

Mémoire présenté devant le CNAM pour l'obtention du Master

Droit Economie Gestion, mention Actuariat et l'admission à l'Institut des Actuaires

le 22 novembre 2024

Par : Marc-Emmanuel ROUMEUR

Titre : Modélisation du risque physique climatique et estimation d'impacts sur un portefeuille d'actifs financiers localisés en zones cycloniques.

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

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

<i>Présidente du Jury :</i> M. David FAURE	signatures	<i>Entreprise :</i> Nom : Accuracy
		<i>Directeur de mémoire en entreprise :</i> Nom :
<i>Membres présents du jury de l'Institut des Actuaires :</i>		<i>Signature :</i>
M. Guillaume GORGE Mme Sophie MICHON		
		<i>Invité :</i> Nom : Signature :

*Membres présents du jury du
Cnam :*

M. Olivier DESMETTRE
M. Kristiano BEJKO

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

Secrétariat :

Bibliothèque :

Signature du responsable entreprise

Signature du candidat

Remerciements

Je tiens à remercier Stéphane Loisel, professeur du Conservatoire National des Arts et Métiers (CNAM) et titulaire de la Chaire « Actuariat et science du risque », mon tuteur académique pour sa disponibilité, son encadrement et ses précieux conseils durant toute la réalisation de ce mémoire.

Je tiens à exprimer également ma gratitude aux actuaires rencontrés au fil de mes expériences professionnelles, dont les conseils avisés et le partage de leur expertise ont nourri mon intérêt pour cette matière.

Enfin, je tenais à remercier mes parents pour leur soutien sans faille, leurs encouragements constants et leur accompagnement tout au long de ma scolarité.

Résumé

Le mémoire s'articule autour de plusieurs thématiques essentielles liées à la modélisation du risque physique climatique. En particulier, on se concentrera sur la modélisation et l'impact du risque physique lié aux cyclones tropicaux sur un portefeuille d'actifs financiers. Si le modèle proposé peut s'adapter à tous types d'actifs financiers, il m'a été demandé de l'adapter à un portefeuille de garanties financières. Une garantie financière est un mécanisme utilisé par les banques pour sécuriser un prêt ou un crédit, en cas de non-remboursement de la part de l'emprunteur. Elle peut prendre la forme d'actifs (tels que des biens immobiliers ou des titres financiers) destinés à couvrir tout ou partie du montant dû. Ces garanties sont particulièrement importantes lorsque des crédits sont octroyés dans des régions à risques, comme les îles exposées aux changements climatiques, notamment les cyclones tropicaux. Dans ce contexte, les banques doivent actuellement être en mesure de valoriser la valeur actuelle de la garantie (*fair value*). De plus, la réglementation européenne bancaire et assurantielle vise à l'avenir à intégrer davantage les effets du réchauffement climatique dans l'évaluation des actifs financiers.

En particulier, elle incite les institutions à considérer l'impact des risques climatiques (risque physique et risque de transition) à long terme sur la valeur des actifs - et donc des garanties - situées dans des zones vulnérables et ce, afin de renforcer la stabilité financière des institutions précitées, face aux défis liés au changement climatique. Cela m'a donc conduit à ajuster la valorisation actuelle de la garantie (*fair value*) vers une valorisation actuelle mais qui intégrerait ce risque physique climatique (*green value*¹). Je propose également d'introduire la notion de *spread climatique* dont l'objectif est de refléter la valeur implicite du risque physique climatique, sur la courbe d'actualisation utilisée pour actualiser les *cash-flows* futurs issus d'un actif financier et donc de la garantie financière.

Dans une première partie, le document établit un constat initial des enjeux liés au risque physique, en explorant son intégration dans la réglementation bancaire et actuarielle. Cette partie couvre de nombreux volets, tels que le reporting ESG bancaire (CRR III), le reporting comptable extra-financier (CSRD), les directives de la BCE, ainsi que le processus actuariel de l'ORSA. Elle aborde également le rapport Langreney, qui prône notamment, une transformation du régime des catastrophes naturelles en France, face à l'accroissement de la probabilité d'occurrence des phénomènes climatiques extrêmes.

Dans une seconde partie, le mémoire présente la méthodologie utilisée pour la collecte de données, l'anonymisation et la visualisation des expositions. Il décrit par la suite les différentes étapes de calcul, y compris la définition de la matrice d'exposition, la modélisation la fonction d'impact, la simulation des taux d'actualisation et le calcul final d'impact physique climatique sur les garanties financières. Le mémoire se conclut par une analyse des résultats obtenus selon le modèle de calibration de la fonction d'impact, la zone géographique, l'année projetée et le scénario climatique envisagés. A partir de ces résultats, la *green value* des garanties financières peut en être déduite et le *spread climatique* implicite. Enfin, certaines limites intrinsèques au modèle proposé sont introduites et des améliorations futures envisagées, telles que l'élargissement de la modélisation à d'autres risques climatiques voire un ajustement de la fonction d'impact.

