

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

Par : Alexis Bastos

**Titre du mémoire :**

*Les solutions paramétriques dans un contexte de « hard-market » : une application au risque cyclonique*

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

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

Membres présents du jury de la  
filière :

Signature :

Entreprise :

Nom : Gras Savoye Willis Towers  
Watson


Signature :

Directeur de mémoire en  
entreprise

Membres présents du jury de  
l'Institut des Actuares :

Signature :

Nom : Aurélien Schwachtgen

Signature : 

Invité :

Nom :

Signature :

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

Signature du responsable  
entreprise :



Signature du candidat :



---

# Résumé

Depuis fin 2018, le marché de l'assurance des entreprises est en plein redressement : les taux de prime augmentent, les capacités sont limitées et les garanties sont sous pression. Dans ce contexte, les entreprises ont besoin d'une capacité complémentaire au marché traditionnel de l'assurance afin de respecter leurs critères de tolérance au risque.

L'objectif de ce mémoire est d'étudier comment une solution alternative de transfert de risque, ici une solution d'assurance paramétrique, peut venir compléter le programme d'assurance d'une entreprise. Plus précisément, nous nous intéressons au cas d'une société étant confrontée à un renouvellement difficile de sa police Dommages Directs et Pertes d'Exploitation à cause du redressement du marché et d'une forte exposition au risque cyclonique dans le bassin nord-atlantique.

Après avoir donné les principales causes et conséquences du redressement du marché, nous présentons le fonctionnement des solutions d'assurance paramétrique ainsi que leurs intégrations dans les programmes traditionnels d'assurance. Nous abordons ensuite la modélisation du risque cyclonique et créons un catalogue d'événements stochastiques afin de quantifier au mieux les impacts des cyclones sur les sites de l'entreprise étudiée. Une fois l'impact quantifié, il est alors possible de structurer des solutions indicelles afin de couvrir le risque cyclonique.

**Mots clés** : *Hard Market*, Assurance Dommages, Assurance Paramétrique - Risque Cyclonique - Modélisation stochastique

---

# Abstract

Since the end of 2018, the corporate insurance market has been in a hard-market situation : premium rates are rising, capacity is limited and covers are under pressure. In this context, companies need complementary capacity to the traditional insurance market in order to meet their risk tolerance criteria.

The purpose of this paper is to investigate how an alternative risk transfer solution, in this case a parametric insurance solution, can be added to a company's insurance programme. More precisely, we are interested in the case of a company facing a difficult renewal of its Property Damage, Business Interruption policy due to the hard-market and a strong exposure to tropical cyclone risk in the North Atlantic basin.

After outlining the main causes and consequences of the hard-market situation, we present the way parametric insurance solutions work and how they can be integrated into traditional insurance programmes. We then discuss the modelling cyclone risk and create a catalogue of stochastic events in order to quantify the impact of cyclones on the company's sites. Once the impact is quantified, it is then possible to structure parametric solutions to cover cyclone risk.

**Key words** : *Hard Market*, Property Insurance, Parametric Insurance - Cyclone Risk - Stochastic Modelling

---

# Synthèse

Afin de transférer les risques ne rentrant pas dans leur appétit et leur seuil de tolérance aux risques, les entreprises de toutes tailles et secteurs font appel au marché de l'assurance. Les entreprises se couvrent généralement pour une grande variété de risques, qui sont souvent regroupés en trois familles distinctes : les risques concernant leurs salariés, leurs biens et leurs responsabilités.

Les sociétés disposent d'un grand nombre de garanties d'assurances permettant d'atténuer les effets des risques auxquelles elles sont exposées. Par exemple, pour couvrir leurs biens, elles souscrivent généralement à des polices Dommages Directs et Pertes d'Exploitation. L'achat des garanties d'assurance par les entreprises est un élément important de leur processus de gestion des risques, et est donc un marché porteur et stratégique pour les assureurs.

Néanmoins, depuis fin 2018 le marché de l'assurance pour les entreprises est dans une phase de redressement technique. Ce redressement du marché a plusieurs effets :

- Les taux de primes augmentent drastiquement comme cela peut-être observé sur la figure ci-dessous,
- Les capacités accordées par les assureurs diminuent, ils sont plus conservateurs dans les risques qu'ils prennent et moins enclins à accorder de la capacité,
- Les garanties sont sous pression, les souscripteurs sont plus vigilants sur les garanties et les conditions appliquées,
- La souscription est plus rigoureuse, les niveaux de prévention des sites assurés sont minutieusement examinés et les zones d'accumulation pour les catastrophes naturelles sont suivies avec la plus grande attention.

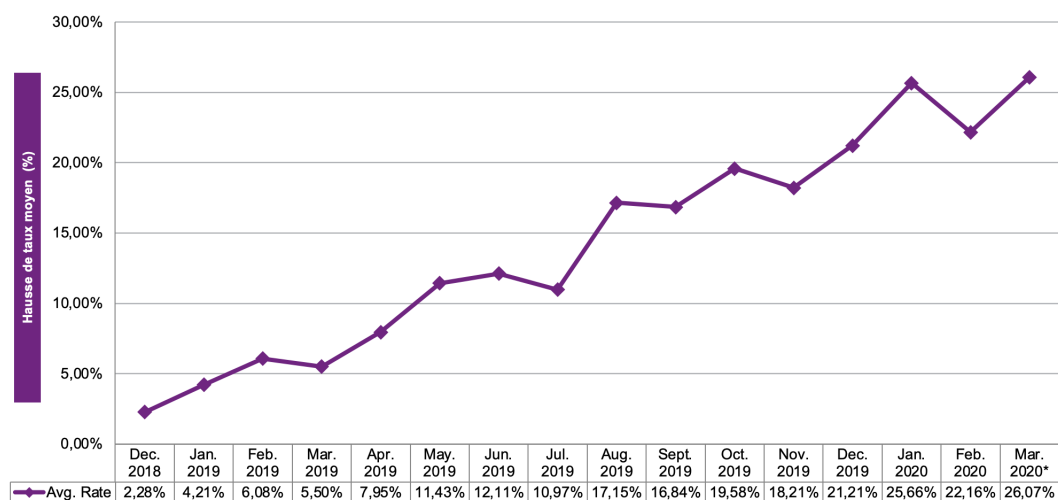


FIGURE 1 – Hausse des taux de prime - *Gras Savoye Willis Towers Watson*

---

Dans ce contexte de redressement du marché, les entreprises ont besoin de capacité complémentaire et supplémentaire par rapport à celles obtenues via le marché traditionnel de l'assurance. C'est dans ce contexte que s'inscrivent les solutions alternatives de transfert de risque proposées par l'équipe *Alternative Risk Transfer* du courtier *Willis Towers Watson*.

Ces solutions de financement des risques sont des solutions sur-mesure qui répondent aux limites des marchés traditionnels d'assurance et permettent d'accéder à différentes formes de capital. Elles peuvent être utilisées lorsque les capacités sont inexistantes ou sous-limitées pour certains risques, lorsque les prix sont très volatiles ou que le risque de contrepartie est important.

Parmi les solutions proposées par l'équipe *Alternative Risk Transfer*, les plus populaires dans le contexte de redressement de marché sont les solutions paramétriques. Les solutions paramétriques, ou indicielles, sont des couvertures permettant une indemnisation forfaitaire, basée sur les mesures d'un indice pré-défini ou sur l'occurrence d'un événement.

Ainsi, après un sinistre, plutôt que d'indemniser directement la perte subie par un assuré, les solutions indicielles indemnisent en fonction des caractéristiques de l'événement sous-jacent, ou de la valeur d'un indice corrélé avec les pertes de l'assuré. Ces solutions ont de nombreux avantages, parmi lesquels :

- La rapidité du paiement des indemnisations, en général moins de 30 jours après la survenance d'un événement,
- L'apport d'une capacité supplémentaire et complémentaire au marché de l'assurance.
- Une flexibilité dans la conception de la couverture,
- Un accès à d'autres porteurs de risques, comme les marchés financiers par exemple.

Afin d'illustrer l'utilisation des solutions paramétriques dans ce contexte de redressement du marché, nous nous intéressons dans ce mémoire à une entreprise ayant été confrontée à des difficultés lors du renouvellement de sa police Dommages Directs et Pertes d'Exploitations. Cette société, très exposée au risque cyclonique dans le bassin nord-atlantique, a vu les franchises de sa police d'assurance Dommages augmenter fortement, comme cela a été le cas pour d'autres entreprises à cause du marché durcissant.

L'objectif de ce mémoire est de proposer à l'entreprise étudiée une solution d'assurance paramétrique pour les cyclones, afin de couvrir les pertes sous franchise qui ne sont plus couvertes après l'augmentation de la franchise de sa police d'assurance Dommages. Le but de cette solution est de permettre à l'entreprise de garder le même appétit au risque que ce qu'elle avait précédemment dans des conditions de marché "soft".

La mise en place d'une couverture indicielle nécessite une bonne connaissance du péril sous-jacent ainsi que de l'exposition de l'assuré. Il est donc nécessaire d'avoir une modélisation précise du risque cyclonique pour ainsi pouvoir établir le profil de risque de l'entreprise.

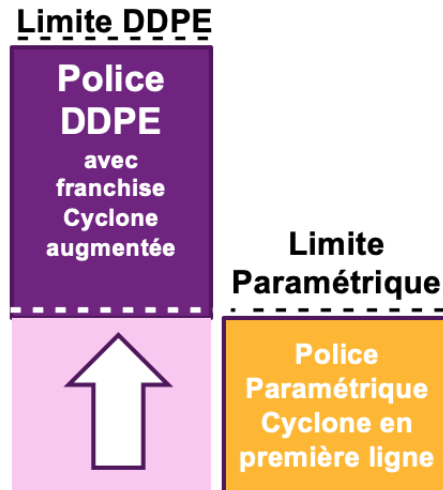


FIGURE 2 – Assurance paramétrique en rachat de franchise

Dans le but de quantifier l'exposition de la société au risque cyclonique, pour ensuite pouvoir structurer une couverture paramétrique, nous nous intéressons dans un premier temps au risque cyclonique dans le bassin nord-atlantique.

Les cyclones sont des phénomènes météorologiques complexes et particulièrement destructeurs : ils produisent des vents violents qui endommagent les infrastructures et les bâtiments, ils créent des ondes de tempête provoquant des montées des eaux, ils sont accompagnés d'une houle cyclonique créant des vagues pouvant atteindre 20 mètres, et ils engendrent de fortes pluies pouvant provoquer des inondations. Ce potentiel destructeur en fait un risque particulièrement important pour les populations, les entreprises et les gouvernements des zones intertropicales.

Afin de quantifier ce risque, nous nous intéressons à la modélisation du risque cyclonique, et plus particulièrement à l'aléa vent. Pour ce faire, nous utilisons les données de la *National Oceanic and Atmospheric Administration* qui alimente d'année en année une base de données contenant l'historique des trajectoires et des caractéristiques physiques des cyclones depuis 1851. Pour des raisons de qualité des données, l'historique utilisé dans ce mémoire commence à 1980.

Les cyclones de forte intensité sont des événements avec une faible fréquence d'occurrence, il est donc nécessaire de disposer d'événements autres que les événements historiques afin d'avoir une vision précise sur le risque auquel est exposé la société étudiée. Nous nous intéressons donc à la création d'un catalogue d'événements stochastiques, créé à partir des données historiques.

Tout d'abord, le nombre annuel d'événements est modélisé par une loi binomiale négative. Ce choix de loi est validé par un test d'adéquation du khi-deux. Ensuite, pour chaque cyclone modélisé, un point et un mois de départ lui est attribué, selon une distribution basée sur les données historiques.

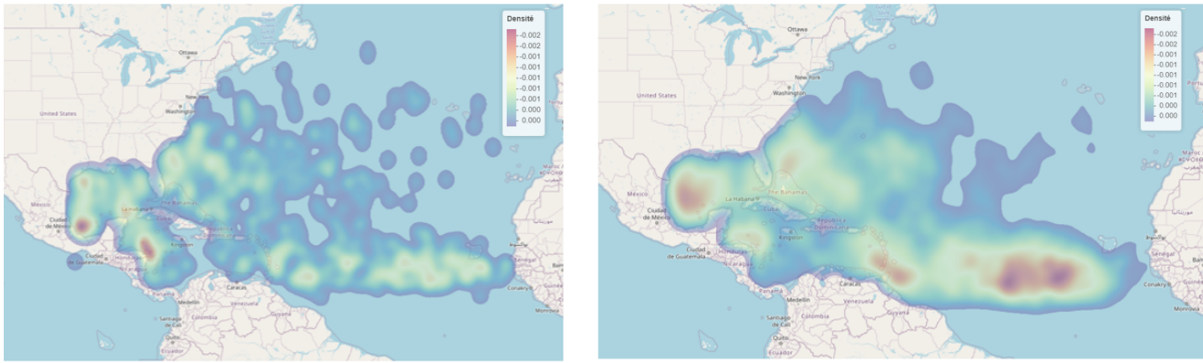


FIGURE 3 – Densité des points d'origine, historique à gauche, modélisé sur 1000 ans à droite

Les trajectoires des cyclones sont ensuite modélisées par des modèles linéaires multiples. Plus précisément, ce sont les variations de longitude et de latitude qui sont modélisées pas à pas. Afin de tenir compte de l'aspect parabolique des cyclones dans le bassin nord-atlantique, le bassin est séparé en tranches de 5 degrés par 5 degrés, et les latitudes et longitudes sont modélisées pour chaque tranche. Les paramètres des modèles choisis ainsi que la distribution des erreurs sont calculés en utilisant la théorie relative aux modèles linéaires.

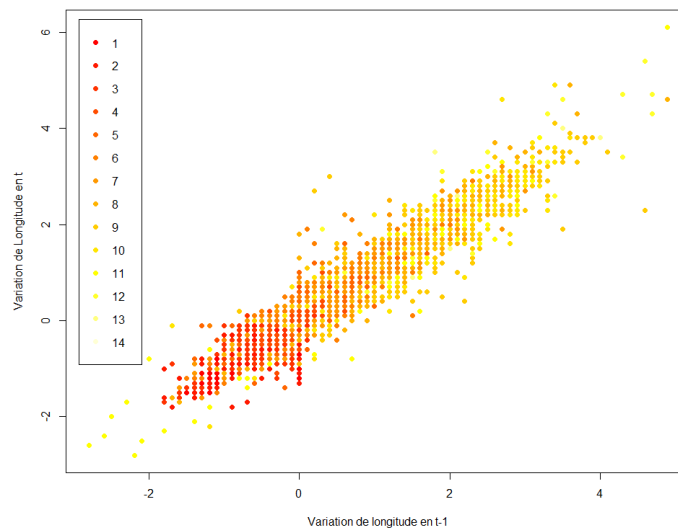


FIGURE 4 – Nuage de points pour les variations de longitude entre  $t$  et  $t - 1$ , et couleurs en fonction de la latitude

Dans un second temps, les caractéristiques physiques des cyclones sont modélisées, à savoir la vitesse maximale des vents du cyclone et la pression minimale centrale. Une fois l'ensemble des caractéristiques physiques modélisées, un catalogue d'événements stochastiques correspondant à 10,000 saisons cycloniques est créé en suivant la méthode suivante :

- Pour chaque saison, tirage aléatoire du nombre de cyclones à simuler,
- Pour chaque cyclone, tirage aléatoire du point de départ,
- Pour chaque point de départ, modélisation de la latitude et de la longitude du point suivant et modélisation des caractéristiques physiques du cyclone à chaque point. Le cyclone se dissipe lorsque la pression minimale centrale est supérieure à la pression atmosphérique.

Lorsque le catalogue d'événements stochastiques a été créé, nous vérifions que les distributions des vitesses de vent et du nombre de passage de cyclones dans toutes les zones du globe sont bien identiques aux distributions dans la base de données historiques. Pour ce faire, les distributions de sous-catalogues de 40 saisons cycloniques sont comparées aux 40 saisons historiques de la base de données *IBTrACS*.

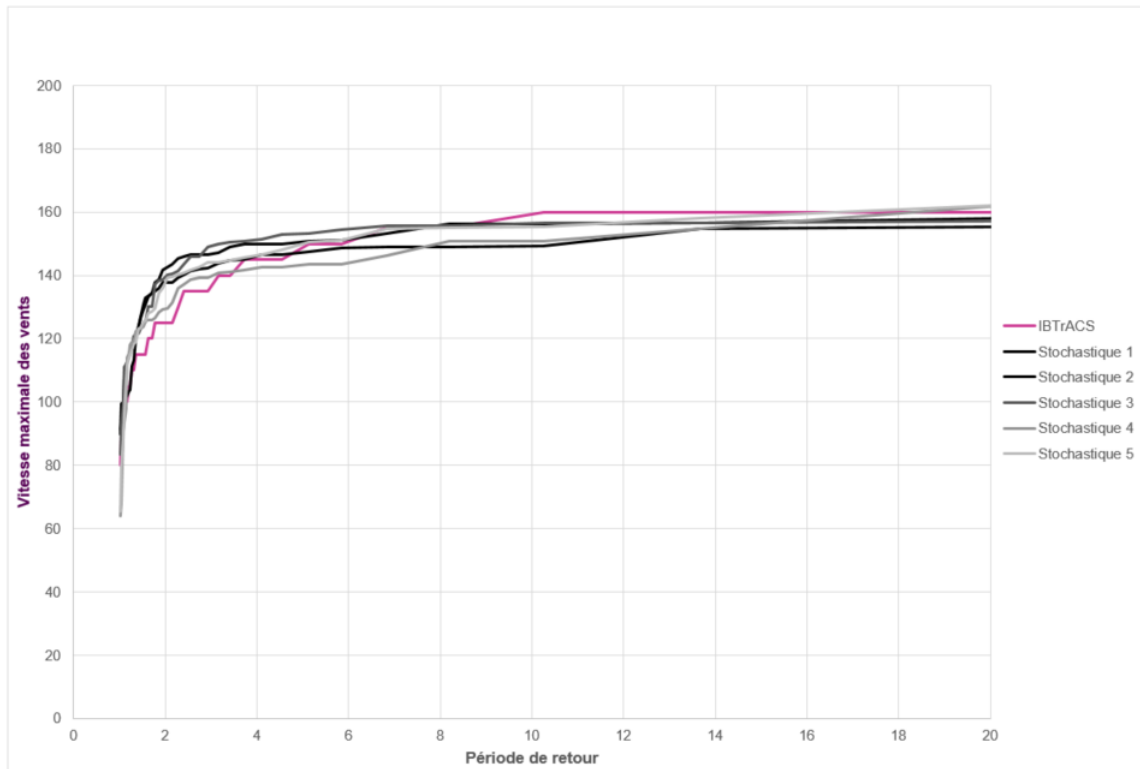


FIGURE 5 – Probabilité annuelle de dépassement - Historique et Stochastique

Une fois le catalogue d'événements validé, les vitesses de vents aux différents sites assurés sont calculées pour tous les cyclones du catalogue, dans le but d'estimer ensuite les pertes subies par l'entreprise étudiée. L'estimation des pertes est faite à l'aide de courbes de vulnérabilité propres à chaque site assuré.

Ainsi, dans la troisième partie du mémoire, nous nous intéressons aux pertes estimées par le modèle et nous appliquons les conditions d'assurance sur ces pertes. Lorsque les conditions ont été appliquées, il est alors possible de quantifier l'impact de l'augmentation de la franchise pour l'entreprise étudiée. Au vu de l'appétit aux risques de la société, l'augmentation de la rétention causée par la franchise en pourcentage des valeurs assurées n'est pas jugée acceptable, et nous explorons donc différentes solutions d'assurance paramétrique permettant de couvrir les pertes sous franchise.

La première solution proposée est la solution nommée " *Cat-In-the-Box* ". Les indices utilisés dans cette solution paramétrique sont la vitesse de vent du cyclone et la distance entre le site assuré et le cyclone. En fonction de la valeur de ces deux paramètres, la société est indemnisée lors du passage d'un cyclone. Nous essayons de structurer la solution d'assurance paramétrique, c'est-à-dire de mettre en place une table d'indemnisation comme celle proposée ci-dessous.



		Distance entre l'œil du cyclone et le site assuré (en km)										
		20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Vitesse maximale des vents du cyclone (en km/h)	200	19.8%	19.3%	18.8%	18.3%	17.8%	17.3%	16.8%	16.4%	15.9%	15.4%	14.9%
	201	20.7%	20.2%	19.7%	19.2%	18.6%	18.1%	17.6%	17.1%	16.6%	16.1%	15.5%
	202	21.6%	21.1%	20.5%	20.0%	19.5%	18.9%	18.4%	17.8%	17.3%	16.8%	16.2%
	203	22.5%	22.0%	21.4%	20.8%	20.3%	19.7%	19.1%	18.6%	18.0%	17.5%	16.9%
	204	23.4%	22.8%	22.3%	21.7%	21.1%	20.5%	19.9%	19.3%	18.7%	18.2%	17.6%
	205	24.3%	23.7%	23.1%	22.5%	21.9%	21.3%	20.7%	20.1%	19.5%	18.9%	18.2%
	206	25.2%	24.6%	24.0%	23.3%	22.7%	22.1%	21.4%	20.8%	20.2%	19.5%	18.9%
	207	26.1%	25.5%	24.8%	24.2%	23.5%	22.9%	22.2%	21.6%	20.9%	20.2%	19.6%
	208	27.0%	26.4%	25.7%	25.0%	24.3%	23.6%	23.0%	22.3%	21.6%	20.9%	20.3%
	209	27.9%	27.2%	26.5%	25.8%	25.1%	24.4%	23.7%	23.0%	22.3%	21.6%	20.9%
	210	28.8%	28.1%	27.4%	26.7%	25.9%	25.2%	24.5%	23.8%	23.1%	22.3%	21.6%
	211	29.7%	29.0%	28.2%	27.5%	26.8%	26.0%	25.3%	24.5%	23.8%	23.0%	22.3%
	212	30.6%	29.9%	29.1%	28.3%	27.6%	26.8%	26.0%	25.3%	24.5%	23.7%	23.0%
	213	31.5%	30.7%	30.0%	29.2%	28.4%	27.6%	26.8%	26.0%	25.2%	24.4%	23.6%
	214	32.4%	31.6%	30.8%	30.0%	29.2%	28.4%	27.6%	26.8%	25.9%	25.1%	24.3%
	215	33.3%	32.5%	31.7%	30.8%	30.0%	29.2%	28.3%	27.5%	26.7%	25.8%	25.0%
	216	34.2%	33.4%	32.5%	31.7%	30.8%	30.0%	29.1%	28.2%	27.4%	26.5%	25.7%
	217	35.1%	34.3%	33.4%	32.5%	31.6%	30.7%	29.9%	29.0%	28.1%	27.2%	26.4%
	218	36.0%	35.1%	34.2%	33.3%	32.4%	31.5%	30.6%	29.7%	28.8%	27.9%	27.0%
	219	36.9%	36.0%	35.1%	34.2%	33.2%	32.3%	31.4%	30.5%	29.5%	28.6%	27.7%
220	37.8%	36.9%	35.9%	35.0%	34.1%	33.1%	32.2%	31.2%	30.3%	29.3%	28.4%	

FIGURE 6 – Exemple d'indemnisation sous forme de gradient

Les résultats pour la solution cat-in-the-box sont peu probants et nous nous intéressons donc à une autre solution d'assurance paramétrique, ayant directement comme indice les vitesses de vent au site assuré. Cette solution est plus simple à structurer après le travail effectué dans le chapitre II.

Finalement, nous tarifons la solution d'assurance paramétrique choisie et nous l'incorporons dans le programme d'assurance de la société étudiée. Afin de juger de la pertinence de la mise en place de cette solution, nous nous intéressons au coût total du risque pour l'entreprise. Nous concluons par le fait que les solutions indicielles peuvent être particulièrement intéressantes pour les entreprises dans ce contexte de redressement du marché.

# Synthesis

In order to transfer risks that do not fit within their appetite and risk tolerance, companies of all sizes and sectors turn to the insurance market. Companies typically insure themselves for a wide variety of risks, which are often grouped into three distinct families : employee, property and liability risks.

Companies have a wide range of insurance cover to mitigate the effects of the risks to which they are exposed. For example, to cover their assets, they typically purchase Property Damage and Business Interruption policies. The purchase of insurance cover by companies is an important part of their risk management process, and is therefore a growing and strategic market for insurers.

Nevertheless, since the end of 2018 the corporate insurance market has been in a hard-market situation. This hard-market phase has several effects :

- Premium rates are increasing drastically as can be seen in the figure below,
- The capacities granted by insurers are decreasing, they are more conservative in the risks they take and less inclined to grant capacity,
- Guarantees are under pressure, underwriters are more vigilant about the guarantees and conditions applied,
- Underwriting is more rigorous, prevention levels of insured sites are scrutinised and accumulation areas for natural disasters are monitored with the utmost care.

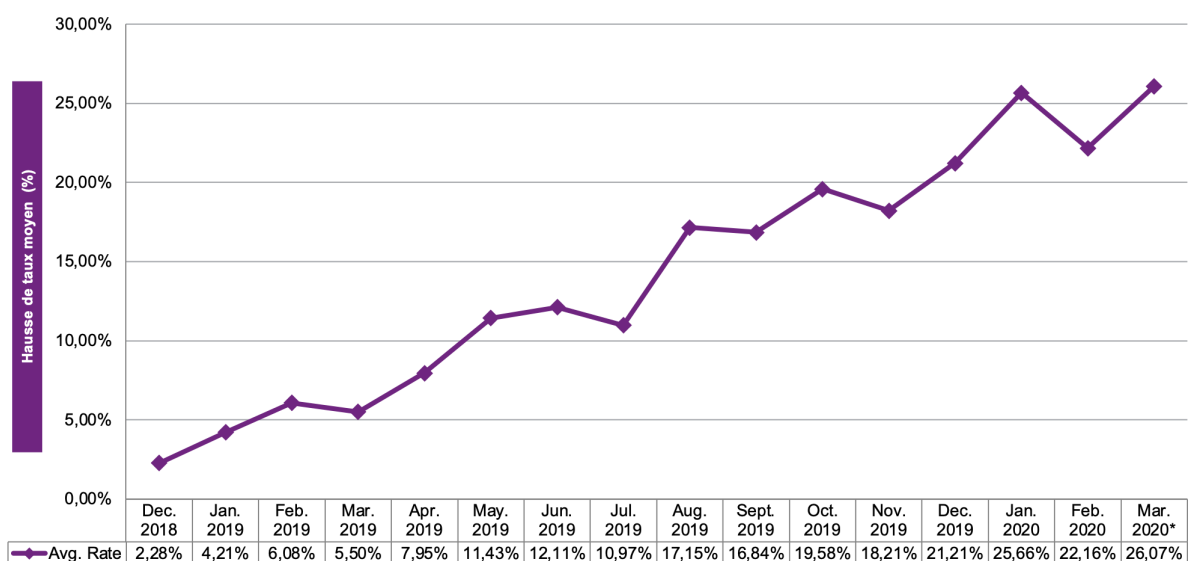


FIGURE 7 – Premium rates increase - *Gras Savoye Willis Towers Watson*

---

In this context of market recovery, companies need complementary and additional capacity to that obtained from the traditional insurance market. It is in this context that the alternative risk transfer solutions proposed by the Alternative Risk Transfer team of the brokerage firm Willis Towers Watson fit in.

These risk financing solutions are tailor-made solutions that address the limitations of traditional insurance markets and provide access to different forms of capital. They can be used where capacity is non-existent or under-limited for certain risks, where prices are highly volatile or where counterparty risk is significant.

Among the solutions proposed by the Alternative Risk Transfer team, the most popular in the context of market recovery are parametric solutions. Parametric, or index-based, solutions are hedges that provide a lump-sum compensation based on the measurements of a pre-defined index or on the occurrence of an event.

Thus, after a loss, rather than compensating directly for the loss suffered by an insured, index-based solutions compensate based on the characteristics of the underlying event, or the value of an index correlated with the insured's losses. These solutions have many advantages, including :

- The speed of settlement, generally less than 30 days after the occurrence of an event,
- An additional and complementary capacity to the insurance market.
- Flexibility in the design of the cover,
- Access to other risk carriers, such as the financial markets for example.

In order to illustrate the use of parametric solutions in this context of hard-market, we focus in this paper on a company that faced difficulties in renewing its Direct Damage and Business Interruption policy. This company, highly exposed to the hurricane risk in the North Atlantic basin, saw the deductibles on its property policy increase dramatically, as has been the case for other companies due to the hardening market.

The objective of this paper is to propose to the company studied a parametric insurance solution for tropical cyclones, in order to cover the losses under the deductible that are no longer covered after the increase in the deductible of its property insurance policy. The aim of this solution is to enable the company to maintain the same risk appetite as it had previously under soft market conditions.

The implementation of an index cover requires a good knowledge of the underlying peril as well as of the insured's exposure. It is therefore necessary to have a precise modelling of cyclone risk in order to establish the company's risk profile.

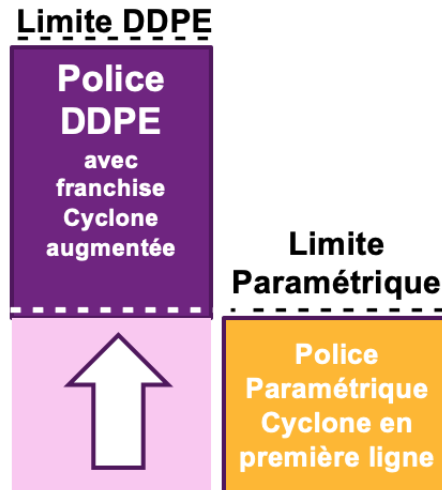


FIGURE 8 – Parametric insurance as a deductible buy-back

In order to quantify the company's exposure to cyclone risk and then structure a parametric solution, we first focus on cyclone risk in the North Atlantic basin.

Cyclones are complex and particularly destructive weather phenomena : they produce strong winds that damage infrastructure and buildings, they create storm surges that cause water to rise, they are accompanied by cyclonic swells that create waves of up to 20 metres, and they generate heavy rainfall that can cause flooding. This destructive potential makes them a particularly significant risk to people, businesses and governments in the inter-tropics.

In order to quantify this risk, we are interested in modelling the cyclonic risk, and more particularly the wind hazard. To do this, we use data from the National Oceanic and Atmospheric Administration, which has maintained a database containing the historical trajectories and physical characteristics of cyclones since 1851. For reasons of data quality, the history used in this paper begins in 1980.

High-intensity cyclones are events with a low frequency of occurrence, so it is necessary to have events other than the historical ones in order to have an accurate view of the risk to which the society under study is exposed. We are therefore interested in creating a catalogue of stochastic events, created from historical data.

Firstly, the annual number of events is modelled by a negative binomial distribution. This choice of law is validated by a chi-square test of adequacy. Then, for each modelled cyclone, a point and a month of departure is assigned to it, according to a distribution based on the historical data.

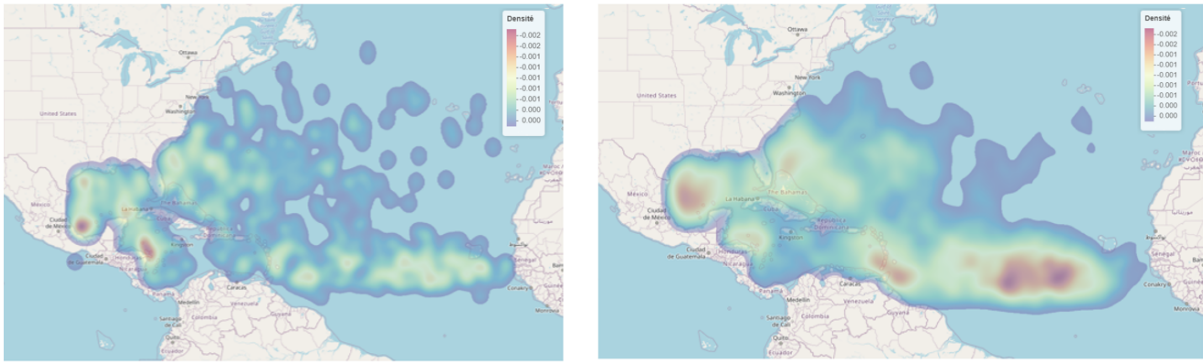


FIGURE 9 – Density of origin points, historical on the left, modelled over 1000 years on the right

The trajectories of the cyclones are then modelled by multiple linear models. More precisely, the longitude and latitude variations are modelled step by step. In order to take into account the parabolic aspect of cyclones in the North Atlantic basin, the basin is separated into 5 degree by 5 degree slices, and latitudes and longitudes are modelled for each slice. The parameters of the selected models and the distribution of errors are calculated using linear model theory.

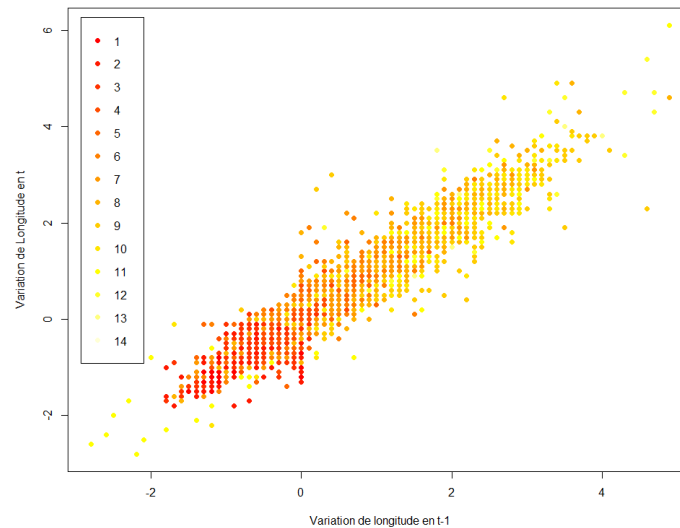


FIGURE 10 – Scatterplot for longitude variations between  $t$  and  $t-1$ , and colours as a function of latitude

In a second step, the physical characteristics of the cyclones are modelled, namely the maximum wind speed of the cyclone and the minimum central pressure. Once all the physical characteristics have been modelled, a catalogue of stochastic events corresponding to 10,000 cyclone seasons is created using the following method :

- For each season, randomly draw the number of cyclones to simulate,
- For each cyclone, random selection of the starting point,
- For each starting point, model the latitude and longitude of the next point and model the physical characteristics of the cyclone at each point. The cyclone dissipates when the minimum central pressure is greater than the atmospheric pressure.

Once the stochastic event catalogue has been created, we check that the distributions of wind speeds and the number of cyclone passages in all areas of the globe are identical to the distributions in the historical database. To do this, the distributions of sub-catalogues of 40 cyclone seasons are compared to the 40 historical seasons in the *IBTrACS* database.

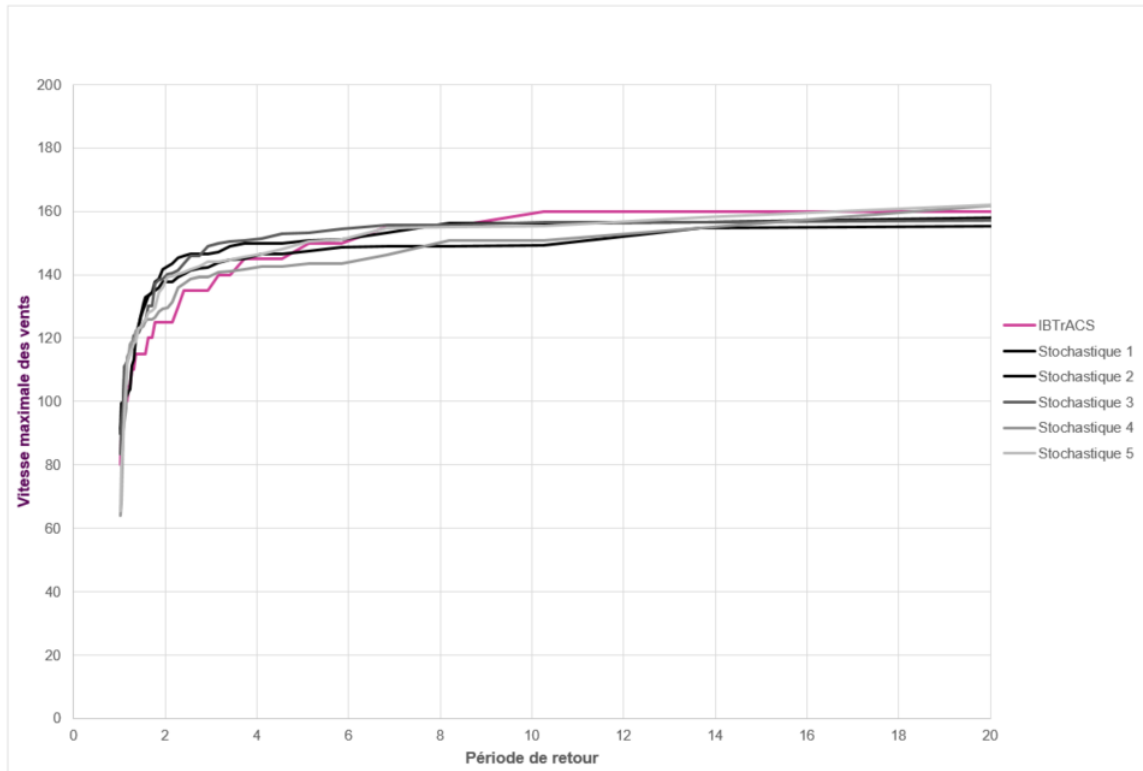


FIGURE 11 – Annual probability of exceedance - Historical and Stochastic

Once the catalogue of events has been validated, the wind speeds at the various insured sites are calculated for all the cyclones in the catalogue, with the aim of then estimating the losses suffered by the company under study. Losses are estimated using vulnerability curves specific to each insured site.

Thus, in the third part of the paper, we look at the losses estimated by the model and apply the insurance conditions to these losses. Once the conditions have been applied, it is then possible to quantify the impact of the increase in the deductible for the company studied. Given the company's risk appetite, the increase in retention caused by the deductible as a percentage of insured values is not considered acceptable, and we therefore explore different parametric insurance solutions to cover the deductible losses.

The first solution proposed is the solution named "*Cat-In-the-Box*". The indexes used in this parametric solution are the wind speed of the cyclone and the distance between the insured site and the cyclone. Depending on the value of these two parameters, the company is compensated when a cyclone occurs. We try to structure the parametric insurance solution, i.e. to set up an indemnity table like the one proposed below.

