qui ont donné cette sélection. La liste de toutes ces tempêtes exceptionnelles est disponible en annexe A.2. De plus la maille utilisée pour la construction de la carte

historique est beaucoup moins fine que celle de l'indice, les délimitations des zones sont donc plus grossières et la distinction côtes/intérieur des terres n'apparaît pas.

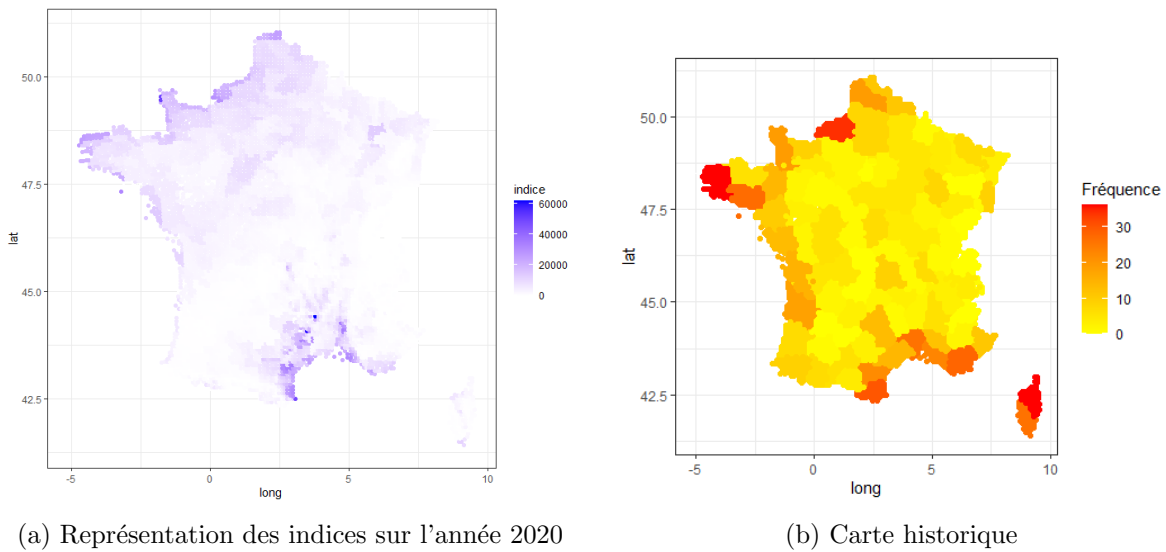


FIGURE 2.28 : Comparaison de la répartition géographique de l'indice avec la carte qui représente les départements en fonction du nombre de tempêtes exceptionnelles qu'ils ont connu entre 1940 et 2020

Certaines zones comme la pointe ouest de la Bretagne et le bassin méditerranéen font partie des localisations historiquement exposées aux phénomènes tempétueux qui ressortent également à travers les valeurs des indices en 2020. Plus généralement la côte Atlantique a connu un nombre de tempêtes assez important. Il n'y a pas d'incohérence flagrante entre les deux cartes même s'il est étonnant que la Corse n'apparaisse pas comme une zone d'indices élevés étant donné l'historique. Les autres zones ayant connu le plus de tempêtes par le passé se trouvent bien dans les zones exposées en 2020. Il y a donc une certaine continuité temporelle. La zone exposée au Nord de la France sur la carte indiciaire ne ressort pas particulièrement sur la carte historique. Les différences ne sont pas étonnantes sachant l'imprécision de la maille. De plus l'absence de connaissance des critères de Météo France pour la sélection de ces tempêtes historiques ne permet pas de savoir si la comparaison se fait sur une base équivalente.

Les résultats démontrés dans ce chapitre ne présentent pas d'incohérences qui pourraient remettre en cause le choix de la formule. Les zones que l'on s'attendait à retrouver comme étant à risque pour 2020 sont bien représentées par l'indice. Parmi ces zones, on retrouve notamment la Bretagne et le bassin méditerranéen (principalement le Var, les Alpes Maritimes et les Alpes de Haute Provence) qui ont été touchés par la tempête Alex au mois d'octobre 2020 (MÉTÉO FRANCE, 2020a). Maintenant qu'une formule a été établie, le chapitre suivant est dédié à l'analyse des projections à très court terme (1 et 2 ans) mais aussi à moyen et long terme (2050 et 2100). Le chapitre suivant aborde également l'étude de la distribution de l'indice.

## Chapitre 3

# Étude des projections et de la distribution de l'indice tempête

Le chapitre 2 a défini l'indice tempête par

$$I_p = \sum_{j=1}^{365} I_{p,j},$$

avec l'indice journalier

$$I_{p,j} = [(v_{p,j} - v_{80\%}) \times \mathbf{1}_{\{v_{p,j} \geq v_{80\%}\}}]^2 \times \left(\frac{D_p}{10000} + 1\right).$$

Dans ce chapitre, une fois le principe de l'assurance paramétrique exposé, la première partie consiste à observer les résultats des projections de l'indice tempête, en vision nationale, à court terme (2022 et 2023) mais aussi à des horizons plus lointains (2050 et 2100). Afin de projeter l'indice tempête annuel, on le calcule avec la même formule mais en utilisant les données prospectives des vitesses de vent fournies par DRIAS (2020a) pour l'année de projection observée (ce mécanisme de projection est illustré par la figure 3.1). Les différentes projections des vitesses de vent sont faites avec le modèle ALADIN63 suivant les scénarios RCP 2.6 et RCP 8.5. Ensuite, les modèles autres que le modèle ALADIN63 utilisé jusque là sont également mis en avant et des intervalles autour de la moyenne de l'indice sont construits afin de mettre en lumière le plus ou moins grand consensus des modélisateurs. Et enfin, la distribution de l'indice tempête est étudiée suivant deux visions différentes : par modèle et en agrégeant tous les modèles. Pour conclure ce chapitre, d'autres utilisations possibles de l'indice tempête sont brièvement abordées dans le dernier paragraphe.

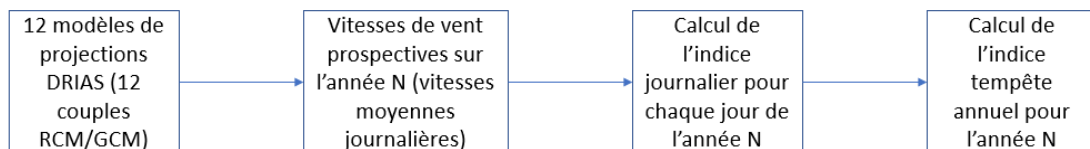


FIGURE 3.1 : Organigramme illustrant la projection de l'indice à l'année N pour un point p de la grille Safran

### Mise en place d'une assurance paramétrique

La section 1.1.4 donne une définition théorique de ce qu'est l'assurance paramétrique en décrivant son principe de fonctionnement. Dans ce paragraphe, un exemple de tarif dépendant de l'indice est illustré. Dans cet exemple, on s'inspire du travail de F. RITLENG ET C. NGUYEN (2014). On considère que l'indemnisation ne se déclenche que lorsque l'indice est supérieur à un certain seuil (A). Elle est ensuite croissante jusqu'à atteindre une valeur limite (C) pour un indice limite (B). Cette tarification est illustrée par le graphique 3.2.

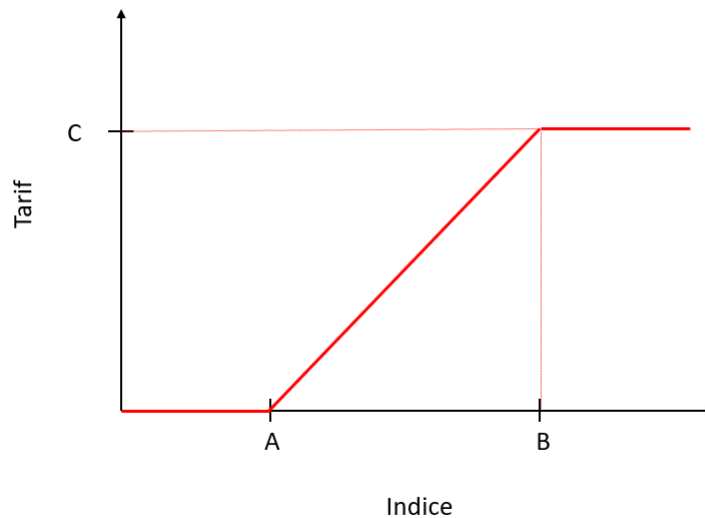


FIGURE 3.2 : Exemple d'évolution du tarif en fonction de la valeur de l'indice

Dans ce cas, si l'indice est supérieur à A, on considère être en présence d'un évènement dommageable qui nécessite une indemnisation. Si l'indice atteint la valeur B ou la dépasse, l'indemnisation reste à hauteur de C, limite fixée au préalable. Les limites A et B sont les quantiles à un certain niveau de la distribution de l'indice. Le plafond du tarif C est quant à lui fixé librement par l'assureur. Dans les cas où l'indice (I) est compris entre A et B, on définit le tarif à l'aide de la formule

$$\text{Tarif} = \frac{I-A}{B-A} \times C.$$

Les bornes A et B peuvent être fixées comme correspondant à certains quantiles d'une année de référence, soit une année de l'historique, soit une année dont les valeurs de vitesses de vent sont des projections. Libre aux assureurs de choisir ensuite le scénario et l'horizon de projection le plus adéquat pour fixer les bornes. Il semble cependant plus pertinent de se baser sur une année historique de référence (voire plusieurs). Par absence de données sur les coûts induits par les tempêtes, il n'est pas possible dans ce mémoire d'aller plus loin sur la tarification d'une assurance paramétrique pour le risque tempête. Il aurait cependant été intéressant de pouvoir relier une valeur d'indice à un coût, en se basant sur une base de données fournissant l'historique des tempêtes et de leur coût. Dans ce mémoire, la limite C restera donc une limite théorique à laquelle aucun chiffre concret ne sera associé.

Dans le cadre d'une assurance paramétrique pour le risque tempête, le dédommagement dépendrait

de l'indice journalier, défini au chapitre 2, qui serait sommé sur la durée de la tempête. On aurait ainsi un indice tempête défini par

$$I_p = \sum_{j=1}^N I_{p,j},$$

avec  $N$  la durée de la tempête en nombre de jours. Cette définition de l'indice tempête spécifique à la problématique du dédommagement n'est pas utilisée dans ce mémoire. En l'absence de base de coût, la tarification n'est pas approfondie, nous nous concentrons donc sur l'indice tempête annuel. Pour que les assureurs puissent estimer les dépenses à venir, il est nécessaire de pouvoir se projeter à très court terme (à horizon de l'année suivante voire celle d'après) en utilisant l'indice tempête annuel. Il est en effet important de savoir le montant total qui va être nécessaire pour l'année à venir en chacun des points de la grille Safran. Le paragraphe suivant présente les valeurs de l'indice tempête annuel de l'année 2021 mais également ceux projetés de l'année 2022 et 2023.

### 3.1 Les projections de l'indice

Les projections à court terme sont nécessaires pour la visibilité des assureurs paramétriques. Les contrats d'assurance dommages étant en général des contrats sur un an, un horizon de projection d'un ou deux ans est suffisant. Toutefois, dans le but d'avoir une idée de l'évolution du risque tempête, il est intéressant de s'intéresser aux projections de l'indice tempête à des horizons plus lointains. De plus, les projections sur le long terme permettent d'estimer si l'indice deviendra obsolète dans le futur ou s'il sera potentiellement toujours applicable.

#### 3.1.1 Projections à court terme

La figure 3.3 et le tableau 3.1 présentent l'évolution de l'indice tempête de l'année 2020 à l'année 2023. Les projections des années 2022 et 2023 sont faites selon les scénarios RCP 2.6 et RCP 8.5.

Indicateur	2020	2021	2022		2023	
			RCP 2.6	RCP 8.5	RCP 2.6	RCP 8.5
Indice minimum	0	0	0	0	0	0
Indice maximum	61 985	60 673	76 535	72 815	78 772	66 588
Moyenne	3 781	2 473	3 772	4 247	5 764	3 807
Écart type	4 682	4 033	5 077	5 364	6 581	4 844

TABLE 3.1 : Indicateurs de l'indice tempête : évolution de 2020 à 2023

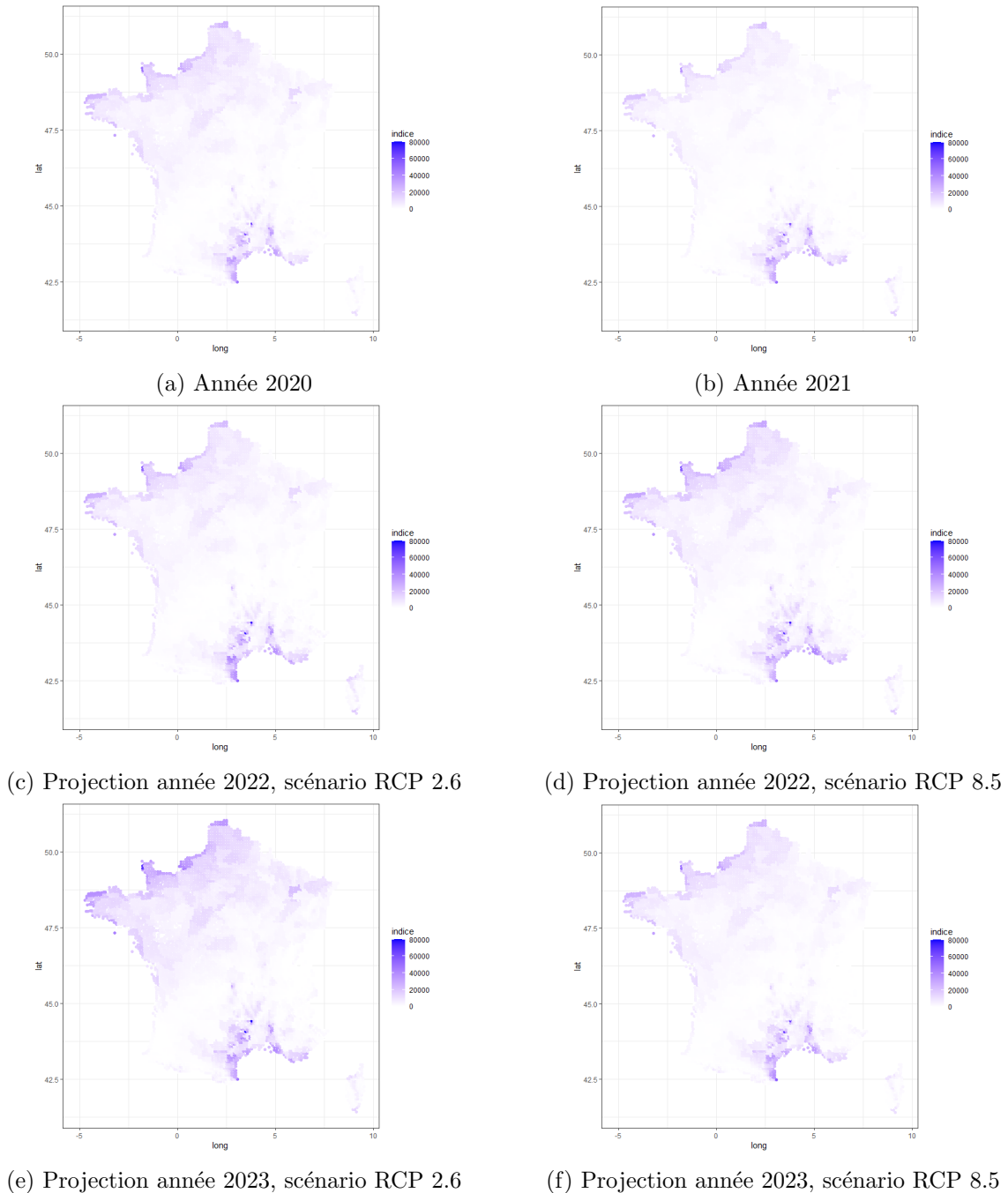


FIGURE 3.3 : Projection de l'indice à court terme

La tendance des indicateurs est à l'augmentation. Si l'année 2021 connaît des indices tempêtes plus bas que l'année 2020, ce n'est pas le cas des années 2022 et 2023. En 2022, l'indice tempête maximum est atteint pour le scénario RCP 2.6, mais la moyenne des indices du scénario RCP 8.5 demeure plus élevée. Il est intéressant de constater que la tendance évolutive n'est pas la même pour le scénario RCP 2.6 que pour le scénario RCP 8.5. Dans le premier cas, l'année 2023 connaît des indices plus élevés que l'année 2022, dans le deuxième cas, on constate le phénomène inverse. Pour ce qui est de l'analyse des cartes, le bassin méditerranéen, les côtes bretonnes et les côtes au Nord de la France sont toujours des zones à risque, quelque soit l'année de projection ou le scénario. Il n'y a pas de différence flagrante entre les projections du scénario RCP 2.6 et celles du scénario RCP 8.5. Ce que l'on constate