En définitive, ce mémoire propose une méthodologie complète pour évaluer l'impact du risque physique climatique, en particulier celui lié aux cyclones tropicaux, sur un portefeuille de garanties financières, tout en intégrant les exigences réglementaires européennes croissantes. Il offre ainsi aux institutions bancaires un modèle pour ajuster la valorisation de leurs garanties financières (via une *green value* ou un *spread climatique*), en tenant compte des risques climatiques à long terme, afin de renforcer leur résilience face aux défis climatiques futurs.

Mots-clés : risque physique, risque climatique, ESG (Environnement, Social et Gouvernance), CRR (*Capital Requirements Regulation*), EBA (*European Banking Authority*), BCE (Banque Centrale Européenne), CSRD (*Corporate Sustainability Reporting Directive*), EFRAG (*European Financial Reporting Advisory Group*), Rapport Langreney, Observatoire de l'assurabilité, CCR (Caisse Centrale de Réassurance), ESRS (*European Sustainability Reporting Standards*), Guide BCE, ORSA (*Own Risk and Solvency Assessment*), EIOPA (*European Insurance and Occupational Pensions Authority*), Climada, cyclones tropicaux, Cat Nat, fonction d'impact, Hull & White, green value, spread climatique, GIEC, Scénarios RCPs et SSPs.

¹J'introduis ici la notion de *green value* inspirée de la *fair value* financière, qui permet d'intégrer le risque climatique dans l'évaluation financière de l'actif.

Abstract

The present thesis is structured around several key topics related to the modelling of physical climate risk. In particular, it will focus on the modelling and impact of the physical risk linked with tropical cyclones on a portfolio of financial assets. While the proposed model can be adapted to all types of financial assets, I was asked to adapt it to a portfolio of financial guarantees. A financial guarantee is a mechanism used by banks to secure a loan or credit in the event of non-repayment by the borrower.

It can take the form of assets (such as property or financial securities) intended to cover all or part of the amount owed. These guarantees are particularly important when loans are granted in high-risk regions, such as islands exposed to climate change, particularly tropical cyclones. In this context, banks must currently be able to value the current value of the guarantee. In addition, European banking and insurance regulations aim to incorporate the effects of global warming to a greater extent in the valuation of financial assets.

In particular, it encourages institutions to consider the impact of long-term climate risks (physical risk and transition risk) on the value of assets - and therefore guarantees - located in vulnerable areas, in order to strengthen the financial stability of the aforementioned institutions in the face of the challenges posed by climate change. This has led me to adjust the current valuation of the guarantee (fair value) towards a valuation that would incorporate this physical climate risk (green value²). I also propose to introduce the notion of "climate spread", the objective of which is to reflect the implicit value of the physical climate risk on the discount curve used to discount the future cash flows from a financial asset and therefore from the financial guarantee.

In the first part, the document establishes an initial overview of the issues relating to physical risk, exploring its integration into banking and actuarial regulations. This part covers a number of aspects, such as ESG banking reporting (CRR III), non-financial accounting reporting (CSRD), ECB directives and the ORSA actuarial process. It also discusses the Langreney report, which advocates, in particular, a transformation of the natural disaster regime in France, given the increased probability of occurrence of extreme climatic phenomena.

In the second part, the report presents the methodology used for data collection, anonymisation and visualisation of exposures. It then describes the various stages of the calculation, including the definition of the exposure matrix, the modelling of the impact function, the simulation of discount rates and the final calculation of the physical climate impact on financial guarantees. The report concludes with an analysis of the results obtained according to the impact function calibration model, the geographical area, the projected year and the climate scenario considered. Based on these results, the green value of the financial guarantees can be deduced and the climate spread implied. Finally, some intrinsic limitations of the proposed model are introduced and future improvements are considered, such as extending the modelling to other climate risks or adjusting the impact function.

Ultimately, this thesis proposes a comprehensive methodology for assessing the impact of physical climate risk, particularly that associated with tropical cyclones, on a portfolio of financial guarantees, while incorporating the growing European regulatory requirements. It thus offers banking institutions a model for adjusting the valuation of their financial guarantees (via a green value or a climate spread), taking long-term climate risks into account, in order to strengthen their resilience in the face of future climate challenges.