		Distance entre l'œil du cyclone et le site assuré (en km)										
		20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Vitesse maximale des vents du cyclone (en km/h)	200	19.8%	19.3%	18.8%	18.3%	17.8%	17.3%	16.8%	16.4%	15.9%	15.4%	14.9%
	201	20.7%	20.2%	19.7%	19.2%	18.6%	18.1%	17.6%	17.1%	16.6%	16.1%	15.5%
	202	21.6%	21.1%	20.5%	20.0%	19.5%	18.9%	18.4%	17.8%	17.3%	16.8%	16.2%
	203	22.5%	22.0%	21.4%	20.8%	20.3%	19.7%	19.1%	18.6%	18.0%	17.5%	16.9%
	204	23.4%	22.8%	22.3%	21.7%	21.1%	20.5%	19.9%	19.3%	18.7%	18.2%	17.6%
	205	24.3%	23.7%	23.1%	22.5%	21.9%	21.3%	20.7%	20.1%	19.5%	18.9%	18.2%
	206	25.2%	24.6%	24.0%	23.3%	22.7%	22.1%	21.4%	20.8%	20.2%	19.5%	18.9%
	207	26.1%	25.5%	24.8%	24.2%	23.5%	22.9%	22.2%	21.6%	20.9%	20.2%	19.6%
	208	27.0%	26.4%	25.7%	25.0%	24.3%	23.6%	23.0%	22.3%	21.6%	20.9%	20.3%
	209	27.9%	27.2%	26.5%	25.8%	25.1%	24.4%	23.7%	23.0%	22.3%	21.6%	20.9%
	210	28.8%	28.1%	27.4%	26.7%	25.9%	25.2%	24.5%	23.8%	23.1%	22.3%	21.6%
	211	29.7%	29.0%	28.2%	27.5%	26.8%	26.0%	25.3%	24.5%	23.8%	23.0%	22.3%
	212	30.6%	29.9%	29.1%	28.3%	27.6%	26.8%	26.0%	25.3%	24.5%	23.7%	23.0%
	213	31.5%	30.7%	30.0%	29.2%	28.4%	27.6%	26.8%	26.0%	25.2%	24.4%	23.6%
	214	32.4%	31.6%	30.8%	30.0%	29.2%	28.4%	27.6%	26.8%	25.9%	25.1%	24.3%
	215	33.3%	32.5%	31.7%	30.8%	30.0%	29.2%	28.3%	27.5%	26.7%	25.8%	25.0%
	216	34.2%	33.4%	32.5%	31.7%	30.8%	30.0%	29.1%	28.2%	27.4%	26.5%	25.7%
	217	35.1%	34.3%	33.4%	32.5%	31.6%	30.7%	29.9%	29.0%	28.1%	27.2%	26.4%
	218	36.0%	35.1%	34.2%	33.3%	32.4%	31.5%	30.6%	29.7%	28.8%	27.9%	27.0%
219	36.9%	36.0%	35.1%	34.2%	33.2%	32.3%	31.4%	30.5%	29.5%	28.6%	27.7%	
220	37.8%	36.9%	35.9%	35.0%	34.1%	33.1%	32.2%	31.2%	30.3%	29.3%	28.4%	

FIGURE 12 – Example of compensation in the form of a gradient

The results for the cat-in-the-box solution are not very convincing and we are therefore interested in another parametric insurance solution, using the wind speeds at the insured site directly as an index. This solution is simpler to structure after the work done in chapter II.

Finally, we price the chosen parametric insurance solution and incorporate it into the insurance programme of the company under study. In order to judge the relevance of the implementation of this solution, we look at the total cost of risk for the company. We conclude that index-based solutions can be particularly interesting for companies in this context of market recovery.

---

# Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier Aurélien Schwachtgen pour son accompagnement, sa confiance et ses précieux conseils tout au long de mon alternance au sein de l'équipe *Alternative Risk Transfer* de *Willis Towers Watson*. Merci aussi de m'avoir fait découvrir les mondes fascinants du courtage, de l'assurance *corporate* et de l'ART.

Plus globalement, je remercie aussi le reste de l'équipe *ART* pour les différentes discussions constructives que nous avons pu avoir, et pour tout ce qu'ils m'ont appris pendant l'année passée avec eux.

Je remercie aussi les enseignants et l'administration de l'ISUP pour la qualité des enseignements dispensés tout au long des trois années passées au sein du cursus. En particulier, je tiens à remercier Maud Thomas ma tutrice académique.

Enfin, une attention particulière à ma famille et à mon entourage qui m'a soutenu et encouragé pendant mes études supérieures.



---

# Table des matières

---

<b>Introduction</b>	<b>19</b>
<b>I Cadre de l'étude et contexte</b>	<b>21</b>
I.1 Le groupe Willis Towers Watson . . . . .	21
I.1.1 Activité et chiffres clés . . . . .	21
I.1.2 Le département Risk & Analytics . . . . .	22
I.1.3 L'activité Transfert Alternatif des Risques . . . . .	23
I.2 Le risque pour une entreprise . . . . .	24
I.2.1 Gestion et appétit aux risques . . . . .	24
I.2.2 L'Entreprise Risk Management . . . . .	24
I.2.3 La tolérance aux risques . . . . .	25
I.2.4 Définition quantitative des seuils de tolérance aux risques . . . . .	26
I.2.4.1 Seuils de tolérance globaux . . . . .	26
I.2.4.2 Seuils de tolérance individuels . . . . .	27
I.3 L'assurance pour les entreprises . . . . .	28
I.3.1 Généralités . . . . .	28
I.3.2 L'assurance Dommages Directs et Pertes d'Exploitation . . . . .	29
I.3.2.1 Les biens assurés et exclus . . . . .	30
I.3.2.2 Les garanties Dommages Directs . . . . .	30
I.3.2.3 Les Pertes d'Exploitation . . . . .	31
I.3.2.4 Franchises et limites de garanties . . . . .	31
I.3.2.5 Résumé . . . . .	33
I.3.3 Le redressement du marché de l'assurance Dommages . . . . .	34
I.3.3.1 Les causes du redressement du marché . . . . .	34
I.3.3.2 L'augmentation des prix . . . . .	35
I.3.3.3 Diminution de la capacité . . . . .	36
I.3.3.4 Pression sur les garanties . . . . .	36
I.3.3.5 Une souscription plus rigoureuse . . . . .	36
I.4 Les solutions Alternatives de Transfert des Risques . . . . .	37
I.4.1 Les captives . . . . .	38
I.4.2 L'assurance structurée . . . . .	39
I.5 Les solutions paramétriques . . . . .	40
I.5.1 Généralités . . . . .	40
I.5.2 Les avantages . . . . .	41
I.5.3 Le risque de base . . . . .	44

I.5.4	Articulation entre assurance paramétrique et assurance traditionnelle . . . . .	46
I.5.4.1	L'option "carve-out" . . . . .	46
I.5.4.2	Option "Rachat de franchise" . . . . .	47
I.5.5	Résumé . . . . .	48
I.6	Étude de cas : Le paramétrique en complément du marché traditionnel . . . . .	49
I.6.1	Contexte . . . . .	49
I.6.2	Caractéristiques de l'assuré . . . . .	49
I.6.3	Objectif de l'étude . . . . .	50
<b>II</b>	<b>Le risque cyclonique dans le bassin Nord-Atlantique : Définition et modélisation</b>	<b>51</b>
II.1	Le risque cyclonique dans le bassin Nord-Atlantique . . . . .	51
II.1.1	Définition et généralités . . . . .	51
II.1.2	Les caractéristiques physiques des cyclones tropicaux . . . . .	53
II.1.2.1	Formation . . . . .	53
II.1.2.2	Structure, cycle de vie et classification . . . . .	53
II.2	La modélisation du risque cyclonique . . . . .	56
II.2.1	Les modèles catastrophe . . . . .	56
II.2.2	Module aléa pour les cyclones . . . . .	57
II.2.2.1	Les données historiques . . . . .	57
II.2.2.2	La modélisation de l'aléa pour les cyclones . . . . .	59
II.2.2.3	Modélisation du nombre annuel d'événements . . . . .	59
II.2.2.4	Modélisation de la genèse du cyclone . . . . .	62
II.2.2.5	Modélisation de la trajectoire . . . . .	63
II.2.2.6	Modélisation des caractéristiques physiques . . . . .	71
II.2.2.7	Création et validation du catalogue d'événements stochastiques . . . . .	73
II.2.3	Module vulnérabilité . . . . .	77
II.2.3.1	Courbes de vulnérabilité . . . . .	77
II.2.3.2	Estimation des vitesses de vent au site . . . . .	78
II.2.4	Remarques sur la modélisation . . . . .	79
II.2.4.1	Périls secondaires . . . . .	79
II.2.4.2	Effets du changement climatique . . . . .	80
<b>III</b>	<b>Résultats de la modélisation et transfert du risque cyclonique</b>	<b>82</b>
III.1	La couverture du risque cyclonique . . . . .	82
III.2	Résultats du modèle . . . . .	83
III.3	Les couvertures paramétriques pour les cyclones . . . . .	86
III.3.1	La solution <i>Cat-in-the-Box</i> . . . . .	86
III.3.1.1	Présentation de la première approche . . . . .	86
III.3.1.2	Structuration de la solution . . . . .	89
III.3.1.3	Seconde approche . . . . .	91
III.3.1.4	Structuration de la seconde approche . . . . .	93
III.3.1.5	Remarques sur la solution <i>Cat-In-the-Box</i> . . . . .	94
III.3.2	La solution <i>Wind-at-Location</i> . . . . .	94
III.3.2.1	Présentation . . . . .	94
III.3.2.2	Structuration de la solution <i>Wind-at-Location</i> . . . . .	96
III.4	Tarifification et Coût Total du Risque . . . . .	99
III.4.1	Tarifification de la solution indicielle . . . . .	99
III.4.2	Coût Total du Risque . . . . .	100

## *TABLE DES MATIÈRES*

---

<b>Conclusion</b>	<b>102</b>
<b>Table des figures</b>	<b>104</b>
<b>Bibliographie</b>	<b>106</b>

---

# Introduction

---

Les entreprises de tous secteurs et de toutes tailles font appel au marché de l'assurance pour transférer les risques ne rentrant pas dans leur appétit et leur seuil de tolérance aux risques. Le choix des risques transférés et la définition des couvertures dont les entreprises ont besoin font partie intégrante de leur stratégie de gestion des risques. Cependant, depuis la fin de l'année 2018, ce processus de gestion des risques est devenu plus complexe : le marché de l'assurance pour les entreprises est entré dans une phase de redressement technique. Ce contexte de marché, aussi appelé "*hard-market*" a des causes variées et des conséquences importantes sur les couvertures d'assurance des sociétés.

Ainsi, nous présentons dans un premier temps le cadre et le contexte de l'étude menée dans ce mémoire, en expliquant pourquoi et comment les entreprises se couvrent, pour ensuite s'intéresser plus particulièrement au redressement du marché en donnant ses causes et ses conséquences. Après avoir mis en évidence la nécessité d'avoir des solutions de transfert de risques complémentaires aux couvertures traditionnelles, nous présenterons le fonctionnement des solutions d'assurance paramétrique ainsi que leurs avantages et leurs inconvénients.

Afin d'illustrer l'intérêt des solutions paramétriques dans un contexte de "*hard-market*", nous nous intéressons au cas d'une entreprise confrontée à un renouvellement difficile à cause d'une exposition forte au risque cyclonique. L'objectif du mémoire est alors d'étudier comment une solution d'assurance paramétrique pour les cyclones peut venir en complément d'une couverture traditionnelle dans ce contexte.

Dans un second temps, après avoir fixé le cadre de l'étude, nous nous intéressons donc au risque cyclonique et à sa modélisation, dans le but de quantifier les risques pour l'entreprise étudiée. Plus précisément, nous créons dans le chapitre II un catalogue d'événements stochastiques à l'aide de méthodes statistiques et nous estimons les pertes consécutives au passage d'une tempête tropicale.

Dans le troisième et dernier chapitre, nous exploitons les résultats du modèle stochastique en appliquant différentes conditions d'assurance, afin d'évaluer l'impact du redressement du marché sur la société étudiée. Dans le but de compléter sa couverture d'assurance traditionnelle, nous nous intéressons à la structuration de solutions d'assurances paramétriques pour les cyclones. Après avoir étudié différentes solutions, nous intégrons celle choisie dans son programme d'assurance afin de revenir à des niveaux de tolérance au risque qu'elle avait avant le redressement du marché.



# — Chapitre I —

---

## Cadre de l'étude et contexte

---

### I.1 Le groupe Willis Towers Watson

Ce mémoire s'inscrit dans le cadre d'une l'alternance au sein de l'équipe de Transfert Alternatif des Risques (*Alternative Risk Transfert, ART*) du groupe *Willis Towers Watson*.

#### I.1.1 Activité et chiffres clés

*Willis Towers Watson* (WTW) est une société multinationale britannique de gestion des risques, de courtage d'assurance et de conseil créée en 1828. WTW est le troisième plus grand courtier d'assurance au monde en terme de chiffre d'affaires.

L'entreprise est développée sur trois segments d'activités et a pour mission d'accompagner ses clients dans la maîtrise et le pilotage de leurs risques afin de les protéger mais aussi de renforcer leurs organisations.



FIGURE I.1 – Les segments d'activité de Willis Towers Watson

Fort d'une présence dans plus de 140 pays, WTW propose des solutions de maîtrise du risque, de gestion des avantages sociaux, d'accompagnement des talents et d'optimisation du capital pour protéger et aider les institutions et les individus.

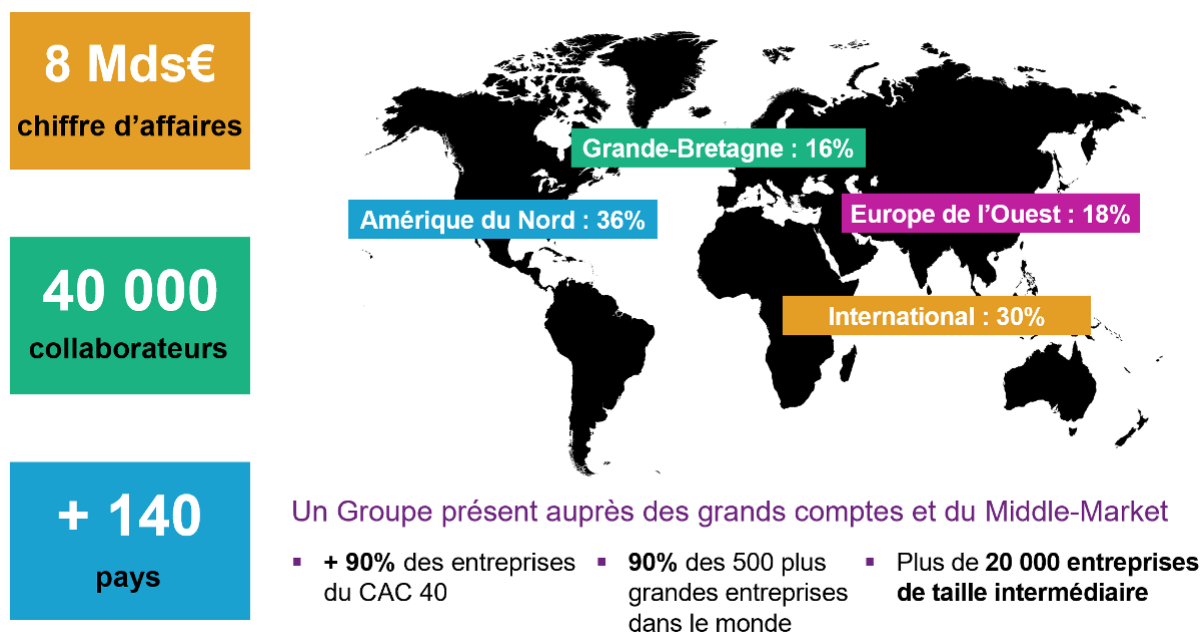


FIGURE I.2 – La répartition géographique et les chiffres clés

En France, *Gras Savoye Willis Towers Watson* rassemble les activités de courtage de Willis Towers Watson. *Gras Savoye* accompagne des entreprises de toutes tailles à travers tout le territoire français sur l'ensemble des problématiques liées au risque.

*Gras Savoye* est le leader du courtage en France depuis 1992. Son activité est décomposée en deux branches :

- La branche Assurances de Personnes : activités de conseil, de gestion et d'accompagnement dans la mise en place des programmes des régimes de santé et prévoyance pour les entreprises.
- La branche Corporate Risk Broking : cette branche regroupe les activités de conseil et courtage sur les risques entreprises non-vie : conseil, placement et mise en place des programmes internationaux pour les entreprises de différents secteurs et sur des risques différents (Dommages, Pertes d'Exploitation, Aviation et Spatial, Construction, Flotte Automobile, Lignes Financières, Cyber, Transport, Responsabilité Civile...).

### I.1.2 Le département Risk & Analytics

Au sein de pôle *Corporate Risk Broking*, le département Risk & Analytics développe des solutions innovantes, concrètes et sur-mesure basées sur l'analyse de données et la science actuarielle pour orienter la prise de décisions dans la gestion des risques.

Le département est constitué de plus de 400 consultants autour du monde et regroupe des experts en Risk Management, en actuariat, en ingénierie, en finance, en data science, en assurances et transfert de risque. Risk & Analytics est composé de six différentes practices travaillant conjointement :



FIGURE I.3 – Les six practices de Risk & Analytics

Les activités des six pôles sont les suivantes :

- Core Analytics : développement d'outils et de technologie de gestion des risques pour les entreprises.
- Strategic Risk Consulting : optimisation des programmes d'assurance et conseil en gestion des risques.
- Alternative Risk Transfer : structuration et mise en place de solutions sur-mesure de financement des risques.
- Captive : étude de faisabilité, mise en place et gestion de captives d'assurance ou de réassurance.
- Forensic accounting : accompagnement des clients dans la préparation, la quantification et le résolution de sinistres importants et complexes.
- Property & Casualty : réalisation d'études d'exposition et mise en place de plan de prévention des risques.

### I.1.3 L'activité Transfert Alternatif des Risques

L'équipe de Transfert Alternatif des Risques (*Alternative Risk Transfert, ART*) a pour objectif de proposer des solutions alternatives de transfert de risque pour les clients de Willis Towers Watson. L'équipe est présente dans les quatre grandes places mondiales que sont Paris, New-York, Hong-Kong et Londres.

Les solutions de financement des risques proposées sont des solutions sur-mesure qui répondent aux limites des marchés d'assurance traditionnels et permettent d'accéder à différentes formes de capital.

Afin d'expliquer au mieux les différentes solutions de transfert alternatif de risque existantes et proposées au sein du pôle ART, il convient de présenter dans un premier temps la gestion des risques en entreprise ainsi que les différentes possibilités qu'ont les entreprises pour piloter au mieux leurs risques.



## I.2 Le risque pour une entreprise

### I.2.1 Gestion et appétit aux risques

D'après l'Association pour le Management des Risques et des Assurances de l'Entreprise (AMRAE), le risque pour une entreprise *"représente la possibilité qu'un évènement survienne et dont les conséquences seraient susceptibles d'affecter les personnes, les actifs, l'environnement, les objectifs de la société ou sa réputation."*

De part leurs secteurs d'activités, leurs tailles ou encore les endroits où elles se situent, les entreprises sont donc exposées à une multitude de risques différents pouvant avoir des effets négatifs sur leurs objectifs et leurs performances.

Ainsi, toute entreprise se doit d'identifier les causes et les effets d'évènements porteurs de risques, dans le but d'étudier leurs impacts et d'ainsi pour pouvoir les limiter et les contrôler dans le cadre d'un processus de gestion des risques. L'objectif pour une entreprise n'est pas de ne pas prendre de risque mais bien d'avoir une politique de gestion adaptée en fonction de ses objectifs. Le risque est inhérent à toute activité et peut être créateur de valeur lorsqu'il est correctement maîtrisé.

Cette gestion des risques peut être matérialisée pas des mesures différentes, qui généralement se retrouvent dans trois grandes familles :

- La prévention des risques : les mesures de prévention permettent idéalement d'empêcher un événement de se produire, ou *a minima*, de réduire la probabilité d'occurrence d'un évènement, tout en atténuant les conséquences qu'il pourrait avoir s'il venait à survenir.
- Le transfert des risques : les mesures de transfert des risques permettent de transformer le côté aléatoire du risque en un sur-coût déterminé, la souscription de contrat d'assurance en étant le parfait exemple. En échange d'un certain montant, l'entreprise viendra transférer le risque auquel elle était exposée à une entité tierce.
- L'acceptation des risques : Dans certains cas, le risque est considéré comme trop faible et il est donc difficile ou peu avantageux de mettre en place des mesures de réduction ou de transfert. Dans ce cas le risque est jugé comme étant acceptable.

Afin de prendre des mesures adaptées aux risques auxquels elle sont exposées, les entreprises doivent définir leur appétit aux risques, c'est-à-dire définir le niveau de risque qu'elles acceptent de prendre dans le but d'atteindre leurs objectifs de développement et de performance.

La définition de l'appétit aux risques pour une entreprise est la base de tout processus de gestion des risques. Elle est propre à chaque entreprise et dépend du profil de risque et des objectifs qu'elle se fixe, conformément aux attentes de ses actionnaires.

### I.2.2 L'Entreprise Risk Management

La gestion des risques est une composante importante de la stratégie d'une entreprise, au point qu'elle est désormais intégrée à des fonctions managériales dans le cadre de l'*Entreprise Risk Management* (ERM). Cette intégration de la gestion des risques dans le processus de

gouvernance d'une entreprise fait suite aux différents textes de loi sur le contrôle interne et les procédures de gestion des risques aux Etats-Unis ainsi qu'en France, tels que la loi américaine Sarbanes-Oxley ou encore la Loi de Sécurité Financière (LSF) française.

En sus de ces textes de loi, des normes et des standards internationaux viennent les compléter, comme par exemple les écrits du *Committee of Sponsoring Organizations of the Treadway Commission* (COSO), en particulier COSO 2 qui aborde les règles de l'ERM, ou encore la norme ISO 31000 : 2009 spécifique à la gestion des risques. Ces différents standards ont tous pour objectif d'accroître la vigilance autour des sujets de gestion des risques, pour ainsi accompagner les entreprises dans la réalisation de leurs objectifs et éviter toute dérive indésirée.

A cet effet, le cadre COSO 2 "*Entreprise Risk Management Framework*" a pour objectif de permettre aux organisations :

- d'identifier les événements pouvant les affecter,
- de maîtriser les risques dans la limite de leur appétit aux risques,
- de donner des garanties quand à la réalisation de leurs objectifs.

Ce cadre de la gestion des risques qu'est l'ERM est donc une composante très importante pour une organisation, au point que les régulateurs, les auditeurs et les agences de notations cherchent à apprécier et évaluer ce processus interne pour juger de la solidité d'une organisation.

### **1.2.3 La tolérance aux risques**

Au-delà de l'appétit aux risques, qui est le niveau de risque qu'une organisation juge acceptable pour atteindre ses engagements, un aspect important de la gestion des risques est la définition de la tolérance aux risques, c'est-à-dire la définition des niveaux de risque pour lesquels une entreprise juge avoir les capacités financières nécessaires pour supporter les coûts engendrés par des événements imprévus.

Les entreprises ont généralement plusieurs seuils de tolérance au risque, en fonction entre autres de leurs tailles et de leurs capacités financières. Les seuils de tolérance au risque visent à classer les pertes des événements porteurs de risque et/ou les pertes d'évènements agrégés en trois grandes catégories :

- Pertes avec une forte probabilité de survenance et de faibles coûts : les événements engendrant ces pertes ont un impact faible sur les finances de l'entreprise et sont généralement acceptés. Ces évènements peuvent être financés en totalité par l'entreprise, sans avoir recours à un capital externe.
- Pertes avec une probabilité de survenance et des coûts modérés : dans ce cas, le ou les risques sous-jacents peuvent être transférés ou retenus. Certains risques peuvent nécessiter des sources de financement externes (capital débloqué en cas de sinistre via une assurance, ou endettement par exemple). Cette zone fait l'objet d'une attention particulière car elle constitue une zone d'arbitrage entre transfert et rétention, c'est-à-dire entre financement interne et financement externe.
- Perte avec une faible probabilité de survenance mais des coûts élevés : les risques sous-jacents ont besoin d'être transférés et/ou requièrent un financement extérieur. Certains

de ces risques peuvent ne pas être transférables.

De manière simple et afin d'illustrer le propos ci-dessus, la distribution des pertes d'une entreprise peut être représentée par ce qui s'apparente à une loi log-normale, où chaque zone de risque requière des mesures spécifiques :

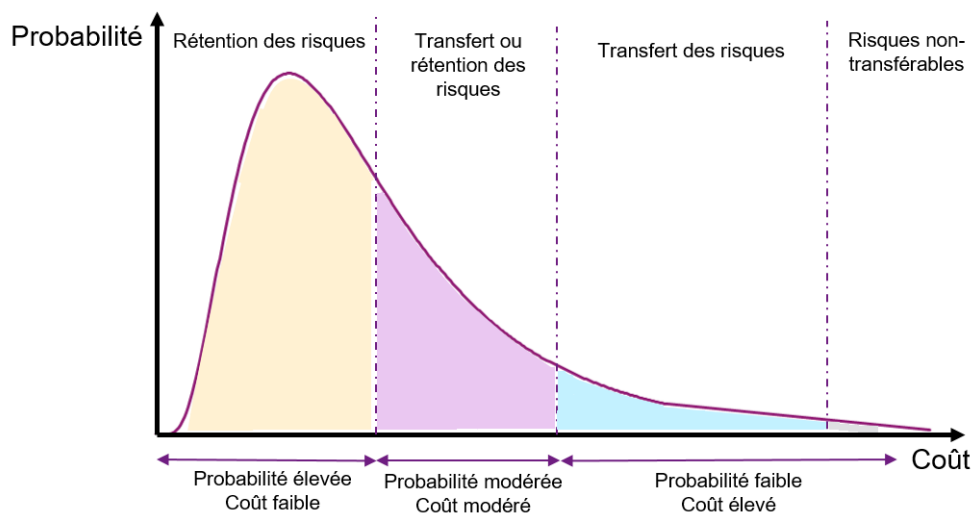


FIGURE I.4 – Seuils de tolérance au risque

## I.2.4 Définition quantitative des seuils de tolérance aux risques

### I.2.4.1 Seuils de tolérance globaux

La définition des seuils de tolérance aux risques est un exercice important permettant ensuite aux organisations d'adopter une stratégie cohérente quant à la rétention, au transfert ou au financement de leurs risques.

Les seuils de tolérance aux risques peuvent être définis de manière quantitative en s'intéressant à l'impact que peuvent avoir des événements sur des indicateurs financiers choisis par l'entreprise. Les seuils de tolérance au risque seront alors les seuils à partir desquels la déviation de l'indicateur choisi n'est pas jugée comme étant acceptable.

Une approche couramment suivie pour définir les seuils de tolérance aux risques est la suivante :

- Définition d'indicateurs financiers à suivre, comme par exemple le chiffre d'affaires, le résultat, le bénéfice avant intérêts, impôts, dépréciation et amortissement (*Earnings before interest, taxes, depreciation and amortization* - EBITDA)
- Définition de seuils de déviation limite pour ces indicateurs financiers, en terme de perte et de probabilité. Un exemple simpliste peut être le suivant : le seuil limite peut être une baisse de  $x\%$  de la trésorerie disponible (*Free Cash Flow* - FCF), au maximum une fois tous les  $y$  ans (i.e avec une probabilité  $\frac{1}{y}$ ).
- Comparaison des seuils à ceux des entreprises du même secteur d'activité et ayant des résultats financiers proches, en réalisant la même analyse que précédemment.

Afin de définir ces seuils de tolérance aux risques, *Willis Towers Watson* a développé, via son équipe *Core Analytics*, un outil permettant de quantifier et de comparer aux pairs les seuils de tolérance au risque.

Cet outil, nommé *Risk Tolerance Clarified* (RTC), utilise les états financiers des entreprises et permet de simuler l'impact d'événements fictifs sur une large variété d'indicateurs financiers, aussi bien pour l'entreprise pour laquelle l'étude est réalisée que pour des entreprises ayant des résultats financiers et des profils (secteur d'activité, localisation géographique...) comparables.

Les études menées avec l'outil RTC permettent alors aux équipes de management des risques des entreprises de quantifier l'impact d'événements fortuits sur leurs états financiers et de comparer ces impacts à ceux de leurs pairs, pour ensuite définir de manière quantitative leurs seuils de tolérance aux risques.

### **I.2.4.2 Seuils de tolérance individuels**

Une fois ces seuils globaux déterminés, il est alors possible de définir des seuils sur chaque risque auquel l'entreprise est exposée. Cette allocation nécessite au préalable une modélisation des risques la plus exhaustive possible, aussi bien au niveau des fréquences, des sévérités, que des corrélations qui existent entre les différents risques. Il s'agit ici d'un exercice complexe puisqu'une entreprise peut être exposée à une grande variété de risques dont la modélisation n'est pas toujours aisée.

Lorsque chaque risque a été modélisé, il est alors possible de simuler un grand nombre d'années d'expositions et d'observer les variations sur les différents indicateurs choisis au préalable : si certains événements ou série d'événements occasionnent des déviations supérieures aux seuils de tolérance au risque, alors il est nécessaire de mettre en place des mesures de gestion des risques, comme par exemple le transfert des risques au marché de l'assurance ou aux marchés financiers.

Afin d'aider ses clients à définir une stratégie pour chaque risque ou ensemble de risques, *Willis Towers Watson* et l'équipe *Core Analytics* ont là encore développé des outils de modélisation des risques et d'optimisation du financement des risques. Ces outils permettent :

- de modéliser une grande variété de risques : Cyber, Responsabilité Civile des Dirigeants, Dommages et Pertes d'Exploitation, responsabilité civile employeur...
- d'étudier l'impact de chaque risque sur les résultats globaux de l'entreprise,
- de définir une stratégie pour chaque risque, et donc d'optimiser au mieux la gestion des risques au global.

Lorsque l'ensemble des études ont été menées, les entreprises ont pour chaque ensemble de risques une stratégie précise. Si la quantification menée au préalable montre que l'impact d'un risque semble faible au vu de la tolérance aux risques de l'entreprise, elle peut décider qu'elle a les capacités pour le financer en cas de survenance. Au contraire, si un risque peut mener à une forte dégradation des résultats financiers de l'entreprise, il est alors nécessaire d'avoir une source de financement extérieure dans le cas où un événement venait à se produire : cette source de financement peut être la contraction d'une dette ou d'un capital débloqué via une assurance.

Communément, les organisations décident donc de transférer les risques ne rentrant pas dans leur appétit et leur seuil de tolérance aux risques aux marchés financiers ou au marché de l'assurance. Dans la section suivante, nous nous intéressons plus particulièrement au marché de l'assurance pour les entreprises.

## **I.3 L'assurance pour les entreprises**

### **I.3.1 Généralités**

Dans la section précédente, nous avons vu que les entreprises ont recours à des sources de financement extérieures pour se couvrir contre les risques ne rentrant pas dans leur appétit aux risques. Plus particulièrement, les organisations se couvrent, et donc transfèrent leurs risques en souscrivant à des contrats d'assurance.

Généralement, les entreprises sont couvertes pour trois grandes familles de risque :

- Les risques concernant leurs salariés : décès, invalidité, incapacité de travail, dépendance, accident...
- Les risques concernant leurs biens : catastrophes naturelles, vol, terrorisme, bris, incendies, pertes d'exploitation...
- Les risques concernant leurs responsabilités : dommages matériels ou immatériels causés aux tiers ou aux salariés, dommages causés par leurs produits, fautes professionnelles, fautes commises dans la gestion de l'entreprises...

Afin d'aider les entreprises dans leur gestion des risques, les assureurs ont mis en place un grand nombre de garanties d'assurances permettant de couvrir les pertes liées aux risques cités ci-dessus. Pour les risques concernant les biens, les entreprises souscrivent généralement à plusieurs polices différentes afin d'atténuer les effets des risques auxquelles elles sont exposées : par exemple, polices Construction, les polices Transport ou encore les polices Dommages Directs et Pertes d'Exploitation (DDPE) qui seront présentées dans la partie suivante.

L'achat des garanties d'assurance par les grandes entreprises est un élément important du processus de gestion des risques. Le marché de l'assurance entreprise est donc un marché porteur et stratégique pour les assureurs. En 2019, l'ensemble des cotisations des professionnels pour les assurances de biens et de responsabilité représentait 21,7 milliards d'euros, soit 37% de l'ensemble des cotisations totales :

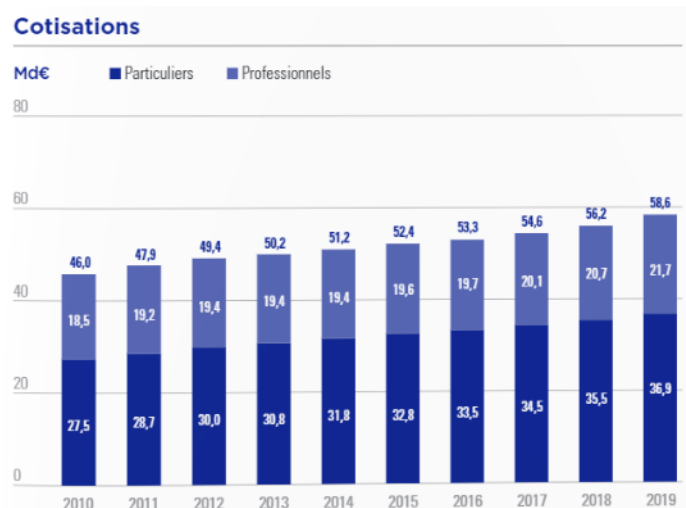


FIGURE I.5 – Répartition des cotisations pour les assurances de biens et de responsabilité - *Fédération Française de l'Assurance*

Avec la répartition suivante :

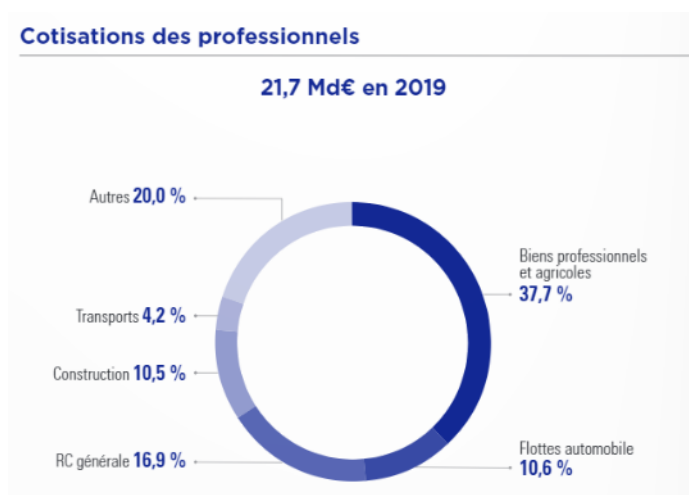


FIGURE I.6 – Répartition des cotisations des professionnels par branches en 2019 - *Fédération Française de l'Assurance*

Ainsi, parmi les assurances de biens de responsabilité, l'assurance de biens professionnels et agricoles représente la plus grande part de cotisations avec 37,7%.

### I.3.2 L'assurance Dommages Directs et Pertes d'Exploitation

Parmi les assurances auxquelles les entreprises souscrivent se trouve l'assurance Dommages Directs et Pertes d'Exploitation (DDPE). Cette assurance permet aux entreprises de se couvrir contre les dommages matériels directs causés par des événements garantis sur les différents sites qu'elles possèdent (partie Dommages Directs) mais aussi de compenser les diminutions du chiffre d'affaires occasionnées par ces dommages directs (partie Pertes d'Exploitation).

### **I.3.2.1 Les biens assurés et exclus**

Dans le cadre d'une assurance DDPE, les biens assurés et exclus sont définis dans la police. Les biens assurés sont divisés en plusieurs catégories :

- Bâtiments : Assurés soit en valeur de reconstruction (matériaux, coût de la main d'oeuvre...), soit en valeur à neuf.
- Mobilier et matériel : assuré en valeur de remplacement à neuf ou en valeur d'usage.
- Marchandises : concerne entre autres les matières premières et les marchandises vendues. Elles sont assurées au prix d'achat ou au prix de vente.

Cependant, tous les actifs possédés par une entreprise sur un site ne sont pas assurés, certains font l'objet d'exclusions. Généralement, les contrats d'assurance DDPE sont conçus sur le modèle "tout sauf", c'est à dire que les biens mobiliers et les biens immobiliers (y compris les nouveaux bâtiments et les biens en cours de constructions) sont assurés, à l'exception des exclusions prévues et dénommées dans la police. Parmi les exclusions fréquentes se trouvent :

- Les devises, espèces, billets de banque, titres, valeurs,
- Les terrains (hors aménagements paysagés, parcs de stationnement, remblais...)
- Les appareils de navigation aérienne, maritime ou fluviale,
- Les mines et barrages,
- Les biens en cours de transport...

Cette liste est non-exhaustive et dépend des spécificités de l'assuré. Certaines exclusions peuvent dépendre de l'exposition géographique de l'assuré mais aussi de son secteur et de l'activité exercée sur les différents sites assurés.

### **I.3.2.2 Les garanties Dommages Directs**

Les polices DDPE possèdent généralement beaucoup de garanties différentes, aussi bien sur les dommages directs que sur les pertes d'exploitation. Parmi les événements couverts pour les dommages directs, les garanties les plus courantes sont les suivantes :

- Actes de terrorisme ou attentats : couvre les dommages résultants d'actes de terrorisme et d'attentat sur les biens assurés.
- Vandalisme : couvre les dommages dûs aux actes de vandalisme, en général à l'intérieur des locaux, l'extérieur des locaux faisant l'objet d'une garantie supplémentaire.
- Vol : couvre les pertes engendrées par un vol. Les circonstances de garanties sont souvent précisées au contrat, aussi bien au niveau du type de vol (effraction par exemple), que des biens couverts/exclus.
- Dégâts des eaux : couvre les dommages provoqués par l'action de l'eau, selon les circonstances définies par le contrat (fuite ou rupture de canalisation, débordement de gouttières, infiltrations...)
- Garantie incendies et explosion : couvre les dégâts occasionés par ces événements. Les dégâts couverts peuvent avoir été occasionés par l'incendie ou l'explosion en elle-même ou par les opérations de sauvetage ayant eu lieu afin d'arrêter l'évènement.

- Garanties catastrophe naturelles : couvre les dégâts occasionés par les catastrophes naturelles. Les catastrophes naturelles couvertes sont variées et généralement dénommées (tempête, grêle, tremblement de terre, inondations, coulées de boue...).

Comme pour les bien assurés/exclus, la liste des garanties présentées ci-dessus ne sont là encore qu'une infime partie de toutes les garanties présentes dans une police d'assurance DDPE, il en existe d'autres qui sont là aussi spécifiques au secteur d'activité de l'entreprise assurées et à son exposition géographique.

De la même manière que précédemment, certains événements pouvant occasionner des dommages directs sont exclus explicitement dans la police (dommages occasionés par une catastrophe nucléaire ou par une guerre civile par exemple).

### **I.3.2.3 Les Pertes d'Exploitation**

Les pertes d'exploitation couvertes sont les pertes d'exploitations résultant directement de dommages ou pertes matériels assurés et affectant des biens.

Lorsqu'une perte d'exploitation survient, c'est généralement la marge brute qui est couverte, l'objectif étant de compenser les effets de la diminution du chiffre d'affaires suite à un événement grave. Cependant, les modalités d'indemnisation des pertes d'exploitations sont généralement complexes et les processus d'indemnisation pour les pertes d'exploitation font appel à des experts qui quantifient les pertes réelles subies par l'assuré. Ce processus est parfois long et prend plusieurs mois voire années après un événement de grande ampleur.