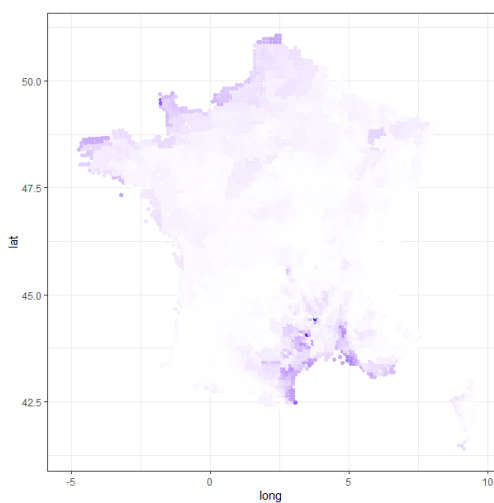
néanmoins, c'est que la zone à risque au Nord de la France est de plus en plus étendue au cours du temps, notamment dans le cas du scénario RCP 2.6.

### 3.1.2 Projections à moyen et long terme

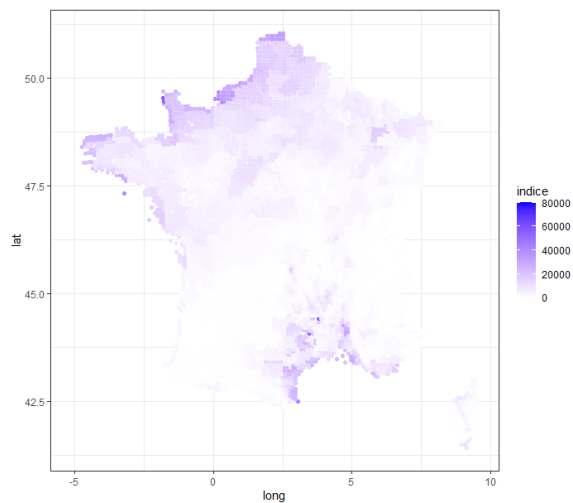
On regarde maintenant les projections à moyen (2050) et long (2100) termes afin d'estimer l'évolution de l'indice tempête et de savoir s'il deviendra obsolète ou s'il sera toujours utilisable dans un futur aussi lointain. De plus, une analyse sur des projections à de tels horizons permet d'avoir des pistes quant à l'évolution du risque tempête. Le tableau 3.2 et la figure 3.5 présentent les résultats obtenus pour ces projections à moyen et long terme.

Indicateur	2020	2050		2100	
		RCP 2.6	RCP 8.5	RCP 2.6	RCP 8.5
Indice minimum	0	0	0	0	0
Indice maximum	61 985	73 575	57 227	59 621	53 935
Moyenne	3 781	3 670	4 638	3 394	3 103
Écart type	4 682	5 098	5 403	4 554	3 929

TABLE 3.2 : Indicateurs de l'indice tempête : comparaison des années 2020, 2050 et 2100



(a) Année 2050, scénario RCP 2.6



(b) Année 2050, scénario RCP 8.5

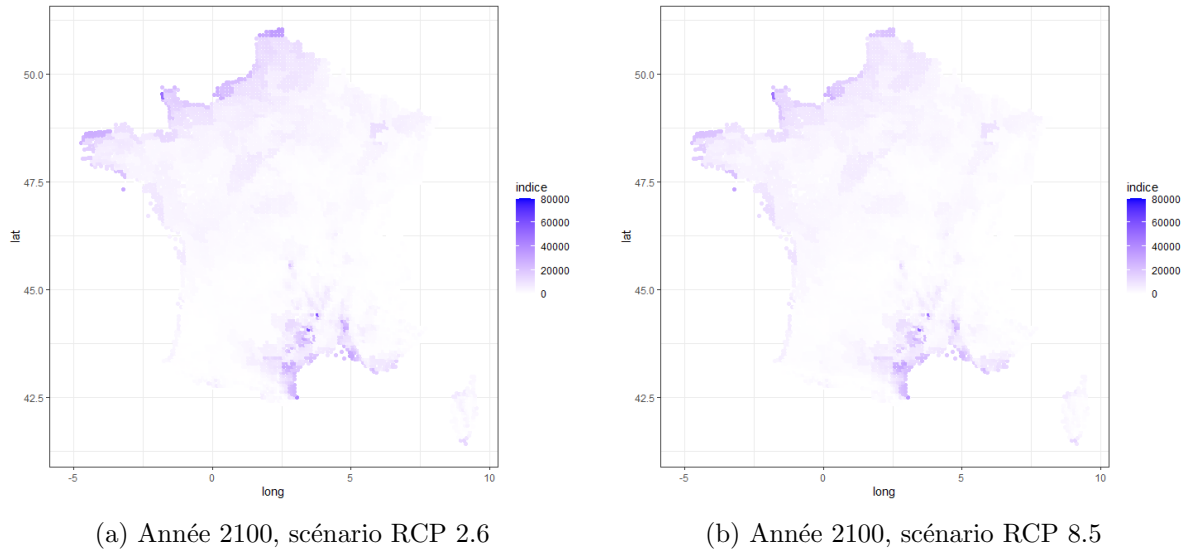


FIGURE 3.5 : Projection de l'indice tempête à horizon 2050 et 2100

Les différents indicateurs montrent que quel que soit l'horizon de projection ou le scénario choisi, les moyennes de l'indice tempête sur la France sont très proches. Il n'y a pas de grandes différences, c'est également ce qui ressort sur les cartes. On constate toutefois que l'indice tempête maximum est atteint en 2050 pour le scénario RCP 2.6 et qu'il est largement au-dessus des autres. Excepté cette différence, les maxima atteints sont tous du même ordre de grandeur. L'indice tempête semble donc utilisable, même à de tels horizons. Pour ce qui est du risque tempête, rien ne semble indiquer une amplification du phénomène ce qui rejoint l'analyse formulée par COVÉA (2022) qui avait mené une étude sur les mêmes données à horizon 2050.

## 3.2 Les différents modèles

### Le modèle français ALADIN63

Le modèle ALADIN63 est un modèle régional. Sur le portail DRIAS il est couplé avec le modèle global CNRM-CM5. Ce couple a été développé par Météo France en association avec le Centre National de Recherches Météorologiques. C'est sur ce couple qu'est basée la construction de l'indice au chapitre précédent.

### Les autres modèles disponibles

Douze couples de modèles globaux et régionaux sont disponibles sur le portail DRIAS (2020a). Ces 12 couples ont déjà été évoqués précédemment, ils sont cités dans le tableau 2.4. Sur le portail DRIAS (2020a) se trouvent des modèles régionaux développés par des institutions scientifiques présentes dans différents pays européens. En France, deux modèles ont été développés : le modèle ALADIN63 par Météo France, en partenariat avec le Centre National de Recherches Météorologiques, et le modèle WFR381P par l'institut Pierre et Simon Laplace. Parmi les autres pays européens à avoir fourni un modèle régional, on trouve :

- l'Allemagne avec les modèles REMO 2009 et REMO 2015 ;



- les Pays-Bas avec le modèle RACMO22E;
- la Suède avec le modèle RCA4;
- l'Italie avec le modèle RegCM4-6.

Tous ces modèles sont documentés par des fiches techniques fournies par DRIAS (2020). En plus des modèles régionaux développés par les différents États européens, il y a le modèle CCLM4-8-17 qui a été conçu par une union internationale de chercheurs nommée " *Climate Limited-area Modelling Community*" (DRIAS, 2020). Tous ces modèles régionaux, associés à différents modèles globaux, donnent douze couples différents et donc potentiellement douze trajectoires différentes. Tous les couples ne sont pas disponibles pour chacun des scénarios de projection RCP du GIEC, ni pour toutes les années de projection. Il y a donc pour cette étude :

- 12 trajectoires pour l'année 2020,
- 8 trajectoires pour une projection en 2050 du scénario RCP 2.6,
- 7 trajectoires pour une projection en 2100 du scénario RCP 2.6,
- 12 trajectoires pour une projection en 2050 du scénario RCP 8.5,
- 10 trajectoires pour une projection en 2100 du scénario RCP 8.5.

Les paragraphes qui suivent vont permettre d'étudier le comportement de l'indice à l'échelle nationale. La première partie permettra d'étudier la distribution de l'indice pour une année, un scénario de projection et un modèle donnés. Dans un second temps, c'est la distribution de l'indice tous modèles confondus qui sera analysée. Mais avant de s'intéresser aux distributions, le premier paragraphe va mettre en avant l'utilisation d'une méthode bootstrap, pour encadrer la moyenne et la variance des indices en chacun des points DRIAS répartis sur tout le territoire français afin de se faire une première idée du plus ou moins grand consensus des différents modèles de projections. Ce consensus est approché par l'analyse de la largeur des intervalles construits. Par souci de simplification, un numéro de modèle est attribué à chacun des douzes couples comme décrit dans le tableau 3.3.

Numéro de modèle	Couple GCM/RCM
Modèle 1	CNRM - CM5 / ALADIN63
Modèle 2	CNRM - CM5 / Racmo22E v2
Modèle 3	EC - EARTH / Racmo22E v2
Modèle 4	EC - EARTH / RCA4
Modèle 5	IPSL - CM5A - MR / RCA4
Modèle 6	IPSL - CM5A - MR / WRF381P
Modèle 7	HadGEM2 - ES / CCLM4 - 8 - 17
Modèle 8	HadGEM2 - ES / RegCM4 - 6
Modèle 9	MPI - ESM - LR / CCLM4 - 8 - 17
Modèle 10	MPI - ESM - LR / REMO 2009
Modèle 11	NorESM1 - M / REMO 2015
Modèle 12	NorESM1 - M / HIRHAM5 v3

TABLE 3.3 : Attribution d'un numéro de modèle à chaque couple GCM/RCM

### 3.3 Encadrement de l'indice moyen par une méthode bootstrap

Le but de ce paragraphe est de créer un intervalle pour encadrer l'indice moyen et ce, en chacun des points de la grille SAFRAN fournie par DRIAS. Ces intervalles, une fois constitués, permettent de statuer sur le niveau de consensus des différents modèles de projection. En effet, la largeur de ces intervalles permet de se faire une première opinion sur la présence ou non d'un consensus au niveau européen.

#### La méthode Bootstrap

C'est une méthode d'inférence statistique qui permet d'estimer la variabilité d'un estimateur  $\theta$ . La première étape consiste en la constitution de  $N$  échantillons de la même taille que l'échantillon initial. C'est l'étape du "ré-échantillonnage" où l'on tire  $n$  valeurs parmi les  $n$  observations (tirage avec remise).

Échantillon initial :  $Y = (Y_1, \dots, Y_n)$

Constitution des échantillons Bootstrap par ré-échantillonnage :

$$\begin{array}{ccc} (Y_1^{*(1)}, \dots, Y_n^{*(1)}) & \rightarrow & \hat{\theta}_n^{*(1)} \\ \dots & & \dots \\ (Y_1^{*(i)}, \dots, Y_n^{*(i)}) & \rightarrow & \hat{\theta}_n^{*(i)} \\ \dots & & \dots \\ (Y_1^{*(N)}, \dots, Y_n^{*(N)}) & \rightarrow & \hat{\theta}_n^{*(N)} \end{array}$$

En théorie  $N = n^n$ , en pratique  $N = 200$  à  $1000$ . La méthode Bootstrap permet ainsi d'approcher la loi de l'estimateur  $\theta$  :

$$\begin{aligned} \text{Loi } (\hat{\theta} - \theta) &\approx \text{Loi bootstrap } (\hat{\theta}^* - \hat{\theta}) \\ &\approx \text{Loi d'échantillonnage } (\hat{\theta}^{*1} - \hat{\theta}, \hat{\theta}^{*2} - \hat{\theta}, \dots, \hat{\theta}^{*N} - \hat{\theta}) \end{aligned}$$

La méthode Bootstrap présente de nombreux avantages parmi lesquels une mise en oeuvre aisée qui permet d'estimer la précision d'un estimateur de manière assez fiable.

#### Application au cas de l'indice

Dans le cas de l'indice tempête, la méthode bootstrap est appliquée sur l'indice journalier calculé tout au long de l'année 2020. Les indices tempête calculés à partir des différents modèles proposés par DRIAS (2020a) pour l'année 2020 sont analysés afin d'évaluer leur dispersion. Il y a 12 trajectoires différentes pour l'année 2020. Il y a donc 12 valeurs différentes de l'indice journalier pour chacun des 8 332 points DRIAS, soit 4 380 valeurs de l'indice tempête pour chacun des points sur une année. En application de la méthode Bootstrap, on effectue, pour chacun des 8 332 points, 1 000 tirages avec remise de 4 380 valeurs d'indice. Ainsi sont constitués 1000 échantillons Bootstrap de 4380 valeurs

pour chacun des points de la grille SAFRAN. Sur chacun de ces échantillons est calculée une moyenne. À cette étape il y a donc en chaque point DRIAS 1000 valeurs d'indice moyen. En récupérant la 25<sup>ème</sup> et la 975<sup>ème</sup> valeurs il est ainsi possible d'encadrer la moyenne avec un niveau de confiance de 95%.

Afin d'illustrer la largeur de ces intervalles, celle-ci est représentée sur la figure 3.6.