Keywords: physical risk, climate risk, ESG (Environment, Social and Governance), CRR (Capital Requirements Regulation), EBA (European Banking Authority), ECB (European Central Bank), CSRD (Corporate Sustainability Reporting Directive), EFRAG (European Financial Reporting Advisory Group), Langreney's report, Insurability observatory, CCR (Caisse Centrale de Réassurance), ESRS (European Sustainability Reporting Standards), Guide BCE, ORSA (Own Risk and Solvency Assessment), EIOPA (European Insurance and Occupational Pensions Authority), Climada, tropical cyclones, Cat Nat, impact function, Hull & White, green value, climate spread, IPCC & RCP scenarios.

²I am introducing here the notion of "green value" inspired by financial "fair value", which makes it possible to incorporate the climate risk into the financial valuation of the asset.

Table des matières

Remerciements	i
Résumé	ii
<i>Abstract</i>	iii
1 Introduction et problématique	1
1.1 Portefeuille immobilier et garanties associées	1
1.2 Constat initial	2
1.3 Le risque physique dans la réglementation bancaire et actuarielle	2
1.3.1 Le risque physique dans le reporting ESG bancaire (CRR III)	3
1.3.1.1 Contexte règlementaire et législatif : nécessité d'un reporting prudentiel des expositions au risque physique dans le CRR III	3
1.3.1.2 Contexte règlementaire et législatif: Description de l'ITS de l'EBA	4
1.3.1.3 Clarification du package de communication à compléter pour le risque physique	5
1.3.2 Le risque physique dans le reporting comptable extra-financier ESG	6
1.3.3 Le risque physique dans le Guide BCE	9
1.3.4 Le risque physique dans le processus actuariel de l'ORSA	12
1.3.5 Risque physique et réglementation	12
1.3.6 Le rapport Langreney, accroissement de la sinistralité et conséquences pour les acteurs financiers	12
1.4 Problématique du mémoire	13
2 Base de données initiale et anonymisation	15
2.1 Méthodologie utilisée	15
2.2 Visualisation des expositions	17
3 Méthodologie générale et justification de l'outil open-source	18
4 Modélisation	21
4.1 Définition de la matrice d'exposition	21
4.1.1 Récupération de l'adresse et de l'exposition	21
4.1.2 Création d'une zone d'exposition	21
4.2 Historique des événements climatiques	22
4.3 Modélisation de la fonction d'impact	24
4.3.1 Fonction d'impact et calibration	25
4.3.2 Association de l'exposition à sa fonction d'impact	33
4.3.3 Mesure d'adaptation au réchauffement climatique	34
4.4 Calcul de l'impact physique climatique sur l'exposition	35
4.5 Module de projection des paramètres selon les scénarios climatiques	35
4.6 Module d'actualisation financière des impacts futurs	37
4.6.1 Choix du modèle de taux	37
4.6.2 Choix du modèle de calibration	38
4.6.3 Données historiques et interpolation	38
4.6.4 Description du modèle Hull White 1 facteur	40
4.6.5 Méthodes de calibration historiques du modèle	41
4.6.5.1 Optimisation suivant la méthode 1	43
4.6.5.2 Optimisation suivant la méthode 2	44
4.6.5.3 Choix du modèle d'optimisation	45
4.6.6 Diffusion du modèle Hull White 1 facteur	45
4.6.6.1 Discrétisation du taux court	45
4.6.6.2 Obtention des simulations de taux d'actualisation	47
4.6.6.3 Extrapolation des taux d'actualisation	50

4.7	Module final de simulations de Monte-Carlo	50
5	Résultats de l'analyse et introduction d'une « green value »	54
5.1	Impact physique actualisé	54
5.2	Introduction du spread climatique	57
6	Conclusions du mémoire	63
7	Limites du mémoire et améliorations dans le futur	64
7.1	Étendre la modélisation du risque physique issus des cyclones, à d'autres risques climatiques .	64
7.2	Affiner le modèle de fonction d'impact	64
7.3	Effectuer un backtesting du modèle	64
7.4	Adaptation au réchauffement climatique	64
7.5	Autres limites du modèle	65
8	Bibliographie	66
8.1	Documentation du GIEC (<i>Sixth Assessment Report</i>)	66
8.1.1	Main reports	66
8.1.2	Special reports	66
8.2	Autres sources	66
8.3	Livres et articles de finance quantitative	66
8.4	Articles de recherche scientifique	66
9	Annexes	68
9.1	Courbes d'impacts actualisées et comparaison des montants	68
9.1.1	Région « EP »	68
9.1.2	Région « NA »	71
9.1.3	Région « NI »	73
9.1.4	Région « SI »	76
9.1.5	Région « SP »	78
9.1.6	Région « WP »	81
9.1.7	Région « SA »	83
9.2	Courbes d'actualisations et taux forward	86
9.2.1	Région « EP »	86
9.2.2	Région « NA »	87
9.2.3	Région « NI »	88
9.2.4	Région « SI »	89
9.2.5	Région « SP »	90
9.2.6	Région « WP »	91
9.2.7	Région « SA »	91
9.3	Synthèse du code Python du modèle	92
9.3.1	Calibration et génération du modèle Hull-White 1 facteur	92
9.3.2	Calculateur d'impact climatique	92
9.3.3	Module des sorties/projections du modèle	92