Comme précisé au dessus, les pertes d'exploitations couvertes sont celles résultants de dommages ou pertes matériels assurés. Ainsi, toutes les pertes d'exploitation ne sont pas couvertes via la police DDPE.

Par exemple, si une tempête survient à proximité d'un site assuré et que le site ne subit aucun dommage ou perte matériel, l'assuré ne sera pas indemnisé même si la tempête entraîne une perte d'exploitation. Cette perte d'exploitation sans dommage peut arriver dans une multitude de cas différents : routes bloquées à cause de la tempête, fournisseurs impactés, diminution des ventes...

En dehors des catastrophes naturelles, d'autres événements peuvent occasionner des pertes d'exploitation sans dommages. C'est le cas par exemple des attentats, des manifestations ou encore des pandémies : tous ces événements n'occasionnent pas de dommage ou de perte matériels mais occasionnent des pertes d'exploitations. Parmi les événements récents ayant impactés un grand nombre d'entreprises nous pouvons par exemple citer les manifestations des gilets jaunes, les grèves contre la réforme des retraites ou encore les actes de terrorisme récents.

### **I.3.2.4 Franchises et limites de garanties**

Comme il a été vu précédemment, tous les biens présents sur un site assuré ne sont pas couverts et tous les événements ne le sont pas non plus. À ces exclusions s'ajoutent le fait que lorsqu'un événement survient et occasionne des dommages ou une perte d'exploitation, l'assuré n'est pas indemnisé pour la perte totale subie, cette perte fait l'objet d'une franchise



et d'une limite.

En effet, chaque garantie présente dans le contrat présente une franchise et une limite spécifique. Lorsqu'un sinistre survient et crée une perte financière, une partie de la charge du sinistre reste à la charge de l'assuré et n'est donc pas indemnisée par l'assureur, il s'agit du montant sous franchise. De la même manière, le montant total indemnisé par l'assureur est capé et ne peut dépasser une somme définie dans la police, la limite.

La franchise et la limite permettent à l'assureur de limiter et de contrôler son exposition aux différents risques, et permettent à l'assuré de conserver une part acceptable du risque. L'assureur dispose d'un grand nombre de moyens différents pour matérialiser de manière quantitative les limites et les franchises, aussi bien par risque, par événement, par localisation, ou encore de manière temporelle.

Les franchises et limites couramment présentes dans une police d'assurance DDPE sont les suivantes (par ordre d'application) :

- Franchise par événement : pour un même événement, l'assureur n'indemnise que pour les pertes supérieures à la franchise par événement.
- Franchise par risque : comme pour la franchise par événements, mais pour un risque en particulier ou un ensemble de risques.
- Franchise annuelle : l'assureur commence à indemniser l'assuré lorsque la somme des pertes sur la période de couverture dépasse ce montant.
- Limite par événement : pour un même événement, l'assureur indemnise au maximum le montant prévu par la limite par événement.
- Limite par risque : comme pour la limite par événement, mais pour un risque en particulier ou pour un ensemble de risques (risques dans une même région ou dans un même pays par exemple).
- Limite annuelle : lorsque la période de couverture est annuelle, l'assureur s'engage à verser au maximum un certain montant pour l'année. Lorsque la somme de toutes les indemnisations dépasse cette limite annuelle, l'assureur n'indemnise plus aucun sinistre.

Là encore, d'autres types de franchises ou de limites existent. Par exemple, certaines polices DDPE présentent des sous-limites spécifiques pour les indemnisations relatives aux bâtiments et des sous-limites spécifiques pour les indemnisations relatives aux biens mobiliers.

Afin d'illustrer le fonctionnement d'une police DDPE, prenons un cas simple. Imaginons une entreprise possédant les actifs suivants :

Site	Zone	Valeur assurée Totale
Site 1	Japon	20,000,000 €
Site 2	Japon	30,000,000 €
Site 3	USA - Californie	90,000,000 €
Site 4	Allemagne	80,000,000 €

Et les franchises/limites suivantes :

Garantie	Franchise par risque et par évènement	Limite annuelle
Incendie, Explosion	100,000€	100,000,000€
Tempête	2% des valeurs assurées sauf : - Japon, 5% des valeurs assurées	50,000,000€ sauf : - Japon, 20,000,000€
Tremblement de terre	2% des valeurs assurées sauf : - Japon, 8% des valeurs assurées - USA - Californie, 10% des valeurs assurées	50,000,000€ sauf : - Japon, 20,000,000€ - USA - Californie, 10,000,000€

Ainsi, si un tremblement de terre survient en Californie au site 3 et occasionne une perte de 20,000,000€, et qu'aucun sinistre n'a eu lieu avant, le calcul suivant est fait :

- Franchise :  $10\% \times 90,000,000 = 9,000,000\text{€}$
- Indemnisation assureur :  $\max(\min(\text{limite}, \text{perte} - \text{franchise}), 0) = \max(\min(10,000,000 ; 20,000,000 - 9,000,000), 0) = 10,000,000\text{€}$

De ce fait, si un autre tremblement de terre survient en Californie, l'assuré ne sera plus indemnisé car la capacité totale accordée par l'assureur pour ce risque aura été épuisée.

L'utilisation de franchise en pourcentage des valeurs assurées est très fréquente et permet aux assureurs de limiter grandement leurs expositions dans des zones à risque pour des périls pouvant occasionner beaucoup de pertes : cyclone dans les Caraïbes ou sur la côte ouest du Japon, tremblement de terre en Californie ou au Japon par exemple.

### I.3.2.5 Résumé

Comme cela a pu être constaté dans cette présentation succincte, les polices d'assurances Dommages Directs et Pertes d'exploitation sont complexes et subtiles.

Ces polices d'assurances possèdent beaucoup de spécificités : tous les biens présents sur un site ne sont pas couverts car certains sont exclus, tous les types de périls pouvant produire des dégâts ne sont pas non plus couverts et, bien souvent, les différents périls sont sous-limités en fonction de l'appétit au risque des assureurs mais aussi des assurés.

En effet, il est bon de noter que certaines entreprises assurées décident d'augmenter par elles-mêmes les franchises ou de diminuer les limites afin de réduire leur coût total d'assurance. Elles mettent alors en place des plans de rétention en interne afin de gérer les risques exclus, sous-franchises ou au dessus des limites prévues par leurs programmes d'assurance.

Ainsi, la mise en place de polices d'assurance DDPE étant conforme à l'appétit au risque d'une entreprise peut s'avérer être une tâche difficile. Qui plus est, à la complexité des polices d'assurances DDPE vient s'ajouter un phénomène de marché : le redressement du marché de l'assurance Dommages.

### 1.3.3 Le redressement du marché de l'assurance Dommages

Depuis 2018, le marché mondial de l'assurance dommages est dans une phase de redressement technique. Les causes et les conséquences du redressement du marché sont présentées dans cette section.

#### 1.3.3.1 Les causes du redressement du marché

Le redressement du marché a plusieurs causes. Parmi ces causes, la première souvent citée est la forte sinistralité des dernières années, aussi bien au niveau des catastrophes naturelles que des incendies. Les catastrophes des dix dernières années ont causé énormément de dégâts et plus particulièrement depuis 2017, avec des événements d'une ampleur inédite comme les cyclones Irma et Maria en 2017 ou encore Dorian en 2019.

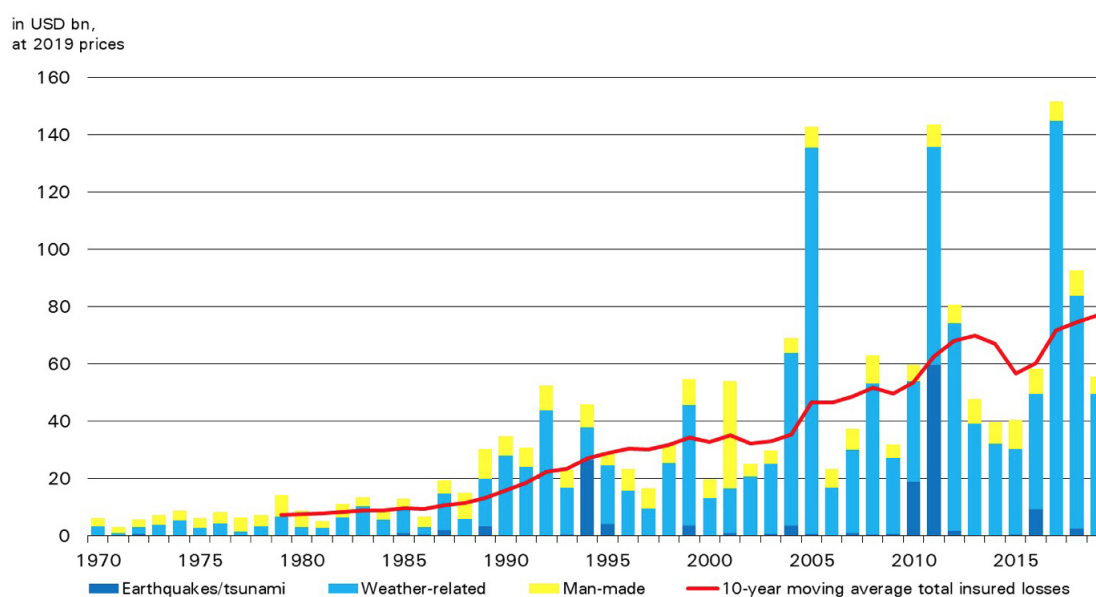


FIGURE I.7 – Pertes assurées totales par péril - *Swiss Re Institute*

Cette sinistralité accrue a détérioré les résultats des assureurs et a donc pu entraîner un raffermissement du marché depuis 2018.

Cependant, bien qu'étant l'axe de communication principal afin de justifier les augmentations tarifaires, cette sinistralité conséquente n'est pas la seule cause expliquant ce redressement du marché. En effet, d'autres raisons peuvent être mises en avant, comme par exemple le fait que, depuis 2004 les taux de prime en assurance dommages n'avaient cessé de diminuer, permettant aux assurés de bénéficier de 15 ans d'amélioration des conditions d'assurance.

Une autre raison pouvant être invoquée est la mise en place de la réforme réglementaire Solvabilité II au 1er janvier 2016. Cette réforme ayant pour objectif de mieux adapter les fonds propres exigés des compagnies de (ré)assurance aux risques que celles-ci encourent a changé les exigences quantitatives et qualitatives. Le passage de Solvabilité I à Solvabilité II peut donc expliquer une vigilance accrue des (ré)assureurs sur les risques qu'ils portent, encore plus dans le cadre des grands risques où certaines spécificités n'étaient pas captées par Solvabilité

I (comme le risque de contrepartie sur les captives d'assurance par exemple).

Enfin, un dernier point pouvant expliquer le redressement du marché est la faiblesse des taux d'intérêts : depuis 2008, les taux directeurs des banques centrales sont à des niveaux historiquement bas et les règles de provisionnement incitent les assureurs à investir dans des actifs peu risqués comme les emprunts d'états. La rémunération des produits financiers compense ainsi plus difficilement les résultats de souscription négatifs.

Toutes ces raisons provoquent ainsi des changements majeurs à plusieurs niveaux de l'assurance. Les assureurs sont alors plus vigilants sur les risques qu'ils portent, aussi bien au niveau des taux primes, des garanties que des capacités accordées.

### 1.3.3.2 L'augmentation des prix

Depuis fin 2018 et à chaque renouvellement des polices dommages, les taux de primes ont augmenté drastiquement. Sur les affaires en portefeuille chez *Gras Savoye Willis Towers Watson*, nous avons ainsi assisté aux augmentations suivantes :

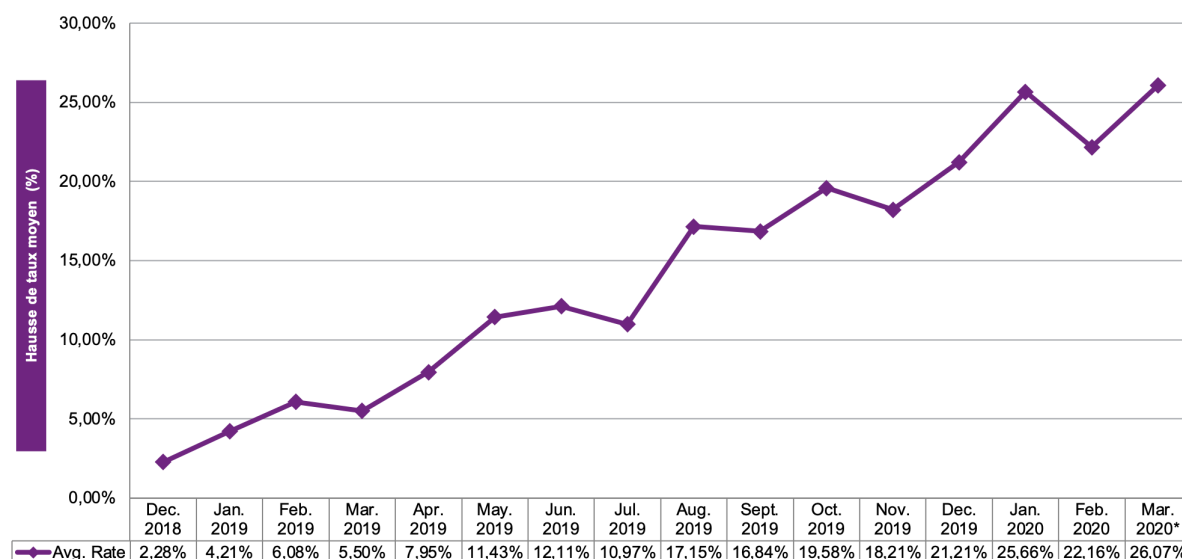


FIGURE I.8 – Hausse des taux de prime - *Gras Savoye Willis Towers Watson*

Comme nous pouvons l'observer sur la figure ci-dessus, l'augmentation des taux de prime moyen a atteint 26% à Mars 2020. Il est bon de noter que cette hausse est une hausse moyenne des taux, certains assurés ont subi des majorations encore plus élevées.

En effet, parmi les risques assurés pour les Dommages, nous pouvons distinguer trois catégories différentes :

- Les risques de qualité : peu de sinistralité et de garanties sensibles, bon niveau de prévention, peu voire pas d'exposition aux catastrophes naturelles dans les zones risquées. Ces assurés ont vu une augmentation des taux entre 10% et 20% en général.
- Les risques de qualité avec exposition aux catastrophes naturelles : peu de sinistralité et de garanties sensibles, bon niveau de prévention mais une exposition forte aux catastrophes naturelles. Augmentation comprise entre 15% et 20% en général.
- Les risques jugés de qualité insuffisante : forte sinistralité, faible niveau de prévention, garanties et expositions sensibles. Augmentation comprise entre 30% et 150%.

### **I.3.3.3 Diminution de la capacité**

Le redressement du marché de l'assurance dommages provoque une diminution de la capacité accordée par les différents assureurs. Même si la capacité globale disponible sur le marché reste stable, les assureurs sont de plus en plus conservateurs et sont donc moins enclins à accorder des capacités élevées.

Les assureurs réduisent leurs parts en fonction de la rentabilité, de l'exposition et des garanties ce qui entraîne une augmentation du nombre de coassureurs sur les polices DDPE et donc une diminution des parts de coassurance :

- La part moyenne d'apérition est passée de 70% à 40%,
- Le nombre d'assureurs par programme est passé de 2.5 à 5 en moyenne.

Cette réduction des parts fait accroître la complexité de mise en place des programmes d'assurance DDPE et rend les placements et renouvellements plus compliqués.

### **I.3.3.4 Pression sur les garanties**

Outre l'augmentation des prix et la diminution des capacités accordées, les souscripteurs sont aussi plus vigilants sur les garanties et les franchises/sous-limites/limites appliquées.

Certaines garanties ou conditions de couverture existant en période de "*soft-market*" sont exclues ou sous-limitées. Plus particulièrement sur toutes les garanties concernant les catastrophes naturelles, en écho à la faiblesse des capacités accordées, les franchises ont largement augmentées et les limites drastiquement réduites.

Ainsi, lors des renouvellements de janvier 2020, pour des polices avec de fortes expositions aux catastrophes naturelles et des événements ayant engendré des pertes élevées, il n'a pas été rare de voir les franchises exploser, passant parfois de franchise en montant fixe (100,000€ par exemple) à des franchises en pourcentage des valeurs assurées, faisant monter la franchise à des montants en millions d'euros.

### **I.3.3.5 Une souscription plus rigoureuse**

Enfin, une dernière conséquence du redressement du marché est l'augmentation des exigences lors du processus de souscription. En effet, afin de pouvoir limiter leur exposition, les assureurs analysent plus précisément les demandes de quotation.

En particulier, le niveau de prévention au niveau des sites assurés est important : les rapports de visite des ingénieurs prévention sont minutieusement examinés. Le suivi et l'évaluation des expositions est aussi pris en compte, en particulier les zones d'accumulation pour les catastrophes naturelles. Ainsi, pour accorder des capacités dans certaines zones à risque ou pour des entreprises d'un certain secteur industriel, les souscripteurs doivent suivre les directives du *Risk Management* et doivent faire approuver par les équipes de gestion de risque les capacités accordées et les taux appliqués.

Les soucripteurs sont ainsi plus sélectifs, les processus de quotation prennent plus de temps et les risques de faible qualité (très exposés, multi-sinistrés...) sont difficilement assurés.

## I.4 Les solutions Alternatives de Transfert des Risques

Comme cela a été vu précédemment, ce contexte de redressement du marché de l'assurance corporate est peu favorable pour les entreprises : les prix des couvertures d'assurance explosent, les capacités sont plus difficiles à trouver et des garanties que possédaient certaines polices d'assurance sont désormais exclues ou sévèrement sous-limitées.

Outre ce contexte compliqué, les polices que les entreprises souscrivent possèdent beaucoup d'exclusions comme nous l'avons vu dans la section sur l'assurance Dommages Directs et Pertes d'Exploitation. Ces exclusions peuvent aussi bien concerner les biens que les événements, un exemple important étant la perte d'exploitation sans dommage qui n'est pas couverte alors qu'elle peut occasionner des pertes importantes pour une entreprise.

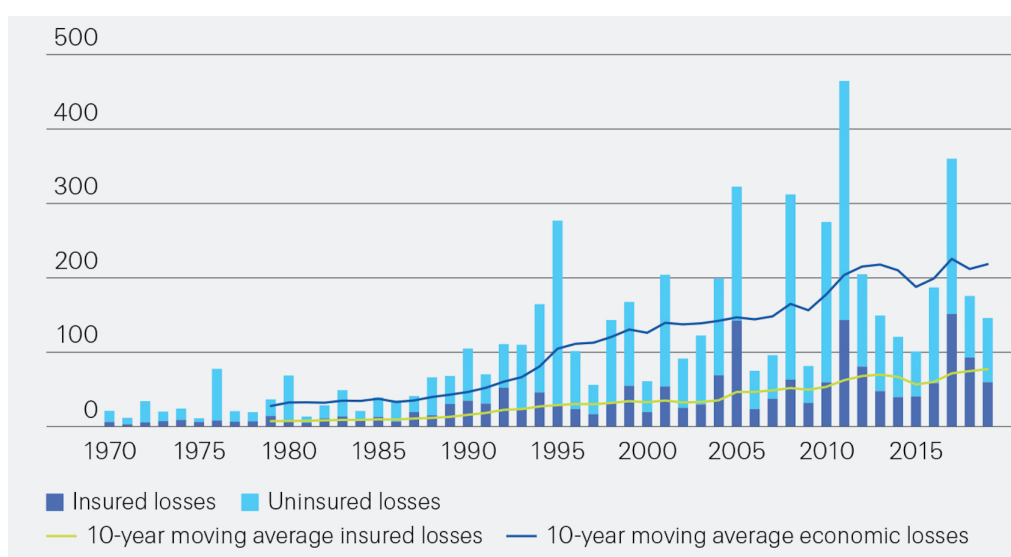


FIGURE I.9 – Pertes assurées et non-assurées - *Swiss Re Institute*

Comme cela peut être constaté dans la figure ci-dessus, une grande part des pertes dues aux catastrophes (*man-made* ou naturelles) n'est pas assurée. Il y a donc un besoin de capacité complémentaire pour ces événements et/ou un besoin au niveau de la gestion interne de ces pertes non-assurées.

Ainsi, c'est dans ce contexte que s'inscrivent les solutions de l'équipe Alternative Risk Transfer de Willis Towers Watson. En effet, les solutions de financement des risques proposées sont des solutions sur-mesure qui répondent aux limites des marchés d'assurances traditionnels et permettent d'accéder à différentes formes de capital. Elles portent le nom d'"alternatives" car elles permettent d'avoir accès à des capitaux alternatifs, à des structures alternatives et elles permettent aussi de couvrir des risques alternatifs.

Généralement, nous considérons que les marchés d'assurance traditionnel ne répondent pas efficacement dans les cas suivants :

- Capacité inexistante ou sous-limitée pour certains risques,
- Volatilité des prix,
- Longs délais de paiement,

- Risque de contrepartie important.

L'objectif de ces solutions complémentaires à l'assurance traditionnelle est donc d'aider les clients à réduire et mieux maîtriser les risques de leur entreprise, conformément à leur stratégie de gestion des risques, et d'améliorer ainsi leur rentabilité, leur stabilité financière et l'efficacité de leur capital.

Les solutions alternatives de transfert des risques sont nombreuses et répondent souvent à des besoins bien différents. Ceci étant, il est tout de même possible de citer les trois grandes familles de solutions les plus populaires parmi le large panel existant :

- Les solutions de gestion de la rétention, en particulier la captive,
- Les solutions mêlant rétention et transfert, comme par exemple les solutions d'assurance structurée,
- Les solutions de transfert de risque, dont font partie les solutions paramétriques.

Ces trois solutions répondent à des besoins différents et ont donc des modes de fonctionnement particuliers, même si elles peuvent être utilisées conjointement. Dans les sections suivantes nous présenterons de manière succincte les captives et les produits structurés et nous nous intéressons plus particulièrement aux solutions paramétriques, qui font l'objet de ce mémoire.

### **I.4.1 Les captives**

Une captive d'assurance ou de réassurance est une entreprise d'assurance ou de réassurance, filiale d'un groupe industriel ou financier, dédiée aux risques propres de ce groupe. La captive couvre uniquement les risques de l'entreprise ou des entreprises auxquelles elle appartient.

La différence entre une captive d'assurance et une captive de réassurance est le fait que la captive d'assurance peut être l'assureur direct d'une société de la même manière que l'assureur traditionnel, alors que la captive de réassurance nécessite que des sociétés d'assurance couvrent en premier lieu l'entreprise pour qu'elles soient ensuite réassurées par la captive. Les sociétés d'assurance étant réassurées par la captive sont appelées *fronter*.

Pour une société, les intérêts de créer et de posséder une captive sont variés. Par exemple, dans un contexte de marché durcissant, avoir une captive permet de bénéficier d'une capacité d'assurance supplémentaire, d'avoir de meilleures conditions en termes de franchises, de limites et de prix. Les captives sont utilisées pour couvrir une grande variété de risques propres à l'entreprise la possédant, cela peut par exemple être des risques non-assurés par le marché traditionnel de l'assurance. Plus généralement, une captive permet à une société de l'aider dans l'accomplissement de sa politique de gestion des risques.

Il est bon de noter que la mise en place d'une captive est un processus complexe nécessitant de la part de l'entreprise une certaine maturité sur les sujets de management des risques. Le choix des risques couverts est en premier lieu dépendant de la tolérance aux risques du groupe, mais aussi des conditions du marché de l'assurance et des contraintes réglementaires : en effet, les captives sont certes des filiales du groupe qu'elles couvrent, mais elles sont aussi des sociétés d'assurance ou de réassurance et sont donc soumises à la même réglementation que

les assureurs et réassureurs traditionnels, en particulier elles doivent suivre la réglementation européenne Solvabilité II.

## I.4.2 L'assurance structurée

Les contrats d'assurance structurée sont des produits complexes combinant rétention et transfert des risques et pouvant être utilisés afin de gérer la rétention et/ou de se couvrir sur des risques en particuliers.

Un recours à l'assurance structurée peut être fait afin de gérer l'impact sur le *cash-flow* de l'entreprise ou d'une captive, de sinistres ayant une faible fréquence et une forte intensité. Dans ce cas, l'assurance structurée se matérialise sous la forme de contrats d'assurance pluriannuels, avec les caractéristiques suivantes :

- Une limite globale pendant toute la durée du contrat,
- Chaque année, les primes versées par l'assuré se cumulent et viennent réduire le montant de transfert accordé par l'assureur. De même, le revenu du placement des primes s'ajoute au capital d'indemnisation disponible.
- En cas de survenance d'un événement, le capital disponible est utilisé afin de couvrir la perte dans la limite globale définie au préalable.
- Dans le cas d'une sinistralité n'ayant pas consommé toute la capacité, le capital restant au terme du contrat peut être partagé entre l'assureur et l'assuré.

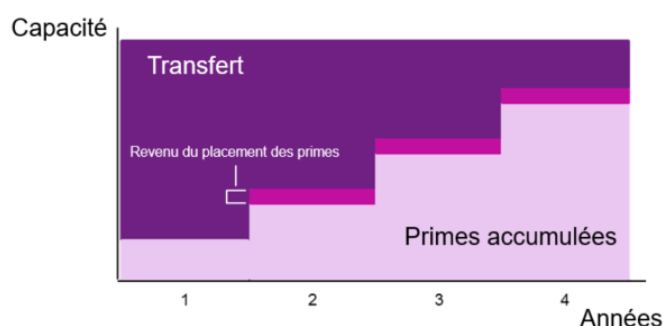


FIGURE I.10 – Exemple de fonctionnement d'une assurance structurée

La mise en place de ce type de solutions permet alors à l'assuré de bénéficier d'une couverture pluriannuelle pour des risques difficiles à couvrir sur le marché traditionnel de l'assurance, le tout en combinant rétention et transfert. En cas de mauvaise sinistralité, les résultats sont lissés sur plusieurs années et, en cas de bons résultats, les profits sont partagés avec l'assureur.



## I.5 Les solutions paramétriques

### I.5.1 Généralités

Les solutions paramétriques, parfois appelées solutions indicelles sont des solutions de transfert de risque dont le fonctionnement diffère des formes traditionnelles d'assurance.

Dans un contrat d'assurance traditionnelle, l'assuré paye une prime et est en échange indemnisé lorsqu'il subit une perte liée à un évènement prévu au contrat. L'indemnisation n'est pas forfaitaire mais indemnitaire, l'assuré reçoit une compensation en fonction des dégâts réels constatés sur les biens assurés. Dans les cas complexes, le paiement ne se fait donc qu'après une évaluation des sinistres par un expert.

A contrario, une police d'assurance paramétrique se base sur les mesures d'un indice pré-défini ou sur l'occurrence d'un évènement, lui aussi pré-défini, pour établir le montant des indemnités. Ainsi, plutôt que d'indemniser en fonction de la perte réelle subie, une assurance paramétrique indemnise en fonction des caractéristiques de l'évènement sous-jacent ou de la valeur de l'indice sous-jacent.

Un contrat d'assurance paramétrique est ainsi constitué de deux composantes essentielles :

#### **Un indice et un évènement déclencheur**

L'évènement déclencheur sert à définir le moment où l'indemnisation est déclenchée. Ce déclencheur peut être un indice atteignant ou dépassant un certain seuil ou un évènement se produisant à une certaine intensité, dans une zone particulière.

L'indice ou l'évènement sous-jacent est choisi dans le but de refléter les pertes subies par l'assuré, il doit donc être corrélé aux pertes économiques qui sont censées être assurées.

Parmi les indices et évènements déclencheurs les plus communs, nous retrouvons les suivants :

- Pour les couvertures dites "climatiques" : vitesse du vent, température, hauteur d'eau, hauteur de pluie, poids des grêlons.
- Couvertures Catastrophes : Survenance d'un tremblement de terre dans une zone pré-définie, passage d'un cyclone dans une zone pré-définie.
- Autres couvertures : Rendement de cultures, production d'électricité, production industrielle, fréquentation d'hôtels ou d'aéroports.

Cette liste est bien évidemment non-exhaustive et une multitude d'autres indices peuvent exister en fonction du risque voulant être couvert. Cependant, tous les indices ou évènements ont le même point commun : ils sont vérifiables de manière indépendante, transparente et surtout, ils sont corrélés aux pertes économiques.

Généralement les indices proviennent d'agences indépendantes mesurant les indices en temps réel, nous pouvons par exemple citer *Météo France*, la *National Oceanic and Atmos-*

*pheric Administration (NOAA)* qui est l'agence américaine responsable de l'étude de l'océan et de l'atmosphère, ou encore *l'Institut d'études géologiques des États-Unis (USGS)*.

Dans certains cas particuliers, lorsque l'indice est la production d'une pièce ou la production d'énergie par exemple, la donnée peut provenir directement du client. Dans ce cas, les données doivent être auditées et validées par un tiers indépendant de l'assuré, un auditeur en général.

### **Un mécanisme d'indemnisation**

Une fois que l'indice atteint ou dépasse un seuil, ou lorsque l'évènement déclencheur a lieu, le client est indemnisé selon une formule définie au contrat, et ce sans prendre en compte la perte réelle subie par le client (*nous reviendrons sur ce point important dans la partie Risque de base*).

Le mécanisme d'indemnisation est défini explicitement dans la police d'assurance. Deux exemples simples peuvent être les suivants :

- Couverture pour les tremblements de terre : si un tremblement de terre a lieu une zone géographique définie au préalable (un cercle autour du site assuré par exemple) et si la magnitude est supérieure à 7 sur l'échelle de Richter, alors l'assuré est indemnisé 10M€.
- Couverture pour les fortes chaleurs : si l'indice est la température relevée à une station météorologique et que la couverture est déclenchée lorsque la température est supérieure à 18°C alors l'assuré peut par exemple être indemnisé 5000€ par degré Celsius au dessus du seuil.

Lorsque l'assuré reçoit l'indemnisation, il peut l'utiliser pour payer n'importe quelle perte économique causée par l'évènement en question, il n'y a aucune restriction sur l'utilisation du capital reçu.

Cependant, il est bon de noter qu'en droit des assurances, un assuré ne peut pas s'enrichir grâce à l'assurance, c'est-à-dire que l'indemnisation versée par l'assureur doit être inférieure ou égale à la perte économique consécutive à l'évènement assuré : c'est le principe d'enrichissement sans cause. Le montant versé par l'assureur dans le cadre d'une assurance paramétrique ne se soustrait pas à ce principe : après une période définie au contrat subséquente au versement de l'indemnisation, l'assuré doit être en mesure de prouver que le montant versé a été utilisé pour compenser des pertes économiques consécutives à l'évènement et, dans le cas où le montant versé était supérieur aux pertes réelles, l'assuré doit rembourser cette somme.

### **1.5.2 Les avantages**

Comme nous l'avons vu dans cette première définition des solutions paramétriques, le fonctionnement de ce type de solution est assez simple : un indice ou un certain type d'évènement est observé, si cet indice atteint ou dépasse un certain seuil, ou si un évènement défini au contrat a lieu, alors l'assuré est indemnisé proportionnellement à la valeur de l'indice ou à l'intensité de l'évènement.

## Rapidité des paiements

De part ce fonctionnement simple et transparent, les solutions paramétriques ont de nombreux avantages, le premier étant la rapidité des paiements.

En effet, dans le cas d'une couverture paramétrique, l'indemnisation dépend uniquement de l'indice ou de l'événement défini au contrat et non pas de la perte réelle subie, ainsi, il n'est pas nécessaire de faire venir un expert sinistre ou d'employer des gestionnaires sinistre locaux après un évènement ayant impacté l'assuré.

Avec une assurance paramétrique, le paiement se fait immédiatement après la parution de l'indice de référence, ce qui généralement prend très peu de temps après la survenance d'un évènement (souvent moins de 10 jours). Cette rapidité des paiements n'est pas comparable avec l'assurance traditionnelle où les délais d'indemnisation pour certains évènements extrêmes comme des tremblements de terre ou des cyclones peuvent prendre jusqu'à 2 ans.

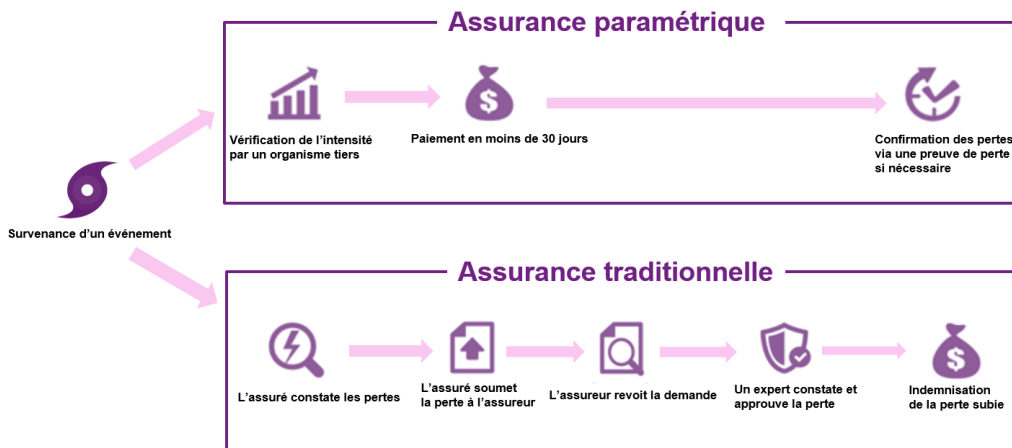


FIGURE I.11 – Processus d'indemnisation

Cette indemnisation rapide est loin d'être négligeable puisqu'elle permet de recevoir un capital rapidement, et donc d'augmenter de manière significative la *trésorerie* de l'assuré au moment où il en a le plus besoin.

## Capacité supplémentaire et complémentaire au marché traditionnel de l'assurance

Comme cela a été vu précédemment, les contrats d'assurance traditionnelle comme les assurances Dommages Directs et Pertes d'Exploitation possèdent beaucoup d'exclusions, tant au niveau des bien assurés que des pertes consécutives à un évènement. Généralement, les Pertes d'Exploitation sans Dommage ne sont par exemple pas indemnisées.

Dans un contrat d'assurance paramétrique, le montant versé peut être utilisé pour compenser n'importe quelle perte économique consécutive à l'évènement. Les solutions paramétriques peuvent donc être mises en place et structurées afin de couvrir spécifiquement de la perte d'exploitation sans dommage ou d'autres risques pour lesquels les couvertures en assurance traditionnelle ne sont pas efficaces.

De même, un contrat d'assurance paramétrique peut venir en complément d'un programme d'assurance traditionnel, par exemple dans le cadre de rachat de franchise pour des risques spécifiques. Nous aurons l'occasion de revenir sur ce point dans la partie suivante.

### **Flexibilité dans la conception de la solution**

Dans un contrat d'assurance paramétrique, toute la conception de la solution est réalisée conjointement par l'assureur, l'assuré et le courtier.

L'assuré peut ainsi choisir librement les risques et sites qu'il souhaite couvrir, les indices qui reflètent au mieux son risque mais aussi tous les paramètres relatifs à l'indemnisation :

- Le seuil de déclenchement,
- La formule d'indemnisation,
- les limites et sous-limites.

La conception d'un produit d'assurance paramétrique étant totalement sur-mesure car reflétant un profil de risque spécifique, l'assuré a un large champ de manoeuvre pour concevoir la solution correspondant le plus à ses attentes, son budget et sa politique de gestion des risques. Ceci étant, la conception de la solution paramétrique pouvant être complexe, les entreprises ont souvent recours à des ressources externes (leur courtier d'assurance par exemple) pour structurer les solutions indicielles.

### **Un accès à d'autres marchés**

Depuis le début de cette introduction aux solutions paramétriques, le terme d'"assurance paramétrique" est utilisé. Cependant, l'emploi de ce terme est un abus de langage : toutes les solutions de couverture paramétrique ne sont pas des solutions assurantielles, c'est-à-dire que le contrat mis en place n'est pas forcément une police d'assurance.

En effet, au vu de la structure des solutions paramétriques, il est tout à fait possible de mettre en place ces solutions sous la forme de produits dérivés financiers : c'est le cas par exemple des dérivés climatiques (put, call ou swap avec pour sous-jacent des données météorologiques comme la température), des *Insurance Linked Securities* (ILS) ou des *cat-bonds*.

Cette possibilité de mettre en place des produits dérivés pour se couvrir contre des risques offre de nombreux avantages parmi lesquels :

- Un accès direct aux marchés financiers dont l'appétit au risque et la capacité sont différents de ceux des marchés d'assurance traditionnels.
- Pas de principe d'enrichissement sans cause : dans le cas d'une solution paramétrique sous forme assurantielle, le montant indemnisé ne doit pas dépasser la perte réelle subie (pas d'enrichissement sans cause en assurance) et le montant versé est régulé après une certaine période (vérification par l'assureur via une "Preuve de perte"). Sous leur forme financière, les solutions paramétriques n'ont pas ce problème, le montant est versé définitivement au bénéficiaire.

- Un intérêt comptable : les produits d'assurance et les produits financiers ont un traitement comptable différent, il y a donc un arbitrage possible entre la forme assurantielle et la forme financière..

Par ailleurs, même si l'assuré décide de se couvrir via une forme assurantielle plutôt que financière, les avantages cités ci-dessus sont toujours valables pour les assureurs eux-mêmes : les assurances paramétriques peuvent être facilement cédées et sont aisément réassurables via des marchés financiers.

Cet accès à un autre marché et à une autre forme de réassurance peut avoir un effet positif sur le prix de ce type de contrat pour l'assuré. En effet, le coût de la réassurance, qui est bien souvent inclus dans la prime commerciale, peut être moins élevé dans le cas de la réassurance paramétrique ou financière comparé à la réassurance traditionnelle.

### **Des solutions innovantes, en lien avec les évolutions technologiques**

Les premières assurances paramétriques remontent à la fin du siècle dernier avec des couvertures climatiques pour l'agriculture, sous l'essor de grands assureurs et réassureurs. Même si les solutions paramétriques sont loin d'être nouvelles sur le marché de l'assurance, elles sont de plus en plus nombreuses et précises en partie grâce à l'amélioration de la collecte et de la transmission des données.

Les avancées technologiques en terme de satellites ou d'objets connectés permettent désormais d'avoir des données fiables et en temps réel, pour presque toute la planète et pour un grand panel de risques différents. L'accès à cette qualité et quantité de données permet donc une modélisation plus précise et par conséquent une conception de solutions paramétriques répondant mieux aux besoins des assurés, ainsi qu'une tarification plus juste.

Ainsi les avantages des solutions paramétriques sont nombreux comparés à l'assurance traditionnelle. Cependant les solutions indiciaires comportent aussi des inconvénients, à commencer par la présence du risque de base.

### **1.5.3 Le risque de base**

Nous abordons dans cette section le concept de risque de base, qui est le principal inconvénient des solutions paramétriques. Simplement, le risque de base est le risque que l'indemnisation apportée par la couverture indiciaire ne soit pas égale à la perte économique subie. Il est bon de noter que le risque de base existe aussi en assurance traditionnelle *via* les conditions et exclusions des polices.