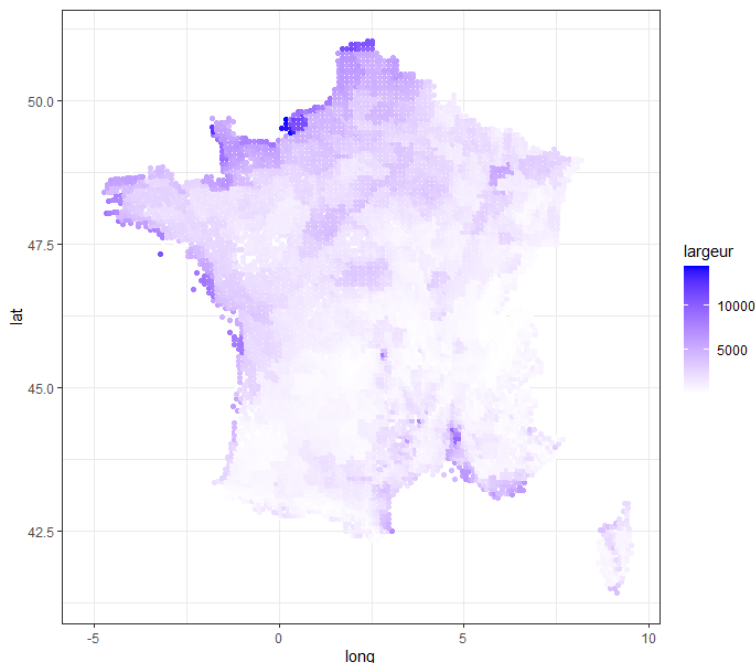


FIGURE 3.6 : Largeur des intervalles d'encadrement de la moyenne à l'échelle nationale pour l'année 2020

La moitié nord de la France est globalement plus sujette à l'incertitude que la moitié sud. On remarque que ce sont les zones les plus à risque pour lesquelles l'intervalle est le plus large. Les modélisateurs des différents pays sont donc d'accord en ce qui concerne les zones les moins à risque mais leurs avis divergent pour les zones les plus à risque.

### 3.4 Étude des distributions de l'indice pour un scénario et une année de projection donnés

Il est maintenant intéressant de voir à quel point le modèle influe sur l'indice tempête. Dans un premier temps, nous nous intéressons aux différents modèles et à leurs résultats pour l'année 2020. La répartition de l'indice tempête est analysée afin de trouver une loi qui la capte de façon adéquate. Ensuite, les résultats sont comparés avec ceux obtenus pour les années 2050 et 2100. Deux visions différentes sont abordées : une vision par modèle et une vision en agrégeant tous les modèles.

### 3.4.1 Analyse de la distribution de l'indice tempête pour l'année 2020 : vision par modèle

Le but est d'estimer la loi de distribution de l'indice pour chacun des 12 modèles disponibles pour l'année 2020. Afin d'effectuer une première analyse graphique, on représente à l'aide d'un histogramme la répartition de l'indice pour chacun des 12 modèles. La figure 3.7 montre la répartition des valeurs de l'indice sur le territoire français, c'est-à-dire la distribution de la charge sinistre en France, en 2020, obtenue pour le modèle français ALADIN63 (les histogrammes pour les autres modèles sont disponibles en annexe A.3). Cet histogramme illustre le fait que la grande majorité des indices sont compris dans un intervalle assez restreint (entre 0 et 10 000).

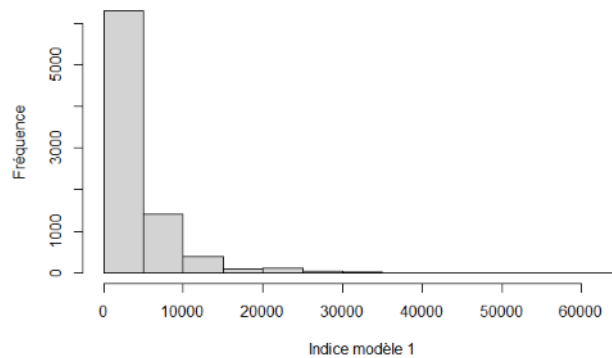


FIGURE 3.7 : Répartition de la charge sinistre en France calculée avec le modèle 1

Après une analyse visuelle, quatre lois pourraient correspondre : la loi de Weibull, la loi binomiale négative, la loi Gamma et la loi log-normale. La fonction "fitdist" du package "fitdistrplus" de R permet d'estimer les paramètres de chacune de ces lois, associés à l'échantillon des valeurs de l'indice tempête. Cette fonction a été appliquée avec la méthode "mme" (*moment matching estimation*). Cette méthode compare les moments théoriques et empiriques et cherche les paramètres les plus adéquats pour les égaliser. On peut ainsi superposer à l'histogramme les fonctions de densité des quatre lois pour pouvoir faire une première sélection graphique. Les résultats obtenus sont illustrés par la figure 3.8. On ne s'intéresse qu'aux valeurs de l'indice strictement positives, l'étude ayant pour objectif l'analyse du comportement de l'indice tempête dans les zones à risque (et donc dans les zones où l'indice est non nul).

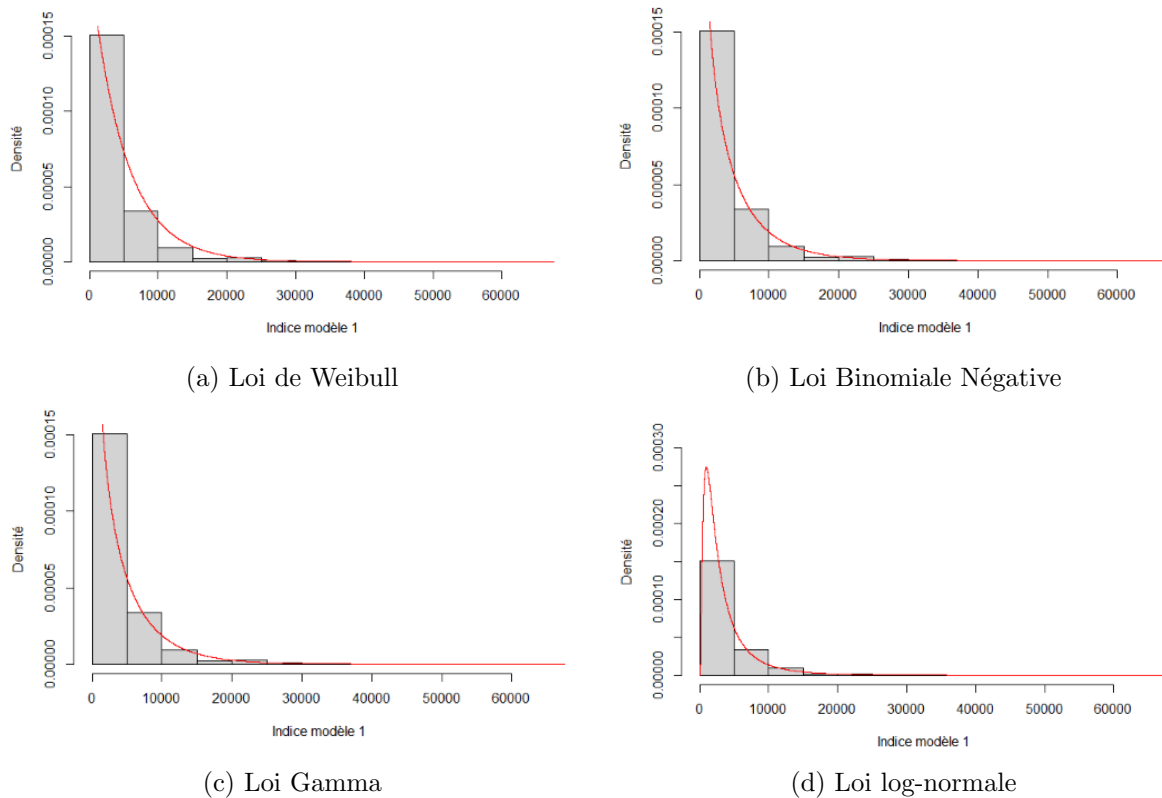


FIGURE 3.8 : Analyse graphique de l'adéquation des lois

Il est impossible de départager les différentes lois graphiquement, par conséquent il est nécessaire d'effectuer un test de Kolmogorov-Smirnov.

### Le test de Kolmogorov-Smirnov

Ce test est utilisé afin de déterminer l'adéquation entre une loi donnée et la loi suivie par un échantillon. Ce test estime la validité ou non de l'hypothèse  $H_0$  suivante : "La distribution de l'échantillon ne correspond pas à la distribution de la loi choisie". Ce test se base sur le calcul de la distance entre la courbe de distribution des points de l'échantillon et la courbe de distribution de la loi : c'est la distance de Kolmogorov-Smirnov  $D_{KS}$ . Cette distance est ensuite comparée à une distance théorique  $D_\alpha$  donnée par la table de Kolmogorov-Smirnov.

- Si  $D_{KS} < D_\alpha$  et donc si  $p.value < \alpha$  alors on rejette  $H_0$ , ce qui signifie que la loi de l'échantillon correspond à la loi choisie.
- Si  $D_{KS} > D_\alpha$  et donc si  $p.value > \alpha$  alors on ne peut pas rejeter  $H_0$ , ce qui signifie que l'on ne peut pas affirmer que la loi choisie est en adéquation avec l'échantillon.

L'erreur  $\alpha$  est généralement de 5%. Les résultats du test sont les suivants :

- loi Gamma :  $D = 0,0995$  et  $p.value < 2.2e^{-16}$ ,
- loi négative binomiale :  $D = 0,0469$  et  $p.value < 2.42e^{-8}$ ,

- loi de Weibull :  $D = 0,1316$  et  $p.value < 2.2e^{-16}$ ,
- loi log normale :  $D = 0,1402$  et  $p.value < 2.2e^{-16}$ .

Dans les quatre cas, la p.value est largement inférieure à 5%, on peut donc rejeter  $H_0$  et ainsi admettre que les quatre lois correspondent. Dans la suite, seule la loi Gamma est étudiée. C'est un choix arbitraire, les trois autres lois correspondant aussi très bien à la distribution de l'indice tempête.

### La loi Gamma

La loi Gamma est une loi applicable uniquement pour des variables positives. Elle est caractérisée par deux paramètres : le paramètre de forme ( $\nu$ ) et le paramètre d'échelle ( $\lambda$ ). Cette loi est utilisée pour décrire des phénomènes tels que la survie. La loi Gamma est caractérisée par la fonction de densité suivante :

$$f_X : t \mapsto \begin{cases} \frac{1}{\Gamma(\nu)} \frac{t^{\nu-1}}{\lambda^\nu} e^{-\frac{t}{\lambda}} & \text{si } t > 0, \\ 0 & \text{sinon,} \end{cases}$$

avec  $\Gamma(\nu) = \int_0^\infty t^{\nu-1} e^{-t} dt$ , la fonction Gamma d'Euler.

Toujours avec la fonction "fitdist", on estime les paramètres de la loi Gamma associés à chacun des 12 modèles comme exposé dans le tableau 3.4. Les deux paramètres à estimer sont la forme ("*shape*") dans le tableau 3.4) et le paramètre d'échelle (l'inverse du paramètre "*rate*" dans le tableau 3.4).

	Shape	Rate (10e-3)
<b>Modèle 1</b>	0,51	0,10
<b>Modèle 2</b>	0,53	0,11
<b>Modèle 3</b>	0,71	0,16
<b>Modèle 4</b>	0,71	0,16
<b>Modèle 5</b>	0,55	0,16
<b>Modèle 6</b>	0,54	0,14
<b>Modèle 7</b>	0,89	0,13
<b>Modèle 8</b>	0,83	0,13
<b>Modèle 9</b>	0,90	0,16
<b>Modèle 10</b>	0,81	0,14
<b>Modèle 11</b>	0,74	0,18
<b>Modèle 12</b>	0,66	0,17

TABLE 3.4 : Paramètres de la loi Gamma en fonction du modèle pour l'année 2020

Ce qui donne les courbes de densité représentées par la figure 3.9.

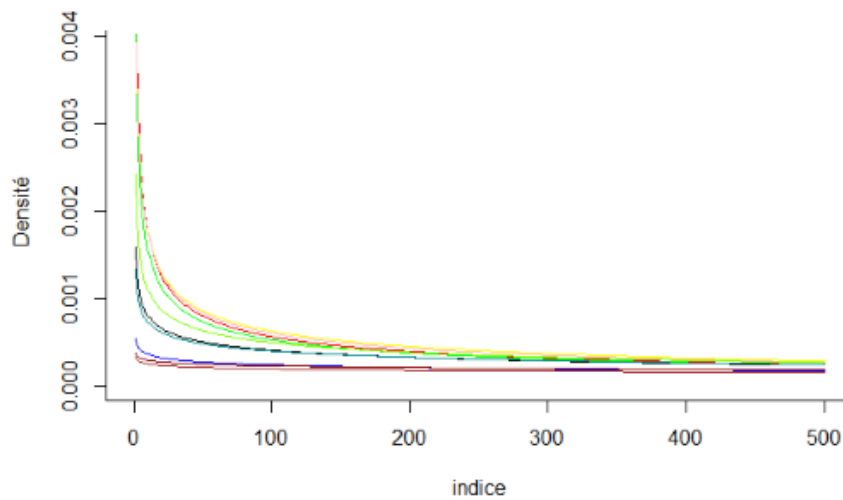


FIGURE 3.9 : Courbes de densité de la loi Gamma associées aux différents modèles pour l'année 2020

On remarque que plus le paramètre *rate* est proche de 0, plus la pente initiale est abrupte mais il est difficile de tirer des conclusions de ce graphique, les courbes étant assez similaires et couvrant un panel de valeurs assez restreint. On remarque d'ailleurs également que les paramètres du tableau 3.4 sont assez proches quel que soit le modèle. Trois modèles ressortent toutefois de part leur paramètre *shape* assez élevé :

- le modèle 8 : courbe bleu foncé,
- le modèle 7 : courbe marron,
- le modèle 9 : courbe rouge foncé.

Ainsi plus le paramètre *shape* est élevé, plus la courbe est basse et plate. On vérifie maintenant l'adéquation de la loi Gamma avec les 12 modèles en appliquant le test de Kolmogorov-Smirnov. On obtient les résultats suivants :

- modèle 1 :  $D = 0,0995$  et  $p.value < 2.2e^{-16}$ ,
- modèle 2 :  $D = 0,1705$  et  $p.value < 2.2e^{-16}$ ,
- modèle 3 :  $D = 0,1244$  et  $p.value < 2.2e^{-16}$ ,
- modèle 4 :  $D = 0,1294$  et  $p.value < 2.2e^{-16}$ ,
- modèle 5 :  $D = 0,1127$  et  $p.value < 2.2e^{-16}$ ,
- modèle 6 :  $D = 0,0869$  et  $p.value < 2.2e^{-16}$ ,
- modèle 7 :  $D = 0,1058$  et  $p.value < 2.2e^{-16}$ ,
- modèle 8 :  $D = 0,1206$  et  $p.value < 2.2e^{-16}$ ,
- modèle 9 :  $D = 0,1907$  et  $p.value < 2.2e^{-16}$ ,
- modèle 10 :  $D = 0,2017$  et  $p.value < 2.2e^{-16}$ ,

- modèle 11 :  $D = 0,0909$  et  $p.value < 2.2e^{-16}$ ,
- modèle 12 :  $D = 0,1283$  et  $p.value < 2.2e^{-16}$ .

On constate que les  $p.value$  sont toujours largement inférieures à 5 %, on peut bien rejeter  $H_0$  et estimer que la loi Gamma est adaptée à notre échantillon quel que soit le modèle. On remarque que la distance  $D$  est assez variable d'un modèle à l'autre. Le modèle 6 se voit attribuer le  $D$  le plus petit, et le modèle 10 celui le plus élevé, l'écart entre ces deux valeurs extrêmes est de 0,1148 ce qui n'est pas négligeable à l'échelle de ce paramètre.