1 Introduction et problématique

La valeur d'un actif financier est influencée tout au long de sa vie par une multitude de facteurs de risque. Parmi ces facteurs, on peut citer par exemple : *les risques financiers* (variations de taux d'intérêt, fluctuations de devises...) ainsi que *les risques économiques* (cycles conjoncturels, politiques monétaires et fiscales...). À ces facteurs peuvent s'ajouter *les risques climatiques* dont l'importance croissante reflète l'exposition des actifs aux impacts des événements météorologiques extrêmes (cyclones tropicaux, inondations, sécheresses...) et aux changements progressifs des conditions environnementales (hausse des températures, montée des eaux...).

De nombreux modèles existants intègrent désormais une analyse conjointe de ces différents risques, mettant en évidence l'interdépendance des scénarios financiers et climatiques. A titre d'exemple, un choc climatique majeur peut influencer les conditions économiques globales et réciproquement, une récession économique est susceptible d'altérer la résilience des sociétés face aux aléas climatiques. Dans le cadre de ce mémoire, le parti a été pris de ne pas tenir compte de la dépendance entre les scénarios financiers et climatiques et ce, afin de se concentrer exclusivement sur les impacts directs des risques physiques climatiques liés aux cyclones tropicaux, sur un portefeuille bancaire d'actifs immobiliers.

Ainsi, sur la base d'une non-corrélation entre les scénarios climatiques et financiers, l'objectif est également de mieux appréhender et modéliser les effets directs des risques physiques climatiques sur le portefeuille immobilier, dans un cadre analytique clair et circonscrit.

1.1 Portefeuille immobilier et garanties associées

Les travaux réalisés dans le cadre de ce mémoire reposent sur une base de données contenant l'ensemble des garanties immobilières adossées à des prêts immobiliers et mise à disposition par une banque. Une garantie immobilière constitue une sûreté offerte par l'emprunteur à la banque pour sécuriser un prêt. Elle prend généralement la forme d'un bien immobilier hypothéqué. Contrairement aux prêts eux-mêmes, qui sont inscrits à l'actif du bilan bancaire en tant que créances, les garanties ne figurent pas directement au bilan. Elles servent de protection en cas de défaut de paiement, permettant à la banque de saisir le bien immobilier pour limiter ses pertes. Ce n'est qu'en cas de saisie et de vente que la garantie devient un actif comptabilisé au bilan.

L'utilisation des garanties par la banque joue un rôle crucial dans la gestion des risques de celle-ci. En adossant un prêt à une garantie, la banque réduit son exposition en cas de défaillance de l'emprunteur. Si ce dernier ne peut honorer ses échéances, la banque peut exercer son droit sur la garantie, notamment en procédant à la saisie et à la revente du bien pour recouvrer une partie ou la totalité du montant dû. Cela permet de limiter les pertes potentielles tout en renforçant la stabilité financière de l'établissement.

La base de données utilisée pour ce mémoire a été mise à disposition par une banque et contient des informations détaillées sur l'ensemble des garanties immobilières liées aux prêts octroyés par celle-ci. Pour chaque garantie, sont enregistrées : l'adresse de localisation, la dernière évaluation financière du bien au 31 décembre 2023, ainsi que la surface du terrain sur lequel la garantie est située.

Ces garanties, exposées aux aléas climatiques tels que les tempêtes, les inondations, les sécheresses ou la montée du niveau des mers, sont directement impactées par le risque physique climatique. Ce risque réside dans la dépréciation de la valeur des garanties en raison des dommages matériels causés par ces événements. Une telle diminution de valeur réduit leur capacité à couvrir les prêts auxquels elles sont adossées, augmentant ainsi l'exposition de la banque à des pertes potentielles.

Cette vulnérabilité liée au risque physique climatique est d'autant plus préoccupante que les garanties constituent une part essentielle des mécanismes de sécurité des portefeuilles de prêts. Dans un contexte de multiplication et d'intensification des phénomènes climatiques extrêmes, la gestion de ces dépréciations devient un enjeu majeur pour les institutions financières, exigeant des approches rigoureuses d'évaluation et de gestion des risques climatiques.