Pour l'assurance paramétrique, il existe deux types de risque de base :

- Le risque de base de type I, le faux-positif : le paiement est supérieure aux pertes réelles de l'assuré ou, le seuil de déclenchement est atteint alors que l'assuré n'a subi aucune perte. Alors, le client devra rendre à l'assureur la somme non-utilisée afin de compenser les pertes occasionnées par l'évènement assuré.
- Le risque de base de type II, le faux-négatif : Le paiement est inférieur aux pertes réelles de l'assuré ou, le seuil de déclenchement n'est pas atteint alors que l'assuré a subi des

pertes. En effet, cela peut arriver lorsque l'indice ou le seuil de déclenchement est mal calibré. Dans ce cas, l'assureur ne versant que la somme définie au contrat, l'assuré ne sera pas indemnisé pour la différence entre la perte économique et le montant versé.

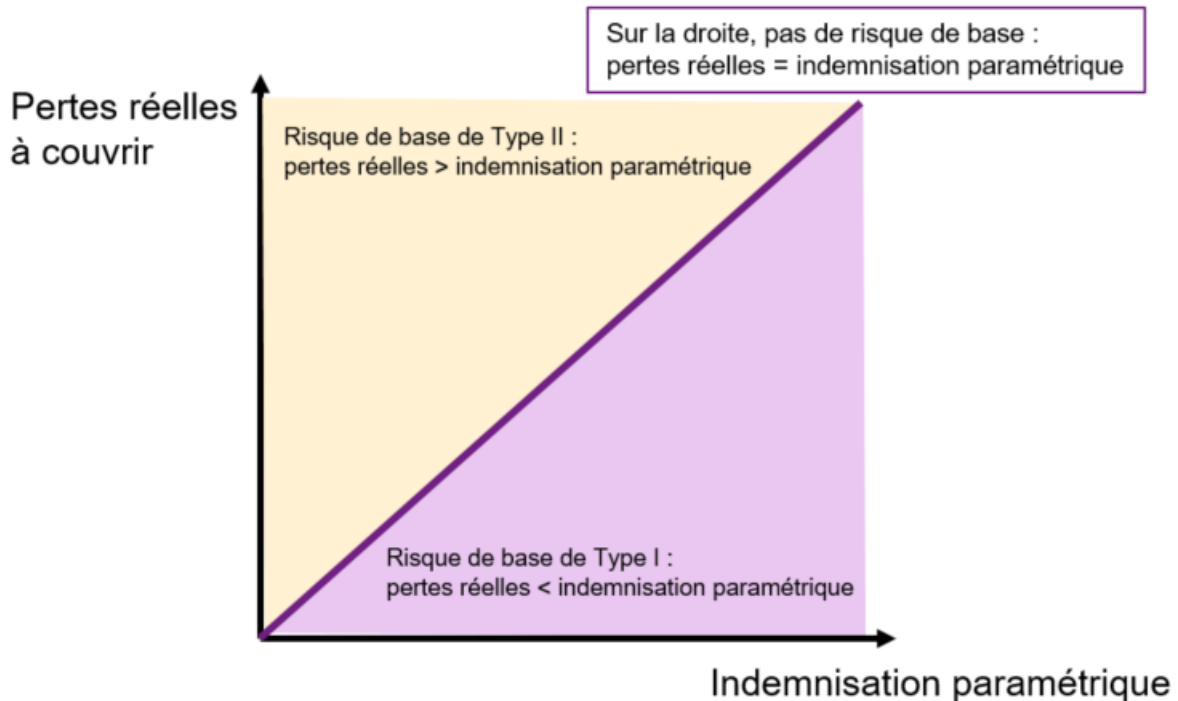


FIGURE I.12 – Risque de base

Dans les deux cas le risque de base est indésirable. Dans le cas du faux-négatif, l'assuré peut être en danger si il n'est pas indemnisé pour une perte élevée qu'il subit. Dans le cas du faux-positif, l'assuré est couvert pour des événements ne l'impactant pas, il paie donc une prime trop élevée par rapport à ses besoins et son profil de risque réel.

Le risque de base est donc un aspect très important des solutions paramétriques, mais il est aussi inhérent à leur fonctionnement : lors de la conception et de la structuration d'une solution paramétrique, l'objectif est de réduire le risque de base au maximum, tout en sachant qu'il est impossible de le faire disparaître totalement.

Les causes du risque de base peuvent être multiples :

- Indice peu fiable ou indisponible au moment d'un événement,
- Mauvaise modélisation des risques,
- Indice non-corrélé aux pertes,
- Formule d'indemnisation mal calibrée.

Le premier point est un écueil facilement évitable : avec les avancées technologiques les indices utilisés sont généralement fiables et de qualité. Cependant, les trois autres points sont plus difficiles à appréhender et constituent le principal travail d'un actuaire s'intéressant à ces sujets.

En effet, la structuration d'une solution paramétrique, c'est-à-dire le fait de choisir le "meilleur" indice, seuil de déclenchement, formule d'indemnisation et limites, nécessite une modélisation des risques précise, en accord avec le profil de risque de l'assuré.

## 1.5.4 Articulation entre assurance paramétrique et assurance traditionnelle

Comme cela a été vu, l'assurance paramétrique offre de nombreux avantages par rapport à l'assurance traditionnelle, et encore plus dans le contexte de redressement du marché qui a été présenté précédemment.

Ainsi, il est de plus en plus fréquent que des entreprises choisissent de compléter leur programme d'assurance traditionnelle avec des solutions d'assurance paramétrique. Nous présentons ci-dessous deux options possibles où les polices d'assurance DDPE et les polices d'assurance paramétriques fonctionnent conjointement.

### 1.5.4.1 L'option "carve-out"

La première option possible est l'option communément appelée "carve-out" qui consiste à exclure un risque d'une police d'assurance traditionnelle et à l'assurer via une solution paramétrique. Par exemple, pour le risque cyclonique, un schéma possible peut être le suivant :

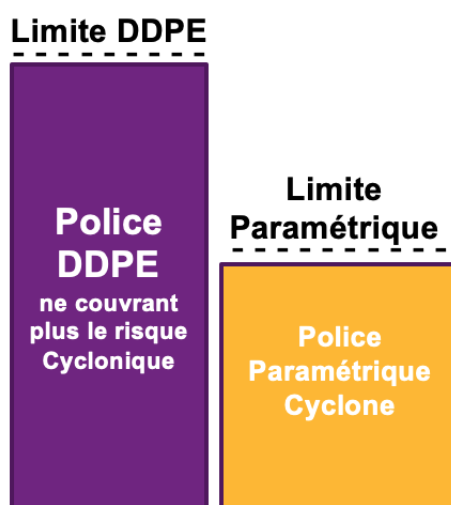


FIGURE I.13 – Option "Carve-out"

Dans cette option, la police d'assurance DDPE ne couvre plus le risque cyclonique, ce risque est exclu et est totalement couvert via une solution paramétrique. Les deux polices fonctionnent ici de manière séparée et les franchises et limites sont totalement indépendantes.

Cette option a plusieurs avantages :

- Elle permet de sortir de la police DDPE un risque qui est le déterminant du prix : en ne couvrant plus ce risque, le prix diminue.
- La police traditionnelle est plus facile à placer auprès des assureurs car elle ne couvre plus un risque pour lequel les assureurs ont des capacités très limitées.

- Les sites couverts via l'assurance paramétrique sont couverts pour des garanties étant exclues via l'assurance traditionnelle telles que les pertes d'exploitation sans dommage successives à un cyclone. De plus, les sites sont couverts en leur totalité, il n'y a pas d'exclusion au niveau des biens assurés.
- Elle permet d'avoir les avantages du paramétrique pour un péril de forte intensité pouvant affecter significativement les résultats financiers et la trésorerie disponible : rapidité de paiement, flexibilité dans la conception de la solution...

#### I.5.4.2 Option "Rachat de franchise"

Une seconde option possible est l'option "rachat de franchise". Cette option consiste à augmenter les franchises pour un risque en particulier et à couvrir ensuite les pertes sous franchise via une solution paramétrique. Un exemple, toujours pour le risque cyclonique :

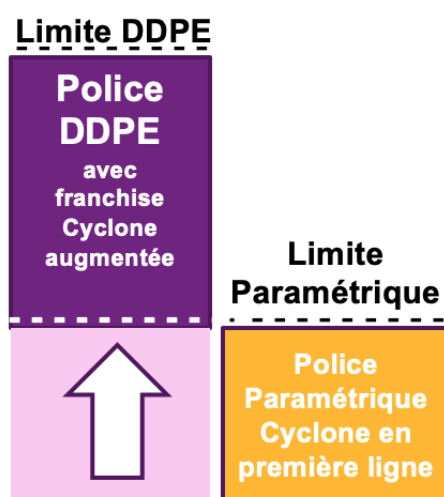


FIGURE I.14 – Option "Rachat de franchise"

Dans le cas présent, l'idée est d'augmenter les franchises, spécifiquement pour le risque cyclonique et de couvrir les pertes sous franchise avec une police paramétrique. Pour ce faire, la solution paramétrique est sous-limitée au montant de la franchise de l'assurance DDPE.

Il est bon de noter que les deux polices sont tout de même indépendantes, la police DDPE n'agissant pas comme un contrat de réassurance XS. En effet, lorsque un sinistre survient, le montant d'indemnisation entre paramétrique et traditionnel peut être différent, l'indemnisation étant forfaitaire en paramétrique et indemnitaire en traditionnelle. Le traditionnel prend le relais lorsque la franchise en traditionnelle est consommée : ce montant peut être différent de ce qui a déjà été payé en paramétrique.

Cette seconde option a les mêmes avantages que la première mais à un coût moindre car le risque n'est pas totalement couvert via une assurance paramétrique.

#### Remarque

Une troisième option envisageable pourrait consister à faire de la couverture paramétrique un XS : diminution des limites pour un risque en particulier dans la police DDPE et couverture



paramétrique en excess de la police DDPE. Pour le risque cyclonique, cela donnerait :

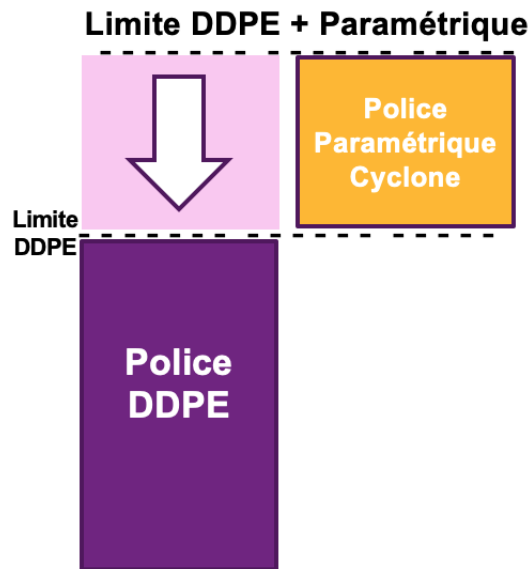


FIGURE I.15 – Option "XS"

Cependant, cette option est rarement retenue, principalement pour deux raisons :

- Les porteurs de risques ne souhaitent pas que la consommation de la capacité en assurance traditionnelle soit un déclencheur d'une solution paramétrique,
- Dans le cas d'un "double déclencheur" (déclencheur paramétrique + capacité traditionnelle consommée), les avantages de la solution paramétrique sont moins évidents, il n'y a plus de rapidité de règlement par exemple.

### I.5.5 Résumé

Comme cela a été vu dans les sections précédentes, les solutions paramétriques ont un fonctionnement simple et disposent de nombreux avantages :

- Rapidité des paiements,
- Flexibilité dans la conception,
- Capacité supplémentaire et complémentaire,
- Accès à d'autres porteurs de risque.

Cependant, il est important de préciser qu'elles sont rarement conçues dans le but de remplacer complètement les solutions d'assurances traditionnelles : les solutions d'assurances paramétriques couvrent généralement un seul risque à la fois et sont limitées par les données disponibles. De plus, la notion de risque de base, inhérente aux solutions paramétriques, rend parfois la conception difficile.

Afin de résumer cette section sur les solutions paramétriques, nous présentons les principales caractéristiques et différences entre l'assurance paramétrique et traditionnelle dans le tableau suivant :

Terme	Assurance traditionnelle	Assurance Paramétrique
Déclenchement	Pertes ou dommages à un bien physique	Un indice dépassant un seuil ou survenance d'un évènement défini
Indemnisation	Remboursement des pertes réellement subies	Montant prédéfini au contrat
Risque de base	Conditions et exclusions de la police	Corrélation entre la formule d'indemnisation et les pertes subies
Gestion des sinistres	Plusieurs mois ou années selon la complexité du sinistre	Indemnisation quelques jours après la publication de l'indice
Période du contrat	Annuelle, pluriannuelle rarement	Mensuelle ; annuelle ou pluriannuelle
Structure	Produits et police standards	Flexibilité dans la structuration du produit
Forme	Assurantielle	Assurantielle ou Produit Dérivé

## I.6 Étude de cas : Le paramétrique en complément du marché traditionnel

### I.6.1 Contexte

Comme nous l'avons vu dans les sections précédentes, le marché de l'assurance des entreprises, et plus particulièrement le marché de l'assurance dommages est dans une période de redressement, cela se traduisant par une augmentation des prix, une baisse des capacités et des pressions sur les garanties.

Afin d'illustrer nos propos sur l'assurance paramétrique et plus généralement sur le rôle du Transfert Alternatif de Risque dans ce contexte de redressement du marché, nous décidons de nous intéresser au cas d'une société pouvant être confrontée à des difficultés lors du renouvellement de sa police Dommages Directs et Pertes d'Exploitations.

Le cas choisi ici est largement inspiré de situations auxquelles les clients de *Gras Savoye Willis Towers Watson* ont du faire face lors des deux derniers renouvellements. Pour des raisons de confidentialité, les données utilisées dans l'étude sont anonymisées et les valeurs numériques ont été normalisées ou modifiées.

### I.6.2 Caractéristiques de l'assuré

La société que nous souhaitons accompagner dans le renouvellement de sa police DDPE a les caractéristiques suivantes :

- Elle a une exposition forte au risque de cyclone dans le bassin nord-atlantique. Nous disposons de la liste des sites, des valeurs assurées et du type de bien assuré.
- Elle a subi plusieurs sinistres à causes d'évènements cycloniques au cours des dernières années. Nous disposons de l'historique des sinistres depuis 2010.

Plus précisément, dans le bassin Nord-Atlantique, le client possède 12 entrepôts de stockage et d'approvisionnement situés aux endroits suivants :

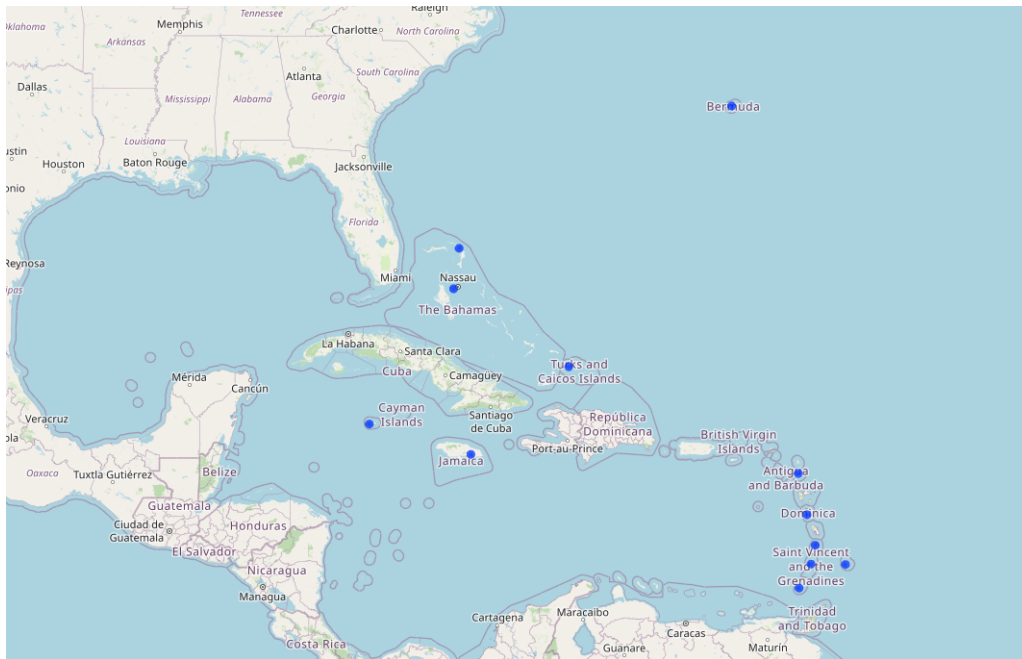


FIGURE I.16 – Les sites assurés dans le bassin Nord-Atlantique

Nous aurons l'occasion de revenir sur le type de construction et les valeurs assurées des sites dans les chapitres à venir.

Dans le contexte de redressement du marché, à cause de ses sites multi-sinistrés et de son exposition forte au risque cyclonique, cette société peine à renouveler sa police Dommages Directs et Pertes d'Exploitations. Plus précisément, les assureurs proposent une franchise par risque de 5% des valeurs assurées pour les événements cycloniques, contre 150,000€ auparavant.

### I.6.3 Objectif de l'étude

L'objectif de ce mémoire est d'étudier dans un premier temps le risque cyclonique dans le bassin Nord-Atlantique, de modéliser ce risque et d'ensuite appliquer les résultats du modèle à l'exposition du client.

Avec les résultats du modèle, il sera ensuite possible de quantifier l'impact de la hausse de franchise pour le risque cyclonique. Afin de garder la même tolérance au risque que ce que la société avait précédemment, nous nous intéresserons à la structuration et à la mise en place d'une solution d'assurance paramétrique pour les cyclones, dans le but de couvrir les pertes sous franchises (option présentée en II.5.4.2) et d'améliorer le coût total du risque pour la société étudiée.

Afin de mesurer l'impact de la hausse des franchises, pour ensuite concevoir la solution paramétrique et la structure convenant le mieux au besoin et au profil de risque du client, nous allons dans un premier temps nous intéresser plus précisément au risque cyclonique dans le bassin Nord-Atlantique.

## — Chapitre II —

---

# Le risque cyclonique dans le bassin Nord-Atlantique : Définition et modélisation

---

Dans ce chapitre, nous nous intéressons au risque cyclonique dans le bassin Nord-Atlantique comprenant le Golfe du Mexique, la Mer des Caraïbes et l'Océan Atlantique Nord. Dans un premier temps, nous définissons ce que sont les cyclones et donnons leurs principales caractéristiques, pour ensuite s'intéresser à la modélisation du risque cyclonique dans le bassin Nord-atlantique.

## II.1 Le risque cyclonique dans le bassin Nord-Atlantique

### II.1.1 Définition et généralités

Un cyclone est un terme météorologique qui désigne une grande zone où l'air atmosphérique est en rotation autour d'un centre de basse pression. Il existe plusieurs types de cyclones en fonction de la zone géographique où ils se forment, mais aussi de leurs caractéristiques :

- Les cyclones tropicaux qui se forment au niveau des mers tropicales. Les noms donnés à ces événements météorologiques varient en fonction des bassins où ils ont lieu : Ouragan dans le bassin Nord-Atlantique et dans le bassin pacifique Nord-Est, Typhon en Asie de l'Est ou tout simplement cyclone dans le reste du monde.
- Les cyclones extra-tropicaux qui se forment entre la ligne des tropiques et le cercle polaire.
- Les cyclones subtropicaux qui sont des cyclones extra-tropicaux mais avec des caractéristiques de cyclones tropicaux (coeur chaud par exemple).
- Les cyclones polaires qui sont des cyclones passant dans les régions arctiques et antarctiques.

Dans notre cas, ce sont les cyclones tropicaux qui nous intéressent. En effet, les cyclones tropicaux sont parmi les événements naturels les plus dévastateurs et représentent donc un

risque majeur pour les zones intertropicales tant au niveau humain, qu'économique et environnemental.

En effet, lorsque qu'ils viennent à frapper les côtes, les cyclones tropicaux ont plusieurs conséquences :

- Ils produisent des vents violents qui endommagent les véhicules, les infrastructures, les bâtiments et qui mettent en mouvement des projectiles rendant l'environnement extérieur extrêmement dangereux.
- Ils créent des ondes de tempête occasionnant des montées de la mer et donc des inondations.
- Ils sont accompagnés d'une houle cyclonique. Cette houle peut occasionner de nombreux dommages sur les zones côtières, avec des vagues pouvant atteindre 20 mètres.
- Ils engendrent de fortes pluies pouvant provoquer des inondations, des glissements de terrain et des destructions de routes.



FIGURE II.1 – Ouragan *Dorian* en 2019 - NOAA

Ce potentiel destructeur des cyclones tropicaux en fait un risque particulièrement important pour les populations, les entreprises et les gouvernements des zones intertropicales. De plus, il a été observé depuis plusieurs années une recrudescence du nombre de cyclone atteignant des intensités très élevées et donc, occasionnant de sérieux dégâts.

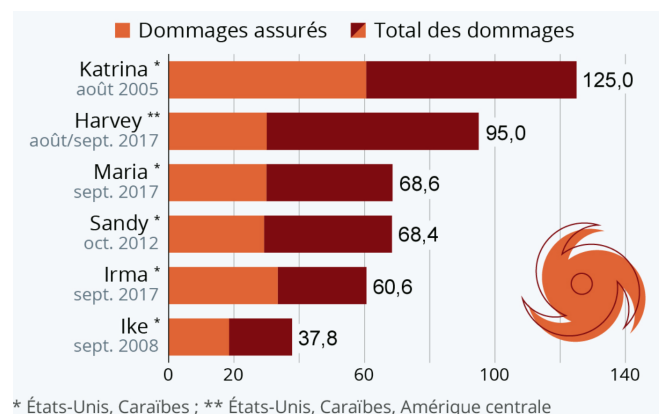


FIGURE II.2 – Ouragans les plus dévastateurs entre 1980 et 2019 - *montants en milliards de dollars - Munich Re*

Comme nous pouvons le voir ci-dessus, l'année 2017 a vu se former 3 des 6 ouragans ayant causés les plus grandes pertes économiques. Outre l'intensité extraordinaire de ces trois cyclones, ces pertes élevées pour des cyclones récents peuvent aussi s'expliquer par l'urbanisation

croissante qui a lieu dans cette région du monde.

## II.1.2 Les caractéristiques physiques des cyclones tropicaux

Afin de mieux comprendre le fonctionnement d'un cyclone et d'ainsi mieux appréhender la modélisation, il est nécessaire de donner plus de détails sur le cycle de vie d'un cyclone.

### II.1.2.1 Formation

Au vu de l'importance du risque cyclonique dans le bassin Nord-Atlantique, la recherche scientifique sur ce sujet est particulièrement abondante et dynamique. Cependant, les cyclones tropicaux sont des événements météorologiques complexes et tous les phénomènes constituant leur cycle de vie ne sont pour le moment pas encore totalement compris.

Concernant la formation des cyclones, il est courant de considérer que les facteurs suivants sont les plus importants :

- La température de la mer doit dépasser une certaine température, aussi bien en profondeur qu'en surface : de l'ordre de 28°C à 29°C pour la température de surface et, la température doit être supérieure à 26°C jusqu'à 60 mètres de profondeur.
- Une perturbation atmosphérique doit exister pour que le cyclone se forme. Les conditions doivent être les mêmes que lors de la formation d'orages : une température atmosphérique basse et diminuant rapidement avec l'altitude, ainsi qu'une humidité élevée. De plus, des vents doivent être présents mais de direction et de force constante non-verticale.
- Ces conditions doivent avoir lieu à plus de 10° au nord de l'équateur. En effet, il faut que la force de Coriolis soit de composante horizontale non-nulle pour que le cyclone engage une rotation et qu'elle se maintienne. Proche de l'équateur, la force de Coriolis a une composante horizontale presque nulle puisque la latitude est proche de 0.

### II.1.2.2 Structure, cycle de vie et classification

Lorsque le cyclone tropical est formé, il est constitué des éléments suivants :

- Une dépression : une zone de basse pression autour de laquelle le cyclone est en rotation.
- Une couverture nuageuse centrale dense : une zone autour de la dépression centrale, où ont lieu des orages et de fortes pluies.
- Un œil : la zone centrale circulaire du cyclone autour de laquelle les nuages ont un mouvement descendant. Au sein de l'œil les vents sont faibles et il n'y a pas de nuages de pluie.
- Un mur de l'œil : bordure circulaire de l'œil du cyclone de convection atmosphérique et de vents intenses. C'est l'endroit où les conditions sont les plus extrêmes et les vents les plus violents.

Visuellement, un cyclone tropical dans l'hémisphère nord ressemble à ceci :

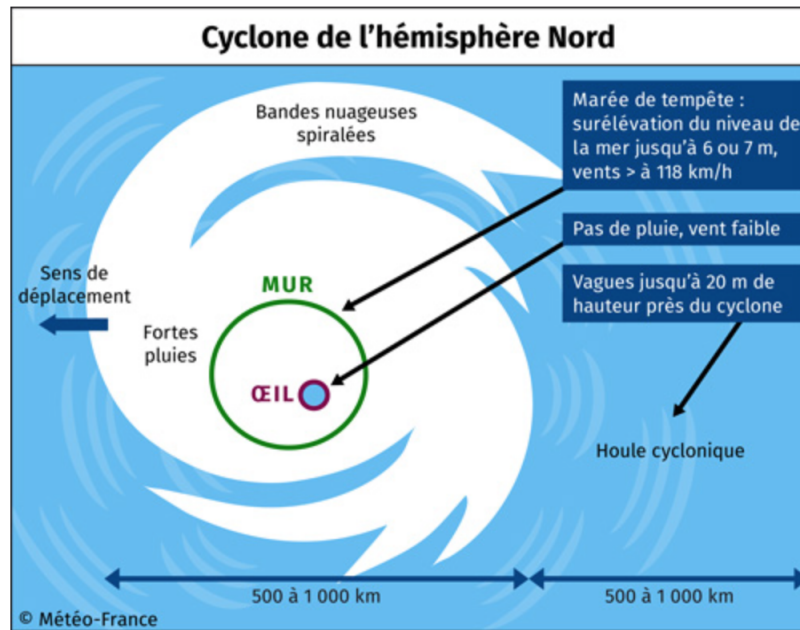


FIGURE II.3 – Cyclone Tropical, vue aérienne - *Meteo France*

Et en coupe verticale :

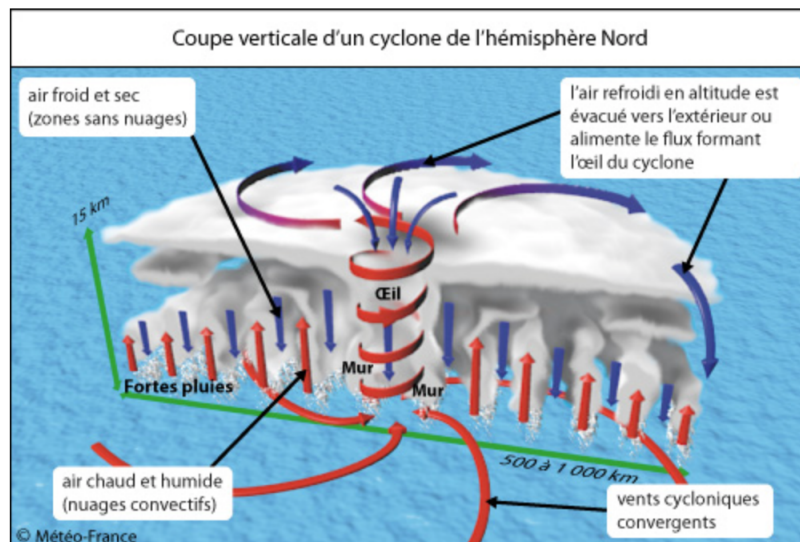


FIGURE II.4 – Cyclone Tropical, coupe verticale - *Meteo France*

Lorsqu'un cyclone tropical est actif ou lorsque des études sont menées à posteriori, des variables précises sont suivies afin d'estimer la puissance et le potentiel destructeur de l'évènement. Parmi ces variables, les plus importantes sont les suivantes :

- La vitesse maximale des vents : c'est le maximum de la vitesse moyenne des vents soutenus à l'intérieur du cyclone, à un moment donné, pendant une période donnée, à une altitude donnée. Pour les cyclones tropicaux dans le bassin Nord-Atlantique, la vitesse maximale des vents est souvent le maximum de la vitesse moyenne des vents soutenus à l'intérieur du cyclone, pendant 1 minute à 10 mètres d'altitude. Dans d'autres bassins la période utilisée est 10 minutes, comme par exemple dans le bassin Pacifique Nord-Ouest. Il existe des facteurs de conversion entre les deux vitesses maximales.

- Le rayon de vitesse maximale des vents : la distance entre le centre de l'œil du cyclone et l'endroit où est relevée la vitesse maximale des vents.
- La Pression atmosphérique centrale : la pression au centre du cyclone.

Lorsque le cyclone tropical est formé, il fonctionne comme une machine thermique et se nourrit de la différence thermique entre l'atmosphère et l'océan. Ainsi, dans les eaux chaudes, le cyclone tropical gagne en énergie et donc en intensité : les pressions sont plus faibles et les vitesses de vent plus élevées. De manière équivalente, le cyclone tropical perd en puissance dans les eaux plus froides et lorsqu'il touche terre.

Afin de suivre les cyclones et leurs intensités, une échelle est couramment utilisée, il s'agit de l'échelle de Saffir-Simpson. Cette échelle a pour fonction de classer les cyclones en 5 catégories en fonction de leur vitesse maximale des vents, le but étant de classer ensemble des cyclones ayant des impacts potentiels identiques.

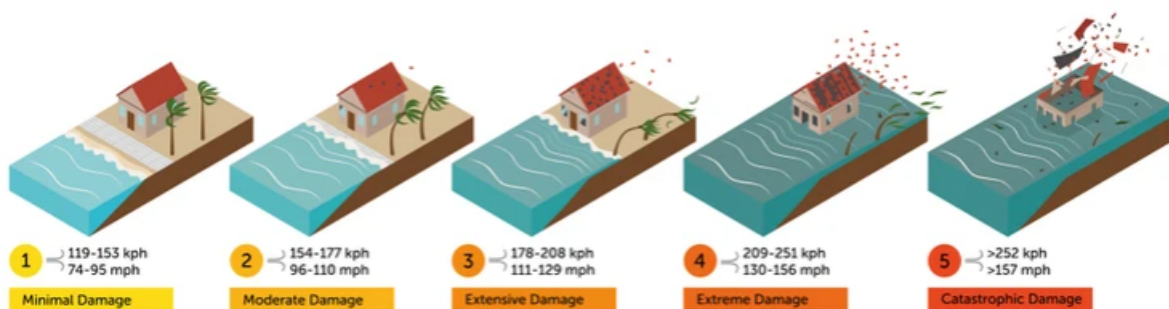


FIGURE II.5 – Échelle de Saffir-Simpson et dégâts occasionnés - NOAA

Deux autres catégories complémentaires sont aussi utilisées afin de compléter l'échelle de Saffir-Simpson pour les événements de plus faible intensité :

- La catégorie Dépression Tropicale : vents jusqu'à 63 km/h.
- La catégorie Tempête Tropicale : vents entre 64 et 118 km/h.

Il est cependant important de noter que cette échelle reflète les dommages occasionnés par un cyclone en moyenne. En effet, en fonction de la distance entre le cyclone et les côtes terrestres ou d'autres facteurs comme la taille physique, un cyclone de catégorie 3 peut parfois occasionner plus de dommages qu'un cyclone de catégorie 5. Nous aurons l'occasion de revenir sur ce point lorsque nous nous intéresserons aux résultats du modèle de vulnérabilité.

Enfin, comme nous l'avons vu précédemment, le cyclone perd en intensité dans les eaux plus froides. Ainsi, le cyclone tropical vient à se dissiper principalement lorsque l'eau de l'océan s'est trop refroidie, où lorsqu'il est sur la terre pendant une longue durée. D'autres raisons peuvent expliquer la dissipation d'un cyclone, comme par exemple le fait que la force de Coriolis diminue, ce qui arrive lorsque le cyclone tropical se rapproche de l'équateur.

Afin d'avoir une meilleure compréhension du risque cyclonique dans le bassin Nord-atlantique et dans le but de pouvoir quantifier les pertes potentielles causées par les cyclones pour la société que nous étudions, nous nous intéressons à la modélisation du risque cyclonique.



## II.2 La modélisation du risque cyclonique

Dans cette partie, nous présentons dans un premier temps les modèles catastrophes de manière générale puis, nous étudions plus particulièrement les modèles pour les cyclones. Nous nous intéressons à plusieurs modèles aléa existant pour le risque cyclonique dans le bassin Nord-atlantique, dans l'objectif de choisir la modélisation la plus adaptée à l'étude.

### II.2.1 Les modèles catastrophe

Dans le but de compléter les données historiques disponibles pour un péril particulier et de quantifier précisément le risque sous-jacent, il est nécessaire de générer des scénarios fictifs probables et d'ensuite mesurer l'impact de ces événements fictifs sur les sites pour lesquels l'étude est menée.

Pour ce faire, il est courant d'utiliser des modèles catastrophe. Les modèles catastrophe sont divisés en 4 modules différents :

- Le module Aléa : Le module aléa est un catalogue d'événements fictifs probables, construit à l'aide de connaissances physiques et de méthodes statistiques.
- Le module Exposition : Le module exposition contient toutes les informations relatives aux risques pour lesquels l'analyse est menée : localisations, valeurs, caractéristiques physiques (type de construction, matériaux utilisés...).
- Le module Vulnérabilité : Ce module met en lien l'exposition et l'aléa, il associe à chaque événement stochastique une perte en fonction des caractéristiques physiques de l'endroit touché.
- Le module financier : Ce module sert à appliquer les conditions financières relatives aux pertes calculées via le module vulnérabilité. Cela peut être l'application de l'assurance ou de la réassurance par exemple.

Schématiquement, un modèle catastrophe fonctionne donc de la manière suivante :

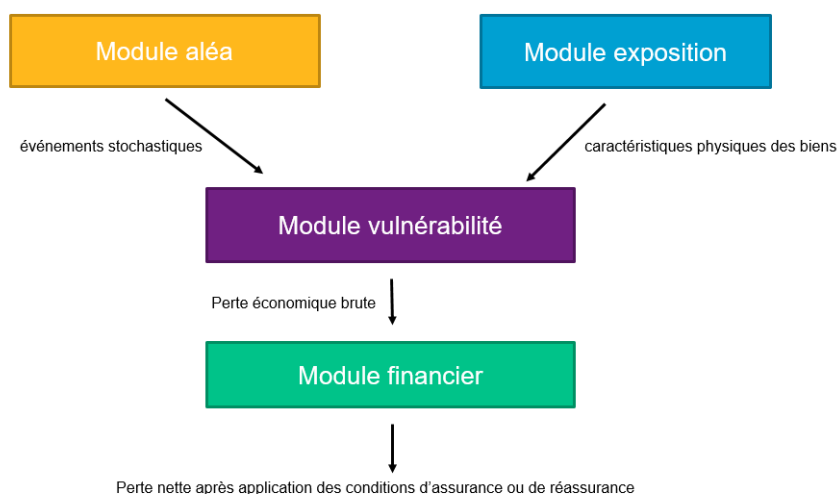


FIGURE II.6 – Fonctionnement d'un modèle catastrophe

Dans le cadre de la structuration d'une solution d'assurance paramétrique, les trois premiers modules sont particulièrement importants puisqu'ils permettent de choisir les bons déclencheurs et des formules d'indemnisations corrélées aux pertes de l'assuré. Plus particulièrement, les relations entre le module aléa et le module vulnérabilité font l'objet d'une attention particulière puisque l'assurance paramétrique vise à indemniser l'assuré uniquement en fonction de l'aléa sous-jacent et non de la perte économique réelle.

Afin de mettre en place une solution d'assurance paramétrique pour la société que nous étudions, nous nous intéressons dans un premier temps au module aléa.

## II.2.2 Module aléa pour les cyclones

### II.2.2.1 Les données historiques

Comme cela a été vu dans la partie précédente, les cyclones sont des événements naturels pouvant être destructeurs et sont donc suivis avec la plus grande attention. Plusieurs organismes à travers le monde s'occupent du suivi des cyclones, avant, pendant et après l'événement. Pour le bassin Nord-atlantique, ce sont souvent les données du *National Hurricane Center* (NHC), une filiale de la *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA) qui sont utilisées afin de suivre un événement ou cours, ou de réaliser des études *a posteriori*.

La NOAA propose ainsi un historique complet des événements cycloniques depuis 1851 jusqu'à aujourd'hui. Cependant, la qualité et la fiabilité des données n'est pas la même pour toutes les années. On distingue généralement trois périodes pour les cyclones du bassin Nord-atlantique :

- de 1851 à 1950 : Les trajectoires et vitesses de vent ont été reconstituées à l'aide d'informations historiques présentes dans des atlas utilisés pour la navigation. Pendant cette période, les cyclones n'étaient pas nommés et les météorologues disposaient d'un nombre limité d'outils pour suivre les caractéristiques physiques d'un cyclone.
- de 1950 à 1980 : A partir des années 50, les suivis des cyclones sont devenus plus précis avec l'utilisation d'avions pour mesurer la pression atmosphérique, les vitesses de vent et les positions des cyclones. Cependant, les vols de reconnaissance n'étaient pas utilisés systématiquement et restaient limités : beaucoup de relevés physiques pour les cyclones de cette période sont attribués aux stations météorologiques.
- à partir de 1980 : utilisation quasi-systématique d'avions pour mesurer les données physiques et utilisation massive des satellites pour relever précisément les données importantes. Les données de cette période sont considérées comme étant relativement fiables et c'est donc sur ces données que se basent la plupart des recherches scientifiques à l'heure actuelle.

Les données historiques pour ces différentes périodes sont accessibles en *open-data* via la base de données *IBTrACS (International Best Track Archive for Climate Stewardship)* gérée par la NOAA. Cette base de données contient les caractéristiques physiques des cyclones à intervalle de temps 6 heures ou 3 heures, en fonction de la période ou de la zone de passage du cyclone. Pour chaque cyclone il est alors possible d'avoir les informations suivantes à différents moments :

- Latitude/Longitude du cyclone (en degré),

- Vitesse de déplacement du cyclone (en nœuds),
- Direction de déplacement du cyclone (en degrés),
- Vitesse maximale des vents du cyclone (soutenue pendant 1 minute à altitude 10 mètres, en nœuds),
- Rayon de vitesse maximale des vents (en kilomètres),
- Pression minimale centrale (en hectopascals).

Ainsi, ces données historiques disponibles via la base de données *IBTrACS* permettent d'avoir une première idée du risque cyclonique dans le bassin Nord-Atlantique. Cependant, l'historique fiable, c'est-à-dire à partir de 1980, est trop faible pour mener des études quantitatives dans certaines zones.