### Le graphique Quantile-Quantile

Les graphiques Quantile-Quantile, aussi appelés "QQ-Plots", sont des graphiques qui permettent d'estimer l'adéquation d'une loi avec un échantillon de données. Plus les points sont alignés selon une droite de pente 1, plus il est possible d'affirmer l'adéquation de la loi théorique avec la loi de l'échantillon.

Dans le cas du modèle français ALADIN63 (modèle 1), on obtient la figure 3.10 (les autres QQ-Plots sont disponibles en annexe A.3).

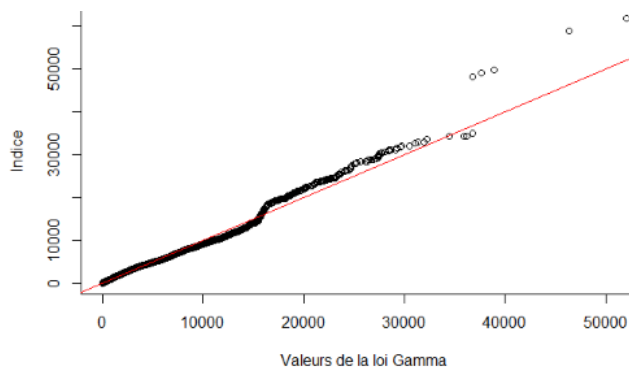


FIGURE 3.10 : Graphique Quantile-Quantile, modèle 1, année 2020

La loi Gamma est plutôt bien adaptée aux données, cependant on constate qu'elle sous-estime légèrement les valeurs extrêmes. La loi Gamma fait partie de la famille des lois à queues légères, ce qui signifie qu'elle a une croissance assez régulière. Il est maintenant intéressant de voir si les valeurs extrêmes ne tendraient pas vers une loi de Pareto généralisée qui a tendance à croître assez fortement. On regarde l'évolution des densités lorsque l'on ne conserve que les valeurs au-dessus de certains seuils sur la figure 3.11.



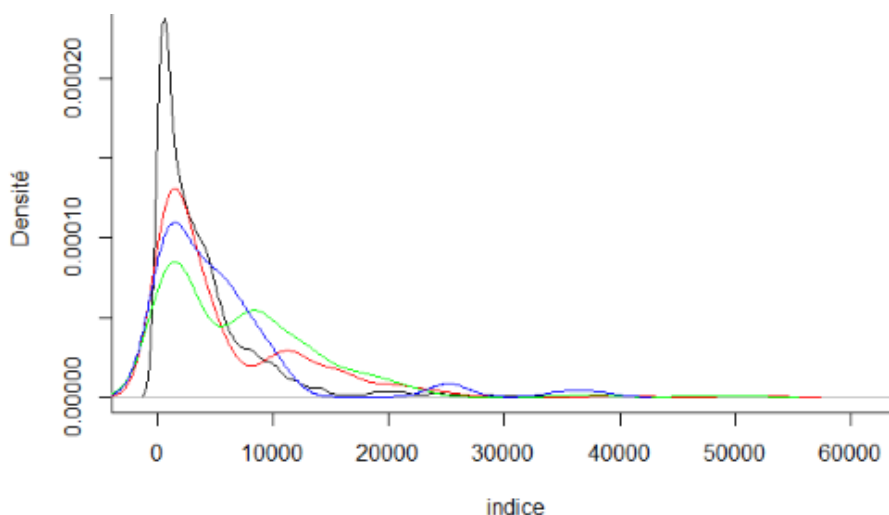


FIGURE 3.11 : Courbes des densités de l'indice tempête au-dessus de différents seuils

Sur ce graphique :

- la courbe noire correspond à la fonction de densité initiale ;
- la courbe rouge correspond à la fonction de densité des valeurs supérieures au quantile à 90% ;
- la courbe verte correspond à la fonction de densité des valeurs supérieures au quantile à 95% ;
- la courbe bleue correspond à la fonction de densité des valeurs supérieures au quantile à 99%.

On constate que même pour un seuil élevé (quantile à 99%), la courbe de densité ne se stabilise pas et ne tend pas vers une distribution de Pareto généralisée. Cela montre le choix des modélisateurs de privilégier une croissance assez régulière sans monter brusquement dans les extrêmes. L'indice ne croît pas aussi sévèrement qu'il le ferait s'il suivait une loi de Pareto. Il est donc pertinent de considérer que les lois à queues légères comme la loi Gamma sont appropriées dans le cas de la répartition de l'indice.

### 3.4.2 Analyse de la distribution de l'indice tempête pour l'année 2020 : vision tous modèles confondus

On suit dans cette partie les mêmes étapes que dans le paragraphe précédent mais au lieu de s'intéresser aux indices issus d'un modèle en particulier, on s'intéresse cette fois-ci aux indices issus de tous les modèles confondus en les agrégeant. La figure 3.12 est obtenue en ne tenant compte que des indices non nuls.

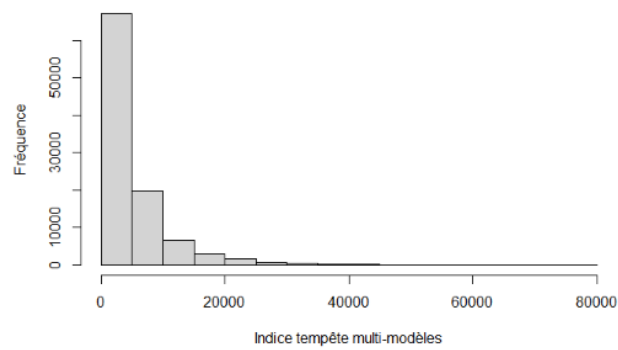


FIGURE 3.12 : Répartition de la charge sinistre en France, vision multi-modèles pour l'année 2020

Encore une fois, les indices sont majoritairement regroupés vers les valeurs les plus basses (dans un intervalle de 0 à 10 000). La médiane est de 2 902, la moyenne de 4 829 et le maximum de 78 742 ce qui montre que les extrêmes sont bien supérieurs à la moyenne. On s'intéresse directement à la loi Gamma avec la figure 3.13.

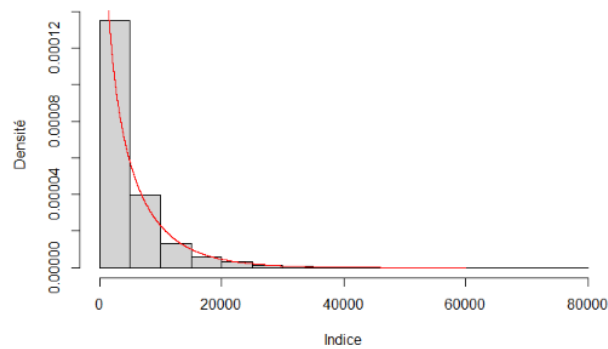


FIGURE 3.13 : Superposition de la loi Gamma avec la répartition de l'indice multi-modèles, année 2020

Cette loi semble correspondre aux données multi-modèles. Le test de Kolmogorov Smirnov donne les résultats suivants :

- $D = 0,0401$  ;
- $p - value < 2.2e^{-16}$ .

La  $p.value$  est toujours bien inférieure à 5 % ce qui permet de rejeter  $H_0$ .

Le graphique Quantile-Quantile est présenté en figure 3.14.

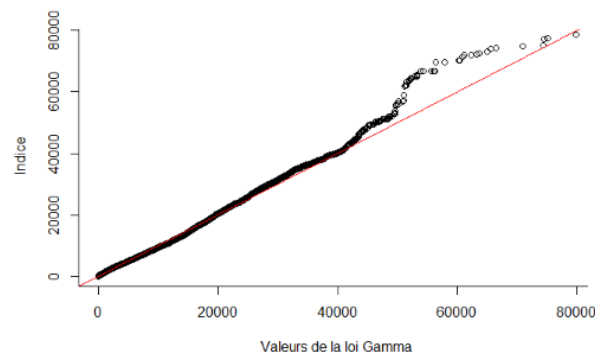


FIGURE 3.14 : Graphique Quantile-Quantile pour l'indice tempête multi-modèles, année 2020

Il est intéressant de constater que cette fois les valeurs extrêmes tendent à rejoindre la droite de pente 1 (en rouge). La loi Gamma prend donc bien en compte toutes les valeurs y compris les plus extrêmes. Il semble qu'une loi à queue légère est adaptée dans le cas de cette analyse multi-modèles. Avec cette vision agrégée, les valeurs de l'indice tempête ne semblent pas non plus tendre vers une loi de Pareto généralisée. Cela montre que dans la majorité des modèles, les modélisateurs privilégient une croissance régulière et progressive. Les courbes de densité obtenues pour un indice supérieur à différents seuils, présentées sur la figure 3.15, valident le fait que les valeurs extrêmes ne tendent pas vers une loi de Pareto généralisée (encore une fois, les courbes ne semblent pas tendre vers une allure plus lisse lorsque l'on augmente le seuil).

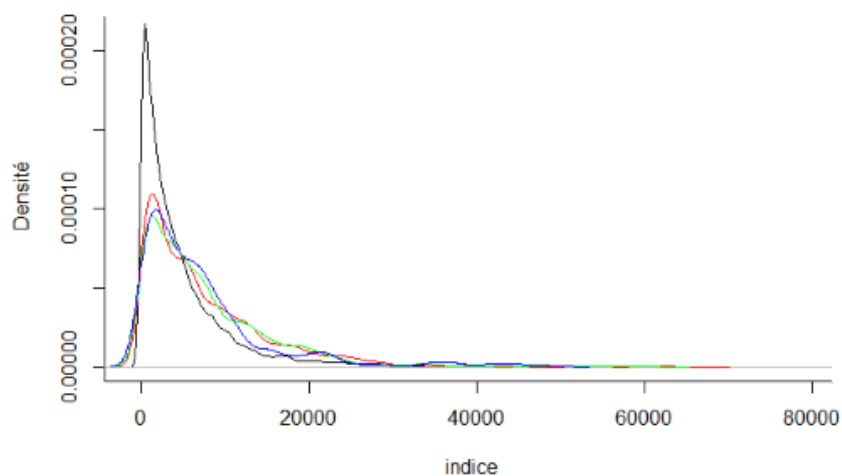


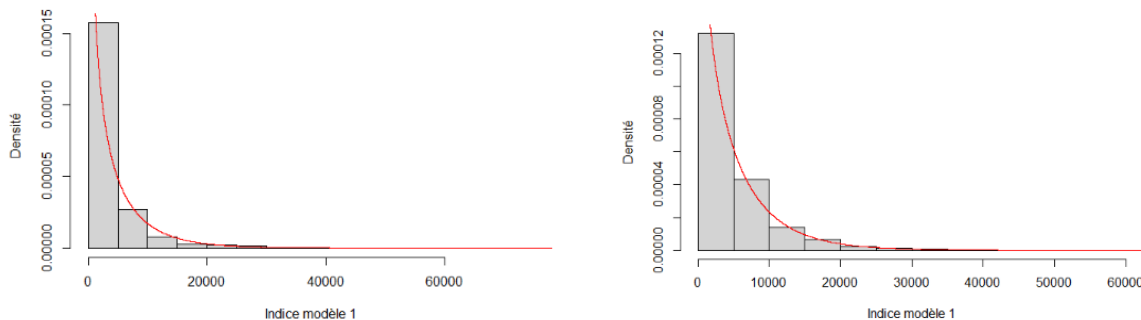
FIGURE 3.15 : Courbes de densité obtenues pour un indice multi-modèles supérieur à différents seuils, année 2020

Sur ce graphique :

- La courbe noire correspond à la fonction de densité initiale,
- La courbe rouge correspond à la fonction de densité des valeurs supérieures au quantile à 90%,
- La courbe verte correspond à la fonction de densité des valeurs supérieures au quantile à 95%,
- La courbe bleue correspond à la fonction de densité des valeurs supérieures au quantile à 99%.

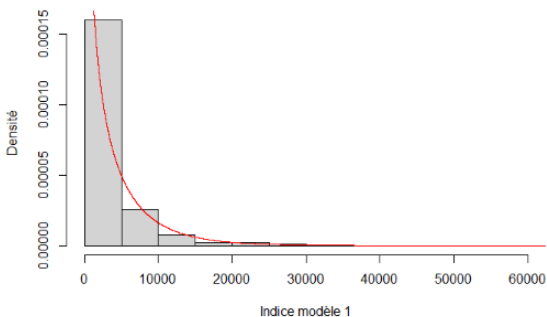
### 3.4.3 Comparaison des distributions de l'indice tempête à plusieurs horizons de temps : modèle ALADIN63

Dans ce paragraphe, les résultats obtenus avec la loi Gamma pour le modèle ALADIN63 à différents horizons de projections (2050 et 2100) vont être comparés avec ceux obtenus sur l'année 2020 afin de déceler s'il y a, ou non, une certaine continuité temporelle. La figure 3.16 permet dans un premier temps de vérifier graphiquement l'adéquation de la loi Gamma avec la distribution de l'indice tempête à horizon 2050 et 2100. Les résultats du test de Kolmogorov-Smirnov présentés dans le tableau 3.5 confirment cette adéquation.

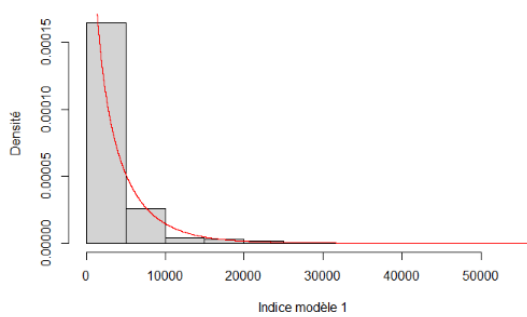


(a) Projection à horizon 2050, scénario RCP 2.6

(b) Projection à horizon 2050, scénario RCP 8.5



(c) Projection à horizon 2100, scénario RCP 2.6



(d) Projection à horizon 2100, scénario RCP 8.5

FIGURE 3.16 : Analyse graphique de l'adéquation de la loi Gamma pour le modèle ALADIN63 à différents horizons de temps

	2020	2050		2100	
		RCP 2.6	RCP 8.5	RCP 2.6	RCP 8.5
D	0,0995	0,1044	0,0352	0,0922	0,0876
p.value	2,20E-16	2,20E-16	7,10E-05	2,20E-16	2,20E-16

TABLE 3.5 : Résultats du test de Kolmogorov-Smirnov sur la loi Gamma pour les années 2020, 2050 et 2100

Les résultats du test confirment que la loi Gamma correspond à la distribution de l'indice tempête et ce, quel que soit l'horizon de temps. En effet la *p.value* est toujours bien inférieure à 5 % ce qui permet de rejeter  $H_0$ . On remarque cependant la valeur de *p.value* plus élevée pour le scénario RCP 8.5 projeté en 2050. On s'intéresse maintenant aux paramètres des lois Gamma associées à l'indice

tempête pour différents horizons de temps ainsi qu'aux valeurs de la moyenne et de l'écart type de ces lois. Le tableau 3.6 présente les différents résultats. Pour rappel, la fonction de densité de la loi Gamma est

$$f_X : t \mapsto \begin{cases} \frac{1}{\Gamma(\nu)} \frac{t^{\nu-1}}{\lambda^\nu} e^{-\frac{t}{\lambda}} & \text{si } t > 0, \\ 0 & \text{sinon,} \end{cases}$$

avec  $\Gamma(\nu) = \int_0^\infty t^{\nu-1} e^{-t} dt$ , la fonction Gamma d'Euler. La moyenne se calcule comme

$$E(X) = \nu \times \lambda;$$

et l'écart type comme

$$\sigma = \sqrt{V(X)} = \nu \times \lambda^2.$$

Le paramètre  $\nu$  correspond au paramètre de forme (*shape parameter*) et le paramètre  $\lambda$  correspond au paramètre d'échelle (*scale parameter*).