1.2 Constat initial

Afin d'appréhender au mieux les aléas précités, il semble impératif que les banques intègrent dorénavant le risque physique dans leurs évaluations, ainsi que - par ailleurs - dans la gestion de leurs garanties immobilières. Cette démarche répond non seulement à la nécessité d'anticiper les impacts des phénomènes climatiques extrêmes, mais aussi à une demande croissante de la part des régulateurs, qu'ils soient bancaires ou assurantiels. **Ces dispositions impliquent une analyse proactive de l'exposition géographique de leurs actifs potentiellement exposés à des événements climatiques extrêmes.**

La base de données contenant les adresses et les montants des garanties immobilières, a l'instar de celles utilisées dans les systèmes bancaires, a la faculté de pouvoir être croisée avec des informations géographiques et climatiques et ce, afin d'évaluer la vulnérabilité de ces garanties. Le modèle cible proposé dans ce mémoire vise donc, à partir des adresses des garanties immobilières, à mesurer la vulnérabilité et donc l'impact sur ces garanties, du risque physique climatique.

L'intégration du risque physique offre également aux banques la possibilité d'ajuster leur politique de crédit, notamment en refusant de financer certains projets dans des zones à haut risque, voire en exigeant des garanties supplémentaires. Concomitamment, la surveillance continue des tendances climatiques et la mise à jour régulière des évaluations des risques apparaissent essentielles dans l'objectif d'une gestion efficace à long terme. **In fine, la prise en compte du risque physique n'est plus une option pour les banques, mais s'impose inéluctablement comme un impératif stratégique pour protéger la valeur de leurs actifs et garantir leur résilience face aux impacts croissants du changement climatique.**

Parmi les différents risques climatiques existants, le risque physique lié aux cyclones tropicaux se distingue comme étant le plus significatif. Ce risque, caractérisé par des vents violents, des précipitations intenses et des inondations côtières, est susceptible de générer des dommages majeurs sur les biens immobiliers, en particulier ceux situés dans des zones à forte exposition. Ces impacts directs rendent les garanties immobilières particulièrement vulnérables, compromettant leur valeur en tant que sûretés pour les prêts bancaires.

A titre d'exemple - dans le cadre de ce mémoire - la banque a choisi de se concentrer spécifiquement sur ce risque physique cyclonique, en raison de son importance stratégique et de son potentiel à causer des pertes importantes dans son portefeuille de garanties. Cette sélection repose sur une analyse des phénomènes climatiques extrêmes susceptibles d'affecter les actifs immobiliers adossés aux prêts. Dans cette hypothèse, le risque cyclonique a été identifié comme prioritaire compte tenu de sa fréquence, de son intensité croissante et de ses conséquences économiques. Cette approche permet d'orienter les travaux vers une évaluation approfondie de l'impact des cyclones tropicaux sur le portefeuille de garanties immobilières.

1.3 Le risque physique dans la réglementation bancaire et actuarielle

La prise en compte du risque physique lié au changement climatique s'avère un enjeu majeur - en constante progression - dans la gestion du risque bancaire. En effet, les banques, à travers leurs portefeuilles de prêts et d'actifs, sont exposées aux conséquences de phénomènes climatiques extrêmes, tels que les inondations, les tempêtes ou les sécheresses. Ces événements sont susceptibles d'entraîner une dépréciation des garanties adossées aux prêts voire des défauts de paiement, accroissant ainsi le facteur risque pour les institutions financières. Conscientes de cette menace croissante, les régulateurs, notamment l'EIOPA (Autorité européenne des assurances et des pensions professionnelles), encouragent les acteurs financiers à renforcer leur capacité à modéliser et à anticiper ces risques.

Dans cette optique, l'EIOPA incite à l'utilisation de solutions open-source, telles que Climada, un programme de modélisation du risque climatique. Ce programme permet de simuler les impacts économiques des événements climatiques à venir en intégrant des données environnementales et géographiques. En s'appuyant sur des outils open-source, les banques sont ainsi en capacité de développer des approches robustes et transparentes pour parfaire la compréhension et - in fine - la gestion d'une exposition potentielle de leurs actifs au risque physique, favorisant ainsi une gestion plus proactive et résiliente face aux changements climatiques.

1.3.1 Le risque physique dans le reporting ESG bancaire (CRR III)

1.3.1.1 Contexte réglementaire et législatif : nécessité d'un reporting prudentiel des expositions au risque physique dans le CRR III

A la faveur du développement des normes internationales de règlementation bancaire³, ces dernières ont ensuite été transposées en droit européen via les CRR⁴ I et II ainsi que les CRD IV et V. Depuis 2019, une nouvelle proposition législative de la Commission européenne visant à mettre en œuvre - dans l'Union Européenne - le dernier volet des réformes de Bâle III (issu de l'accord du Comité de Bâle de 2017) a été mise en place. Ce dernier volet vise - en particulier - à analyser et surveiller le *plancher en fonds propres*, le *risque de crédit*, le *risque de Credit Valuation Adjustment (CVA)* ainsi que le *risque opérationnel*, ainsi que celui portant sur le *risque de marché* (accord de janvier 2019).