En effet, les événements cycloniques sont relativement rares, on dénombre en moyenne 6,7 événements cycloniques de catégorie supérieure ou égale à 1 par an dans le bassin Nord-atlantique (de 1980 à 2019), et 2,7 avec une catégorie supérieure ou égale à 3 sur l'échelle de Saffir-Simpson.

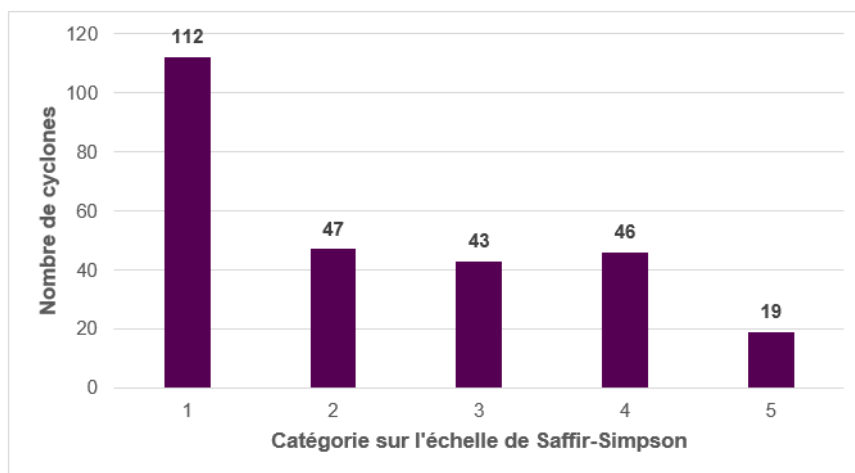


FIGURE II.7 – Nombre de cyclones historiques par catégorie, de 1980 à 2019

Ainsi, en regardant dans l'histogramme ci-dessus réalisé à partir de la base *IBTrACS* de 1980 à 2019, on constate que seuls 19 cyclones ont atteint la catégorie 5 et ce sur l'ensemble du bassin Nord-Atlantique. Si on ajoute à cette faible probabilité d'occurrence le fait que les cyclones touchent des zones restreintes sur l'ensemble du bassin lorsqu'ils ont lieu, on constate que certaines zones ont été épargnées par le passé, ce qui ne veut pas dire qu'elles ne sont pas risquées.

De ce fait, quantifier le risque cyclonique à un endroit précis uniquement à l'aide de données historiques est un exercice presque impossible puisque les événements cycloniques extrêmes ont des périodes de retour élevées et l'historique fiable est assez restreint. Afin de quantifier de manière précise le risque cyclonique, il est donc nécessaire d'étendre la vision historique. Pour ce faire, nous abordons dans la section suivante la modélisation de l'aléa cyclonique.

### II.2.2.2 La modélisation de l'aléa pour les cyclones

Dans le but de compléter les données historiques sur les cyclones, une approche communément choisie est de créer des catalogues d'événements fictifs ayant une distribution similaire à celle des événements historiques. Pour ce faire, les données fictives sont généralement construites via une approche par simulation de type *Monte-Carlo*.

L'idée est de construire un grand nombre de saisons cycloniques, en construisant pas à pas la trajectoire et les caractéristiques physiques de chaque cyclone qui constitue une année fictive d'exposition. La construction de chaque événement cyclonique est basée sur les données historiques observées, le but étant de conserver les mêmes distributions physiques que les événements historiques.

Les méthodes de modélisation que nous étudions ici sont basées sur des méthodes purement statistiques. Certains modèles peuvent coupler des méthodes statistiques à des modèles physiques dynamiques mais ils ne sont pas étudiés dans ce mémoire.

Afin de construire un grand nombre de saisons cycloniques, nous nous intéressons au processus de modélisation suivant :

- Modélisation du nombre d'événements cycloniques dans une année,
- Modélisation du point de départ de chaque cyclone,
- Modélisation de la trajectoire de chaque cyclone et des caractéristiques physiques en chaque point de la trajectoire (vitesse maximale des vents, pression centrale, rayon de vitesse maximale de vents...)

Cette méthode est utilisée dans plusieurs modèles purement statistiques développés ces dernières années par des scientifiques spécialisés dans le domaine. C'est le cas par exemple du modèle de Nakamura, *et al.* dans [7] ou encore du modèle de Bloemendaal, *et al.* dans [8].

Plus particulièrement, nous décidons dans les parties suivantes de reprendre les méthodes de modélisation de Bloemendaal, *et al.* et Nakamura, *et al.*, d'analyser les hypothèses statistiques sous-jacentes et d'apporter des modifications lorsque cela semble nécessaire.

### II.2.2.3 Modélisation du nombre annuel d'événements

Nous nous intéressons dans un premier temps à la modélisation du nombre annuel d'événements cycloniques. Plus précisément, nous souhaitons modéliser le nombre annuel d'événements atteignant au moins la catégorie de Tempête Tropicale, c'est-à-dire ayant une vitesse maximale des vents de plus de 34 nœuds.

Historiquement, en utilisant la base de données IBTrACS de 1980 à 2019, le nombre annuel d'événements est le suivant :

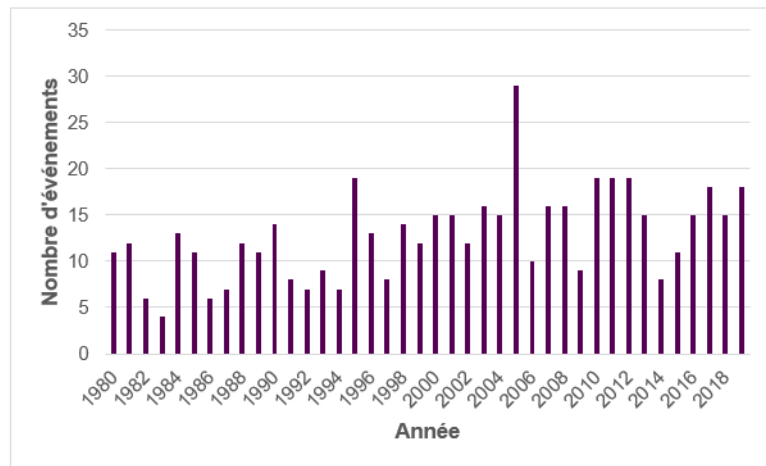


FIGURE II.8 – Nombre d'événements de catégorie "Tempête Tropicale" ou plus de 1980 à 2019

Sous forme d'histogramme, cela donne la répartition suivante :

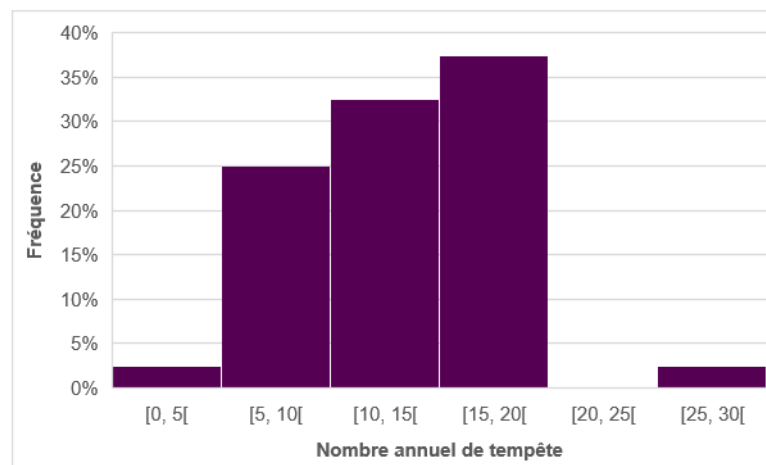


FIGURE II.9 – Histogramme des événements de catégorie "Tempête Tropicale" ou plus de 1980 à 2019

Les deux lois utilisées usuellement pour modéliser des fréquences sont la loi de Poisson et la loi binomiale négative.

**Définition** (Loi de Poisson) : Si  $X$  suit une loi de Poisson de paramètre  $\lambda \in \mathbb{R}^{+*}$ , alors pour  $k \in \mathbb{N}$  :

$$\mathbb{P}(X = k) = \frac{\lambda^k}{k!} e^{-\lambda}$$

Pour une loi de Poisson de paramètre  $\lambda$ , l'espérance et la variance sont identiques et sont égales au paramètre  $\lambda$ .

Dans le cas du nombre annuel d'événements, cela ne semble pas adapté puisque la moyenne empirique est égale à 12,9 et la variance à 23,7.

**Définition** (Loi binomiale négative à paramètre réel) : Si  $X$  suit une loi binomiale négative de paramètres  $r \in \mathbb{R}^{+*}$  et  $p \in ]0, 1[$ , alors pour  $k \in \mathbb{N}$  :

$$\mathbb{P}(X = k) = \frac{\Gamma(r + k)}{k! \Gamma(r)} p^r (1 - p)^k$$

Pour une loi binomiale négative de paramètres  $r$  et  $p$ ,  $\mathbb{E}(X) = \frac{r(1-p)}{p}$  et  $\mathbb{V}(X) = \frac{r(1-p)}{p^2}$ .

Les paramètres de cette loi pour la distribution du nombre annuel de tempête peuvent être estimés aisément via la méthode des moments. En effet, en notant la moyenne empirique  $\bar{n}$ , et la variance empirique  $\hat{\sigma}^2$  les estimateurs de  $p$  et  $r$  par la méthode des moments sont les suivants :

$$\hat{p} = \frac{\bar{n}}{\hat{\sigma}^2}, \text{ et } \hat{r} = \frac{\bar{n}^2}{\hat{\sigma}^2 - \bar{n}}$$

En appliquant ces formules aux données historiques, les valeurs des paramètres par la méthode des moments sont les suivants :  $\hat{p} = 0,54$  et  $\hat{r} = 15,19$ .

Afin de vérifier l'adéquation de la loi binomiale négative aux données historiques, l'hypothèse suivante est testée : " $H_0 : n$  suit une loi binomiale négative de paramètres  $\hat{r}$  et  $\hat{p}$ ." Pour tester l'hypothèse plusieurs tests d'adéquation existent, comme par exemple le test de Kolmogorov-Smirnov ou le test d'adéquation du khi-deux. La loi étudiée ici étant discrète, le test d'adéquation du khi-deux semble adapté.

**Définition** (Test d'adéquation du khi-deux) : Soit  $(n_1, \dots, n_N)$  un échantillon de données d'une variable aléatoire  $n$ , prenant un nombre fini  $J$  de valeurs. L'hypothèse nulle à tester est la suivante : "La probabilité que  $n$  prenne la valeur  $j$  vaut  $p_j$  pour  $j \in [1, J]$ , avec  $\sum_{j=1}^J p_j = 1$ ."

La probabilité empirique pour une valeur  $j$  est le nombre d'observations prenant la valeur  $j$  sur le nombre total d'observation  $J$ . Ainsi,  $\hat{p}_j = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \mathbf{1}_{(n_i=j)}$ .

Alors, la statistique du test d'adéquation du khi-deux est  $T = \sum_{j=1}^J \frac{(N\hat{p}_j - Np_j)^2}{Np_j}$ .

Sous l'hypothèse nulle, la statistique du test suit asymptotiquement une loi du khi-deux à  $J - 1$  degrés de liberté. L'hypothèse nulle pour un test de niveau  $\alpha$  peut donc être rejetée lorsque la statistique du test est plus grande que le quantile d'ordre  $1 - \alpha$  de la loi du khi-deux à  $J - 1$  degrés de liberté.

En appliquant le test d'adéquation du khi-deux à l'échantillon du nombre de tempêtes par année et à une loi binomiale négative, la probabilité de rejeter à tort l'hypothèse nulle  $H_0$  définie plus haut est de 0,69 pour un test de niveau 5%. L'hypothèse nulle ne peut donc pas être rejetée puisque  $0,69 > 0,05$ .

De la même manière, l'hypothèse " $H_0 : n$  suit une loi de Poisson de paramètre  $\lambda$ " est aussi testée via un test d'adéquation du khi-deux. Dans ce cas, les calculs mènent à une p-value de  $5.5 \times 10^{-12}$  pour un test de niveau 5%. L'hypothèse  $H_0$  peut donc être rejetée.

Dans la suite, le nombre annuel de tempêtes est modélisé selon une distribution binomiale négative de paramètres  $\hat{r}$  et  $\hat{p}$ . Ce choix de distribution est différent de celui réalisé dans [8], où c'est une loi de Poisson qui est choisie, et de [7] où le nombre annuel de tempête est modélisé par une distribution uniforme ayant pour bornes le nombre minimal et maximal de tempêtes observées dans une année.

#### II.2.2.4 Modélisation de la genèse du cyclone

D'après ce qui a été vu en partie II.1.2.1, les tempêtes tropicales ont besoin de certaines conditions physiques pour se former :

- Une température de surface et de profondeur de la mer élevée,
- Une humidité forte et une atmosphère instable,
- Une force de Coriolis élevée, la zone de naissance doit donc être assez éloignée de l'équateur.

Pour ces raisons, les cyclones tropicaux ont tendance à se former à des périodes temporelles particulières, et à des endroits précis. D'un point de vue temporel, la majorité des cyclones se forme vers la fin de l'été, en août et en septembre. En effet, c'est à ce moment là que la température de l'eau est la plus élevée. Cela s'observe bien sur l'histogramme ci-dessous :

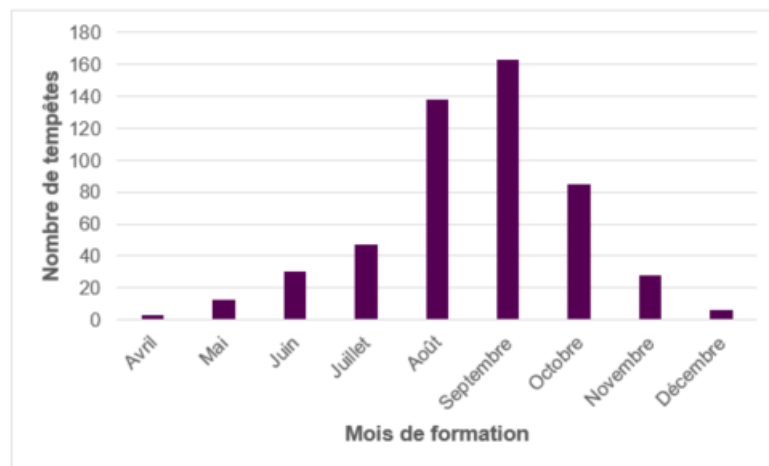


FIGURE II.10 – Nombre d'événements de catégorie "Tempête Tropicale" ou plus de 1980 à 2019, par mois de formation

Le mois de formation a une importance dans la modélisation puisque la vitesse des vents du cyclone et la pression centrale dépendent de la pression environnementale et de la température de surface de l'eau. Pour chaque cyclone modélisé, un mois de formation lui est attribué aléatoirement en fonction de la distribution observée ci-dessus.

D'un point de vue géographique, les cyclones ont aussi des contraintes au niveau de la zone de formation. Afin de choisir un point de formation (une latitude et une longitude), une première idée peut être de tirer aléatoirement un point de formation historique dans la base *IBTrACS*, en fonction du mois tiré aléatoirement au préalable. Cette manière de choisir le point de départ du cyclone est simple à mettre en place mais a le désavantage de limiter fortement le nombre de points de départ, ce qui fait que des trajectoires très proches peuvent exister.

De ce fait, une méthode alternative consiste à regrouper les différentes positions initiales dans des boîtes de taille 1 degré par 1 degré. Une boîte est ensuite tirée aléatoirement en fonction de la distribution historique des points dans chaque boîte. Une fois la boîte choisie, le point de départ est fixé aléatoirement à l'intérieur du carré. Cette méthode est mise en place pour produire les cartes ci-dessous :

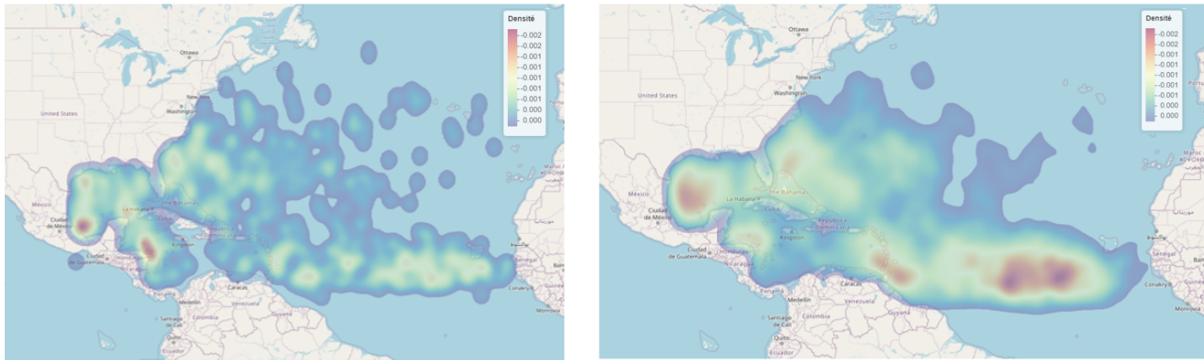


FIGURE II.11 – Densité des points d'origine, historique à gauche, modélisé sur 1000 ans à droite

On constate que les zones de formation principales au large de l'Afrique, dans le Golfe du Mexique, au large du Honduras et du Nicaragua, ainsi qu'au nord du Venezuela sont bien reproduites dans la version modélisée. Des boîtes de tailles différentes ont aussi été testées mais celle de taille 1 degré par 1 degré a le meilleur compromis en terme de nombre de points historiques par boîte et de taille, elle reproduit donc le plus fidèlement les densités.

### II.2.2.5 Modélisation de la trajectoire

Une fois chaque point de départ et mois de formation choisis, il est nécessaire de construire la trajectoire du cyclone point par point. Pour ce faire, la plupart des recherches scientifiques partent du constat suivant : les trajectoires des cyclones dans le bassin nord-atlantique ont généralement la même allure, les tempêtes partent du sud du bassin nord-atlantique pour ensuite remonter par les Caraïbes avec un changement de direction vers l'ouest à l'approche du Golfe du Mexique, pour enfin se dissiper dans les terres ou dans les eaux plus froides de l'Atlantique.

Ce phénomène s'observe particulièrement bien sur les cyclones de catégories élevées, comme par exemple sur la figure ci-dessous où sont tracées les trajectoires des cyclones ayant atteint les catégories 4 et 5, entre 2003 et 2019.

Afin de modéliser les trajectoires des cyclones, il est donc courant de prendre l'hypothèse que les trajectoires des cyclones peuvent être modélisées par des séries temporelles, c'est-à-dire qu'à chaque instant la position future d'un cyclone peut être expliquée par sa position présente et ses positions passées. Formellement, si l'on note  $x_t$  la longitude et  $y_t$  la latitude d'un cyclone à un moment donné  $t$ , et  $C_t$  le couple  $(x_t, y_t)$ , alors :

$$C_{t+1} = f(C_t, C_{t-1}, \dots, C_0) + \varepsilon_{t+1}$$

avec  $f$  une fonction déterministe et  $(\varepsilon_t)_t$  une suite de variables aléatoires indépendantes identiquement distribuées.



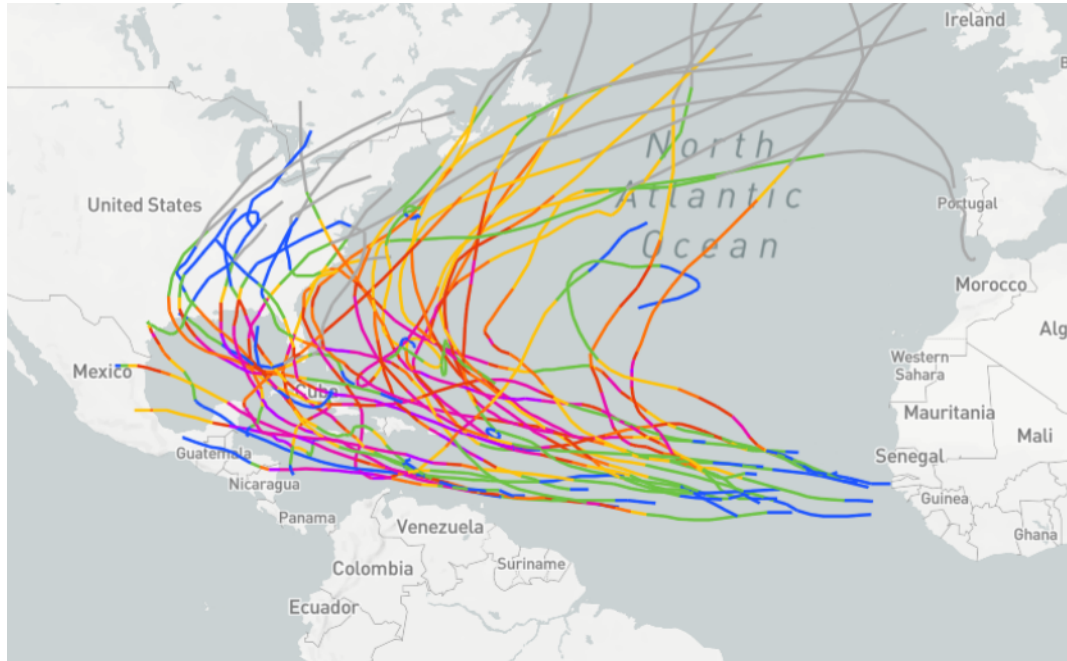


FIGURE II.12 – Cyclones de catégorie 4 et 5 de 2003 à 2019 - NOAA

### Modélisation par les chaînes de Markov

Une première approche peut être de considérer que la position future d'un cyclone est indépendante des positions passées et qu'elle ne dépend que de la position présente, c'est le cadre des chaînes de Markov. Nous rappelons brièvement les définitions des chaînes de Markov et des chaînes de Markov homogènes.

**Définition** (Chaîne de Markov) : Soit  $X = (X_i)_{i \in \mathbb{N}}$  une suite de variable aléatoires discrètes. Le processus  $X$  est une chaîne de Markov si, pour tout  $n \in \mathbb{N}$  :

$$\mathbb{P}(X_{n+1} = j | X_0 = i_0, X_1 = i_1, \dots, X_n = i_n) = \mathbb{P}(X_{n+1} = j | X_n = i_n)$$

avec  $(i_0, \dots, i_n, i_{n+1})$  les états de  $(X_0, \dots, X_n, X_{n+1})$ .

**Définition** (Chaîne de Markov homogène) : Soit  $X = (X_i)_{i \in \mathbb{N}}$  une chaîne de Markov. La chaîne de Markov  $X$  est dite homogène, si pour tout  $n \in \mathbb{N}^*$  :

$$\mathbb{P}(X_{n+1} = i_{n+1} | X_n = i_n) = \mathbb{P}(X_n = i_{n+1} | X_{n-1} = i_n)$$

avec  $(i_0, \dots, i_n, i_{n+1})$  les états de  $(X_0, \dots, X_n, X_{n+1})$ .

Autrement dit, une chaîne de Markov homogène est une chaîne de Markov pour laquelle la probabilité de transition est indépendante du moment auquel elle se trouve.

L'approche par des chaînes de Markov (homogènes ou non) a été développée à de nombreuses reprises dans la littérature scientifique, c'est par exemple le cas dans [7] et dans [9].

Dans les travaux menés dans ce mémoire, cette approche a été essayée mais n'a pas été retenue, essentiellement pour des questions de résolution.

En effet, le calcul des probabilités de transition nécessite une discrétisation des zones du bassin Nord-Atlantique. La résolution choisie pour la discrétisation doit être assez grossière pour avoir assez de données historiques dans chaque zone et pour pouvoir permettre un temps de calcul raisonnable. Dans le cas de chaînes de Markov homogènes, la résolution la plus adaptée semble être 1 degré par 1 degré (soit environ 110 km).

Avec cette résolution de 1 degré par 1 degré, les changements de direction sont assez brusques comme cela a été constaté dans [9]. Ces changements de directions importants peuvent ne pas être gênants lorsqu'on s'intéresse aux effets des vents cycloniques sur de grandes zones, c'est par exemple le cas lorsque les zones étudiées sont des îles, mais cela est plus dérangeant pour des sites ponctuels comme dans ce mémoire. L'approche par les chaînes de Markov n'est donc pas retenue.

### Modélisation par modèle autoregressif

Une seconde approche, peut être de modéliser la trajectoire des cyclones via un modèle autorégressif d'ordre  $p$ . En notant  $X_t$  la longitude à un moment  $t$ , on a alors :

$$X_t = \alpha_0 + \sum_{i=1}^p \alpha_i X_{t-i} = \alpha_0 + \alpha_1 X_{t-1} + \dots + \alpha_p X_{t-p} + \varepsilon_t$$

avec  $(\alpha_i)_i$  des constantes et  $(\varepsilon_t)_t$  une suite de variables aléatoires indépendantes identiquement distribuées.

De manière équivalente, étant donné que les données disponibles pour la modélisation sont données à un intervalle de temps constant (3 heures), il est possible de modéliser les variations de positions entre deux instants plutôt que les positions elles-mêmes. En notant  $\Delta X_t = X_t - X_{t-1}$ , la variation de longitude entre  $t$  et  $t - 1$  on cherche à exprimer  $\Delta X_t$  de la manière suivante :

$$\Delta X_t = \alpha_0 + \sum_{i=1}^p \alpha_i \Delta X_{t-i} = \alpha_0 + \alpha_1 \Delta X_{t-1} + \dots + \alpha_p \Delta X_{t-p} + \varepsilon_t$$

avec  $(\alpha_i)_i$  des constantes et  $(\varepsilon_t)_t$  une suite de variables aléatoires indépendantes identiquement distribuées.

Une fois les  $(\Delta X_t)_t$  modélisés, il est alors possible d'estimer  $X_t$  la longitude au moment  $t$  puisque :

$$X_t = \Delta X_t + X_{t-1}$$

## Modélisation par des modèles linéaires

### Modélisation de la longitude

James & Mason proposent dans [6] de modéliser simplement les variations de longitude par un modèle linéaire d'ordre 1, c'est-à-dire d'exprimer  $\Delta X_t$  comme :

$$\Delta X_t = \alpha_0 + \alpha_1 \Delta X_{t-1} + \varepsilon_t$$

Lorsqu'on observe les données historiques de la base *IBTrACS*, il semble bien y avoir une relation linéaire entre  $\Delta X_{t-1}$  et  $\Delta X_t$  :

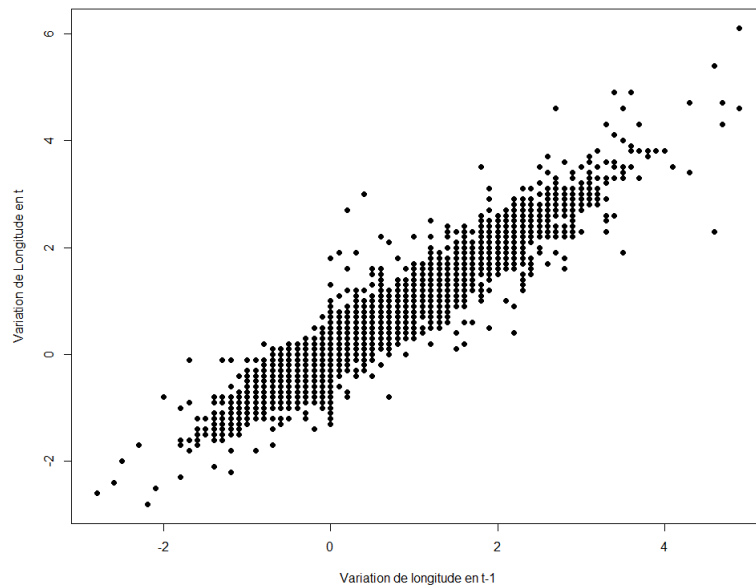


FIGURE II.13 – Nuage de points pour  $(\Delta X_{t-1}, \Delta X_t)$

L'aspect "quadrillage" dans le graphique ci-dessus est dû à la résolution de la base de données historique (0.1 degré).

Cependant, plutôt que d'avoir le même modèle pour tous les points du bassin et afin de tenir compte du fait que les cyclones ont des trajectoires différentes en fonction de la latitude à laquelle ils se trouvent, Bloemendaal, *et al.* proposent de séparer les points historiques en fonction de leur latitude. Plus précisément, les cyclones sont séparés en 14 "tranches" de 5 degrés de latitude. En reprenant le graphe ci-dessus et en attribuant une couleur spécifique à chaque point en fonction de sa latitude, on constate qu'il y a bien un comportement différent en fonction de la latitude :

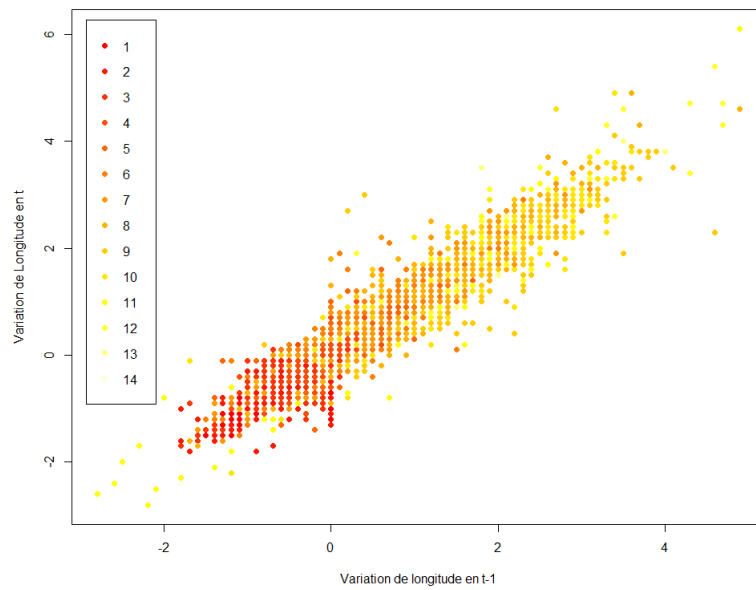


FIGURE II.14 – Nuage de points pour  $(\Delta X_{t-1}, \Delta X_t)$ , et couleurs en fonction de la latitude

Dans le graphique précédent, le numéro correspond au numéro de la tranche. Par exemple 1 correspond à la tranche de 5 à 10 degré de latitude. On constate que dans les latitudes basses (couleurs qui tendent vers le rouge), les variations de longitude sont négatives, car les cyclones se déplacent d'est en ouest. Au contraire, dans les latitudes hautes, les cyclones se déplacent d'ouest en est, et les variations sont donc positives et plus fortes.

L'idée est donc d'estimer pour chaque tranche les paramètres  $\alpha_0$  et  $\alpha_1$ , ainsi que la distribution des  $(\varepsilon_t)_t$ . Pour cela, nous rappelons le cadre théorique des modèles linéaires multiples.

**Définition** (Modèle de régression linéaire multiple et hypothèses) : Un modèle de régression linéaire est défini par une équation de la forme :

$$Y = X\beta + \varepsilon$$

où :

- $Y$  est un vecteur de dimension  $n$ ,
- $X$  est une matrice de taille  $n \times p$ . La matrice  $X$  est supposée de rang  $p$ .
- $\beta$  est le vecteur de dimension  $p$  des paramètres inconnus du modèle,
- $\varepsilon$  est le vecteur de dimension  $n$  des erreurs. Les erreurs sont supposées normales, centrées, de même variance et non corrélées entre elles.

Le vecteur des paramètres  $\beta$  peut être estimé par l'estimateur des Moindres Carrés Ordinaires (MCO). L'estimateur des MCO est l'estimateur qui minimise la fonction de coût quadratique :

**Définition** (Estimateur des MCO) : L'estimateur des Moindres Carrés ordinaires  $\hat{\beta}$  est défini par :

$$\hat{\beta} = \arg \min_{\beta \in \mathbb{R}^p} \sum_{i=1}^n \left( y_i - \sum_{j=1}^p \beta_j x_{ij} \right)^2 = \arg \min_{\beta \in \mathbb{R}^p} \|Y - X\beta\|^2$$

**Proposition** (Expression de  $\hat{\beta}$ ) : L'estimateur des Moindres Carrés ordinaires  $\hat{\beta}$  a pour expression :

$$\hat{\beta} = ({}^tXX)^{-1} {}^tXY$$

Le résultat ci-dessus est appliqué pour l'estimation des  $(\Delta X_t)_t$  pour chaque tranche de latitude. Dans le cas de la longitude, deux paramètres sont à estimer. Ainsi, pour chaque tranche, en notant  $\widehat{\Delta X}_t$  l'estimateur de  $\Delta X_t$ , on a :

$$\widehat{\Delta X}_t = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 \Delta X_{t-1}$$

La qualité de l'ajustement peut être quantifiée *via* le coefficient de détermination  $R^2$ .

**Définition** (Coefficient de détermination) : Le coefficient de détermination  $R^2$  est défini par :

$$R^2 = 1 - \frac{SCR}{SCT}$$

avec :

- $SCT = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2$  avec  $\bar{y}$  la moyenne de  $Y$ .  $SCT$  est la somme des carrés totale.
- $SCR = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2$ .  $SCR$  est la somme des carrés résiduels.

Le coefficient de détermination est compris entre 0 et 1. Lorsque qu'il est proche de 1, cela signifie que le modèle linéaire sous-jacent a un bon pourcentage de variance expliquée par rapport à la variance totale, autrement dit que la somme des carrés des résidus est négligeable devant la somme des carrés totale.

Dans notre cas, pour les 14 tranches de latitude, le coefficient de détermination est compris entre 0,75 et 0,95, avec les valeurs les plus faibles pour les tranches avec peu d'historique (tranches très basses et très hautes).

Pour chaque modélisation, on cherche aussi à vérifier les hypothèses choisies sur les résidus, c'est-à-dire une distribution normale, de moyenne nulle, des variances identiques et une absence de corrélation entre les résidus. Pour ce faire, nous utilisons les méthodes suivantes, essentiellement basée des tests statistiques et une approche graphique :

- Normalité : La normalité des résidus est vérifiée via un diagramme Quantile/Quantile des résidus estimés,
- Homoscédasticité : l'hypothèse d'homoscédasticité (variances identiques) est vérifiée via un test de White.
- Indépendance : Un test de Durbin-Watson est effectué.

**Définition** (Diagramme quantile/quantile) : Un diagramme quantile/quantile est le tracé d'un nuage de points  $(x_i^*, x_i)_i$  où  $x_i^*$  représente les quantiles théoriques d'une distribution et  $x_i$  les quantiles observés d'une distribution.

Si la distribution empirique et la distribution théorique ont la même loi, alors le nuage de point est proche de la droite d'équation  $y = x$ .

**Définition** (Test de White) : On pose pour  $i \in [1, N]$  avec  $N$  le nombre d'observations,  $V(\varepsilon_i) = \sigma^2 + \gamma(\sum_{j=1}^p \beta_j x_{i,j})^2 + \omega_i$  avec  $\omega_i$  un bruit blanc. L'hypothèse nulle est alors :  $H_0 : \gamma = 0$  puisque dans ce cas les variances des  $(\varepsilon_i)_i$  sont identiques.

L'équation donnée ci-dessus est estimée par la méthode des MCO, et le coefficient de détermination  $R^2$  est utilisé pour le test de White. En effet, sous  $H_0$ ,  $NR^2$  suit une loi du khi-deux de paramètre  $\frac{K(K+1)}{2} - 1$  avec  $K$  le nombre de paramètres à estimer sous  $H_0$ .

La valeur de  $NR^2$  est donc comparée à une table du khi-deux pour un niveau de risque d'erreur donné. Si  $NR^2$  rentre dans la région de rejet, alors  $H_0$  peut être rejetée.

**Définition** (Test de Durbin-Watson) : Soit  $(\varepsilon_t)_t$  les résidus à tester. Pour tout  $t$ , on pose  $\varepsilon_t = \rho\varepsilon_{t-1} + u_t$  avec  $u_t$  un bruit blanc.

L'hypothèse  $H_0$  du test de non auto-corrélation est  $\rho = 0$ . La statistique de Durbin-Watson est définie par :

$$DW = \frac{\sum_{t=2}^N (\varepsilon_t - \varepsilon_{t-1})^2}{\sum_{t=1}^N \varepsilon_t^2}$$

En fonction de la valeur de  $DW$ , il est possible de rejeter ou non l'hypothèse nulle. En notant  $d_1$  et  $d_2$  les seuils correspondants à un niveau de tolérance donné, si  $DW$  est compris entre  $d_2$  et  $4 - d_2$ , l'hypothèse nulle peut être acceptée. Autrement, entre 0 et  $d_1$ , il y a auto-corrélation positive ( $\rho > 0$ ), entre  $4 - d_1$  et 4 il y a auto-corrélation négative. Les autres cas sont indéterminés.

Le test de Durbin-Watson teste uniquement l'autocorrélation de premier ordre. Pour d'autres vérifications de la non-autocorrélation des résidus, il est possible d'utiliser des représentations graphiques des résidus studentisés. Nous ne rentrons pas dans le détail de ces méthodes dans le cas présent.

Les différents tests et procédures cités au-dessus sont effectués pour chaque tranche de latitude. Au final, les hypothèses sont validées et l'erreur est donc modélisée avec une loi normale centrée et de variance égale à la variance des erreurs empiriques.

Ainsi, pour chaque cyclone les variations de longitude sont modélisées en utilisant la formule de régression suivante :

$$\widehat{\Delta X}_t = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 \widehat{\Delta X}_{t-1} + \varepsilon_X$$

avec  $\varepsilon_X \sim \mathcal{N}(0, \sigma^2)$

De ces variations estimées, on en déduit la longitude à chaque point avec la formule suivante :

$$\widehat{X}_t = \widehat{X}_{t-1} + \widehat{\Delta X}_t$$

Pour la première position,  $X_0$  est la longitude choisie via la méthode présentée en II.2.2.4.

### Modélisation de la latitude

Pour la modélisation de la latitude, l'approche est similaire puisqu'on estime d'abord les variations de latitude plutôt que la latitude elle-même. La seule différence avec la modélisation de la longitude réside dans le fait qu'un facteur correctif est introduit pour éviter que les trajectoires ne soient trop proches de l'équateur, ce qui est peu probable (à cause de la force de Coriolis comme cela a été vu précédemment).

Ainsi, plutôt que d'écrire la variation de latitude à un moment donné ( $\Delta Y_t$ ) de la manière suivante :

$$\Delta Y_t = \alpha_0 + \alpha_1 \Delta Y_{t-1} + \epsilon_t$$

James & Mason proposent la forme suivante :

$$\Delta Y_t = \alpha_0 + \alpha_1 \Delta Y_{t-1} + \alpha_2 \frac{1}{Y_t} + \epsilon_t$$

On constate dans cette équation que si un cyclone se rapproche de l'équateur,  $Y_t$  va se rapprocher de 0 et le terme inversement proportionnel à  $Y_t$  va donc augmenter.

Cependant, bien qu'on introduise un nouveau terme dans l'équation de régression, le cadre des modèles linéaires s'applique toujours puisqu'il y a juste une variable en plus par rapport au modèle choisi pour la modélisation de la longitude. Néanmoins, afin d'appliquer la méthode des MCO, il faut bien vérifier que la matrice des variables explicatives est bien conditionnée, c'est-à-dire que le déterminant de  ${}^t X X$  n'est pas proche de 0 pour bien pouvoir inverser la matrice.