	2020	2050		2100	
		RCP 2.6	RCP 8.5	RCP 2.6	RCP 8.5
Paramètre de forme ( $\nu$ )	0,51	0,52	0,75	0,56	0,63
Paramètre d'échelle ( $\lambda$ )	10 000	7 058	6 259	6 079	4 949
Moyenne ( $E(X)$ )	5 100	3 692	4 672	3 424	3 129
Écart type ( $\sigma(X)$ )	7 141	5 105	5 408	4 562	3 935

TABLE 3.6 : Paramètres de la loi Gamma pour les années 2020, 2050 et 2100

Peu importe l'horizon de projection, les valeurs de la moyenne et de l'écart type ne varient que très peu. Il n'y a pas de tendance, ni à la hausse, ni à la baisse. L'année 2020 se démarque quand même légèrement avec un paramètre d'échelle, une moyenne et un écart type plus élevés que pour les années de projections. Pour finir cette comparaison de la loi Gamma sur le modèle ALADIN63, on regarde maintenant les graphiques quantile-quantile obtenus pour les années 2050 et 2100 et représentés par la figure 3.17.

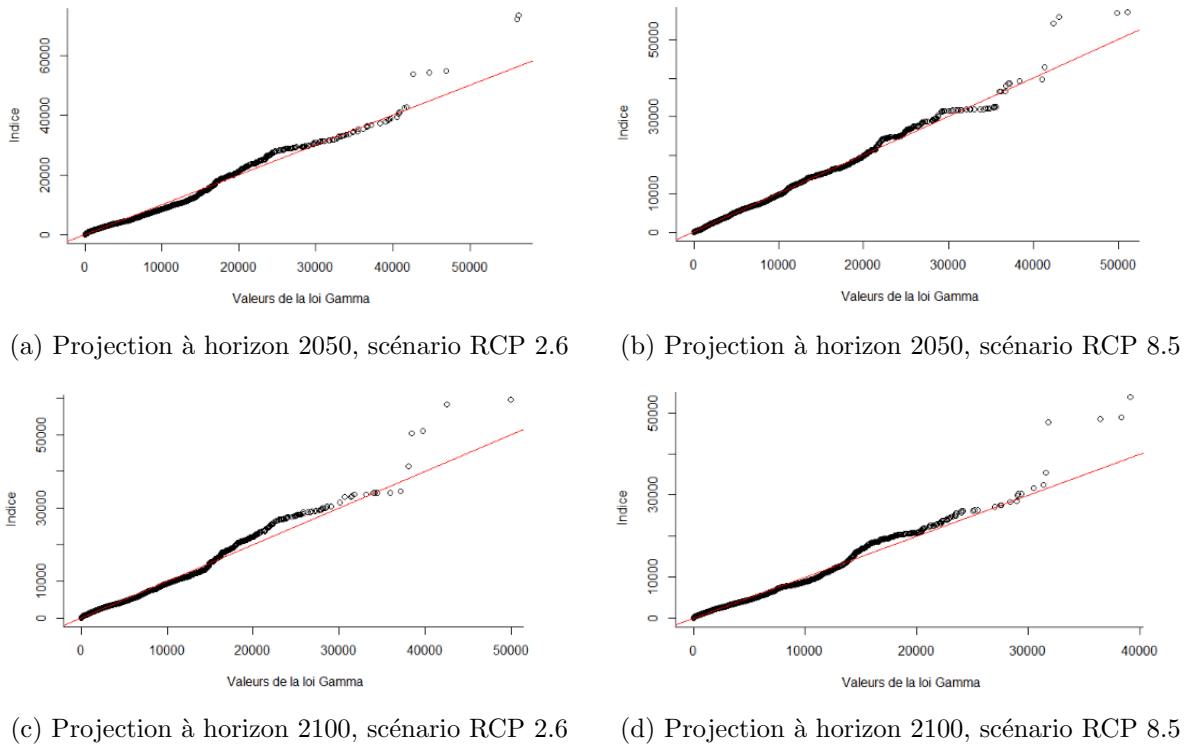


FIGURE 3.17 : Analyse des QQ-plots obtenus pour le modèle ALADIN63 à différents horizons de temps

Le même phénomène est visible sur les 4 graphiques, la loi Gamma semble très bien adaptée comme en attestent les valeurs qui se regroupent vers la droite de pente 1 (en rouge). Cependant dans les extrêmes, les valeurs se dispersent ce qui montre la difficulté de la loi à capter ces extrêmes.

### 3.4.4 Comparaison des distributions de l'indice tempête à plusieurs horizons de temps : agrégation de modèles

Avant de s'intéresser à la loi Gamma, le tableau 3.7 présente quelques indicateurs obtenus pour l'indice tempête calculé selon chacun des différents modèles proposés par DRIAS et ce, pour différentes années et scénarios de projection. Les valeurs en rouge sont les plus élevées et celles en bleues les plus basses relevées pour chacun des indicateurs (moyenne, médiane et maximum). Globalement les valeurs de l'indice tempête ne sont pas trop dispersées. Deux valeurs ressortent particulièrement, ce sont les deux extrêmes en terme de maximum. La projection en 2050 du scénario RCP 2.6 faite par le modèle 4 donne un indice maximum bien en dessous des autres (12 710 tandis que la moyenne des maxima est à 60 627 pour cette année et ce scénario). La projection en 2100 suivant le scénario RCP 8.5 faite par le modèle 6 affiche, quant à elle, un maximum bien supérieur aux autres (107 241 tandis que la moyenne des maxima est à 75 047). Mis à part quelques résultats qui se démarquent, il y a une relative concordance. Cette concordance se traduit notamment par des indices moyens assez proches quel que soit le modèle. Les écarts type sont assez bas pour les moyennes et les médianes. Seule la prédiction des extrêmes semblent être source de divergence.

	Moyenne					Médiane					Maximum							
	2020	RCP 2.6			RCP 8.5		2020	RCP 2.6			RCP 8.5		2020	RCP 2.6			RCP 8.5	
		2050	2100	2050	2100	2050		2100	2050	2100	2050	2100		2050	2100	2050	2100	
Modèle 1	3 781	3 670	3 994	4 638	3 103	2 352	2 039	1 942	2 858	1 898	61 985	73 575	59 621	57 227	53 935			
Modèle 2	4 150	3 704	3 506	4 912	3 624	2 613	2 142	2 115	3 259	2 352	64 931	73 550	59 067	81 809	66 301			
Modèle 3	5 598	3 569	3 711	4 471	6 138	3 654	1 959	2 068	2 703	4 175	69 666	63 638	73 046	77 777	85 267			
Modèle 4	5 447	2 469	3 573	4 219	6 954	3 833	2 183	2 002	2 547	4 949	66 755	12 710	68 179	65 553	85 746			
Modèle 5	6 299	-	-	2 630	7 258	4 156	-	-	1 522	4 680	77 540	-	-	57 358	87 478			
Modèle 6	6 658	-	-	2 726	7 361	4 690	-	-	1 623	4 876	75 026	-	-	61 224	107 241			
Modèle 7	3 803	-	-	3 504	-	2 030	-	-	1 979	-	78 743	-	-	71 987	-			
Modèle 8	3 394	3 592	-	3 858	-	1 903	1 994	-	2 295	-	66 890	53 223	-	83 472	-			
Modèle 9	4 419	4 594	4 263	4 175	4 328	2 899	2 971	2 231	2 474	2 505	66 911	71 243	71 326	69 574	60 124			
Modèle 10	4 419	4 524	3 926	5 046	4 264	2 899	2 935	1 761	3 178	2 713	66 911	75 568	72 196	87 589	65 016			
Modèle 11	4 953	3 759	3 448	4 352	4 664	2 413	2 413	1 944	2 716	2 724	73 097	61 506	76 380	71 999	72 124			
Modèle 12	4 796	-	-	4 192	4 785	2 245	-	-	2 606	3 081	72 377	-	-	59 314	67 240			
Moyenne	4810	3735	3774	4060	5248	2974	2330	2009	2480	3395	70069	60627	68545	70407	75047			
Écart type	1022	656	298	770	1557	902	410	150	548	1155	5249	20810	6737	10578	16072			

TABLE 3.7 : Indicateurs de l'indice tempête pour chacun des modèles DRIAS

Nous allons maintenant comparer l'adéquation de la loi Gamma pour 2020 avec les années 2050 et 2100 en adoptant une vision multi-modèles (en étudiant les résultats obtenus en agrégeant tous les modèles). Les étapes sont les mêmes qu'au paragraphe précédent, on commence par analyser l'adéquation graphique grâce à la figure 3.18 avant de vérifier cette adéquation par le test de Kolmogorov-Smirnov dont les résultats se trouvent dans le tableau 3.8.

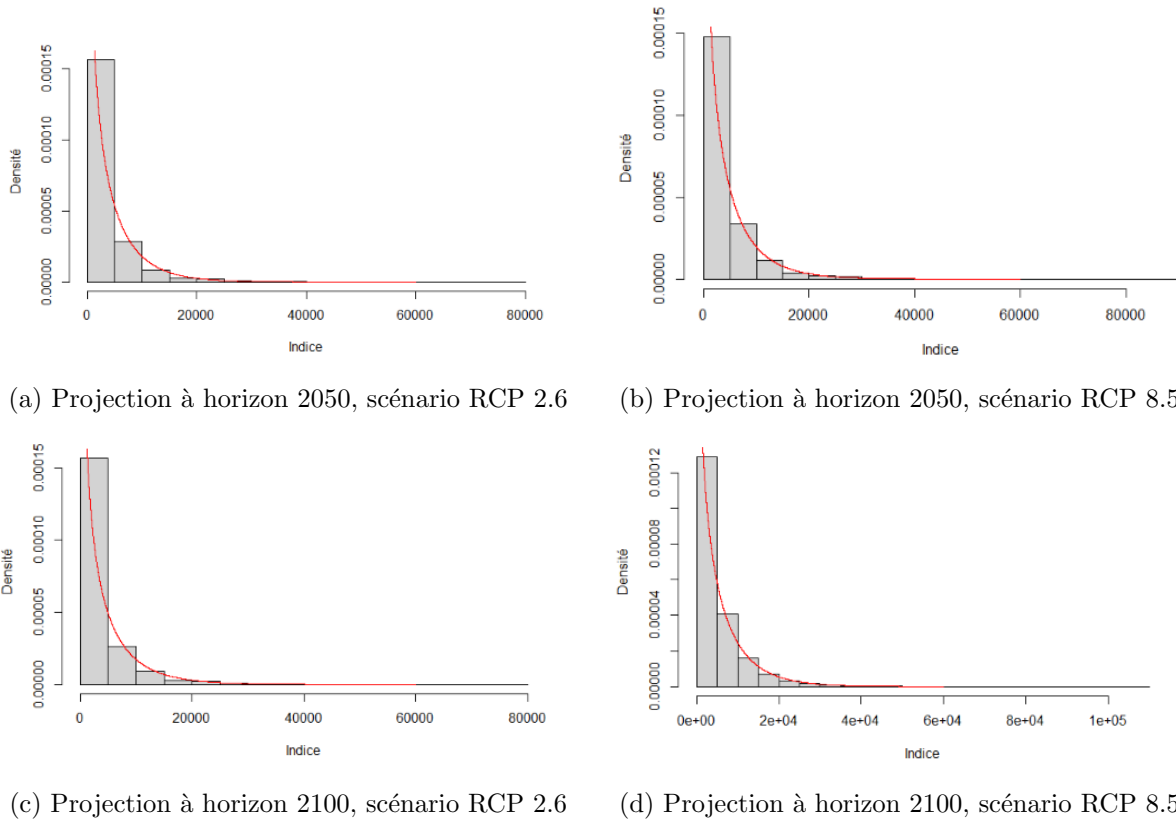


FIGURE 3.18 : Analyse graphique de l'adéquation de la loi Gamma à différents horizons de temps

	2020	2050		2100	
		RCP 2.6	RCP 8.5	RCP 2.6	RCP 8.5
D	0,0401	0,1044	0,0724	0,1032	0,0387
p.value	2,20E-16	2,20E-16	7,10E-05	2,20E-16	2,20E-16

TABLE 3.8 : Résultats du test de Kolmogorov-Smirnov sur la loi Gamma pour les années 2020, 2050 et 2100

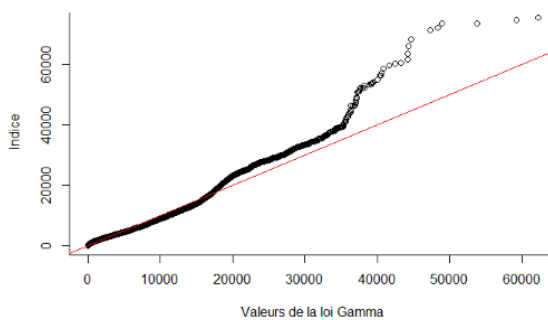
La *p.value* est toujours bien inférieure à 5 %, on peut rejeter  $H_0$  et considérer que la loi Gamma correspond à l'indice tempête obtenu par agrégation de modèles quel que soit l'horizon de projection. On s'intéresse maintenant aux paramètres de la loi Gamma regroupés dans le tableau 3.9.

	2020	2050		2100	
		RCP 2.6	RCP 8.5	RCP 2.6	RCP 8.5
Paramètre de forme ( $\nu$ )	0,66	0,62	0,64	0,54	0,68
Paramètre d'échelle ( $\lambda$ )	7 311	6 046	6 386	6 903	7 776
Moyenne ( $E(X)$ )	4 829	3 746	4 070	3 704	5 265
Écart type ( $\sigma(X)$ )	5 942	4 759	5 098	5 057	6 398

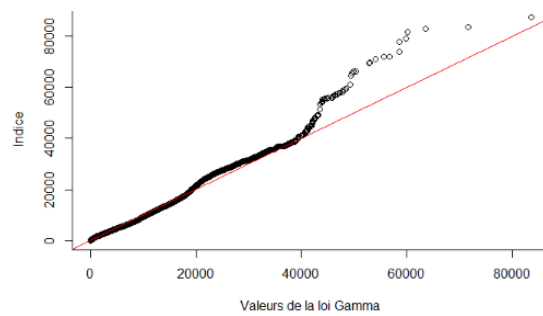
TABLE 3.9 : Paramètres de la loi Gamma pour les années 2020, 2050 et 2100

Les valeurs des paramètres de la loi, la moyenne et la variance sont proches quel que soit l'année ou le scénario observés. Aucune tendance à la hausse ou la baisse ne ressort et on décèle une réelle continuité temporelle. On analyse maintenant les graphiques quantile-quantile présentés en figure 3.19.