Ainsi, le nouveau cadre réglementaire représente la dernière pierre de l'édifice des **réformes réglementaires** engagées à la suite de la crise de 2007-2009. Publiée en octobre 2021 par la Commission européenne puis publiée au JOUE⁵ le 19 juin 2024, la proposition législative dite « CRR III » marque le démarrage de la phase de négociation pour les deux autres co-législateurs que sont :

- Le Conseil Européen
- Le Parlement Européen

Les principales évolutions apportées par la proposition CRR III/CRD VI reprennent les dispositions des accords de Bâle de 2017, assorties de quelques adaptations, qui visent à prendre dûment en compte les spécificités européennes.

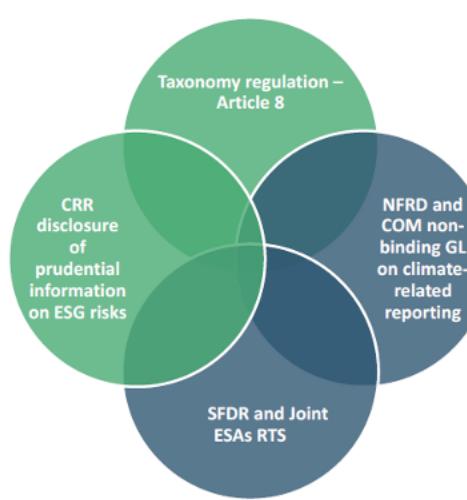


Image n°1 : Initiatives législatives de l'UE sur la publication d'informations relatives à l'ESG issues de l'ITS de l'EBA⁶

Le CRR, tel que modifié en 2019, comprend l'article 449 bis sur la divulgation des risques environnementaux, sociaux et de gouvernance. *Cet article impose aux grands établissements - qui ont émis des valeurs mobilières admises à la négociation sur un marché réglementé d'un État membre - de publier des informations sur les risques ESG - y compris les risques physiques et les risques de transition - telles que définies dans le rapport visé à l'article 98, paragraphe 8, de la directive sur les fonds propres :*

- a. L'article 434 bis du CRR charge l'EBA d'élaborer des projets de normes techniques d'exécution (ITS) imposant cette obligation de fournir des informations suffisamment exhaustives et comparables, afin de permettre aux bénéficiaires de ces informations d'évaluer les profils de risque des établissements.

³Accords de Bâle successifs (Bâle I, II, III et IV)

⁴Capital Requirement Regulation (établit des exigences strictes en matière de capital, de liquidité et de gestion des risques)

⁵Journal Officiel de l'Union Européenne

⁶ITS de l'EBA sur « EBA draft ITS on Pillar 3 disclosures on ESG risks »

- b. Ces ITS comprennent des modèles et des tableaux standard complétés d'informations harmonisées et comparables, ainsi que des instructions associées pour la divulgation des informations requises à l'article 449 bis du CRR.
 - c. Les établissements devront initier la divulgation de ces informations à compter de juin 2022. La première divulgation sera annuelle, puis semestrielle. Ce qui signifie qu'en pratique, la première divulgation a été effective en 2023, pour une *date de référence de divulgation* de fin décembre 2022.

1.3.1.2 Contexte réglementaire et législatif: Description de l'ITS de l'EBA

Afin de respecter le mandat qui lui a été attribué par l'article 449 bis du CRR III, l'EBA a donc publié le 24 janvier 2022 un ITS concernant les informations prudentielles sur les risques ESG conformément à l'article 449 bis du CRR. *Cet ITS présente les informations à fournir au titre du troisième pilier⁷ sur les risques ESG.* Ainsi, cet ITS propose ainsi des tableaux, des modèles et des instructions associées³ qui précisent l'exigence prévue à l'article 449 bis du CRR de publier des **informations prudentielles** sur les risques **environnementaux, sociaux et de gouvernance (ESG)** - y compris le **risque de transition et le risque physique** - adressées aux grands établissements dont les titres sont négociés sur un marché réglementé d'un État membre quel qu'il soit.