Pour ce faire, on calcule les corrélations empiriques entre les deux variables explicatives et on vérifie que les coefficients de détermination des régressions linéaires simples entre les variables sont faibles. Cette vérification est effectuée pour toutes les tranches de latitude et les résultats sont probants.

Ainsi, les paramètres de la régression sont estimés par la méthode des Moindres Carrés Ordinaires et les vérifications effectuées sont les mêmes que pour la modélisation de la longitude. Pour chaque cyclone, les variations de latitude sont donc modélisées en utilisant la formule de régression suivante :

$$\widehat{\Delta Y}_t = \hat{\alpha}_0 + \hat{\alpha}_1 \widehat{\Delta Y}_{t-1} + \hat{\alpha}_2 \frac{1}{\widehat{Y}_{t-1}} + \epsilon_Y$$

avec  $\widehat{Y}_{t-1} = \widehat{Y}_{t-2} + \widehat{\Delta Y}_{t-2}$ .

Ainsi, les longitudes et latitudes sont modélisées en suivant les formules de régression indiquées précédemment.

Cependant, il faut aussi définir des conditions d'arrêt pour que la trajectoire du cyclone ne soit pas infinie. Ces conditions d'arrêt peuvent être définies de deux manières :

- Choix de la durée de vie du cyclone avant de le simuler. Par exemple, il est possible de choisir aléatoirement une durée de vie en fonction des durées de vie historiques des cyclones dans la base de données *IBTrACS*. C'est le choix qui est fait dans [7].
- Choix de la durée de vie en fonction des caractéristiques physiques du cyclone (vitesse des vents, pression centrale). Lorsque ces caractéristiques physiques descendent en dessous ou au dessus d'un certain seuil, le cyclone se dissipe.

Pour la deuxième option, il faut donc modéliser les caractéristiques physiques des cyclones en même temps que la trajectoire du cyclone. Nous nous intéressons ainsi à la modélisation des caractéristiques physiques dans la section suivante.

### II.2.2.6 Modélisation des caractéristiques physiques

Les caractéristiques physiques des cyclones qui doivent être modélisées sont les suivantes :

- La pression minimale centrale,
- La vitesse maximale des vents,
- Le rayon de vitesse maximale des vents.

Dans cette section, nous suivons la modélisation proposée par James & Mason et par Bloemendaal, *et al.* dans [6] et [8].

Les modélisations des caractéristiques physiques sont là aussi effectuées *via* des méthodes statistiques mais nécessitent aussi des connaissances physiques et météorologiques supplémentaires. Nous faisons donc le choix de présenter de manière succincte les méthodes utilisées dans cette partie, ces méthodes ayant été proposées, revues et validées par des *cat-modelers* spécialisés dans les phénomènes atmosphériques.

La première relation utilisée dans la modélisation est la relation vent-pression proposée par Harper dans [10] :

$$V_t = a(P_{env} - P_t)^b$$

avec  $a$  et  $b$  des constantes et :

- $V_t$  la vitesse maximale des vents,
- $P_t$  la pression minimale au niveau de la mer,
- $P_{env}$  la pression moyenne au niveau de la mer.

Afin d'estimer les paramètres  $a$  et  $b$ , les données historiques de la base *IBTrACS* pour  $V_t$  et  $P_t$  sont utilisées, ainsi que les données de pressions moyennes mensuelles de la base de données *ERA-5*. L'estimation des paramètres peut être faite via un modèle linéaire en linéarisant l'équation. En effet, l'équation est équivalente à :

$$\ln(V_t) = \ln(a) + b \ln(P_{env} - P_t)$$



à condition que  $P_{env}$  et  $P_t$  ne soient pas égaux.

Graphiquement, il est possible de constater qu'il y a bien un lien entre pression centrale minimale et vitesse maximale des vents :

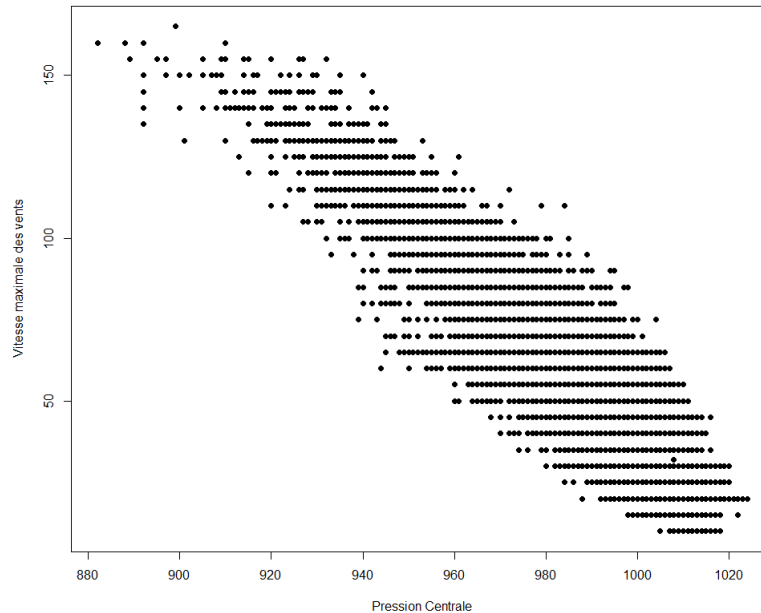


FIGURE II.15 – Vitesse maximale des vents en fonction de la pression minimale centrale

Une fois les paramètres  $a$  et  $b$  estimés, modéliser la vitesse maximale des vents revient à modéliser la pression atmosphérique centrale du cyclone puisque les deux variables sont reliées par la relation vent-pression. Nous ne rentrons pas dans le détail des calculs pour la modélisation de la pression, celle-ci étant modélisée via la relation non-linéaire suivante :

$$\Delta P_t = \gamma_0 + \gamma_1 \Delta P_{t-1} + \gamma_2 e^{-\gamma_3 X}$$

où :

- $\Delta P_t$  est la variation de pression entre  $t$  et  $t - 1$ ,
- $X$  est une variable aléatoire imposant une contrainte relative à l'intensité potentielle maximale, afin d'éviter que les cyclones ne deviennent trop intenses.
- $(\gamma_i)_t$  sont les paramètres à estimer.

La variable  $X$  est définie en utilisant les pressions environnementales de la base de données ERA-5, ainsi que les températures à la surface de la mer, provenant aussi des données ERA-5.

Une fois que les paramètres de régression pour le modèle pression ont été estimés, le cyclone est initialisé avec une vitesse maximale des vents de 34 nœuds, et les pressions sont calculées pas à pas avec la formule de régression indiquée au dessus. Pour chaque position du cyclone, la pression est convertie en vitesse des vents. Le cyclone se dissipe une fois que la pression minimale dépasse la pression environnementale : dans ce cas il n'y a plus de dépression.

Afin de modéliser le fait que les cyclones perdent en intensité lorsqu'ils touchent terre, un modèle de désintégration exponentielle est utilisé, celui de Kaplan & DeMaria présenté

dans [11]. Ce modèle permet de diminuer l'intensité du cyclone en fonction du temps et de la distance qu'il a parcouru pendant qu'il était sur une étendue terrestre.

Enfin, la dernière caractéristique physique modélisée est le rayon de vitesse maximale des vents. Il n'existe pas de relation précise entre les autres caractéristiques physiques et le rayon, on constate juste que lorsque le cyclone s'intensifie, le  $R_{max}$  a tendance à diminuer. Cela s'observe sur les données *IBTrACS* :

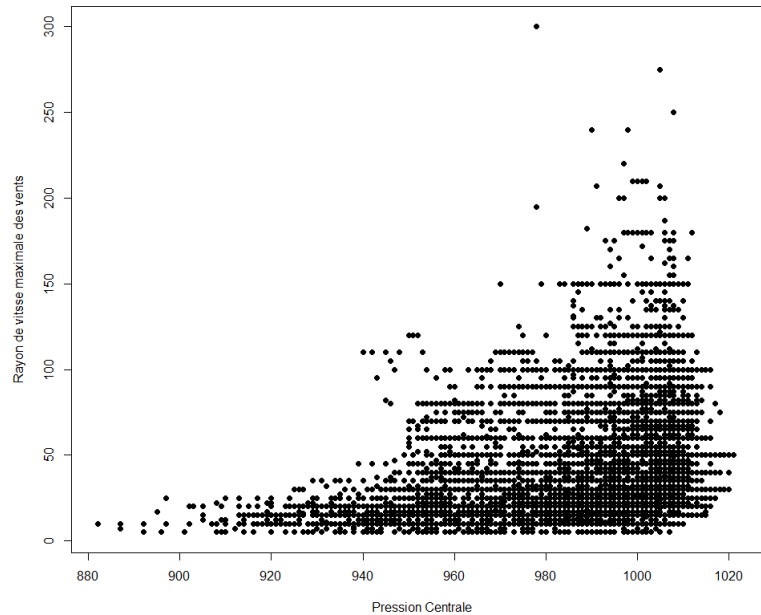


FIGURE II.16 – Rayon de vitesse maximale des vents en fonction de la pression minimale centrale

Afin de reproduire ce phénomène physique et d'éviter de trop fortes variations de  $R_{max}$ , les rayons sont construits linéairement : entre la naissance et le pic d'intensité (pression minimale) le rayon diminue puisque la pression diminue, puis entre le pic d'intensité et la dissipation, le rayon augmente. Les trois rayons servant de seuils, c'est-à-dire le rayon lors de la naissance du cyclone, lors du pic d'intensité et lors de la dissipation sont modélisés en fonction de la distribution dans les données historiques.

### II.2.2.7 Création et validation du catalogue d'événements stochastiques

Afin d'obtenir un catalogue d'événements stochastiques, le processus de modélisation suivant est utilisé :

- Choix du nombre de saisons cycloniques à modéliser. Idéalement ce nombre doit être assez grand pour assurer une convergence des résultats (nous reviendrons sur ce point dans la partie suivante). Nous choisissons de simuler 10000 saisons cycloniques.
- Pour chaque saison, choix du nombre de cyclones à simuler, comme vue en II.2.2.3.
- Pour chaque cyclone, choix du point de départ et du mois de départ (II.2.2.4)
- Pour chaque cyclone, modélisation de la trajectoire et des caractéristiques physiques sous-jacentes (II.2.2.5 et II.2.2.6).

Une fois toutes les saisons cycloniques modélisées, l'objectif est de vérifier que le catalogue d'événements stochastiques a bien les mêmes caractéristiques que le catalogue d'événements historiques, ici la base de données *IBTrACS*. Pour cela, nous vérifions que les distributions de plusieurs variables sont bien identiques dans les deux catalogues :

- Le nombre annuel de cyclones. Cela a été vérifié en II.2.3.
- Les zones de formation des cyclones. Cela a été vérifié en II.2.4.
- Les distributions spatiales des cyclones,
- Les distributions des cyclones par catégorie,
- Les distributions des vitesses de vent.

Pour les trois derniers points plusieurs vérifications existent, il est par exemple possible de diviser le bassin nord-atlantique en des zones de tailles identiques et de vérifier pour chaque zone que les caractéristiques des cyclones sont bien identiques pour les deux catalogues. La taille de la zone étudiée doit être assez grande pour qu'il y ait assez de données historiques à l'intérieur.

On propose de subdiviser le bassin Nord-atlantique en des zones de 5 degrés par 5 degrés et de vérifier que les distributions sont identiques en traçant pour chaque boîte la distribution des cyclones par catégorie, la distribution des vitesses de vent et la distribution du nombre annuel de points dans la zone. Afin d'avoir des visions comparables, on compare les distributions historiques à des sous-catalogues stochastiques ayant le même nombre de saisons cycloniques. Plus précisément on prend 10 catalogues stochastiques, constitués chacun de 40 saisons cycloniques choisies aléatoirement, comme dans la base *IBTrACS*.

Par exemple, si les vérifications données ci-dessus sont effectuées pour le bassin entier, on obtient le graphique suivant pour la distribution des catégories des cyclones. On constate qu'en moyenne, le catalogue stochastique est à moins de 5% du nombre de cyclone par catégorie, sauf pour la catégorie 5 où le nombre est légèrement surévalué :

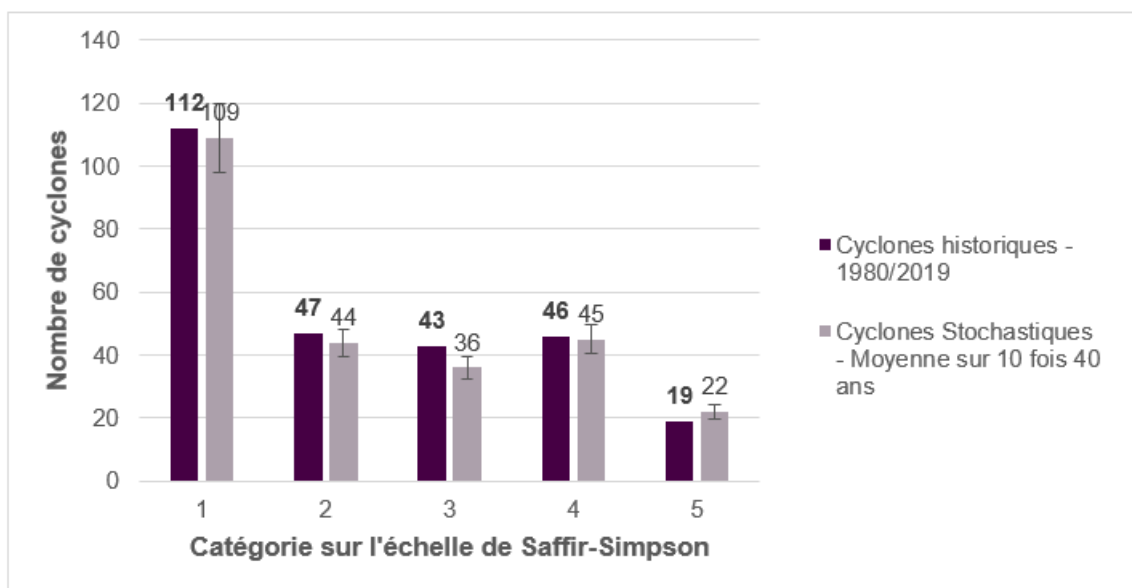


FIGURE II.17 – Distribution des catégories de Cyclone sur 40 ans

De la même manière, on regarde la probabilité annuelle de dépasser une certaine vitesse maximale des vents pour la base de données *IBTrACS* et pour 5 catalogues stochastiques constitués de 40 saisons chacun. On obtient le graphique suivant :

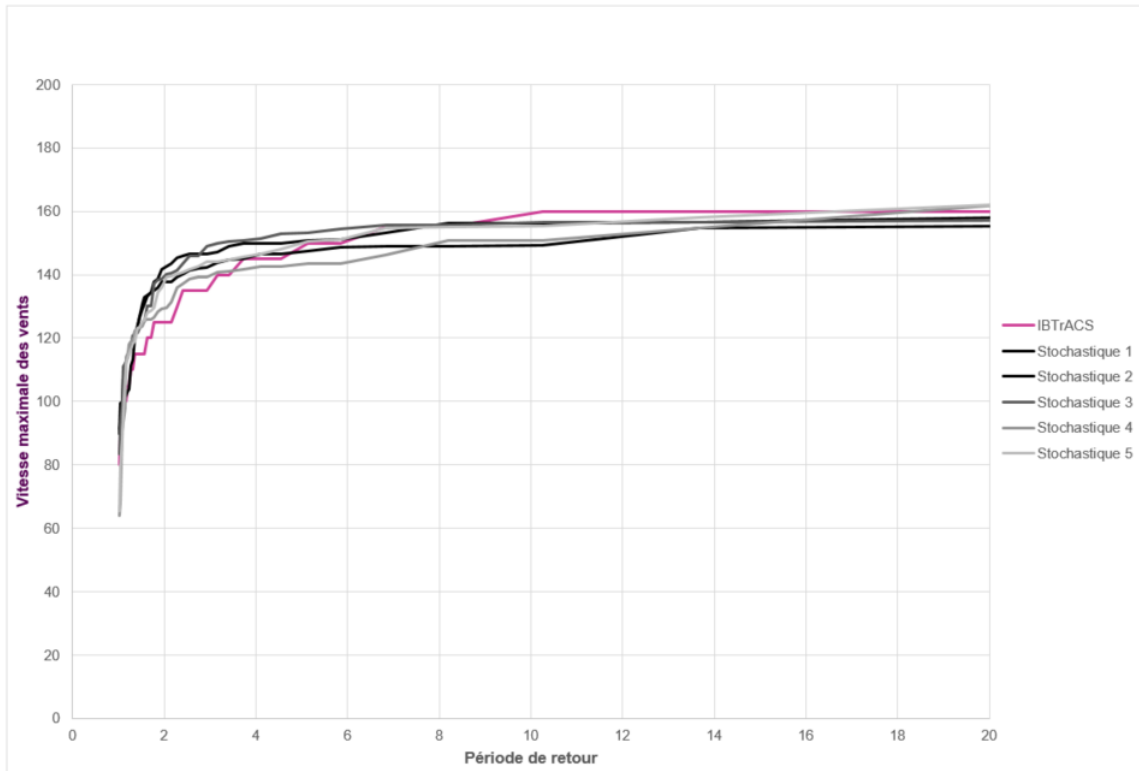


FIGURE II.18 – Probabilité annuelle de dépassement - Historique et Stochastique

On constate que les distributions pour les catalogues stochastiques sont assez proches de la distribution historique. Elles semblent cependant être un peu plus fortes sur le bas de courbe (pour les périodes de retour entre 2 et 4 ans). Afin de vérifier que les distributions suivent bien la même loi, on peut effectuer un test de Kolmogorov-Smirnov.

**Définition-Proposition** (Test de Kolmogorov-Smirnov) : Soient  $(x_1, \dots, x_p)$  et  $(y_1, \dots, y_q)$  deux échantillons provenant de la réalisation de deux variables aléatoires  $X$  et  $Y$ . Soient  $F$  et  $G$  les fonctions de répartition des lois de  $X$  et  $Y$ . On souhaite tester l'hypothèse  $H_0 : F = G$ .

Pour cela, on considère les fonctions de répartition empiriques de  $X$  et  $Y$  :

$$F_p(x) = \frac{1}{p} \sum_{i=1}^p \mathbf{1}_{x_i \leq x}$$

et

$$G_q(y) = \frac{1}{q} \sum_{i=1}^q \mathbf{1}_{y_i \leq y}$$

On a que pour  $c > 0$  :

$$\mathbb{P} \left[ \sup_x |F_n(x) - G_n(x)| > \frac{c}{\sqrt{n}} \right] \xrightarrow{n \rightarrow \infty} \alpha(c) = 2 \sum_{r=1}^{+\infty} (-1)^{r-1} \exp(-2c^2 r^2)$$

On peut donc rejeter  $H_0$  si l'écart maximal absolu entre les fonctions de répartition dépasse  $\frac{c}{\sqrt{n}}$  où  $c$  est choisi en fonction du niveau d'erreur toléré.

Si on applique ce test à un niveau 5%, aux échantillons utilisés pour la figure II.18, on constate que les probabilités de rejeter à tort l'hypothèse nulle sont toutes supérieures à 5%. L'hypothèse nulle ne peut donc pas être rejetée.

Enfin, il est aussi possible de regarder la distribution des vitesses maximales des vents par cyclone plutôt qu'annuellement. Pour cela, on regarde pour chaque cyclone de la base historique et pour chaque cyclone de 5 catalogues stochastiques (de 40 ans chacun), la vitesse maximale atteinte par le cyclone. Lorsqu'on trace les périodes de retour empirique on obtient alors le graphique suivant :

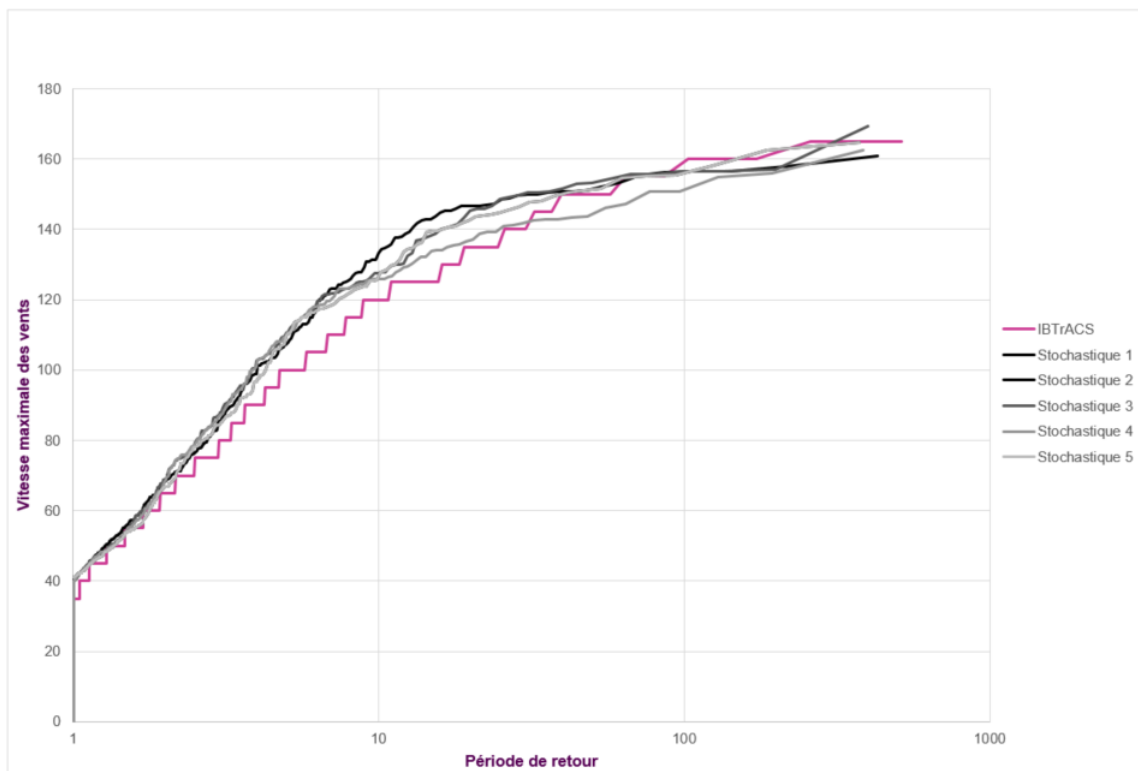


FIGURE II.19 – Probabilité de dépassement par occurrence - Historique et Stochastique (échelle logarithmique)

On peut alors faire le même constat que pour l'analyse annuelle : sur les périodes de retour faibles (jusqu'à une fois tous les 20/30 événements), les vitesses de vent sont légèrement surestimées. Cette surestimation se voit bien car le graphique est en échelle logarithmique.

De la même manière que ce qui a été fait précédemment, les distributions empiriques et stochastiques sont testées avec un test de Kolmogorov-Smirnov. Pour un seuil de 5%, les  $p$ -value sont à chaque fois supérieures à 5% et on ne rejette donc pas l'hypothèse nulle qui est que les échantillons historiques et stochastiques ont la même distribution.

Ces vérifications ont été effectuées sur le bassin Nord-Atlantique pour les exemples ci-dessus, mais elles ont aussi été réalisées pour des boîtes de tailles 5 degré par 5 degrés. On constate que pour la grande majorité des boîtes, les distributions entre les données historiques

et stochastiques semblent bien identiques. Les seules zones n'ayant pas des résultats satisfaisants sont celles où l'historique est très faible. Ces zones sont généralement situées à des latitudes élevées et ne sont donc pas gênantes dans le cadre de notre étude.

Après vérifications *via* les différents graphiques et les test présentés ci-dessus, le catalogue d'événements stochastiques est satisfaisant puisque les principales caractéristiques des cyclones sont reproduites conformément aux données historiques, comme par exemple le nombre de cyclones ou les vitesses maximales des vents. De plus, ces caractéristiques sont vérifiées aussi bien d'un point de vue global, que d'un point local puisque les distributions ont été testées pour des zones réduites de 5 degré par 5 degré.

## II.2.3 Module vulnérabilité

### II.2.3.1 Courbes de vulnérabilité

Après avoir modélisé l'aléa cyclonique, nous disposons désormais d'un catalogue d'événements stochastiques que nous pouvons utiliser pour estimer les pertes économiques causées aux différents sites étudiés dans cette étude. Pour rappel, dans le cadre du mémoire nous disposons de la liste des sites et de l'ensemble des informations relatives à l'exposition.

Lorsque les sites étudiés sont des sites industriels avec une exposition forte aux catastrophes naturelles (aux tremblements de terre ou aux cyclones par exemple) il est courant d'avoir des informations précises sur les sites assurés. En effet, les entreprises font souvent appel à des ingénieurs pour les aider dans leur gestion des risques sur leurs sites industriels. Ces ingénieurs ont plusieurs fonctions :

- Ils évaluent les risques liés à l'activité des entreprises,
- Ils identifient les moyens possibles pour réduire les risques,
- Ils réalisent des diagnostics sur la qualité des infrastructures et des équipements.

À cet effet, les entreprises reçoivent fréquemment des visites d'ingénieurs gestion des risques sur leurs sites stratégiques. Les ingénieurs peuvent être mandatés par l'assureur de l'entreprise, par son courtier ou par l'entreprise elle-même. Ces visites et les rapports qui suivent permettent aux sociétés de prendre des mesures de gestion des risques et d'avoir une meilleure vision des risques auxquels elles sont exposées. De plus, ces visites sont souvent valorisées par les assureurs : les entreprises suivant les recommandations des ingénieurs préventions et ayant des rapports de visite favorables bénéficient de meilleurs conditions d'assurance, à des tarifs plus compétitifs.

Dans le cadre de notre étude, les rapports de visite des ingénieurs sont forts utiles puisqu'ils permettent d'avoir une idée précise de l'exposition des différents sites à couvrir. En effet, les rapports mentionnent généralement le type d'infrastructure et les matériaux utilisés et il est donc possible d'utiliser des courbes de vulnérabilité précises pour estimer les dommages consécutifs aux passages d'un cyclone.

Les courbes de vulnérabilité pour les cyclones sont des courbes qui associent les vitesses de vent ressenties à un point à des taux de destruction. Il existe un grand nombre de courbes de vulnérabilité en fonction du type de structure du bâtiment, du type d'occupation ou encore

des matériaux utilisés.

Un exemple pour un bâtiment industriel avec des infrastructures conçues pour résister aux cyclones (fenêtres/portes protégées, ensemble du bâtiment en béton), peut être le suivant :

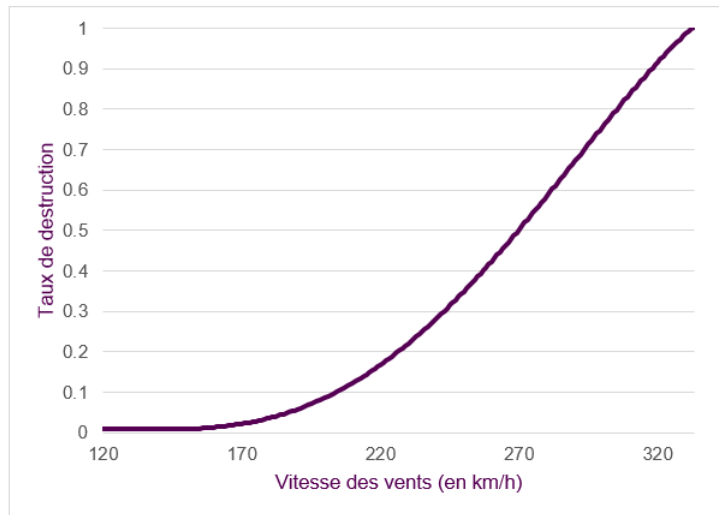


FIGURE II.20 – Exemple de courbe de vulnérabilité

Dans notre cas, les courbes de vulnérabilité pour les bâtiments et pour le contenu ont été fournies par des ingénieurs, pour l'ensemble des sites à assurer, chaque site ayant une courbe de vulnérabilité légèrement différente en fonction de ses caractéristiques.

En plus de ces courbes de vulnérabilité, il est aussi nécessaire d'estimer les pertes liées aux pertes d'exploitations. Pour cela, une méthode utilisée fréquemment est d'exprimer les taux de destruction relativement à ceux du bâtiment et du contenu.

Pour calculer le ratio pertes d'exploitation par rapport aux pertes bâtiments, nous décidons de nous baser sur les pertes historiques de la société que nous étudions. Nous disposons de l'historique des sinistres depuis 2010, avec le détail des pertes assurées séparées en fonction de la garantie Bâtiment/Contenu/Pertes d'exploitation. Nous prenons donc le ratio moyen des pertes historiques observées pour les pertes d'exploitation, relativement au contenu.

### II.2.3.2 Estimation des vitesses de vent au site

Comme cela a été présenté dans la section précédente, les courbes de vulnérabilité ont pour abscisse les vitesses de vent aux sites assurés. Il est donc nécessaire de calculer ces vitesses des vents pour chaque cyclone du catalogue stochastique.

Pour ce faire, il faut donc calculer les gradients de vitesse des vents des cyclones du catalogue d'événements stochastiques. Plusieurs modèles existent, plus ou moins faciles à mettre en place. Dans le cadre de ce mémoire, nous utilisons le modèle de Willoughby *et al.*, implémenté dans le package "*stormwindmodel*" de R afin de créer les gradients de vitesse des vents. La documentation de ce package est disponible en [14].

Résumé simplement, les vitesses des vents aux différents sites souhaités sont calculées en fonction, entre autres, des vitesses de déplacement des cyclones, de la direction prise par le cyclone, du rayon de vitesse maximale des vents.

En appliquant ce modèle à l'ouragan *Katrina* de 2005, on obtient par exemple le gradient de vitesse des vents suivant pour chaque comté des États-Unis :

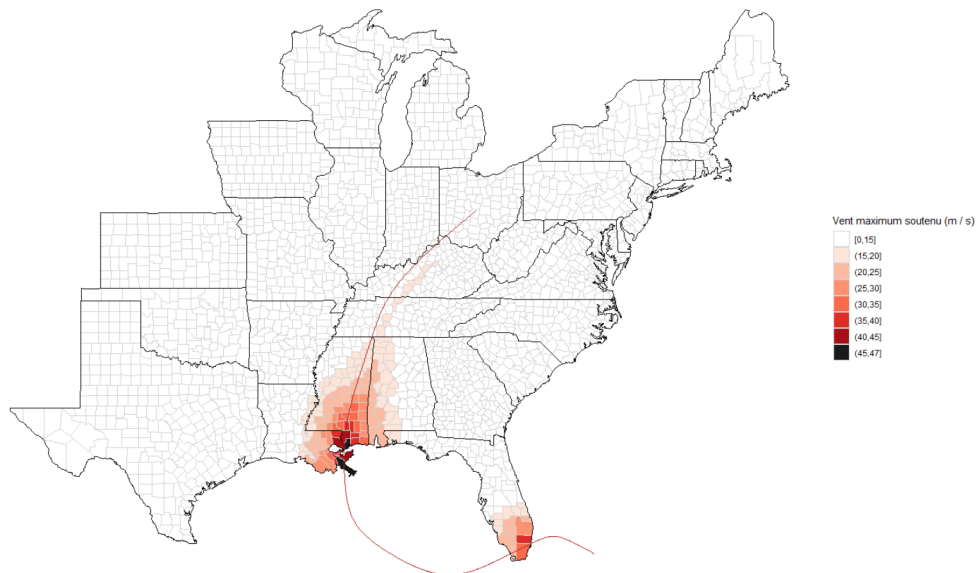


FIGURE II.21 – Empreinte de l'ouragan Katrina en 2005

Ainsi, pour chaque cyclone du catalogue d'événements stochastiques, nous disposons de la vitesse des vents ressentie à chaque site de l'entreprise que nous étudions. Nous pouvons donc pour chaque cyclone faire le lien entre l'événement et la perte subie par l'assuré en utilisant les courbes de vulnérabilité qui ont été fournies par les ingénieurs.

Dans le chapitre suivant, nous nous intéressons donc aux sorties du modèle, c'est-à-dire aux pertes modélisées. Plus particulièrement, nous nous intéressons à l'application des conditions d'assurance sur ces pertes modélisées, dans le but d'obtenir les distributions des pertes pour la société, en fonction de plusieurs structures d'assurance.

## II.2.4 Remarques sur la modélisation

Avant de passer au chapitre suivant sur les résultats du modèle, nous mentionnons deux points qui n'ont pas été traités jusqu'ici, à savoir la modélisation des périls secondaires et la prise en compte du changement climatique dans la modélisation des fréquences et des intensités des événements cycloniques.

### II.2.4.1 Périls secondaires

Dans le travail effectué précédemment, seules les pertes consécutives aux vents violents ont été modélisées. Cependant, les pertes causées par une tempête ne sont pas uniquement celles



liées aux vents, comme cela avait été expliqué précédemment. D'autres phénomènes physiques peuvent aussi causer des dommages et des pertes d'exploitation, comme par exemple les inondations causées par les pluies torrentielles ou encore la submersion marine.

Des modèles existent aussi pour la submersion marine et pour l'inondation causée par des pluies torrentielles, le catalogue d'événements stochastique créé dans les sections précédentes pourrait d'ailleurs servir afin de modéliser la submersion marine. Ces modélisations complémentaires ne sont pas traitées dans ce mémoire et les pertes consécutives aux inondations et aux submersions marines ne sont donc pas prises en compte dans la suite des travaux. Nous prenons donc comme hypothèse que les pertes causées par ces périls secondaires pour la société que nous étudions sont négligeables devant les pertes causées par les vents violents. Cette hypothèse est forte et peut constituer une première limite de la modélisation effectuée dans ce mémoire.

#### II.2.4.2 Effets du changement climatique

Un autre point important qui n'a pas été mentionné est la prise en compte du changement climatique dans la modélisation des événements cycloniques. Ce point est important mais est aussi particulièrement complexe à traiter, il fait l'objet de nombreuses recherches scientifiques à l'heure actuelle. Nous mentionnons ici deux articles récents sur la question :

- L'étude "Évolution du risque cyclonique en outre-mer à horizon 2050" menée conjointement par la Caisse Centrale de Réassurance (CCR), Météo-France et RiskWeatherTech, parue en février 2020.
- L'article "Quantifying the Impact from Climate Change on U.S. Hurricane Risk" menée par l'agence de modélisation AIR et parue en 2020.

Les deux articles utilisent les scénarios du Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat (GIEC) et visent à estimer l'évolution des pertes causées par les cyclones dans deux zones du bassin Nord-Atlantique : dans les territoires d'outre-mer pour la CCR et aux États-Unis d'Amérique pour l'étude d'AIR. Ces deux études mettent en avant le fait que l'estimation de cette évolution causée par le changement climatique est particulièrement complexe à estimer.

Les modélisations de la CCR corroborent les conclusions du GIEC dans l'AR5 (le cinquième rapport d'évaluation du GIEC : le changement climatique mènerait à une diminution du nombre global de cyclones dans le bassin Nord-Atlantique à horizon 2050. Cependant, la diminution du nombre global pourrait être accompagnée d'une augmentation des fréquences de cyclones plus intenses (catégorie 4 et 5) selon les conclusions de l'AR5. Cette diminution globale est cependant contestée par des articles récents, comme par exemple celui de Lee, *et al.* en 2020.

Au niveau des simulations des dommages, les conclusions sont les suivantes d'après la CCR pour l'outre-mer :

- Pour les dommages liés aux vents : Aucune augmentation significative des dommages est mise en évidence avec les simulations effectuées.
- Pour les dommages liés aux submersions marines : Augmentation de l'impact des submersions marines, à cause de l'élévation du niveau de la mer liée au changement climatique.

- Pour les dommages liés aux inondations : Augmentation des précipitations associées aux cyclones à horizon 2050 du fait du changement climatique, selon les conclusions du GIEC.

Le rapport d'AIR conclut aussi à une augmentation des pertes causées par les cyclones, mais ne donne pas de détail entre les impacts causés par le vent, les submersions marines et les inondations. Cependant, il est bon de noter que les pertes peuvent être bien différentes en fonction des différentes zones du bassin nord-atlantique. En effet, les modélisations de la CCR mènent par exemple à un déplacement des trajectoires cycloniques vers le nord du bassin, ce qui entraînerait des pertes plus fortes sur le sud des États-Unis d'Amérique et le Golfe du Mexique.

Ainsi, les effets du changement climatique sur les pertes causées par les événements cycloniques sont particulièrement difficiles à quantifier, même pour des scientifiques chevronnés, et ils font l'objet de nombreuses recherches et de nombreux débats à l'heure actuelle. Du fait de cette modélisation complexe et des divergences dans les conclusions entre les différents articles, nous ne prenons pas en compte les éventuels effets du changement climatique sur les pertes causées par les cyclones pour la société que nous étudions.

## — Chapitre III —

---

# Résultats de la modélisation et transfert du risque cyclonique

---

### III.1 La couverture du risque cyclonique

Comme cela a été vu dans les chapitres précédents, le risque cyclonique fait l'objet d'une vigilance accrue pour des raisons humaines, économiques et environnementales. Les entreprises implantées dans le bassin Nord-atlantique n'y échappent pas et sont généralement très exposées aux événements cycloniques.

Premièrement, les entreprises subissent des dommages directs à cause du cyclone. Les vents violents ou les inondations peuvent endommager les bâtiments et le contenu qu'elles possèdent, et les projectiles mis en mouvement par le cyclone peuvent eux aussi occasionner de lourds dégâts. Outre ces dommages directs, les entreprises sont aussi confrontées à toutes les pertes d'exploitation qui résultent du passage d'un cyclone : routes coupées, magasins fermés, approvisionnement et exportation retardés.

Pour ces entreprises, le fait d'assurer ce risque est donc très important et encore plus lorsqu'elles ont peu de diversification géographique, c'est-à-dire que leur activité s'exerce principalement dans cette zone du globe.

Généralement, les entreprises sont assurées pour ce risque via leur programme d'assurance Dommages Directs et Pertes d'Exploitation. Cependant, comme nous l'avons vu dans le chapitre I, cette police d'assurance comporte de nombreuses limites :

- Certains actifs ne sont pas assurés : les terrains, les parkings par exemple.
- Certaines pertes économiques ne sont pas assurées : les pertes d'exploitation sans dommage en particulier.

De plus, dans le contexte de redressement du marché qui a été présenté dans le chapitre I, les assureurs sont bien moins enclins à accorder de la capacité pour ce risque et encore plus lorsque les entreprises ont été multi-sinistrées par la passé. Conséquence de ce manque

d'appétit des assureurs, la capacité est rare et coûte plus cher. Bien souvent, les franchises sont élevées (en pourcentage des sommes assurées) et les limites sont basses. C'est le cas de l'entreprise que nous étudions dans ce mémoire.