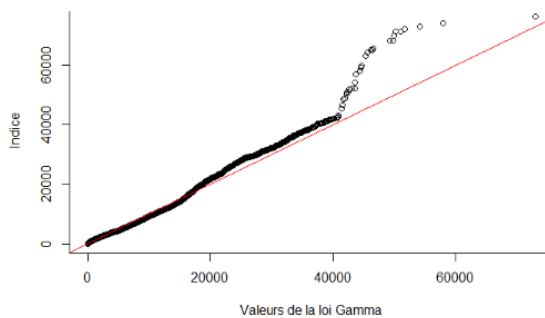




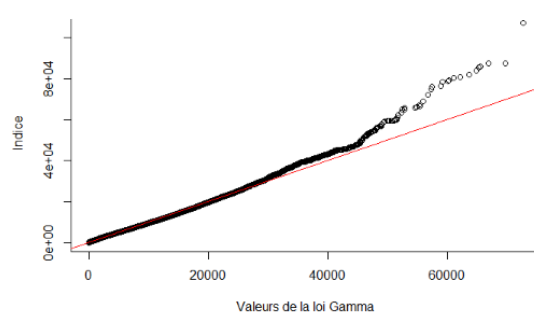
(a) Projection à horizon 2050, scénario RCP 2.6



(b) Projection à horizon 2050, scénario RCP 8.5



(c) Projection à horizon 2100, scénario RCP 2.6



(d) Projection à horizon 2100, scénario RCP 8.5

FIGURE 3.19 : Analyse des QQ-plots obtenus en vision multi-modèles à différents horizons de temps

La loi Gamma semble moins bien capter l'indice tempête que dans le cas du calcul avec le modèle ALADIN63 uniquement. En effet le nombre de points dispersés au dessus de la droite de pente 1 est plus important.

Pour conclure sur l'adéquation de la loi Gamma, elle correspond relativement bien à l'indice tempête excepté dans le cas des valeurs extrêmes comme le montre les QQ-plots. Dans le cas particulier des valeurs extrêmes, il faudrait éventuellement chercher une autre loi ou étudier des lois non paramétriques. Ce ne sera pas fait dans ce mémoire mais ce sont des pistes d'exploration envisageables.

### 3.5 Réflexions sur le choix du modèle

Les résultats des projections dépendent en partie du modèle choisi. La principale difficulté dans la conduite d'une étude en lien avec les effets du changement climatique réside donc dans le choix du couple GCM/RCM adéquat. Le portail DRIAS (2020a) offre un panel de couples choisis dans le but de couvrir un spectre assez large de résultats. Le choix du modèle va principalement dépendre de l'usage qui va en être fait. Dans le cas d'une étude d'impact, il est conseillé de ne se concentrer que sur un seul modèle qui peut être choisi en fonction de la situation étudiée. DRIAS met à disposition toutes les informations nécessaires afin de savoir quels sont les couples qui donnent les résultats les plus extrêmes notamment (DRIAS, 2020b). Dans le cas de projections à horizon lointain (2100), le niveau d'incertitude des projections est plus élevé. Il est donc intéressant de travailler également en agrégeant les modèles afin d'être en mesure d'évaluer la dispersion des paramètres projetés, comme

cela a été fait en section 3.3.

Pour conclure, et comme cela est expliqué dans la fiche méthodologique DRIAS (2020b), si une étude d'impact se fait généralement avec un seul modèle, il est toujours intéressant d'apporter un aspect probabiliste, quand cela est possible, afin de capter la dispersion du paramètre étudié. Dans ce mémoire, le chapitre 2 se concentre sur une analyse à un seul modèle (ALADIN63) et ce chapitre permet de s'intéresser aux autres modèles et d'apporter ce point de vue probabiliste qui permet une estimation de la dispersion de l'indice.

### 3.6 Présentation d'autres pistes d'utilisation de l'indice tempête

Ce dernier paragraphe aborde brièvement deux pistes, autres que l'assurance paramétrique, d'utilisation de l'indice tempête. Ce ne sont que des ébauches d'idées de ce qui pourrait éventuellement être fait.

#### Calcul de ratios et ajustement des primes

Les différentes cartes qui ont été présentées dans ce mémoire amènent toutes à la même conclusion : le territoire de la France métropolitaine est inégalement exposé au risque tempête. Face à l'hétérogénéité spatiale de ce risque, il est intéressant d'envisager d'ajuster les primes en fonction de la localisation géographique du bien assuré. Ainsi les assurés placés dans les territoires où l'indice est proche de l'indice moyen paieraient une prime "de base". Cette prime serait augmentée d'un certain coefficient lorsque le bien se trouverait dans un territoire plus exposé que la moyenne et au contraire elle serait diminuée lorsqu'il se trouverait dans un territoire où le risque de tempête serait minimale. La figure 3.20 illustre le ratio de l'indice tempête annuel sur l'indice tempête national moyen pour l'année 2020.

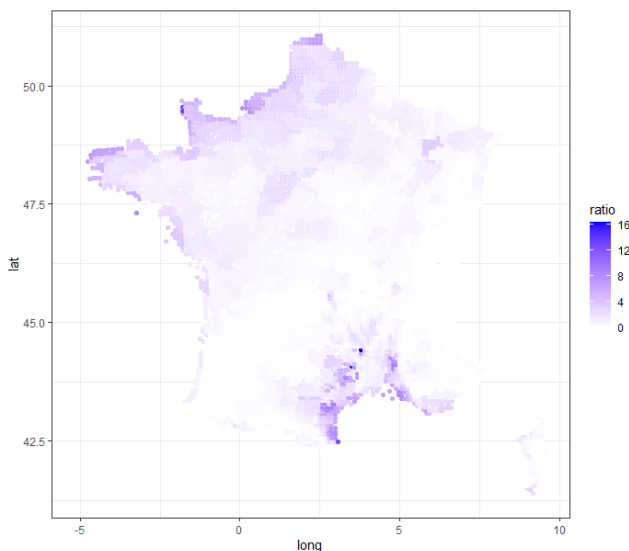


FIGURE 3.20 : Représentation du ratio indice sur indice moyen

Il faut noter que pour établir cette carte l'indice moyen a été calculé en ne prenant en compte que les indices non nuls. Selon cette carte, les zones côtières bretonnes et le bassin méditerranéen ont un indice pouvant être jusqu'à plus de 16 fois plus élevé que la moyenne. Plus l'on avance dans les terres,

plus l'indice est proche de la moyenne. Cette carte illustre que la majorité des indices en France se trouvent dans un intervalle restreint, à l'exception de quelques zones où il atteint des valeurs extrêmes. Ce phénomène était déjà illustré par les histogrammes présentant la répartition de l'indice en section 3.4.

### Gestion de portefeuille : exploiter les expositions

L'assurance dommage est basée sur le concept de mutualisation des risques. Il est donc essentiel que l'assureur ait une vision claire de la répartition des risques dans son portefeuille. Un indice tel que celui développé dans ce mémoire permet de visualiser les territoires à risque et grâce au scénario du GIEC ; de visualiser ceux qui le seront dans les années à venir. Il est ainsi possible d'évaluer l'évolution de l'importance du risque tempête selon les régions. Si l'on se positionne dans le cas du scénario RCP 8.5, l'évolution de l'indice à moyen et long terme est représentée par la figure 3.21.

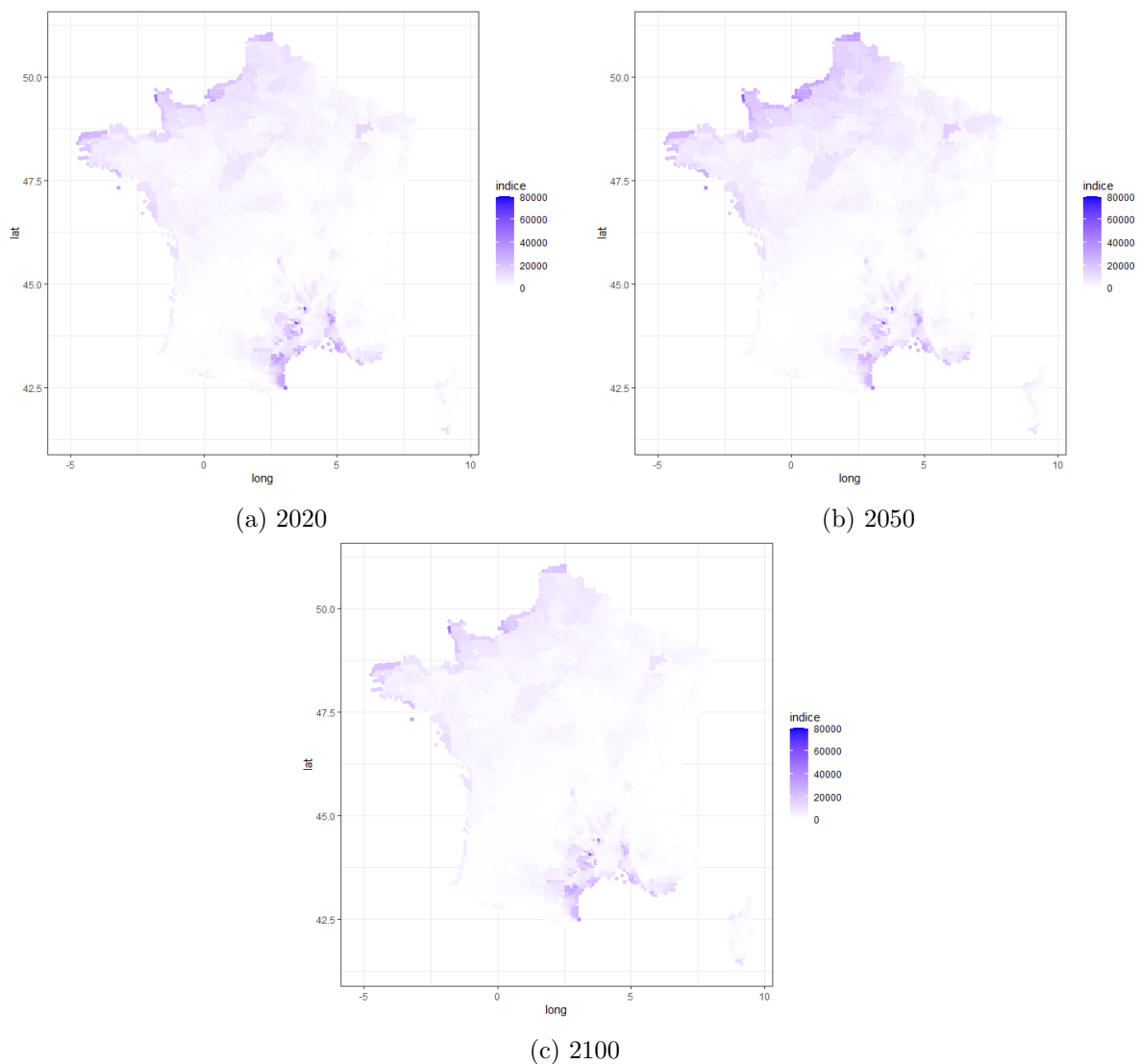


FIGURE 3.21 : Évolution des zones à risque de 2020 à 2100 pour le scénario RCP 8.5

Ces trois cartes montrent l'évolution temporelle des territoires à risque dans le cas de la réalisation

du scénario RCP 8.5. On constate qu'il n'y a pas d'évolution marquante des zones à risque, si ce n'est que la zone à risque dans l'hémisphère nord est légèrement plus étendue en 2050. Les projections de l'indice tempête pourraient ainsi aiguiller les assureurs dans la gestion de leur portefeuille d'assurés. Ils pourraient ainsi éviter les concentrations d'assurés dans les zones à risque et équilibrer leur portefeuille.

### 3.7 Limites et ouvertures

Une des premières limites découle du caractère hasardeux des tempêtes. En effet, il est aujourd'hui extrêmement difficile de prédire les phénomènes tempétueux. Les vitesses de vents projectives fournies par DRIAS (2020a) sont à prendre avec beaucoup de recul car elle sont la source de grandes incertitudes, notamment à des horizons lointains comme 2100. Les projections de l'indice tempête sur le long terme sont donc très peu fiables.

Les autres limites sont inhérentes au fait de travailler uniquement sur de l'open data. En effet, il est nécessaire de s'adapter aux données disponibles. Il aurait été extrêmement intéressant de pouvoir intégrer la dimension valeur des biens dans la formule de l'indice tempête étant donné que le coût imputé aux assureurs et réassureurs dépend en partie de la valeur du bien endommagé. De même, travailler sur de l'open data impose d'utiliser les vitesses de vent de DRIAS (2020a) afin d'avoir ce paramètre à une maille assez fine et en vision prospective également. L'inconvénient majeur de ces données est que ce sont des vitesses moyennes journalières, il y a donc moins de précisions qu'en travaillant avec des moyennes sur 10 min par exemple. Et enfin, la nécessité de devoir considérer le paramètre densité comme une constante constitue également une limite. L'idéal aurait été de travailler avec un modèle de projection démographique, ce qui peut être une piste d'amélioration de la formule de l'indice tempête.

Une dernière piste d'amélioration serait d'utiliser l'indice en lien avec une base coût afin d'entreprendre un réel processus de tarification. De plus, il serait intéressant de pouvoir valider la vraisemblance de cet indice, qui, même s'il est basé sur une littérature solide, n'a pas été mis en relation avec des coûts réels.

# Conclusion

La catégorie des phénomènes atmosphériques, dont font partie les tempêtes, sont les événements climatiques qui engendrent le plus de dégâts matériels. Il est donc essentiel pour les organismes d'assurance et de réassurance d'être en mesure de capter ce risque. Une des solutions envisageables pour la couverture des risques climatiques est l'assurance paramétrique dont la performance repose en grande partie sur le choix de l'indice adéquat. Cet indice doit prendre en compte à la fois l'aspect météorologique inhérent à tout risque climatique et l'aspect exposition pour ainsi être en mesure de quantifier les potentiels dommages.

La littérature fournit des exemples d'indices tempête, construits à partir des coûts et souvent reliés à un portefeuille en particulier. L'idée de ce mémoire est d'apporter une vision générale, exclusivement construite sur de l'open data, en se basant sur ce qui a déjà été développé. La première étape est de comprendre le lien entre le phénomène climatique et les dommages engendrés. Dans le cas des tempêtes, les dégâts occasionnés sur les habitations (et autres infrastructures) sont dus à la pression exercée par le vent. Cette pression est proportionnelle au carré de la vitesse des rafales de vent. L'indice doit donc inclure la notion de vitesse de vent afin de capter la force de la tempête. L'indice développé dans ce mémoire ne doit capter que les événements les plus extrêmes, ainsi seules les tempêtes dont les vitesses de vent sont supérieures à un certain quantile sont considérées. Pour ce qui est du paramètre d'exposition, c'est la densité de population qui a été choisie afin de faire ressortir les territoires les plus peuplés qui peuvent donc connaître plus de dégâts en cas de passage d'une tempête.

L'indice tempête offre donc la possibilité de capter les événements tempétueux dommageables les plus extrêmes qui ont lieu sur le territoire français. Outre cette possibilité de quantifier les événements tempétueux, cet indice permet également de construire une vision prospective du paysage climatique français. En effet, le portail DRIAS (2020a) met à disposition des vitesses de vent prospectives suivant différents scénarios du GIEC. Dans ce mémoire ont été étudiées les projections des scénarios RCP 2.6 (le plus optimiste) et RCP 8.5 (le plus pessimiste). Les projections de l'indice tempête ne révèlent pas de changement dans la répartition géographique des zones à risque. Rien ne laisse présager une quelconque évolution de l'intensité et de la fréquence des phénomènes tempétueux sur le territoire français métropolitain, ce qui rejoint les conclusions de l'étude de COVÉA (2022).