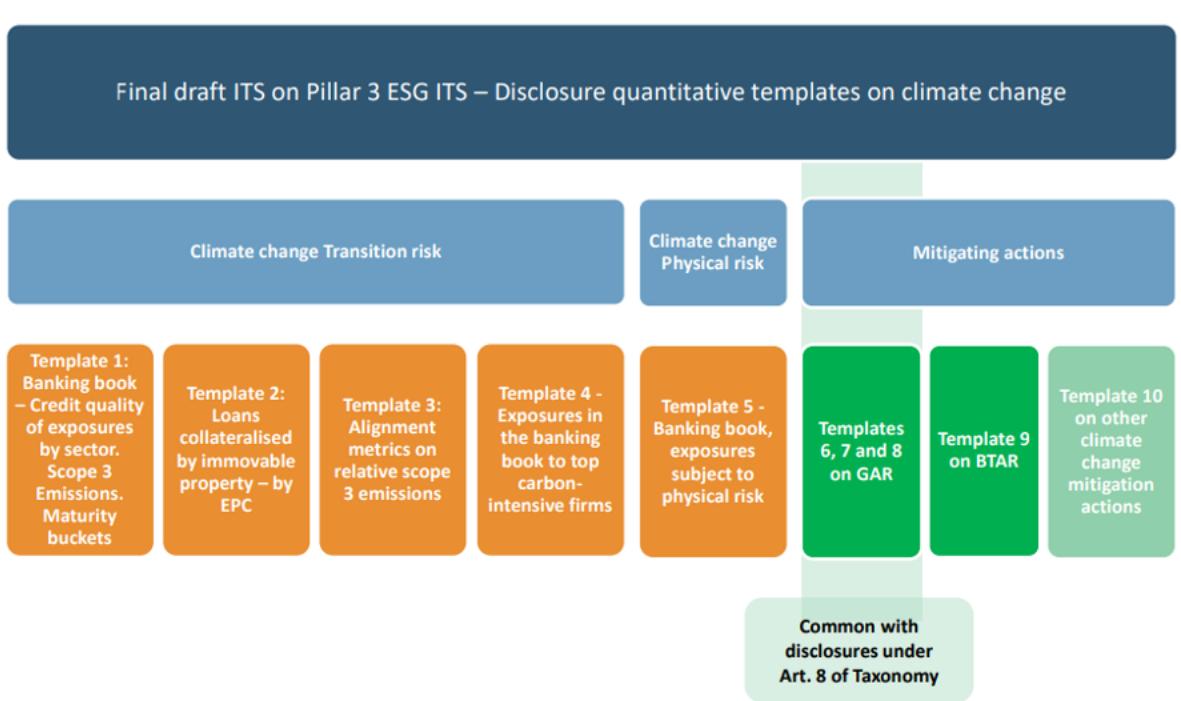


Image n°2 : Templates quantitatifs proposés, issus de l'ITS de l'EBA⁸

Cet ITS a été élaboré conformément à d'autres initiatives prises au niveau de l'UE et au niveau international, notamment via les recommandations formulées par le *groupe de travail du Conseil de stabilité financière* sur la divulgation d'informations relatives au climat. A ces informations précitées, s'ajoutent celles liées aux classifications spécifiées dans le règlement relatif à la *taxonomie européenne* concernant les informations à fournir sur le climat de l'UE.

Cet ITS dédié au "troisième pilier" de l'EBA va bien au-delà, notamment en mettant en exergue les lacunes apparaissant dans les informations non financières actuellement délivrées, et en particulier sur la nécessité de *fournir des informations plus cohérentes et comparables entre-elles*.

⁷Le pilier 1 décrit l'exigence minimale de fonds propres que doit respecter la banque, le pilier 2 décrit une exigence additionnelle juridiquement contraignante de fonds propres afin de couvrir des risques non/mal couverts dans le pilier 1. Enfin, le pilier 3 est dédié à la communication des informations à destination du public et du superviseur.

⁸ITS de l'EBA sur « EBA draft ITS on Pillar 3 disclosures on ESG risks ».

En établissant des informations obligatoires, cohérentes et normalisées, y compris des modèles et des tableaux granulaires voire des instructions connexes, cet ITS contribue à combler ces lacunes au niveau de l'UE et au niveau international, en établissant un *benchmark* des meilleures pratiques de place.

1.3.1.3 Clarification du package de communication à compléter pour le risque physique

Au sein de l'actif d'une institution financière, celle-ci est susceptible d'investir dans des actifs financiers « risqués » sur la base d'une logique de court terme, dans le but de réaliser des profits immédiats liés aux mouvements à court terme de marché (d'où le terme de "*trading book*"). Elle peut néanmoins également investir dans des actifs moins risqués avec une vision moyen/long terme, dans un but de détention jusqu'à échéance, afin de bénéficier - par exemple - des coupons attachés aux obligations.

Le *template n°5 « Banking Book, exposures subject to physical risk » impose ainsi de reporter à la BCE une estimation de l'exposition au risque physique lié au banking book d'une institution financière ainsi qu'une estimation du risque théorique financier associé à cette exposition.*

Il existe en réalité deux risques liés au dérèglement climatique :

- a) le risque de transition
- b) le risque physique

Si le **risque physique** concerne les *effets directs du changement climatique* sur le banking book de la banque, le **risque de transition** concerne - quant à lui - *les perturbations économiques et les changements structurels* résultant de la transition vers une économie durable, lesquels peuvent également impacter le banking book de la banque. Ainsi, les templates n°1, 2, 3 et 4 de l'ITS de l'EBA sont dédiés au **risque de transition**, tandis que le template n°5 est dédié au **risque physique**.