## III.2 Résultats du modèle

Dans le chapitre précédent, nous avons modélisé les pertes subies par l'entreprise pour l'ensemble des cyclones du catalogue d'événements stochastiques. Pour représenter les distributions des pertes on s'intéresse généralement à deux types de distributions :

- L'*Aggregate Exceedance Probability* (AEP) : La probabilité annuelle de dépasser un certain seuil de pertes. Formellement, si on note  $(X_1, \dots, X_n)$  les pertes pour une année, l'AEP pour un seuil de perte  $x$  est :

$$AEP(x) = \mathbb{P} \left( \sum_{i=1}^n X_i \geq x \right)$$

- L'*Occurrence Exceedance Probability* (OEP) : La probabilité annuelle que la perte maximale pour un seul événement dépasse un certain seuil. Formellement, en notant  $(X_1, \dots, X_n)$  les pertes pour une année, l'OEP pour un seuil de perte  $x$  est :

$$OEP(x) = \mathbb{P} (\max(X_1, \dots, X_n) \geq x)$$

Dans l'étude menée ici, nous nous intéressons à ces probabilités dans trois cas différents :

- Lorsque les pertes sont brutes d'assurance,
- Lorsque les pertes sont couvertes après application d'une franchise par risque de 150,000€ . Cette franchise correspond à la situation pré-renouvellement pour la société que nous étudions.
- Lorsque les pertes sont couvertes après application d'une franchise par risque de 5% des valeurs assurées. Ce montant correspond à la franchise proposée par l'assureur apériteur de la société étudiée.

Nous comparons les cas 2 et 3 afin de pouvoir quantifier l'impact de l'augmentation des franchises sur les pertes transférées et retenues pour l'entreprise étudiée. Plus précisément, nous voulons voir si cette augmentation des franchises à impact fort sur son appétit au risque.

Tout d'abord, nous vérifions que les 10000 années simulées permettent une bonne convergence de la perte brute annuelle moyenne. Cela peut se vérifier simplement via le graphique ci-dessous. On constate qu'à partir de 5000 simulations la moyenne varie peu :

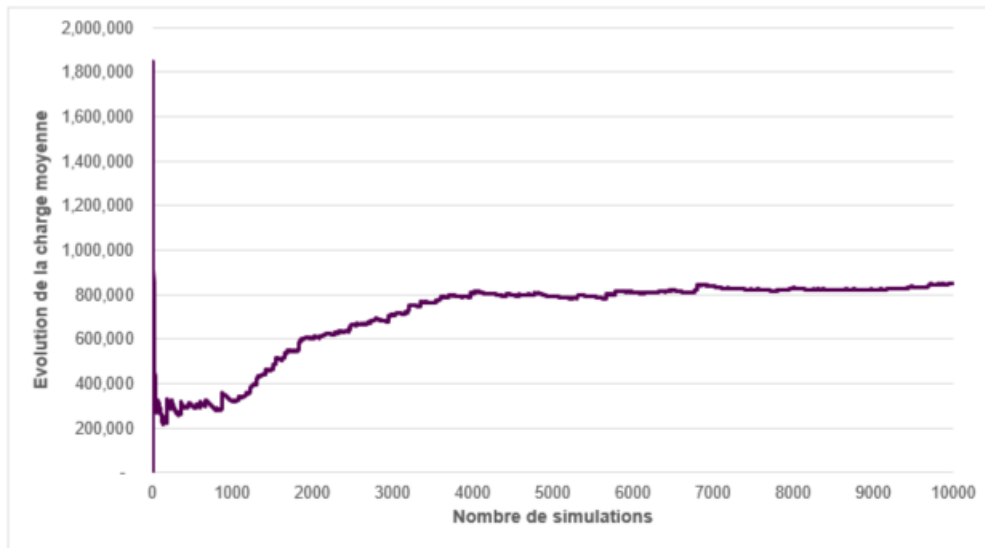


FIGURE III.1 – Convergence de la charge moyenne avant application de l'assurance

Avec les modélisations effectuées dans le chapitre 2, nous pouvons calculer les charges transférées après application des franchises à chaque perte modélisée. On compare ces charges transférées à la charge brute :

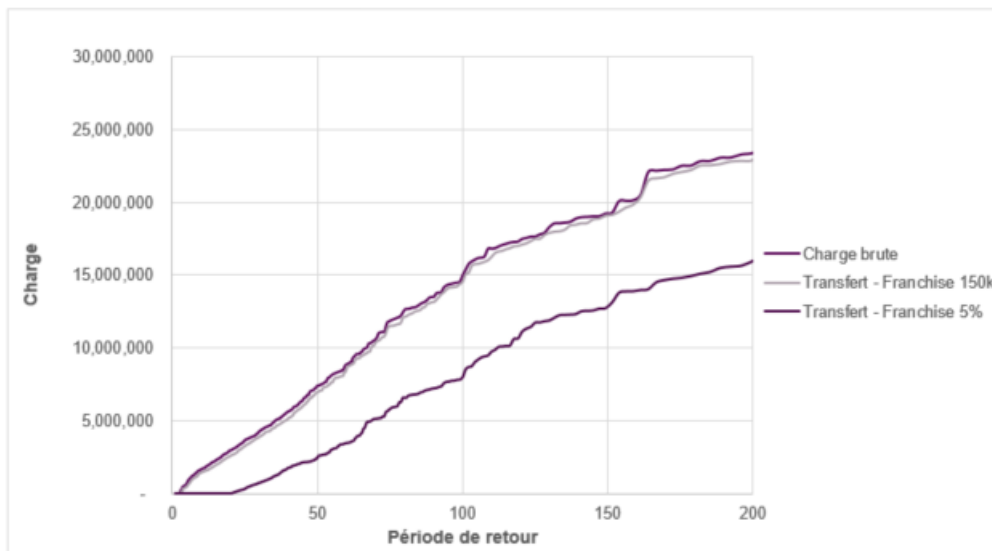


FIGURE III.2 – Charges modélisées en fonction de la période de retour

Dans le graphique ci-dessus, les distributions empiriques des charges brutes, et des charges transférées ont été tracées à partir des 10,000 saisons cycloniques du catalogue d'événements stochastiques. Par exemple pour calculer les périodes de retour pour la charge brute, on utilise la méthode suivante : soit  $(X_1, \dots, X_{10000})$  l'échantillon des charges brutes pour les 10,000 saisons cycloniques modélisées. On note  $(X_{(1)}, \dots, X_{(10000)})$  l'échantillon des statistiques d'ordre obtenues par tri croissant. À chaque statistique d'ordre est associée une probabilité de dépassement empirique. En notant  $X$  la charge brute annuelle, la probabilité de dépasser  $X_{(p)}$  pour  $p \in [1, 10000]$  est :

$$\mathbb{P}(X \geq X_{(p)}) = 1 - \frac{p}{10000 + 1}$$

La période de retour pour un montant  $X_{(p)}$  est alors donnée par :

$$\frac{1}{\mathbb{P}(X \geq X_{(p)})}$$

En calculant les périodes de retour empiriques pour les charges brutes et les charges transférées on obtient la figure III.2 présentée précédemment. On constate que la franchise en montant fixe à 150k€ a peu d'impact sur la charge transférée. Au contraire, les franchises en % des valeurs assurées changent fortement le transfert de risque, sur toutes les périodes de retour.

Cet impact de la franchise est aussi fort d'un point de vue fréquentiel :

- La probabilité modélisée d'avoir une perte consécutive à un cyclone est de 0,38%, soit un cyclone tous les 2,6 ans environ.
- La probabilité que la couverture soit activée, dans le cas de la franchise à 150k€ est de 0,36, soit 1 fois tous les 2,8 ans environ.
- La probabilité que la couverture soit activée, dans le cas de la franchise à 5% des valeurs assurées est de 0,05, soit 1 fois tous les 20 ans environ.

On constate que la différence est grande entre les deux couvertures. Pour l'entreprise étudiée cela se traduit donc par un manque de couverture par rapport à ce qu'elle avait auparavant. Afin de respecter le même appétit aux risques que ce qu'elle avait précédemment, la société doit donc transférer cette rétention supplémentaire provoquée par la hausse des franchises.

Nous cherchons donc à couvrir l'écart entre la rétention après transfert avec franchise à 150k€, et la rétention après transfert avec franchise à 5% des valeurs assurées. Graphiquement, cela représente l'écart entre la courbe grise et la courbe violette :

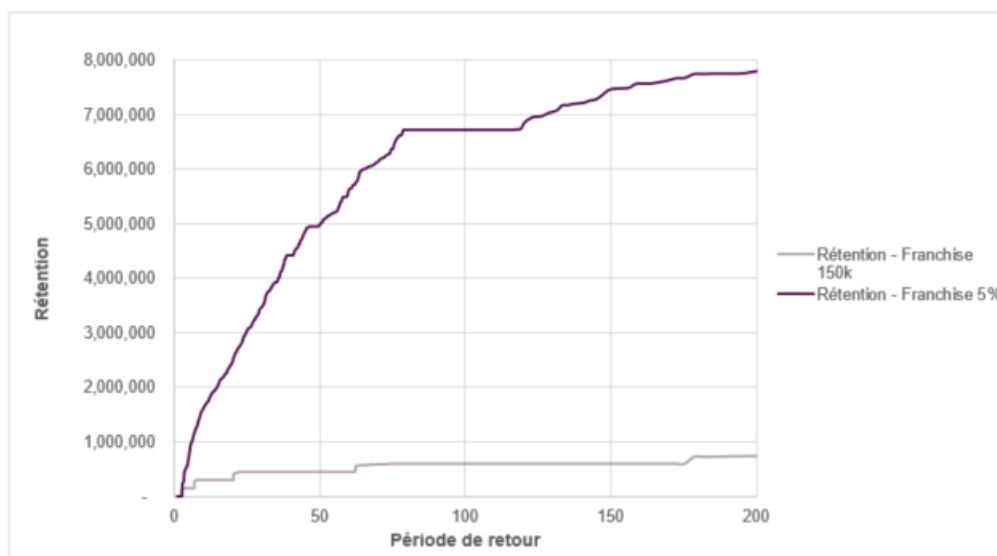


FIGURE III.3 – Rétention en fonction de la période de retour

Nous nous intéressons donc dans les sections suivantes aux solutions d'assurance paramétrique pour les cyclones et plus particulièrement à la structuration d'une solution paramétrique pour couvrir la rétention supplémentaire produite par la hausse des franchises. Le but des sections à venir est de répondre aux questions suivantes : est-il possible de construire un indice propre aux caractéristiques physiques du cyclone, reflétant les pertes de l'assuré ? Si oui, est-ce que le transfert *via* une assurance paramétrique est intéressant en terme de coût par rapport à une rétention totale du risque sous franchise ?

### III.3 Les couvertures paramétriques pour les cyclones

Au vu des points soulevés lors de l'analyse des résultats du modèle, il semble nécessaire d'apporter de la capacité de transfert supplémentaire pour le risque cyclonique, pour la société que nous étudions. Pour ce faire, il existe plusieurs solutions paramétriques permettant de couvrir le risque cyclonique, différentes dans leur fonctionnement et leur utilisation.

Avant de présenter les couvertures indicielles pour le risque cyclonique, rappelons un point important relatif aux périls secondaires. Comme nous l'avons vu dans la partie précédente, les causes des pertes après le passage d'un cyclone sont variées : vents violents, montée de la mer, houle cyclonique, fortes pluies. Dans notre cas, nous ne modélisons que les pertes consécutives aux vents violents.

Ainsi, dans ce mémoire, nous nous intéressons uniquement aux couvertures paramétriques où l'indice est relatif aux vitesses de vent. Des couvertures indicielles spécifiques pour les trois autres causes existent, nous pouvons par exemple citer le produit d'assurance paramétrique présenté par Ritleng et Nguyen dans le mémoire d'actuariat "*Étude d'un produit d'assurance paramétrique contre le risque de pluie torentielle en Jamaïque*" [15].

Ceci étant, même si l'indice que nous allons utiliser par la suite est relatif aux vitesses de vent, cela n'empêche pas le fait que le capital débloqué en cas d'indemnisation puisse être utilisé pour payer les pertes causées par les autres phénomènes physiques. En effet, comme nous l'avons vu dans la présentation des solutions indicielles, le capital débloqué en cas d'événement peut être utilisé pour payer toutes les pertes causées par l'événement, y compris les pertes causées par les événements secondaires. Cela est un avantage important des solutions d'assurance paramétrique.

Dans la suite de cette section, nous présentons donc les solutions paramétriques ayant pour indices les vitesses de vent ou assimilé.

#### III.3.1 La solution Cat-in-the-Box

##### III.3.1.1 Présentation de la première approche

La première solution que nous présentons ici porte le nom de "*Cat-In-the-Box*" pour "*Catastrophe in the box*". Comme son nom l'indique, l'idée de cette solution est de déclencher un paiement lorsqu'une catastrophe naturelle, ici un cyclone même si la couverture existe aussi pour les tremblements de terre, a lieu dans une zone géographique précise, une "*box*". Cette solution d'assurance paramétrique est actuellement l'une des plus populaires en partie grâce à

sa simplicité de fonctionnement.

Prenons le cas de la société pour laquelle nous souhaitons mettre en place une couverture indiciaire. L'idée est de tracer une "boîte" autour de chacun des sites à assurer. Lorsqu'un cyclone passe dans la boîte, l'assuré est indemnisé en fonction de la vitesse des vents maximale lors du passage dans la boîte.

Bien souvent, lorsque des sites ponctuels sont assurés et non des régions (des îles par exemple), les boîtes sont des cercles avec pour centre les sites assurés. En effet, l'utilisation de cercle est souvent utilisée pour les cyclones car lors du passage d'un cyclone les vitesses de vent sont propagées de manière quasi-circulaire.

Afin de donner les caractéristiques principales de ce type d'assurance paramétrique, nous proposons ci-dessous un exemple de structure sous le format *Cat-in-the-box* pour les 12 sites que nous souhaitons faire assurer, en utilisant des cercles de tailles différentes.

### Sites assurés et taille des cercles

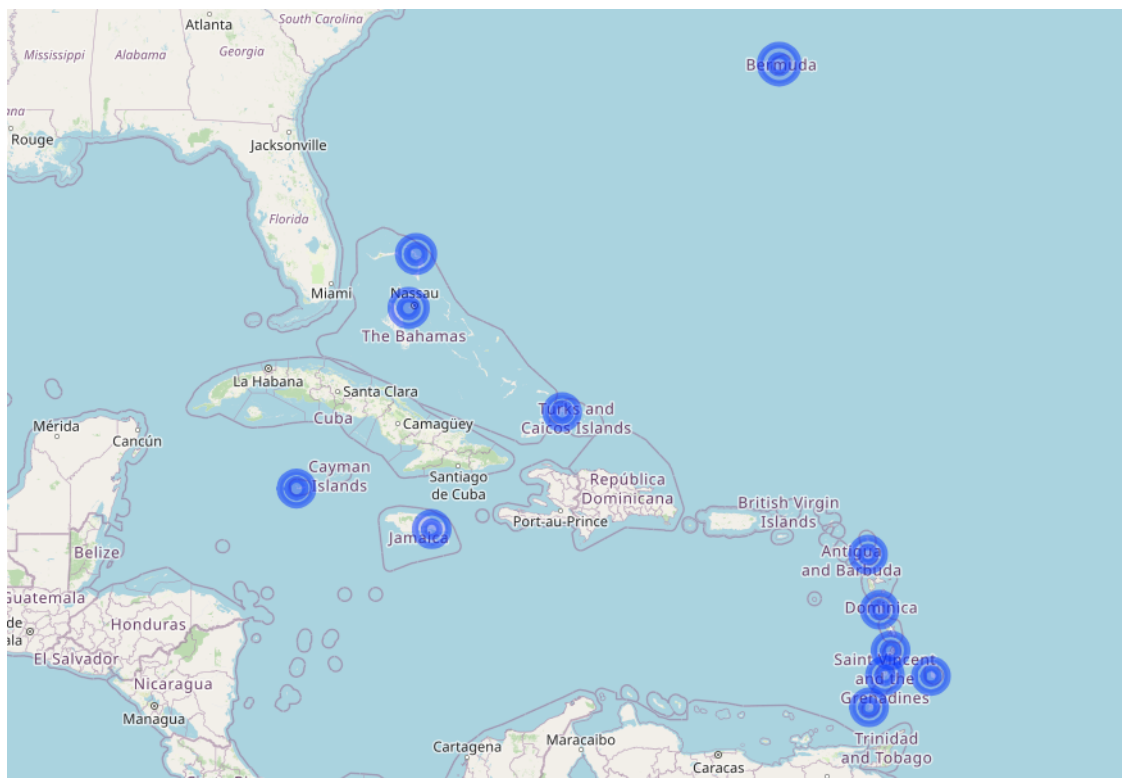


FIGURE III.4 – Sites assurés et cercles de déclenchement de la couverture paramétrique

Autour de chaque site plusieurs cercles sont tracés, par exemple nous prenons ici deux cercles, un de rayon 30km et un de rayon 60km. Dans une police d'assurance paramétrique, le centre (longitude, latitude) et les rayons de chaque cercle sont définis précisément. L'idée derrière le fait de prendre plusieurs cercles est de proposer des indemnités plus élevées lorsqu'un cyclone passe proche d'un site. Dans le cas présent, l'indemnité serait plus forte lorsque le cyclone passe dans le cercle de rayon 30km que dans celui de 60km.



### Fournisseur de données

Le fournisseur de données est le *National Hurricane Center*, le centre de prévisions météorologiques des États-Unis d'Amérique.

Lorsqu'un cyclone survient, le *NHC* publie les données relatives au cyclone pendant toute la période où les vitesses de vent étaient supérieures à 18km/h. Les données sont fournies sous la forme d'un tableau où chaque ligne comporte les caractéristiques du cyclone à un moment donné. Les caractéristiques du cyclone sont données toutes les 6 heures et les variables présentes dans le tableau sont les suivantes :

- Nom du Cyclone
- Heure de l'observation.
- Latitude de l'œil du cyclone à l'heure donnée, en degrés.
- Longitude de l'œil du cyclone à l'heure donnée, en degrés.
- Vitesse des vents maximale du cyclone à l'heure donnée (soutenue pendant 1 minute, à hauteur 10 mètres) en noeuds.

Ce sont ces données qui viennent ensuite alimenter la base de données *IBTrACS* que nous avons utilisé dans la partie modélisation.

### Indice et formule d'indemnisation

Cette solution d'assurance paramétrique comporte deux indices, le premier est la trajectoire du cyclone et le second la vitesse maximale des vents. Afin de calculer la vitesse maximale du cyclone à l'intérieur des cercles, la trajectoire et la vitesse des vents entre chaque points de la base de données du *NHC* sont interpolées linéairement. Toutes les formules utilisées afin de faire ce calcul doivent être présentes dans la police d'assurance afin que les deux parties (l'assuré et l'assureur) procèdent de la même manière lors du calcul de l'indemnisation et qu'il n'y ait pas de doute sur la façon de calculer l'indice.

Une fois que la vitesse maximale des vents dans les cercles a été déterminée, deux choix sont alors possibles pour le calcul de l'indemnisation forfaitaire du contrat d'assurance paramétrique. La première option est d'associer à chaque point dans le cercle sa catégorie sur l'échelle de Saffir-Simpson présentée plus haut. L'indemnisation sera alors relative à la catégorie maximale que le cyclone a atteint lors de son passage dans les cercles. Par exemple la table d'indemnisation servant à calculer le montant forfaitaire d'indemnisation pourrait ressembler à ceci :

Catégorie de Saffir-Simpson	Paiement - Cercle A	Paiement - Cercle B
1	0%	0%
2	10%	0%
3	30%	20%
4	70%	50%
5	100%	100%

TABLE III.1 – Exemple de table d'indemnisation

A chaque catégorie sur l'échelle de Saffir Simpson et à chaque cercle est associé un paiement qui est exprimé comme un pourcentage des valeurs assurées. Ici le cercle A est le cercle ayant un rayon de 30km, et le cercle B celui de 60km. Si l'on suppose que les dégâts sont plus élevés lorsqu'un cyclone passe proche du site assuré, alors les montants d'indemnisation doivent donc être supérieurs pour le cercle de plus petit rayon.

En utilisant les données historiques et la table d'indemnisation ci-dessus, prenons les sites aux Bahamas et regardons le cas du cyclone *Dorian* en 2019.

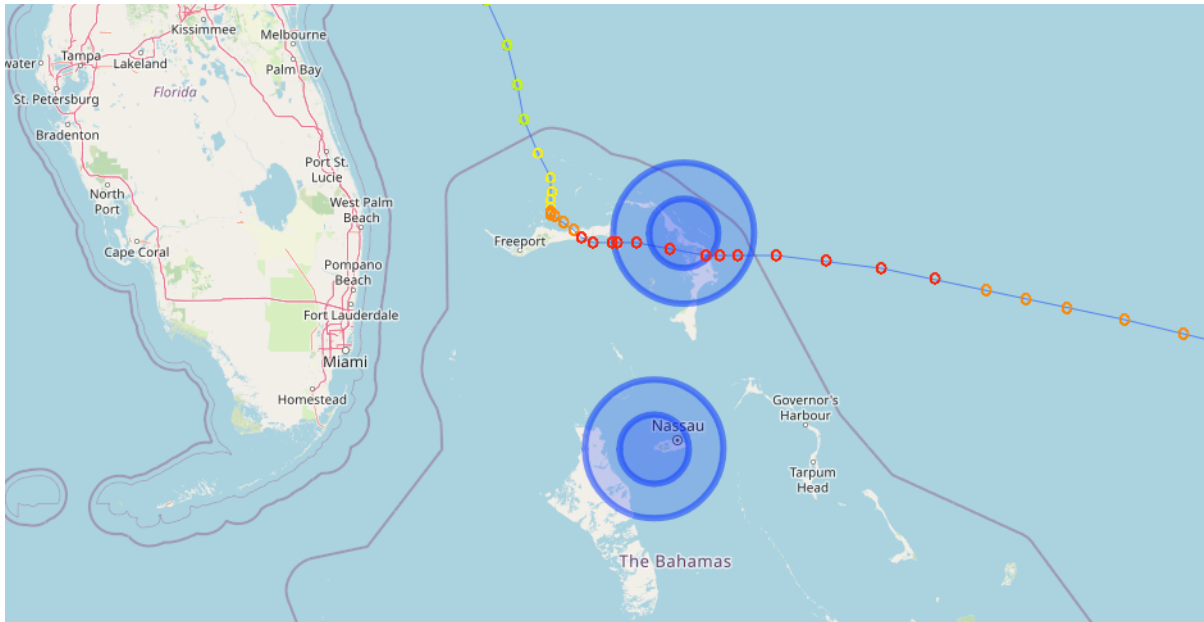


FIGURE III.5 – Sites assurés au Bahamas et trajectoire de l'ouragan *Dorian*

Comme nous pouvons l'observer sur la carte, l'ouragan *Dorian* est passé à moins de 30km du site assuré, et il était en catégorie 5 lorsqu'il est passé dans le cercle. L'indemnisation aurait donc été de 100% des valeurs assurées si on suit la table d'indemnisation donnée plus haut. La structure présentée ici (table des paiements, tailles des cercles) est juste donnée à titre d'exemple afin d'illustrer la solution "Cat-in-the-box" pour les cyclones.

Afin de structurer cette solution d'assurance paramétrique convenablement, il convient donc de déterminer les paramètres suivants :

- Le nombre de cercles à prendre en compte,
- La taille des différents cercles,
- L'indemnisation pour chaque catégorie de cyclone et pour chaque cercle.

### III.3.1.2 Structuration de la solution

Dans cette partie nous étudions la structuration d'une solution de type *cat-in-the-box* comme celle présentée précédemment. Plus précisément, nous utilisons les résultats du modèle catastrophe afin de voir si il y a une corrélation forte entre la catégorie du cyclone, la distance entre le cyclone et le point assuré et les pertes causées par le cyclone. Cette corrélation permettrait ensuite de définir une table d'indemnisation ayant pour entrées la distance entre

le cyclone et le site à assurer ainsi que sa catégorie, comme pour la table d'indemnisation présentée dans le tableau au-dessus.

Pour ce faire, nous revenons sur le modèle catastrophe. Pour chaque site assuré et pour chaque cyclone du catalogue stochastique, nous ajoutons aux vitesses de vent aux sites assurés les éléments suivants :

- Distance minimale entre le site et la trajectoire du cyclone,
- Vitesse des vents du cyclone au point le plus proche du site,
- Distance entre le site et le cyclone, au moment où les vents les plus forts ont été ressentis sur le site assuré,
- Vitesse des vents du cyclone, au moment où les vents les plus forts ont été ressentis sur le site assuré.

Afin d'obtenir ces nouvelles informations, les trajectoires des cyclones sont interpolées linéairement pour obtenir un point toutes les 15 minutes au lieu de 3 heures. Il est possible d'isoler le moment où les vents les plus forts ont été ressentis sur le site assuré car le modèle de Wiloughby permet de calculer le gradient de vitesse des vents pour chaque "portion" de cyclone. Afin de savoir quelle était la distance entre le site et le cyclone au moment où les vents les plus forts ont été ressentis, il suffit donc d'isoler la portion du cyclone qui a occasionné les vents les plus forts.

Nous nous intéressons donc à la corrélation entre les vitesses de vent maximales ressenties aux sites et la distance/catégorie au moment où les vents étaient les plus forts au site. Nous ne gardons que les cyclones ayant engendré des vitesses de vent supérieures à 110km/h, qui est le seuil à partir duquel les taux de destruction sont non-nuls dans les courbes de vulnérabilité utilisée. Nous traçons les graphiques pour les 5 catégories de l'échelle de Saffir-Simpson :

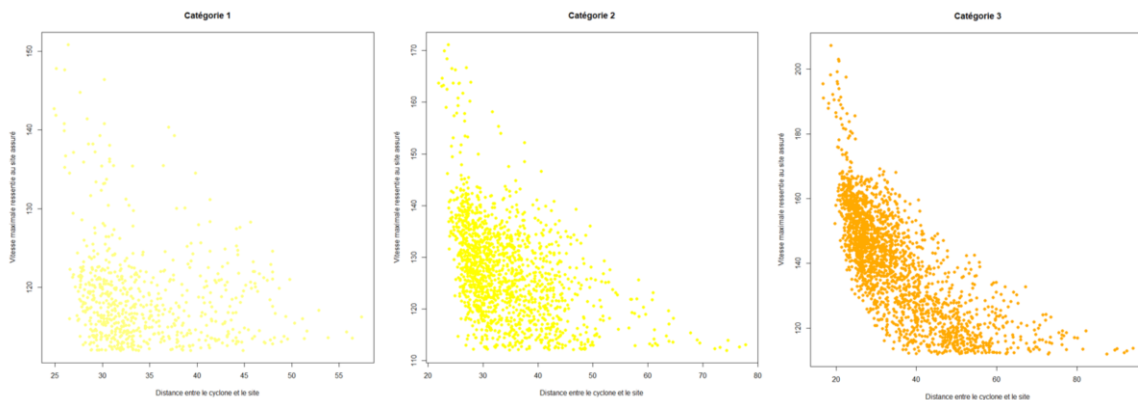


FIGURE III.6 – Vitesse maximale ressentie au site assuré en fonction de la distance au moment des vents les plus forts - Catégories 1 à 3

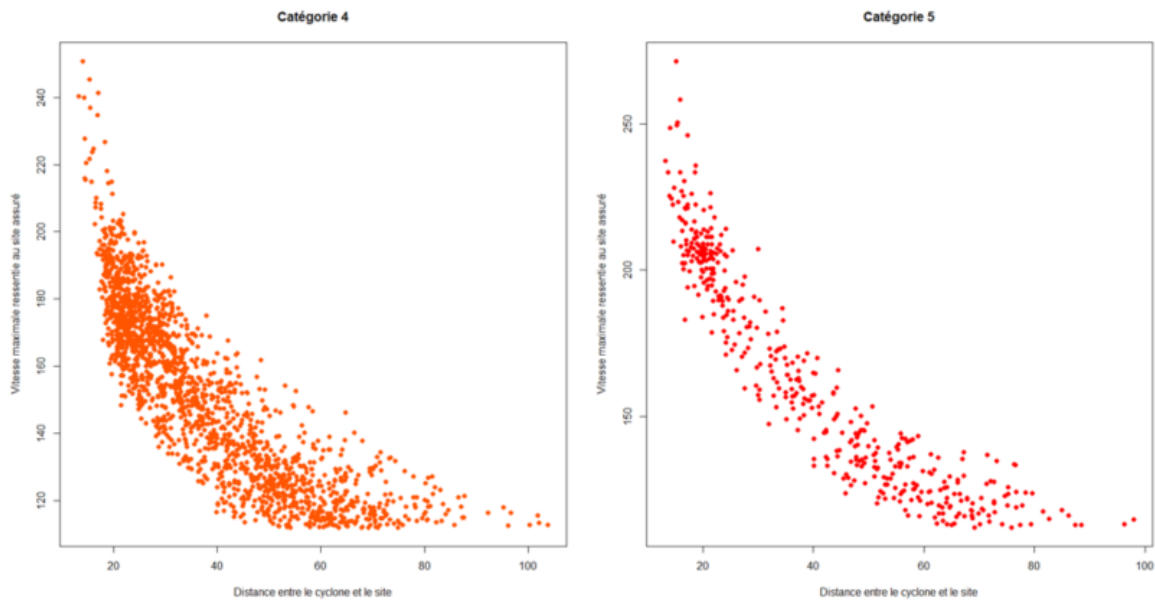


FIGURE III.7 – Vitesse maximale ressentie au site assuré en fonction de la distance au moment des vents les plus forts - Catégories 4 et 5

Avec les graphiques précédents, il est possible de faire un constat important : pour une catégorie de cyclone donnée et une distance entre le site et le cyclone fixée, les vitesses maximales ressenties peuvent être bien différentes, même si la variation est moindre dans le cas de cyclones de forte intensité (catégories 4 et 5 sur l'échelle de Saffir-Simpson).

Cela peut s'expliquer par l'approche suivante : il est raisonnable de penser que deux cyclones passant à la même distance du site et ayant une vitesse maximale des vents de 208 km/h pour l'un et de 209 km/h pour l'autre occasionneront sensiblement les mêmes dégâts au site assuré alors qu'ils ont des catégories différentes sur l'échelle de Saffir-Simpson. De même, deux cyclones de même vitesse passant à 29 km du site assuré et à 31 km produiront à peu près les mêmes vitesses de vent au site, alors qu'étant dans des cercles différents.

Dès lors que ce constat est effectué, il ne semble pas envisageable de construire une table d'indemnisation basée uniquement sur la catégorie du cyclone et sa distance au site, les effets de seuil entre les différents cercles et entre les catégories du cyclone étant trop importants.

### III.3.1.3 Seconde approche

Dès lors que ces effets de seuils ont été mis en lumière, il convient de changer légèrement la table des paiements en ayant une approche plus fine. Plutôt que de considérer la catégorie sur l'échelle de Saffir-Simpson et des cercles de rayons différents, il est possible d'utiliser directement la vitesse maximale des vents du cyclone, ainsi que la distance entre le site assuré et l'œil du cyclone, et de proposer une formule d'indemnisation sous forme de gradient. La fonction utilisée pour le calcul d'indemnisation serait alors sous la forme suivante :

$$I(v_{max}, d) = V(v_{max}) \times D(d)$$

avec :

- $I(v_{max}, d)$  l'indemnisation correspondant au point du cyclone à une distance  $d$  du site, avec une vitesse maximale des vents de  $v_{max}$ .

- $V$  une fonction croissante à valeurs entre 0 et 1, associant la  $v_{max}$  du cyclone à un pourcentage d'indemnisation.
- $D$  une fonction décroissante à valeurs entre 0 et 1, associant la distance entre l'œil du cyclone et le site à un pourcentage d'indemnisation.

Un exemple simple de fonctions  $V$  et  $D$  pouvant être utilisées sont les suivantes :

- Pour  $x \in [0, +\infty[$ ,  $V(v_{max}) = \frac{v_{max}-178}{252-178} \times \mathbf{1}_{x \in [178,252[} + \mathbf{1}_{x > 252}$
- Pour  $d \in [0, +\infty[$ ,  $D(d) = \frac{60-d}{60} \times \mathbf{1}_{x \leq 60}$

Ce qui peut se traduire par une indemnisation linéaire en fonction de la vitesse, entre la catégorie 3 et la catégorie 5 sur l'échelle de Saffir-Simpson, couplée à une indemnisation linéaire en fonction de la distance au site assuré, dans la limite de 60 km. Entre 20 et 30 km et entre 200 et 220 km/h cela donnerait par exemple les pourcentages d'indemnisation suivants :

		Distance entre l'œil du cyclone et le site assuré (en km)										
		20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Vitesse maximale des vents du cyclone (en km/h)	200	19.8%	19.3%	18.8%	18.3%	17.8%	17.3%	16.8%	16.4%	15.9%	15.4%	14.9%
	201	20.7%	20.2%	19.7%	19.2%	18.6%	18.1%	17.6%	17.1%	16.6%	16.1%	15.5%
	202	21.6%	21.1%	20.5%	20.0%	19.5%	18.9%	18.4%	17.8%	17.3%	16.8%	16.2%
	203	22.5%	22.0%	21.4%	20.8%	20.3%	19.7%	19.1%	18.6%	18.0%	17.5%	16.9%
	204	23.4%	22.8%	22.3%	21.7%	21.1%	20.5%	19.9%	19.3%	18.7%	18.2%	17.6%
	205	24.3%	23.7%	23.1%	22.5%	21.9%	21.3%	20.7%	20.1%	19.5%	18.9%	18.2%
	206	25.2%	24.6%	24.0%	23.3%	22.7%	22.1%	21.4%	20.8%	20.2%	19.5%	18.9%
	207	26.1%	25.5%	24.8%	24.2%	23.5%	22.9%	22.2%	21.6%	20.9%	20.2%	19.6%
	208	27.0%	26.4%	25.7%	25.0%	24.3%	23.6%	23.0%	22.3%	21.6%	20.9%	20.3%
	209	27.9%	27.2%	26.5%	25.8%	25.1%	24.4%	23.7%	23.0%	22.3%	21.6%	20.9%
	210	28.8%	28.1%	27.4%	26.7%	25.9%	25.2%	24.5%	23.8%	23.1%	22.3%	21.6%
	211	29.7%	29.0%	28.2%	27.5%	26.8%	26.0%	25.3%	24.5%	23.8%	23.0%	22.3%
	212	30.6%	29.9%	29.1%	28.3%	27.6%	26.8%	26.0%	25.3%	24.5%	23.7%	23.0%
	213	31.5%	30.7%	30.0%	29.2%	28.4%	27.6%	26.8%	26.0%	25.2%	24.4%	23.6%
	214	32.4%	31.6%	30.8%	30.0%	29.2%	28.4%	27.6%	26.8%	25.9%	25.1%	24.3%
	215	33.3%	32.5%	31.7%	30.8%	30.0%	29.2%	28.3%	27.5%	26.7%	25.8%	25.0%
	216	34.2%	33.4%	32.5%	31.7%	30.8%	30.0%	29.1%	28.2%	27.4%	26.5%	25.7%
	217	35.1%	34.3%	33.4%	32.5%	31.6%	30.7%	29.9%	29.0%	28.1%	27.2%	26.4%
	218	36.0%	35.1%	34.2%	33.3%	32.4%	31.5%	30.6%	29.7%	28.8%	27.9%	27.0%
219	36.9%	36.0%	35.1%	34.2%	33.2%	32.3%	31.4%	30.5%	29.5%	28.6%	27.7%	
220	37.8%	36.9%	35.9%	35.0%	34.1%	33.1%	32.2%	31.2%	30.3%	29.3%	28.4%	

FIGURE III.8 – Exemple d'indemnisation sous forme de gradient

Ainsi, pour une solution de ce type, il est nécessaire de bien choisir plusieurs paramètres pour que les indemnisations soit corrélées aux pertes réellement subies par l'assuré. Les paramètres importants sont le choix des fonctions  $V$  et  $D$ , en particulier :

- La distance jusqu'à laquelle le cyclone provoque une indemnisation, autrement dit la taille de la "box", ou mathématiquement le support de la fonction  $D$ ,
- Les vitesses des vents maximales pour lesquelles le cyclone engendre une indemnisation, mathématiquement le support de la fonction  $V$ ,
- La forme des fonctions  $V$  et  $D$  lorsqu'elles sont non-nulles, ou plus précisément le poids qu'elles accordent à chaque distance/vitesse.

### III.3.1.4 Structuration de la seconde approche

Afin de structurer cette solution, nous reprenons la même approche que ce qui a été fait précédemment : nous traçons la vitesse soutenue au site en fonction de la distance site/cyclone au moment où les vents étaient les plus forts au site. À chaque point est associé une couleur correspondant à la vitesse du cyclone au moment où les cyclones étaient les plus forts.

Nous obtenons le graphique suivant :

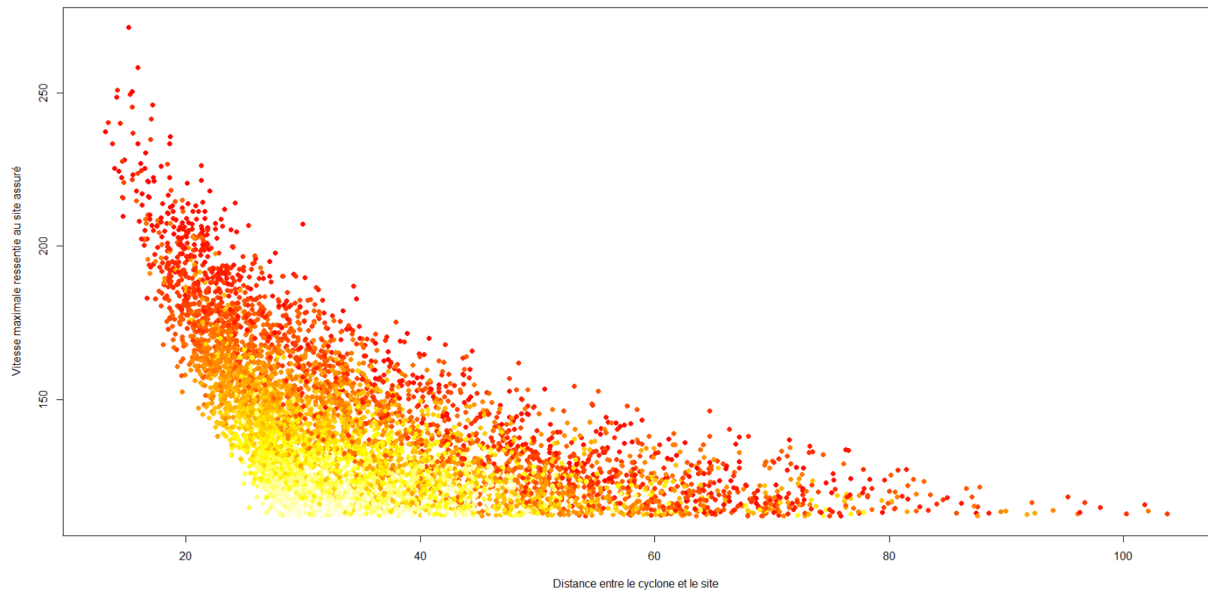


FIGURE III.9 – Vitesse soutenue au site en fonction de la distance entre le cyclone et le site au moment des vents les plus forts

Bien que les vitesses de vent soutenues aux sites assurés semblent bien être corrélées à la distance du cyclone et aux vitesses de vents du cyclone au global, on constate là encore qu'à distance fixée et pour une même nuance de couleur, la vitesse soutenue au site peut varier fortement. Cette forte variation ne permet donc pas de structurer la solution d'assurance paramétrique en utilisant uniquement la distance entre le cyclone et le site ainsi que la vitesse des vents du cyclone.