Les modèles de projections restent assez incertains. Le portail DRIAS (2020a) présente l'avantage de donner accès à différents modèles ce qui permet de se faire une idée sur le plus ou moins grand consensus des modélisateurs. Les zones d'indice nul font généralement l'unanimité chez les différents modélisateurs. Les principaux désaccords se retrouvent dans les zones où l'indice est le plus élevé. Ces résultats sont donc à prendre en compte avec une certaine prudence en raison du niveau d'incertitude entourant certaines zones comme une partie des côtes au nord de la France.

Ainsi un tel indice permet de capter le risque tempête mais également d'en avoir une vision prospective à différents horizons ce qui permet aux organismes d'assurance et de réassurance de pouvoir adapter leurs portefeuilles mais aussi potentiellement ajuster leurs primes. L'incertitude des projections peut être mesurée grâce à l'évaluation du plus ou moins grand consensus des différents modélisateurs. Ce mémoire présente une des possibilités pour arriver à capter un risque climatique comme le risque tempête, c'est une ouverture sur ce qu'il est possible de faire.

# Bibliographie

- A. DALLEAU (2021). Évaluation de l'impact du changement climatique sur le risque cyclonique dans les Antilles. Mém. de mast. ISUP, Paris.
- A. MORNET (2015). Contributions à l'évaluation des risques en assurance tempête et automobile. Mém. de mast. ISFA, Lyon.
- A. SADI (2018). Solution dynamique d'assurance paramétrique agricole. Mém. de mast. ENSAE, Paris.
- ACPR (2020). Scénarios et hypothèses principales de l'exercice pilote climatique.
- ACPR (2021). Une première évaluation des risques financiers dus au changement climatique : Les principaux résultats de l'exercice pilote climatique 2020.
- ASSEMBLÉE NATIONALE (2019). Proposition de loi visant à réformer le régime des catastrophes naturelles.
- B. SADOU (2017). Méthodes de tarification pour la gestion d'un portefeuille et couvertures indicelles multirisques. Mém. de mast. ISFA, Lyon.
- C. DUCHESNE (2019). Contexte tempétueux. *La Chaîne Météo*.
- CCRIF SPC (2018). Strategic Plan 2018-2021.
- CERFACS, CNRS, IPSL (2020). Les nouvelles projections climatiques de référence DRIAS 2020 pour la métropole.
- CERTIFICAT MÉTÉO (2020). Intempéries et catastrophes naturelles : quelles modalités d'indemnisation ?
- CLIMATE PREDICTION CENTER (USA) (2014). Storm Track Monitoring.
- COMMISSARIAT GÉNÉRAL AU DÉVELOPPEMENT DURABLE (2018). Évènements naturels dommageables entre 1900 et 2017.
- COVÉA (2022). Changement climatique & Assurance : Quelles conséquences sur la sinistralité à horizon 2050 ?
- D. CLAUDAUD (2014). Actions du vent sur les bâtiments selon l'Eurocode 1 Partie 1.4. *Techniques de l'Ingénieur*.
- DIRECTION GÉNÉRALE DE LA CONCURRENCE, DE LA CONSOMMATION ET DE LA RÉPRESSION DES FRAUDES (2018). Fiches pratiques : assurance multirisque habitation.
- DONNÉES PUBLIQUES MÉTÉO FRANCE (2020). Données SYNOP essentielles OMM.
- DRIAS (2020a). URL : <http://www.drias-climat.fr/>.
- DRIAS (2020b). Aide à la sélection des modèles.
- DRIAS (2020). Simulations DRIAS-2020.
- EIOPA (2020). Opinion on the 2020 review of solvency II.
- EIOPA (2021a). Methodological paper on potential inclusion of climate change in the Nat-Cat standard formula.
- EIOPA (2021b). Opinion on the supervision of the use of climate change risk scenarios in ORSA.
- EIOPA (2022). Methodological principles of insurance stress testing-climate change component.
- F. RITLENG ET C. NGUYEN (2014). Étude d'un produit d'assurance paramétrique contre le risque de pluie torrentielle en Jamaïque. Mém. de mast. ENSAE, Paris.

- FÉDÉRATION FRANÇAISE DE L'ASSURANCE - DIRECTION DES ÉTUDES ÉCONOMIQUES ET DES STATISTIQUES (2020). La garantie tempête grêle neige en 2019.
- GIEC (2011). Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation (SREX).
- GIEC (2014). Cinquième Rapport d'évaluation.
- GIEC (2021). Climate Change 2021 : The Physical Science Basis, Technical Summary.
- GIEC (2022). Sixième Rapport d'évaluation.
- GROUPE DE LA BANQUE MONDIALE (2015). Réalisations du mécanisme mondial pour l'assurance indicielle dans les pays de l'ACP, phase 1.
- IMMO DATA (2022). Demandes de Valeurs Foncières (DVF) : consultation des ventes immobilières.
- INSEE (2018). Insee statistiques locales - Densité de population (historique depuis 1876).
- INSTITUT NATIONAL DE L'INFORMATION GÉOGRAPHIQUE ET FORESTIÈRE (2019). Comment obtenir la distance entre deux points connus en longitude et en latitude sur la sphère ?
- JP. PALUTIKOF, BB. BRABSON, DH. LISTER ET ST. ADCOCK (1999). A review of methods to calculate extreme wind speeds.
- L. CVITAN (2003). Determining wind gusts using mean hourly wind speed.
- LA CHAÎNE MÉTÉO (2015). Tempête Klaus : des vents à 190 km/h le 24 janvier 2009.
- LA CHAÎNE MÉTÉO (2019). Tempêtes du siècle : en 1999, Lothar et Martin dévastaient la France.
- LA POSTE GROUPE (2022). Base officielle des codes postaux.
- L'ARGUS DE L'ASSURANCE (2021). L'assurance paramétrique, mode d'emploi.
- L'ARGUS DE L'ASSURANCE (2022). Tempêtes Eunice et Franklin : France Assureurs livre une estimation du coût.
- Les assureurs français face au risque de changement climatique (2019).
- M. BROBERG (2020). Parametric loss and damage insurance schemes as a means to enhance climate change resilience in developing countries. *Climate Policy*.
- MINISTÈRE DE LA TRANSITION ÉCOLOGIQUE (2021). Chiffres clés du climat France, Europe et Monde.
- MINISTÈRE DE LA TRANSITION ÉCOLOGIQUE ET DE LA COHÉSION DES TERRITOIRES (2021). Carte des loyers.
- MÉTÉO FRANCE (2020a). Alex le 2 octobre 2020.
- MÉTÉO FRANCE (2020b). Tempêtes historiques.
- MÉTÉO FRANCE (2021). Tempêtes en France métropolitaine.
- MÉTÉO FRANCE (2022). Dangers Météorologiques Vent Violent.
- N. BEDI (2018). Modélisation du risque de tempête en France métropolitaine. Mém. de mast. ISUP, Paris.
- OBSERVATOIRE DES TERRITOIRES (2018). Indicateurs en données ouvertes : densité de population.
- ONERC (2019). Les événements météorologiques extrêmes dans un contexte de changement climatique.
- ORGANISATION MÉTÉOROLOGIQUE MONDIALE (2016). Catastrophes (peu) naturelles : Expliquer les liens entre les événements climatiques extrêmes et le changement climatique.
- S. OUTTEN ET S. SOBOLOWSKI (2021). Extreme wind projections over Europe from the Euro-CORDEX regional climate models.
- SWISS RE (2015-2021). Études sigma.
- X. LIN, WJ. KWON (2019). Application of Parametric Insurance in Principle/Regulation-Compliant and Innovative Ways.



## Annexe A

# Annexes

### A.1 Les données libre accès Météo France (SYNOP)

Liste des postes de relevés SYNOP

ID	Nom	ID	Nom
7005	Abbeville	7335	Poitiers-Biard
7015	Lille-Lesquin	7434	Limoges-Bellegarde
7020	Pte de la Hague	7460	Clermont-Ferrand
7027	Caen-Carpiquet	7471	Le Puy-Loudes
7037	Rouen-Boos	7481	Lyon-Saint Exupéry
7072	Reims-Prunay	7510	Bordeaux-Mérignac
7110	Brest-Guipavas	7535	Gourdon
7117	Ploumanac'h	7558	Millau
7130	Rennes-Saint Jacques	7577	Montélimar
7139	Alençon	7591	Embrun
7149	Orly	7607	Mont-de-Marsan
7168	Troyes-Barberey	7621	Tarbes-Ossun
7181	Nacy-Ochey	7627	Saint Girons
7190	Strasbourg-Entzheim	7630	Toulouse-Blagnac
7207	Belle île-Le Talut	7643	Montpellier
7222	Nantes-Bouguenais	7650	Marignane
7240	Tours	7661	Cap Cepet
7255	Bourges	7690	Nice
7280	Dijon-Longvic	7747	Perpignan
7299	Bale-Mulhouse	7761	Ajaccio
7314	Pte de Chassiron	7790	Bastia

## Liste des variables de la base de données SYNOP

Descriptif	Mnémonique	Type *	Unité
indicatif OMM station	numer sta	car	
date (UTC)	date	car	AAAAMMDDHHMISS
pression au niveau mer	pmer	int	Pa
variation de pression en 3 heures	tend	int	Pa
type de tendance barométrique	cod tend	int	code (0200)
direction du vent moyen 10mn	dd	int	degré
vitesse du vent moyen 10mn	ff	réel	m/s
température	t	réel	K
point de rosée	td	réel	K
humidité	u	int	%
visibilité horizontale	vv	réel	mètre
temps présent	ww	int	code (4677)
temps passé 1	w1	int	code (4561)
temps passé 2	w2	int	code (4561)
nébulosité totale	n	réel	%
nébulosité des nuages de l'étage inférieur	nbas	int	octa
hauteur de la base des nuages de l'étage inférieur	hbas	int	mètre
type des nuages de l'étage inférieur	cl	int	code (0513)
type des nuages de l'étage moyen	cm	int	code (0515)
type des nuages de l'étage supérieur	ch	int	code (0509)
pression station	pres	int	Pa
niveau barométrique	niv bar	int	Pa
géopotential	geop	int	m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup>
variation de pression en 24 heures	tend24	int	Pa
température minimale sur N heures	tnN	réel	K
température maximale sur N heures	txN	réel	K
température minimale du sol sur 12 heures	tminsol	réel	K
méthode mesure tw	sw	int	code (3855)
température du thermomètre mouillé	tw	réel	K
rafales sur les 10 dernières minutes	raf10	réel	m/s
rafales sur une période	rafper	réel	m/s
période de mesure de la rafale	per	réel	minute
état du sol	etat sol	int	code (0901)
hauteur totale de la couche de neige, glace, autre, au sol	ht_neige	réel	mètre
hauteur de la neige fraîche	ssfrai	réel	mètre
Période de mesure de la neige fraîche	perssfrai	réel	1/10 heure
Précipitations dans les N dernières heures	rrN	réel	mm
Phénomène spécial	phenspeN	réel	code (3778)
Nébulosité couche nuageuse N	nnuageN	int	octa
Type de nuage N	ctypeN	int	code (0500)
Hauteur de base de nuage N	hnuageN	int	mètre

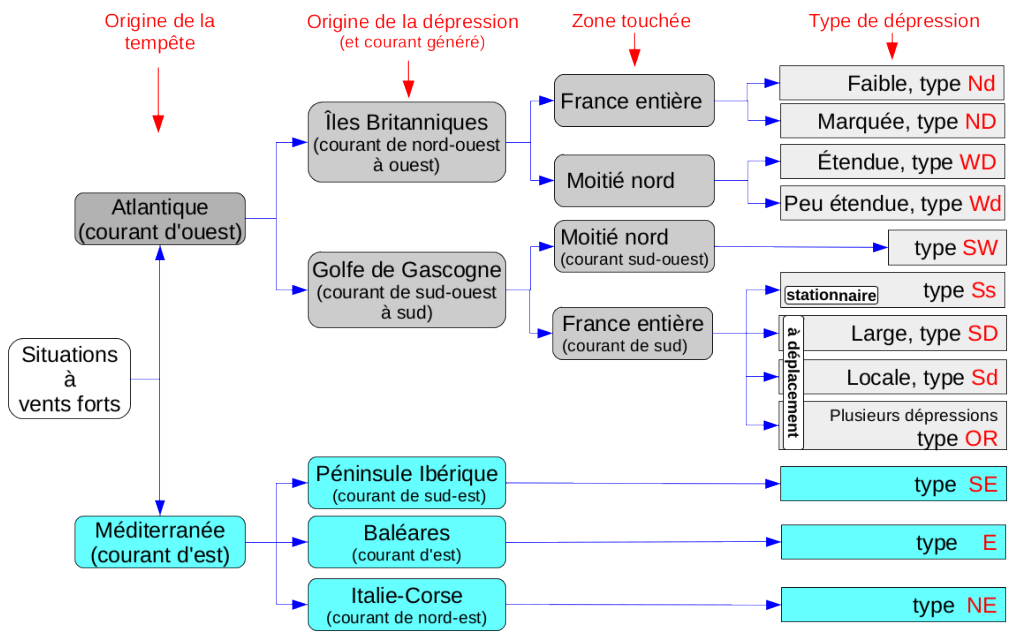
## A.2 Liste des tempêtes historiques

Date de début	Nom Tempête	Vent instantané maximal (km/h)	Indice de sévérité	Surface du territoire touché	Classification Drevetou
14/03/1940	Tempête du 14 mars 1940	137	indéterminé	moitié nord du pays	type WD
25/09/1947	Tempête en Méditerranée 24 et 26 septembre 1947	162	indéterminé	3 départements	type E
07/08/1948	Tempête du 7 août 1948	97	indéterminé	5 régions	type SW
12/12/1952	Tempête du 12 au 13 décembre 1952	130	indéterminé	30 à 35 départements	type WD
31/01/1953	Tempête du 31 janvier au 1er février 1953	162	indéterminé	inconnue	type WD
28/11/1956	Tempête en Méditerranée 28 et 29 novembre 1956	216	indéterminé	environ 15000km2	type NE
14/02/1957	Tempête du 14 février 1957	155	indéterminé	environ 180000km3	type Sd
12/12/1957	Tempête du 12 décembre 1957	72	indéterminé	moins de 2000km2	type Ss
26/06/1958	Tempête du 26 juin 1958	140	indéterminé	environ 300000km2	type SD
06/10/1961	Tempête en Méditerranée du 6 octobre 1961	180	indéterminé	environ 15000km2	type E
16/12/1962	Tempête en Méditerranée du 16 décembre 1962	216	indéterminé	27 départements	type NE
01/12/1963	Tempête du 1er au 3 décembre 1963	119	indéterminé	envrion 25%	type Ss
12/03/1967	Tempête du 12 mars 1967	140	indéterminé	une vingtaine de départements	type SW
07/01/1968	Tempête du 7 janvier 1968	162	indéterminé	presque 100%	type Nd
06/07/1969	Tempête du 6 juillet 1969	166	indéterminé	envrion 10 départements	type Wd
13/02/1972	Tempête du 13 février 1972	162	indéterminé	environ 50%	type SD
16/01/1974	Tempête du 16 janvier 1974	151	indéterminé	14 départements + île de France	type WD
02/12/1976	Tempête du 2 décembre 1976	191	indéterminé	environ 25 départements	type ND
15/12/1979	Tempête du 15 décembre 1979	169	indéterminé	18 départements	type Wd
21/12/1979	Tempête en Méditerranée 21 au 22 décembre 1979	194	indéterminé	6 départements	type NE
27/12/1979	Tempête du 27 et 28 décembre 1979	148	indéterminé	environ 15%	type SW
06/11/1982	Tempête du 6 au 8 novembre 1982	216	exceptionnel	43%	type Ss
30/09/1983	Tino	151	non pertinent	moins de 2%	type NE
26/11/1983	Tempête du 26 et 27 novembre 1983	144	exceptionnel	43%	type ND
23/01/1984	Tempête du 23 et 24 janvier 1984	166	fort	23%	type ND
06/02/1984	Tempête du 6 au 9 février 1984	108	modéré/exceptionnel	12%/52%	type ND
09/02/1984	Tempête en Méditerranée 9 au 11 février 1984	148	indéterminé	12 départements	type NE
04/10/1984	Hortense	166	modéré	11%	type SD
22/11/1984	Tempête du 23 et 24 novembre 1984	166	fort	39%	type WD
24/03/1986	Tempête du 24 et 25 mars 1986	173	fort	39%	type WD
07/06/1987	Tempête du 7 juin 1987	126	modéré	environ 8%	type Sd
15/10/1987	L'ouragan	216	exceptionnel	32%	type SW
22/01/1988	Tempête du 22 janvier 1988	126	fort	27%	type ND
25/01/1990	Daria	176	fort	38%	type WD
03/02/1990	Herta	162	exceptionnel	47%	type SW

Date de début	Nom Tempête	Vent instantané maximal (km/h)	Indice de sévérité	Surface du territoire touché	Classification Drevetou
26/02/1990	Viviane	166	indéterminé	52%/28%	type ND
28/02/1990	Wiebke	176	fort	28%	type ND
18/12/1991	Tempête en Méditerranée du 18 au 25 décembre 1991	205	non pertinent	entre 30 et 40%	type ND et NE
20/12/1991	Tempête en Méditerranée le 20 décembre 1991	184	modéré	10%	type NE
22/12/1991	Tempête en Méditerranée le 22 décembre 1991	191	modéré	8%	type NE
12/09/1993	Tempête du 12 au 13 septembre 1993	140	modéré	5%	type Wd
05/01/1994	Tempête du 5 au 7 janvier 1994	158	indéterminé	quelques pourcents	type OR
07/02/1996	Tempête du 7 au 8 février 1996	180	fort	20%	type ND
16/12/1997	Tempête en Méditerranée 16 au 17 décembre 1997	180	modéré	7%	type SE
02/01/1998	Tempête du 2 janvier 1998	191	modéré	11%	type Wd
04/01/1998	Tempête du 4 janvier 1998	180	modéré	9%	type Wd
05/01/1998	Tempête du 5 janvier 1998	166	modéré	4%	type Wd
12/11/1999	Tempête en Méditerranée du 12 novembre 1999	144	non pertinent	moins de 2%	type E
26/12/1999	Lothar	173	exceptionnel	56%	type WD
27/12/1999	Martin	166	exceptionnel	50%	type ND
30/10/2000	Oratia	151	modéré	9%	type Wd
05/11/2000	Rebekka	155	modéré	2%	type WD
10/11/2001	Torsten	144	indéterminé	le quart sud est du pays	type E
21/02/2002	Zarah	173	modéré	2%	type NE
27/10/2002	Jeanett	130	modéré	8%	type Wd
02/01/2003	Calvann	122	fort	19%	type WD
15/07/2003	Episodes orageux du 15 juillet 2003	158	modéré	2%	type OR
01/12/2003	Tempête en Méditerranée 1er au 4 décembre 2003	155	modéré	2%	type E
12/01/2004	Les tempêtes du 12 au 13 janvier 2004	193	modéré	11%/5%	type Nd
17/12/2004	Dagmar	162	fort	18%	type Wd
03/10/2006	Renate	141	modéré	8%	type OR
08/12/2006	Véra	144	fort	18%	type Sd
26/12/2008	Britta	164	indéterminé	10 départements	type NE
24/01/2009	Klaus	191	fort	19%	type SD
09/02/2009	Quinten	133	fort	33%	type Wd
27/02/2010	Xynthia	238	exceptionnel	49%	type SD
16/12/2011	Joachim	192	fort	24%	type ND
05/01/2012	Andréa	170	fort	16%	type ND
28/04/2012	Queenie	170	modéré	9%	type SE
27/10/2012	Tempête en Méditerranée du 28 octobre 2012	189	modéré	7%	type NE

Date de début	Nom Tempête	Vent instantané maximal (km/h)	Indice de sévérité	Surface du territoire touché	Classification Drevetton
23/12/2013	Dirk	143	fort	15%	type WD
04/11/2014	Qendresa	181	modéré	4%	type Sd
05/03/2015	Anton	151	modéré	5%	type NE
06/03/2017	Zeus	190	fort	30%	type ND
03/01/2018	Eleanor	185	fort	27%	type ND
13/12/2019	Tempête du 13 décembre 2019	176	fort	29%	type ND
10/02/2020	Ciara	219	fort	23%	type ND
02/10/2020	Alex	186	modéré	2%	type Wd

### Classification Drevetton



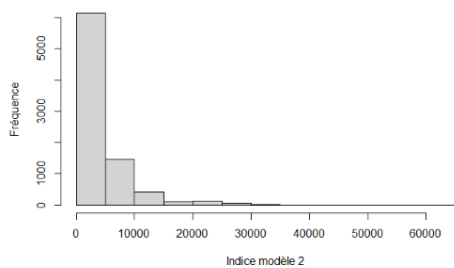
### A.3 Étude de la distribution de l'indice pour différents scénarios, année 2020

Rappel : attribution d'un numéro à chaque couple

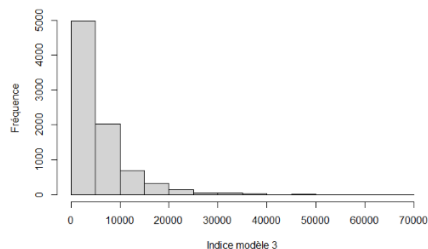
Numéro de modèle	Couple GCM/RCM
Modèle 1	CNRM - CM5 / ALADIN63
Modèle 2	CNRM - CM5 / Racmo22E v2
Modèle 3	EC - EARTH / Racmo22E v2
Modèle 4	EC - EARTH / RCA4
Modèle 5	IPSL - CM5A - MR / RCA4
Modèle 6	IPSL - CM5A - MR / WRF381P
Modèle 7	HadGEM2 - ES / CCLM4 - 8 - 17
Modèle 8	HadGEM2 - ES / RegCM4 - 6
Modèle 9	MPI - ESM - LR / CCLM4 - 8 - 17
Modèle 10	MPI - ESM - LR / REMO 2009
Modèle 11	NorESM1 - M / REMO 2015
Modèle 12	NorESM1 - M / HIRHAM5 v3

TABLE A.1 : Attribution d'un numéro de modèle à chaque couple GCM/RCM

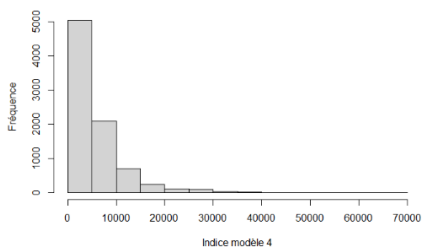
**Histogrammes illustrant la répartition de l'indice tempête en fonction du modèle pour l'année 2020**



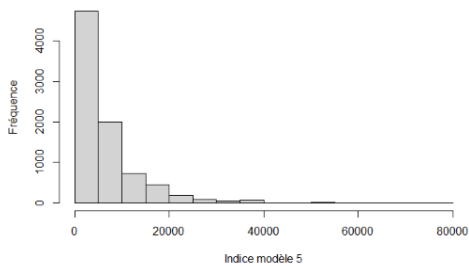
(a) Modèle 2



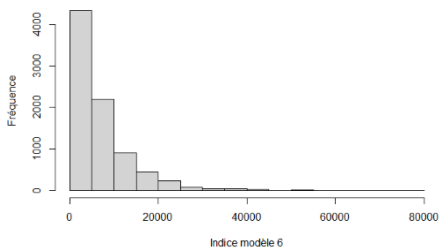
(b) Modèle 3



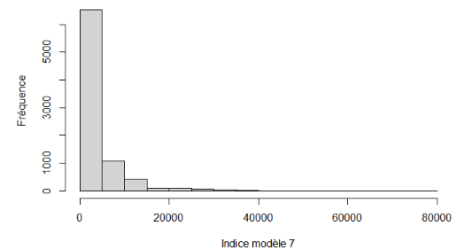
(c) Modèle 4



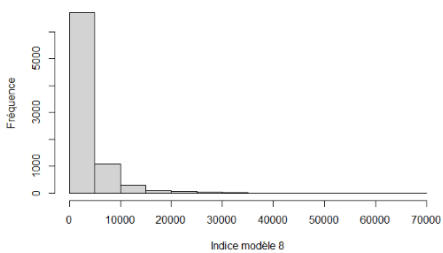
(d) Modèle 5



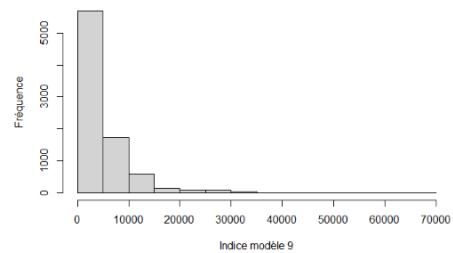
(e) Modèle 6



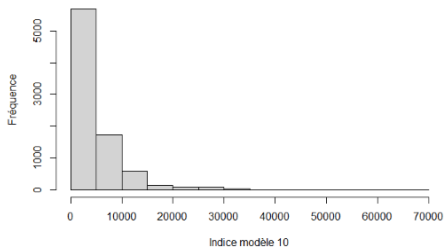
(f) Modèle 7



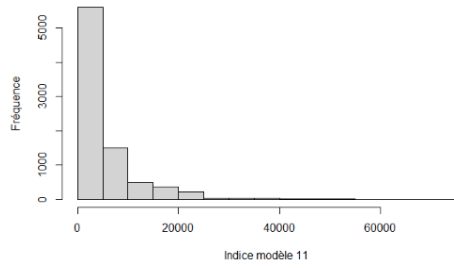
(g) Modèle 8



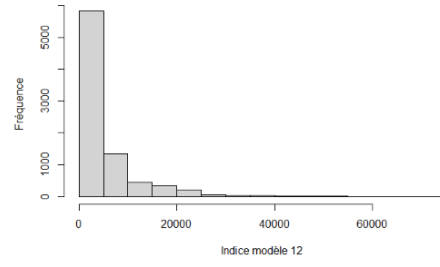
(h) Modèle 9



(i) Modèle 10

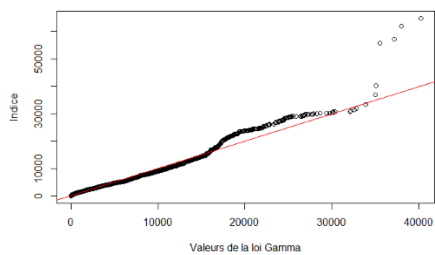


(a) Modèle 11

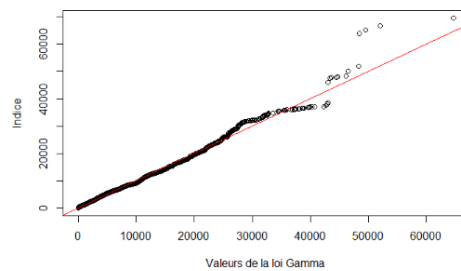


(b) Modèle 12

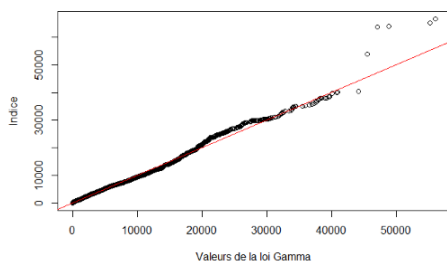
QQ-Plots de la loi Gamma pour les différents modèles de l'année 2020



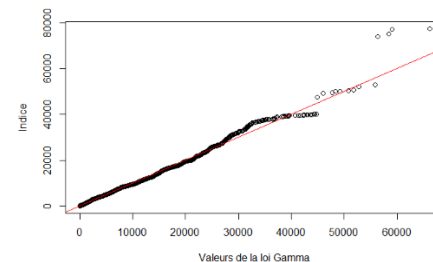
(a) Modèle 2



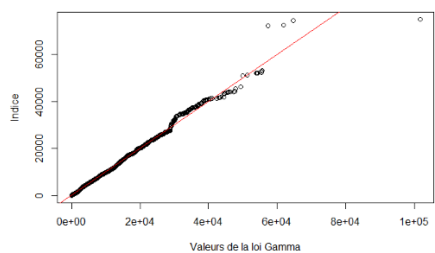
(b) Modèle 3



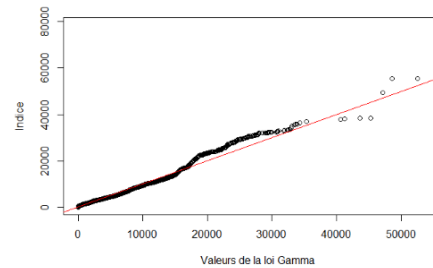
(c) Modèle 4



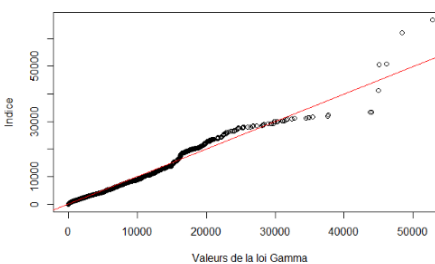
(d) Modèle 5



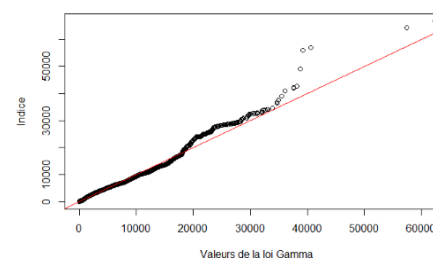
(e) Modèle 6



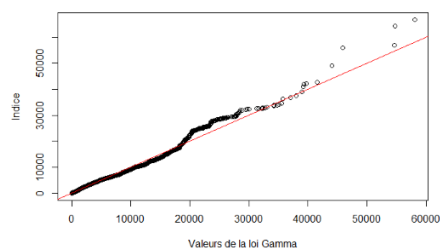
(f) Modèle 7



(g) Modèle 8

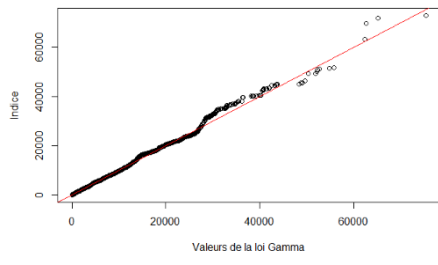


(h) Modèle 9

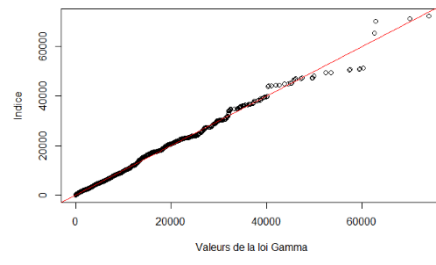


(i) Modèle 10





(a) Modèle 11



(b) Modèle 12