Les deux indices que sont la vitesse des vents du cyclone et la distance cyclone/site ne sont pas suffisants car d'autres paramètres rentrent en compte dans la modélisation des vitesses de vent au site, comme par exemple la direction du cyclone par rapport au site ou encore sa vitesse de déplacement, et ses paramètres sont tout aussi importants que la distance entre le cyclone et le site.

Afin de confirmer ces observations, des modélisations ont été effectuées dans le but d'exprimer la vitesse ressentie au site en fonction de la distance minimale cyclone/site et la vitesse des vents du cyclone. De ces modélisations nous pouvons en déduire des tables d'indemnisation mais les résultats ne sont pas probants pour les raisons suivantes :

- Dans le cas où on minimise l'écart entre indemnisation paramétrique et pertes réelles subies, les résultats sont corrects en moyenne sur un grand nombre de simulation mais cela est loin d'être satisfaisant puisque les écarts individuels sont forts.

- De nombreux événements déclenchent des indemnisations alors qu'ils ne produisent aucun dégât au site. Cela s'explique par le fait que le couple distance/vitesse du cyclone est trop réducteur : deux cyclones de même vitesse et à même distance du site ne produisent pas les mêmes dégâts si l'un se déplace vers le site et si l'autre a une direction orthogonale.

### III.3.1.5 Remarques sur la solution *Cat-In-the-Box*

D'après ce qui a été vu précédemment, il est difficile de structurer une solution d'assurance paramétrique en se basant uniquement sur la distance entre le site et la trajectoire du cyclone, ainsi que les vitesses de vent du cyclone. Dans le cas de l'entreprise que nous étudions, nous écartons donc la structure *cat-in-the-box* car il est difficile d'établir une table d'indemnisation convenable, c'est-à-dire une table d'indemnisation où le risque de base est faible.

Néanmoins, il est bon de préciser que c'est dans le cadre de notre modélisation et de ce que nous souhaitons couvrir que la solution *cat-in-the-box* n'est pas adaptée. Elle peut avoir des avantages dans d'autres cas :

- Si l'on souhaite couvrir un portefeuille global plutôt que des sites ponctuels. En effet, cette solution sera plus simple à structurer car les pertes subies seront moins dépendantes des résultats individuels pour chaque site : les écarts entre indemnisation et perte réelle sont compensés entre les sites au sein du portefeuille.
- Si on souhaite se couvrir contre les pertes d'exploitation sans dommage. Dans ce cas, on se retrouve dans la même situation que pour l'assurance d'un portefeuille global puisqu'on souhaite se couvrir contre les effets du vent sur une zone entière, plutôt que sur un site en particulier.

Afin d'illustrer ce qui vient d'être dit, nous pouvons citer les couvertures de plusieurs pays des Caraïbes qui sont construites sous le format *Cat-In-the-Box*, comme par exemple la couverture dont dispose l'île de Porto Rico.

## III.3.2 La solution *Wind-at-Location*

### III.3.2.1 Présentation

Après avoir écarté la solution *Cat-In-the-Box*, nous nous intéressons à une seconde solution d'assurance paramétrique pour les cyclones existant sur le marché du Transfert Alternatif de Risques : la solution "*Wind-at-Location*", aussi appelée "*STORM*" ou encore *RMS HWind* par certains porteurs du risque, car les données utilisées pour la conception de cette solution proviennent généralement de l'agence de modélisation *RMS*.

Cette seconde solution part d'un constat simple effectué sur la solution présentée précédemment : lorsque nous nous intéressons aux pertes subies à un endroit précis, la vitesse du cyclone au point le plus proche du site et la distance minimale entre le cyclone et le site ne sont pas suffisants pour quantifier les pertes réelles subies. D'autres facteurs rentrent en compte, tels que la vitesse de déplacement du cyclone, le déplacement angulaire du cyclone ou encore le rayon de vitesse maximale des vents.

Fort de ce constat, l'idée n'est plus de prendre la distance entre le site et le cyclone ainsi que la vitesse maximale des vents du cyclone, mais bien de prendre la vitesse des vents au site assuré directement. Cette vitesse peut soit être la vitesse soutenue pendant 1 minute, soit la vitesse des rafales de vent.

Dans le cas de cette solution paramétrique, l'indice est uniquement la vitesse des vents au site assuré et l'indemnisation est tout simplement proportionnelle à la vitesse calculée. Cette solution d'assurance paramétrique semble plus simple et fiable que la solution cat-in-the-box à première vue, mais est en réalité complexe à mettre en place car il est nécessaire d'avoir des données fiables de vitesse de vent aux sites assurés.

### Les sources de données

Afin de calculer les vitesses de vent aux sites assurés, consécutivement au passage d'un cyclone, plusieurs options pourraient être possibles.

La première option serait d'utiliser les mesures d'une station météorologique afin de quantifier la vitesse de vent maximale après le passage d'un cyclone. Cependant il est rare d'avoir une station météorologique proche de tous les sites assurés, et le fait d'utiliser une station météorologique éloignée augmente inévitablement le risque de base. Par exemple, lors du passage de l'ouragan *Andrew* en 1992, il a été constaté des variations de vitesse de vent de plus de 60 km/h pour des écarts de distance de moins de 15 km.

La seconde option, qui est l'option généralement choisie, est d'utiliser une agence de modélisation tierce pour calculer les vitesses de vent aux sites assurés. L'agence choisie est souvent *RMS*, qui a développé des produits spécifiquement pour cet usage. En effet, *RMS* a développé le produit *RMS HWIND* qui permet d'avoir après chaque cyclone, l'empreinte de l'événement et les vitesses de vent maximales soutenues pendant 1 minute, à une résolution élevée.

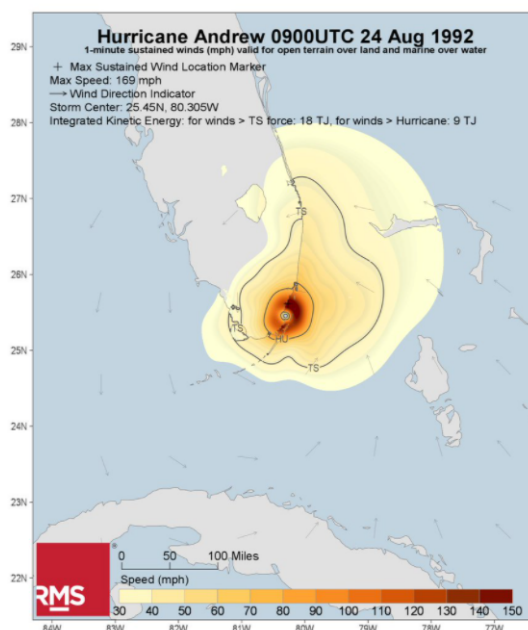


FIGURE III.10 – Empreinte des vents pour l'ouragan *Andrew* - *RMS*



Le fait d'avoir recours à une agence de modélisation tierce pour calculer et mesurer l'indice, plutôt que d'utiliser une source disponible en "open-data" comme pour la solution *Cat-in-the-box* peut être un inconvénient lors de la mise en place de ce type de solution paramétrique. En effet, l'organisme tiers doit être rémunéré pour le calcul de l'indice et l'achat des données représente un coût supplémentaire dans la mise en place de la solution paramétrique, coût qui n'existe pas dans le cas de données en *open-data*.

### III.3.2.2 Structuration de la solution Wind-at-Location

Après avoir écarté la solution *cat-in-the-box*, nous nous intéressons à la structuration de la deuxième solution d'assurance paramétrique, la solution *wind-at-location* où l'indice utilisé est la vitesse des vents aux sites à assurer.

Étant donné que nous avons modélisé les pertes subies par l'assuré via des courbes de vulnérabilité faisant le lien entre vitesses des vents au site et taux de destruction, cette solution est bien plus simple à mettre en place. En effet, afin d'établir une formule d'indemnisation il suffit de réutiliser les courbes de vulnérabilités présentées dans la partie II.2.3.1. et d'y associer le bon montant d'indemnisation.

Illustrons notre propos par un exemple précis. Prenons le cas du site en Jamaïque. Pour ce site, nous avons trois courbes de vulnérabilité, une pour le bâtiment, une pour le contenu ainsi qu'une courbe pour les pertes d'exploitations. Pour chaque site, nous transformons les taux de destruction en montant et nous créons une courbe unique avec en abscisse les vitesses de vent au site et en ordonnée les montants. Cette courbe peut ensuite être repassée en taux de destruction en divisant le montant par la somme totale des valeurs assurées, c'est-à-dire la somme des valeurs assurées bâtiment, contenu et pertes d'exploitation.

Afin de calculer l'indemnisation de l'assurance paramétrique, il suffit alors de prendre le minimum entre le taux de destruction de la courbe créée précédemment et 5%, qui est la valeur de la franchise du programme d'assurance DDPE. Pour le site en Jamaïque cela donne alors :

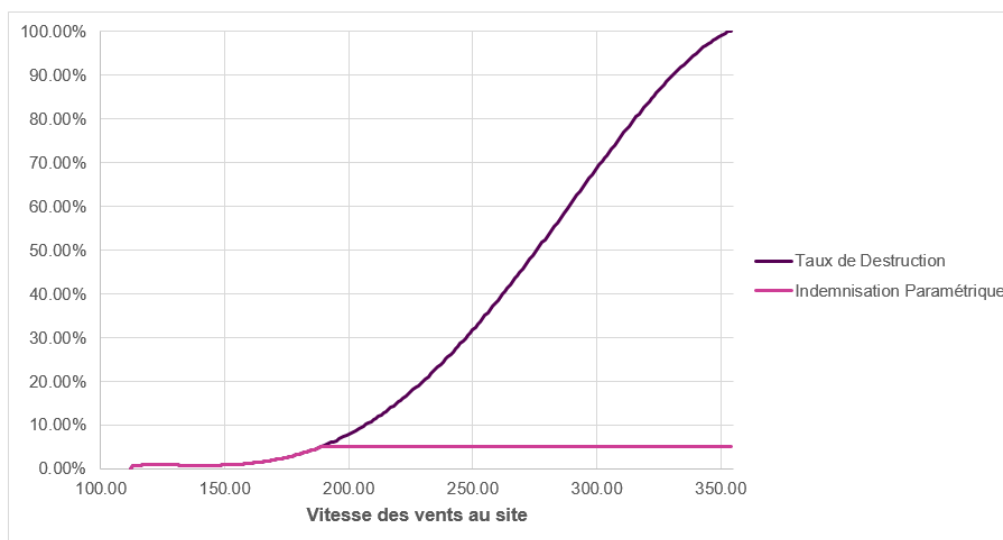


FIGURE III.11 – Taux de destruction et indemnisation paramétrique en fonction des vitesses de vent

Afin de garder l'ancienne franchise qui était de 150,000€, il est aussi possible de déclencher l'indemnité à partir d'un certain seuil de vent. Pour cela, nous calculons le ratio entre 150,000€ et la valeur assurée totale pour chaque site. Si on note,  $v_{max}$  la vitesse de vent au site et  $T(v_{max})$  le taux de destruction associé à cette vitesse, la formule d'indemnisation  $I$  pour la solution indiciaire est la suivante :

$$I(v_{max}) = \max(\min(T(v_{max}), 5\%) - \frac{150000}{TIV}, 0)$$

où TIV représente la somme totale assurée pour le site en question.

Ainsi nous obtenons pour chaque site une formule d'indemnisation dépendant des courbes de vulnérabilité du site ainsi que de ses valeurs assurées. En prenant un site avec une valeur assurée totale de 10 millions d'euros, nous obtenons la courbe d'indemnisation suivante :

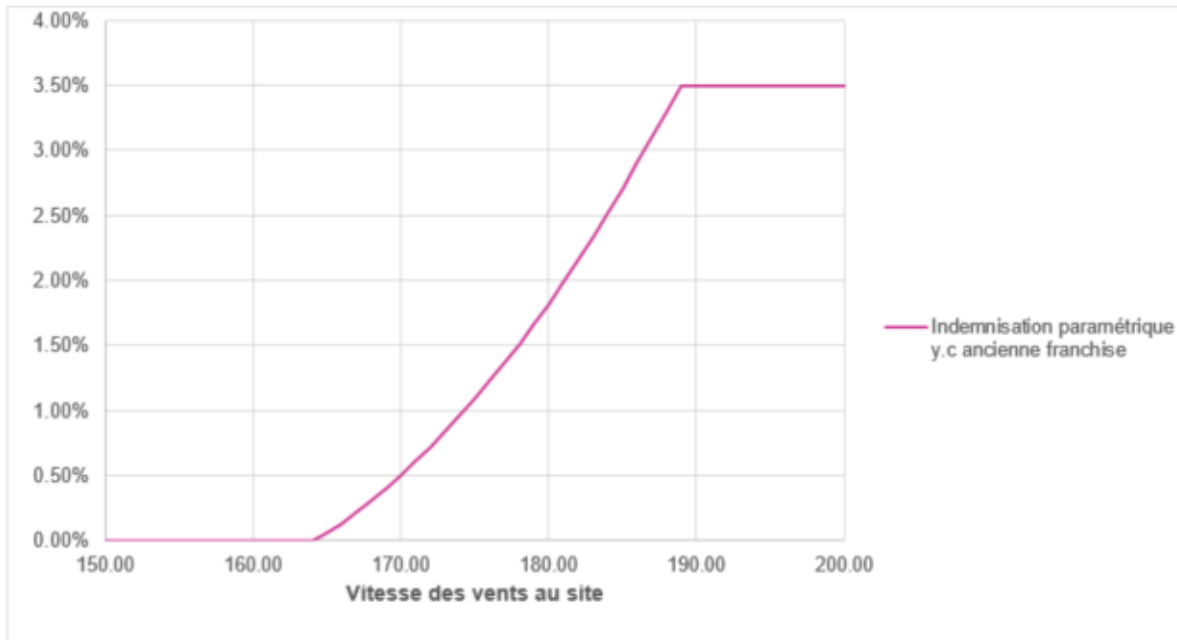


FIGURE III.12 – Indemnisation paramétrique en fonction des vitesses de vent

Nous pouvons distinguer trois cas :

- Avant 165 km/h de vitesse de vent au site, l'indemnisation n'est pas déclenchée : cela correspond aux vitesses de vent qui ne produisent pas de dommages au site ainsi qu'aux vitesses de vent qui produisent des pertes inférieures à 150,000€.
- Entre 165 km/h et 189 km/h, l'indemnisation est progressive en fonction de la vitesse des vents. Cela correspond aux pertes de moins de 5% des valeurs assurées.
- Après 189 km/h, les pertes sont capées à 3.5% des valeurs assurées : après cette vitesse, les pertes supplémentaires sont couvertes *via* l'assurance DDPE de la société puisque la franchise est de 5%. Les pertes ne sont pas capées à 5% car l'indemnisation prend en compte l'ancienne franchise qui était de 150k€, soit 1.5% des valeurs assurées dans le cas d'un site à 10 millions d'euros de valeurs assurées.

Pour chaque site, nous construisons donc une courbe d'indemnisation dépendant des courbes de vulnérabilité utilisées ainsi que des valeurs assurées. Nous appliquons ensuite les formules d'indemnisation aux pertes modélisées *via* le catalogue d'événements stochastiques et nous construisons la distribution de la charge transférée :

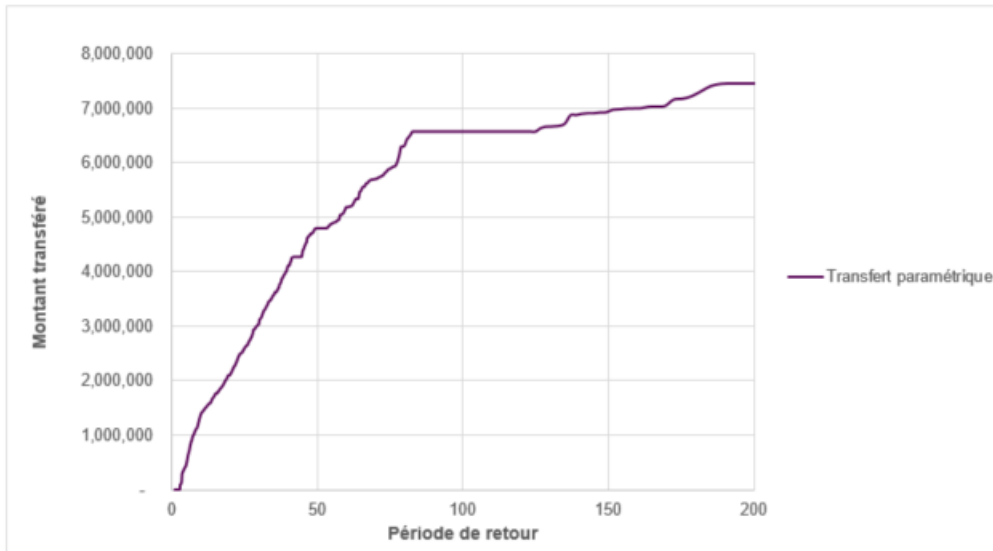


FIGURE III.13 – Distribution des montants transférés par l'assurance paramétrique

Enfin, nous vérifions que la charge transférée par l'assurance paramétrique additionnée à la charge transférée par l'assurance traditionnelle avec une franchise de 5% des valeurs assurées donnent bien les mêmes transferts que dans le cas de l'assurance traditionnelle avec franchise à 150,000€. On constate que c'est bien le cas :

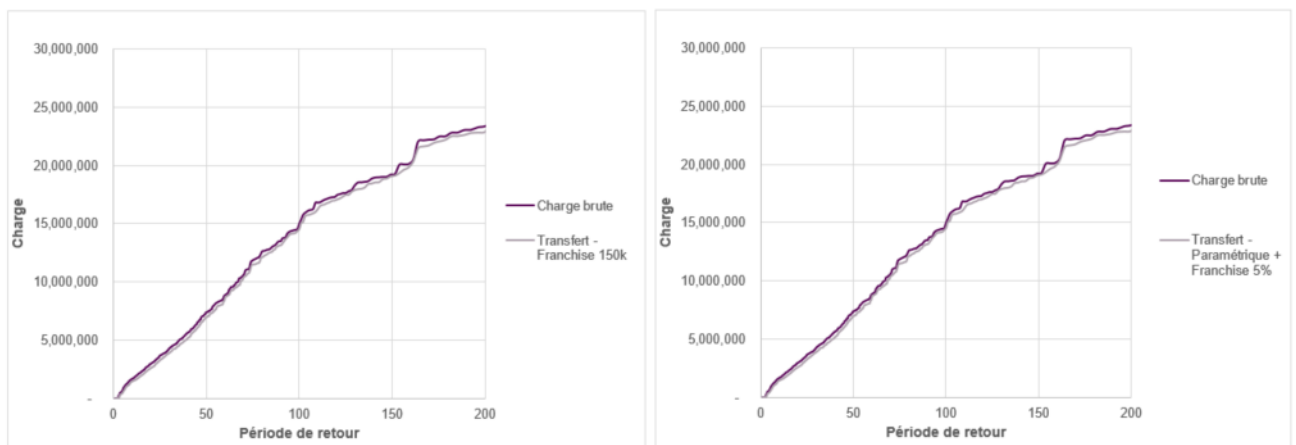


FIGURE III.14 – Comparaison des transferts - Option pré-renouvellement vs post-renouvellement avec paramétrique

## III.4 Tarification et Coût Total du Risque

Après avoir structuré une solution indicielle dans le but de couvrir les pertes sous franchise de l'assuré dans la section précédente, nous nous intéressons dans cette dernière section à l'intérêt de la solution paramétrique pour la société que nous étudions, en essayant de répondre à la question : "Est-ce intéressant de se couvrir pour les pertes sous franchises d'un point de vue financier?". Pour cela nous proposons une méthode de tarification pour la solution paramétrique choisie et nous nous intéressons ensuite à l'intégration de la solution dans un schéma de coût total du risque.

### III.4.1 Tarification de la solution indicielle

Afin d'estimer une prime pour la couverture souhaitée, nous proposons deux méthodes de tarification ayant été testée au sein de l'équipe *Alternative Risk Transfer* de *Willis Towers Watson*.

La première méthode consiste à exprimer la prime commerciale de la manière suivante :

$$P_C = \frac{P_P + \tau_V(P_P - \sigma)}{1 - C}$$

avec :

- $P_C$  la prime commerciale,
- $P_P$  la prime pure, c'est-à-dire la moyenne de la charge transférée *via* la solution paramétrique,
- $\sigma$  la volatilité de la charge transférée *via* la solution paramétrique,
- $\tau_V$  un taux, appelé chargement sur la volatilité,
- $\tau_C$  un taux correspondant au chargement pour les frais et autres dépenses.

La prime pure et la volatilité sont déjà connues grâce aux modélisations effectuées précédemment. Il faut donc estimer les différents chargements, qui varient d'un porteur de risque à un autre. Afin d'estimer un chargement moyen correspondant au marché, les différentes tarifications obtenues par le passé auprès d'assureurs et réassureurs pour d'autres structures d'assurance paramétrique ont été collectées à travers les différents bureaux de l'équipe *ART* de *Willis Towers Watson*. Les chargements sont donc estimés sur base de cette historique.

De la même manière, nous comparons la prime obtenue via chargement sur la volatilité à une prime obtenue via chargement sur la *Value-at-Risk* à 200 ans. Cette prime est calculée comme suit :

$$P_C = \frac{P_P + C_C(P_P - VaR_{99,5})}{1 - C}$$

avec :

- $P_C$  la prime commerciale,
- $P_P$  la prime pure, c'est-à-dire la moyenne de la charge transférée *via* la solution paramétrique,
- $VaR_{99,5}$  la Value-at-Risk à 200 ans pour les charges transférées, autrement dit la charge transférée pour une période de retour de 200 ans.

- $c$  est un taux, correspondant au coût du capital,
- $\tau_C$  un taux correspondant au chargement pour les frais et autres dépenses.

Le coût du capital et le chargement pour frais sont là aussi calculés *via* une régression sur les prix obtenus pour des structures mises en place par le passé.

Au final, les tarifications selon les deux méthodes mènent à des résultats similaires et donnent donc un intervalle de prix pour la couverture indicielle.

### III.4.2 Coût Total du Risque

Dans cette dernière section, nous introduisons le concept de "Coût Total du Risque" afin de juger de la pertinence de la mise en place d'une solution d'assurance paramétrique dans le programme d'assurance de la société étudiée.

Le coût total du risque (ou *Total Cost of Risk*, *TCOR*) est la somme des coûts de transfert et de la charge des risques conservés. L'idée du *TCOR* est de décomposer les coûts relatifs à un risque en trois parties :

- Le coût du transfert : dans un schéma d'assurance classique, cela correspond aux primes d'assurance,
- Le coût de la rétention : cela correspond à la moyenne des pertes sous franchises et au-delà des limites, ainsi qu'aux pertes non-transférées (car exclues de la couverture d'assurance par exemple),
- Le coût de la volatilité : c'est le coût relatif à la rétention du risque. Ce coût est spécifique à chaque entreprise et dépend de ses capacités financières ainsi que de la distribution des pertes retenues.

Le coût de la volatilité peut se calculer de plusieurs manières. La méthode utilisée chez *Willis Towers Watson* vise à associer à un montant de perte retenu, un coût en pourcentage de ce montant retenu. Ce pourcentage correspond au surcoût engendré par la survenance d'un événement. Ce surcoût peut s'expliquer de la manière suivante : afin de payer une perte, l'entreprise peut utiliser des liquidités ou contracter une dette, dans les deux cas ce capital débloqué afin de payer le sinistre a un coût.

Ainsi, le fait de couvrir les pertes sous franchise via une solution d'assurance paramétrique a certes un coût supplémentaire, ce qui fait augmenter le coût du transfert, mais permet de réduire les pertes retenues par l'entreprise ainsi que leur volatilité, ce qui fait diminuer le coût de la rétention et le coût de la volatilité.

La solution d'assurance paramétrique est alors intéressante pour la société lorsque la somme du gain en coût de la rétention et du gain en coût de la volatilité est supérieure à la prime de la couverture paramétrique.

L'intégration de la solution paramétrique dans le cas que nous avons étudié dans ce mémoire dépend essentiellement du coût de la volatilité pour la société de l'étude de cas. En disposant du profil de risque de l'entreprise il serait alors possible d'arbitrer entre l'achat ou non

d'une solution d'assurance paramétrique. Nous illustrons le cas où l'assurance paramétrique est intéressante d'un point de vue financier par le schéma suivant :

## Coût Total du Risque

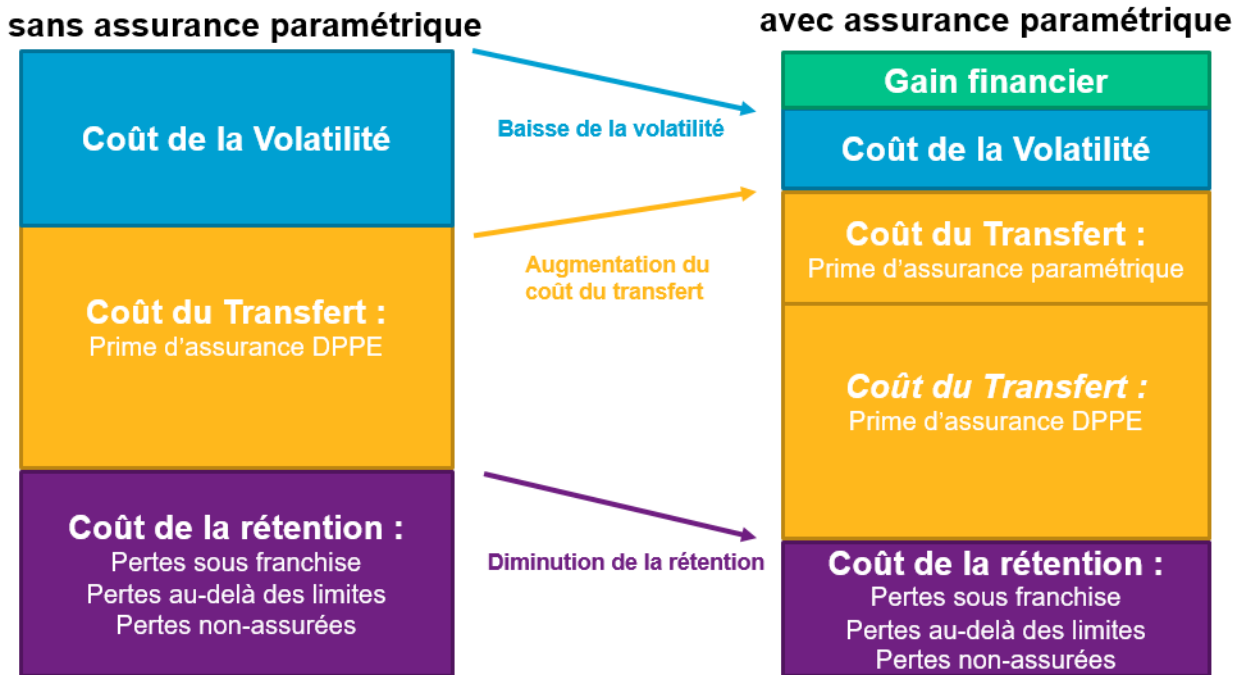


FIGURE III.15 – Coût Total du Risque, avec et sans solution paramétrique

---

# Conclusion

---

Comme nous avons pu le constater dans ce travail, le redressement du marché de l'assurance pour les entreprises peut avoir des impacts forts sur les politiques de gestion de risque et sur les tolérances aux risques des sociétés de toutes tailles et de toutes industries. Les entreprises ont de plus en plus besoin de solutions alternatives et complémentaires au marché traditionnel de l'assurance, en particulier pour des périls pouvant occasionner de lourds dégâts. C'est dans ce contexte que s'inscrit le travail présenté dans ce mémoire.

Après avoir présenté les causes et les conséquences du redressement du marché de l'assurance entreprises, nous nous sommes intéressés aux solutions d'assurance paramétrique en décrivant leur fonctionnement, leurs avantages et leurs inconvénients. Afin d'illustrer la manière dont elles pouvaient venir compléter des programmes d'assurance traditionnelle, nous avons étudié le cas d'une société confrontée à des difficultés lors du renouvellement de sa police Dommages Directs et Pertes d'Exploitation, en partie à cause de sa forte exposition au risque cyclonique.

Afin de comprendre et de quantifier le risque cyclonique de manière précise, nous nous sommes intéressés à ses conséquences sur les zones du bassin nord-atlantique, ainsi qu'à sa modélisation. Comme cela a pu être constaté, la modélisation du risque cyclonique peut être complexe car elle nécessite aussi bien des connaissances sur les modèles statistiques, que des connaissances physiques. Les différents modèles utilisés, ainsi que les différentes méthodes inspirées de la littérature scientifique récente ont permis de modéliser un catalogue d'événements stochastiques reproduisant les principales caractéristiques du catalogue d'événements historiques que nous avons à disposition.

Ce catalogue d'événements stochastiques a ensuite été utilisé dans le but de quantifier l'impact de l'augmentation des franchises pour la société que nous étudions. Afin de compenser l'augmentation des franchises, nous nous sommes ensuite concentrés sur la structuration d'une solution paramétrique pour couvrir les pertes sous franchise causées par le risque cyclonique. Après avoir étudié une première solution d'assurance paramétrique, nous avons finalement choisi une seconde solution, ayant pour indice les vitesses de vent aux sites assurés. Afin de juger de la pertinence de cette solution paramétrique, nous avons donné les conditions pour que cette solution paramétrique soit intéressante pour la société étudiée, au regard du coût total du risque.

Le travail présenté dans ce mémoire montre que les solutions d'assurance paramétrique

peuvent parfaitement venir compléter des programmes d'assurance traditionnelle, encore plus dans un contexte de redressement du marché.

Afin de compléter l'étude réalisée ici, des travaux complémentaires pourraient être menés sur la modélisation des périls secondaires pour les cyclones, tels que la houle cyclonique et les pluies torientielles, afin de quantifier leur impact pour ainsi pouvoir mieux les couvrir, éventuellement par des solutions d'assurance paramétrique. De même, une prise en compte des effets du changement climatique sur le risque cyclonique pourrait être un axe d'amélioration de cette étude.



---

## Table des figures

---

1	Hausse des taux de prime - <i>Gras Savoye Willis Towers Watson</i> . . . . .	3
2	Assurance paramétrique en rachat de franchise . . . . .	5
3	Densité des points d'origine, historique à gauche, modélisé sur 1000 ans à droite	6
4	Nuage de points pour les variations de longitude entre $t$ et $t - 1$ , et couleurs en fonction de la latitude . . . . .	6
5	Probabilité annuelle de dépassement - Historique et Stochastique . . . . .	7
6	Exemple d'indemnisation sous forme de gradient . . . . .	8
7	Premium rates increase - <i>Gras Savoye Willis Towers Watson</i> . . . . .	9
8	Parametric insurance as a deductible buy-back . . . . .	11
9	Density of origin points, historical on the left, modelled over 1000 years on the right . . . . .	12
10	Scatterplot for longitude variations between $t$ and $t - 1$ , and colours as a function of latitude . . . . .	12
11	Annual probability of exceedance - Historical and Stochastic . . . . .	13
12	Example of compensation in the form of a gradient . . . . .	14
I.1	Les segments d'activité de Willis Towers Watson . . . . .	21
I.2	La répartition géographique et les chiffres clés . . . . .	22
I.3	Les six pratiques de Risk & Analytics . . . . .	23
I.4	Seuils de tolérance au risque . . . . .	26
I.5	Répartition des cotisations pour les assurances de biens et de responsabilité - <i>Fédération Française de l'Assurance</i> . . . . .	29
I.6	Répartition des cotisations des professionnels par branches en 2019 - <i>Fédération Française de l'Assurance</i> . . . . .	29
I.7	Pertes assurées totales par péril - <i>Swiss Re Institute</i> . . . . .	34
I.8	Hausse des taux de prime - <i>Gras Savoye Willis Towers Watson</i> . . . . .	35
I.9	Pertes assurées et non-assurées - <i>Swiss Re Institute</i> . . . . .	37
I.10	Exemple de fonctionnement d'une assurance structurée . . . . .	39
I.11	Processus d'indemnisation . . . . .	42
I.12	Risque de base . . . . .	45
I.13	Option "Carve-out" . . . . .	46
I.14	Option "Rachat de franchise" . . . . .	47
I.15	Option "XS" . . . . .	48
I.16	Les sites assurés dans le bassin Nord-Atlantique . . . . .	50
II.1	Ouragan <i>Dorian</i> en 2019 - <i>NOAA</i> . . . . .	52

II.2	Ouragans les plus dévastateurs entre 1980 et 2019 - <i>montants en milliards de dollars - Munich Re</i> . . . . .	52
II.3	Cyclone Tropical, vue aérienne - <i>Meteo France</i> . . . . .	54
II.4	Cyclone Tropical, coupe verticale - <i>Meteo France</i> . . . . .	54
II.5	Échelle de Saffir-Simpson et dégâts occasionnés - <i>NOAA</i> . . . . .	55
II.6	Fonctionnement d'un modèle catastrophe . . . . .	56
II.7	Nombre de cyclones historiques par catégorie, de 1980 à 2019 . . . . .	58
II.8	Nombre d'événements de catégorie "Tempête Tropicale" ou plus de 1980 à 2019	60
II.9	Histogramme des événements de catégorie "Tempête Tropicale" ou plus de 1980 à 2019 . . . . .	60
II.10	Nombre d'événements de catégorie "Tempête Tropicale" ou plus de 1980 à 2019, par mois de formation . . . . .	62
II.11	Densité des points d'origine, historique à gauche, modélisé sur 1000 ans à droite	63
II.12	Cyclones de catégorie 4 et 5 de 2003 à 2019 - <i>NOAA</i> . . . . .	64
II.13	Nuage de points pour $(\Delta X_{t-1}, \Delta X_t)$ . . . . .	66
II.14	Nuage de points pour $(\Delta X_{t-1}, \Delta X_t)$ , et couleurs en fonction de la latitude . .	67
II.15	Vitesse maximale des vents en fonction de la pression minimale centrale . . . .	72
II.16	Rayon de vitesse maximale des vents en fonction de la pression minimale centrale	73
II.17	Distribution des catégories de Cyclone sur 40 ans . . . . .	74
II.18	Probabilité annuelle de dépassement - Historique et Stochastique . . . . .	75
II.19	Probabilité de dépassement par occurrence - Historique et Stochastique (échelle logarithmique) . . . . .	76
II.20	Exemple de courbe de vulnérabilité . . . . .	78
II.21	Empreinte de l'ouragan Katrina en 2005 . . . . .	79
III.1	Convergence de la charge moyenne avant application de l'assurance . . . . .	84
III.2	Charges modélisées en fonction de la période de retour . . . . .	84
III.3	Rétention en fonction de la période de retour . . . . .	85
III.4	Sites assurés et cercles de déclenchement de la couverture paramétrique . . . .	87
III.5	Sites assurés au Bahamas et trajectoire de l'ouragan <i>Dorian</i> . . . . .	89
III.6	Vitesse maximale ressentie au site assuré en fonction de la distance au moment des vents les plus forts - Catégories 1 à 3 . . . . .	90
III.7	Vitesse maximale ressentie au site assuré en fonction de la distance au moment des vents les plus forts - Catégories 4 et 5 . . . . .	91
III.8	Exemple d'indemnisation sous forme de gradient . . . . .	92
III.9	Vitesse soutenue au site en fonction de la distance entre le cyclone et le site au moment des vents les plus forts . . . . .	93
III.10	Empreinte des vents pour l'ouragan <i>Andrew</i> - <i>RMS</i> . . . . .	95
III.11	Taux de destruction et indemnisation paramétrique en fonction des vitesses de vent . . . . .	96
III.12	Indemnisation paramétrique en fonction des vitesses de vent . . . . .	97
III.13	Distribution des montants transférés par l'assurance paramétrique . . . . .	98
III.14	Comparaison des transferts - Option pré-renouvellement vs post-renouvellement avec paramétrique . . . . .	98
III.15	Coût Total du Risque, avec et sans solution paramétrique . . . . .	101

---

# Bibliographie

---

- [1] URL : <https://www.swissre.com/institute/research/sigma-research/sigma-2020-02>. *sigma 2/2020 : Natural catastrophes in times of economic accumulation and climate change* 2020.
- [2] URL : <https://www.ffa-assurance.fr/>. *Fédération Française de l'Assurance*.
- [3] Darasovann THACH. *Arbitrer le marché de l'assurance à l'aide d'outils ART (Alternative Risk Transfer), de la théorie à la pratique : Une application numérique à un cas réel*. 2015.
- [4] Yannick Appert-Raullin. *Entreprise Risk Management. Cours ISUP*. 2019.
- [5] AMWINS. *How Parametric Products Benefit Catastrophe-Driven Risk Transfer*. 2020.
- [6] M.K. James and L.B. Mason. *Synthetic Tropical Cyclone Database*. 2005.
- [7] Nadia Bloemendaal et al. *Generation of a global synthetic tropical cyclone hazard dataset using STORM*. 2020.
- [8] Jennifer Nakamura, et al. *HITS : Hurricane Intensity and Track Simulator with North Atlantic Ocean Applications for Risk Assessment*. 2015.
- [9] Christophe DENISE-BAILLON. *Modélisation statistique du risque de tempêtes tropicales dans le bassin Atlantique Nord*. 2013.
- [10] B. Harper. *Tropical Cyclone Parameter Estimation in the Australian Region : Wind-Pressure Relationships and Related Issues for Engineering Planning and Design - A Discussion Paper*. 2002.
- [11] M. DeMaria & J.Kaplan *Sea Surface Temperature and the Maximum Intensity of Atlantic Tropical Cyclones*. 1994.
- [12] URL : <https://www.ncdc.noaa.gov/ibtracs/index.php?name=ib-v4-access>. *International Best Track Archive for Climate Stewardship (IBTrACS)*.
- [13] URL : <https://www.ecmwf.int/en/forecasts/datasets/reanalysis-datasets/era5>. *ERA5 dataset*.
- [14] URL : [https://github.com/geanders/stormwindmodel/tree/master/Details\\_README](https://github.com/geanders/stormwindmodel/tree/master/Details_README). *Documentation stormwindmodel package*.
- [15] CCR. *Évolution du risque cyclonique en outre-mer à horizon 2050*. 2020.
- [16] AIR Worldwide. *Quantifying the Impact from Climate Change on U.S. Hurricane Risk*. 2020.
- [17] C.-Y Lee et al. *Statistical-dynamical downscaling projections of tropical cyclone activity in a warming climate : Two diverging genesis scenarios*. 2020.
- [18] Maud Thomas. *Économétrie de l'assurance non-vie. Cours ISUP*. 2019.
- [19] Charlotte Dion. *Modèles linéaires. Cours ISUP*. 2018.