Le **risque physique**, lié aux événements météorologiques et climatiques, est susceptible d'entraîner des dommages matériels, des pertes financières et des perturbations opérationnelles pour les entreprises, les gouvernements et les individus.

Il peut être catégorisé en deux volets principaux :

- a) Les **événements aigus** qui sont des phénomènes climatiques extrêmes, se produisent à **court terme**, et peuvent causer des *impacts soudains et importants* (ex : les tempêtes, les cyclones, les inondations, les sécheresses, les incendies de forêt et les vagues de chaleur extrêmes...). Ces événements sont susceptibles d'endommager les infrastructures, détruire des biens, perturber les opérations commerciales, provoquer des pertes humaines et économiques et in fine, générer des surcoûts considérables pour les entreprises et les gouvernements.
- b) Les **événements chroniques** qui relèvent de la catégorie des changements climatiques à **long terme**, se produisent progressivement et sont potentiellement générateurs d'impacts durables sur les régions et les écosystèmes (ex : les phénomènes tels que l'élévation du niveau de la mer, l'acidification des océans, les changements de température et les modifications des schémas de précipitations...). Ces événements peuvent avoir des conséquences à long terme sur l'agriculture, la disponibilité de l'eau, la biodiversité, les écosystèmes côtiers et d'autres aspects de la vie humaine et environnementale.

Ces deux types d'événements liés au **risque physique** se doivent d'être traités distinctement dans le cadre du remplissage du template n°5 de l'EBA.

Ainsi, le template de reporting n°5 - que les institutions financières doivent renseigner - impose, dans un premier temps aux institutions, d'évaluer la part de leur exposition totale au regard de leur exposition au risque climatique. Enfin, en conclusion de ce template, l'EBA sollicite auprès des institutions l'évaluation d'un montant d'impact négatif lié à la prise en compte du risque physique climatique impactant les actifs sensibles au risque considéré. L'ITS de l'EBA fournit des informations parcellaires quant à la méthodologie de « remplissage » de ce template. En particulier concernant les sources d'informations permettant d'évaluer le risque physique, ainsi que la méthodologie d'évaluation du risque physique, une fois les expositions sensibles dûment identifiées.

1.3.2 Le risque physique dans le reporting comptable extra-financier ESG

Un autre volet de *suivi du risque physique* dans les entreprises, trouve sa source dans la *directive proposée par la commission européenne* - et publiée au JOUE⁹ -. Elle a pour objectif de renforcer la **transparence** et la **cohérence** des **informations environnementales, sociales et de gouvernance** (ESG) fournies par les entreprises cotées en bourse et les grandes entreprises dans l'UE. Il s'agit en l'espèce, de la directive CSRD (*Corporate Sustainability Reporting Directive*) qui institue la création de normes de *reporting* de durabilité : ESRS (*European Sustainability Reporting Standards*)¹⁰.

Les informations qui sont tenues d'être publiées dans le cadre de la CSRD - et selon les ESRS précitées - suivront les recommandations de la *Task-Force on Climate-related Financial Disclosures* (TCFD) selon quatre catégories :

1. Gouvernance
2. Stratégie
3. Gestion des impacts, risques et opportunités
4. Indicateurs et objectifs

La CSRD impose, par conséquent aux entreprises, la préparation d'**états de durabilité** (« sustainability statements ») *qui prescrivent à la fois le contenu et le format de cette information de durabilité*. Dans ce cadre, les ESRS visent à répondre aux besoins des utilisateurs en termes d'information de qualité élevée, comparable et pertinente sur les questions de durabilité, dans la perspective de mettre l'information de durabilité au même niveau que l'information financière. Lors de la publication au JOUE de la CSRD, l'union européenne a mandaté l'EFRAG (*European Financial Reporting Advisory Group*) afin de fournir des conseils techniques concernant la publication des nouvelles normes ESRS.

A cette fin, un premier jeu de normes ESRS a été publié. Le support retenu est le « *Set 1* », lequel pose les bases d'un langage standardisé commun de nature à traiter des questions de durabilité à travers l'Europe selon le canevas décrit ci-dessous :

⁹JOUE : Journal Officiel de l'Union Européenne

¹⁰Ces normes ESRS peuvent, dans une certaine mesure, être comparées aux IFRS (*International Financial Reporting Standards*) qui sont les normes comptables internationales introduites afin d'harmoniser les pratiques de place comptables au niveau international et d'en assurer par conséquent une meilleure comparabilité.

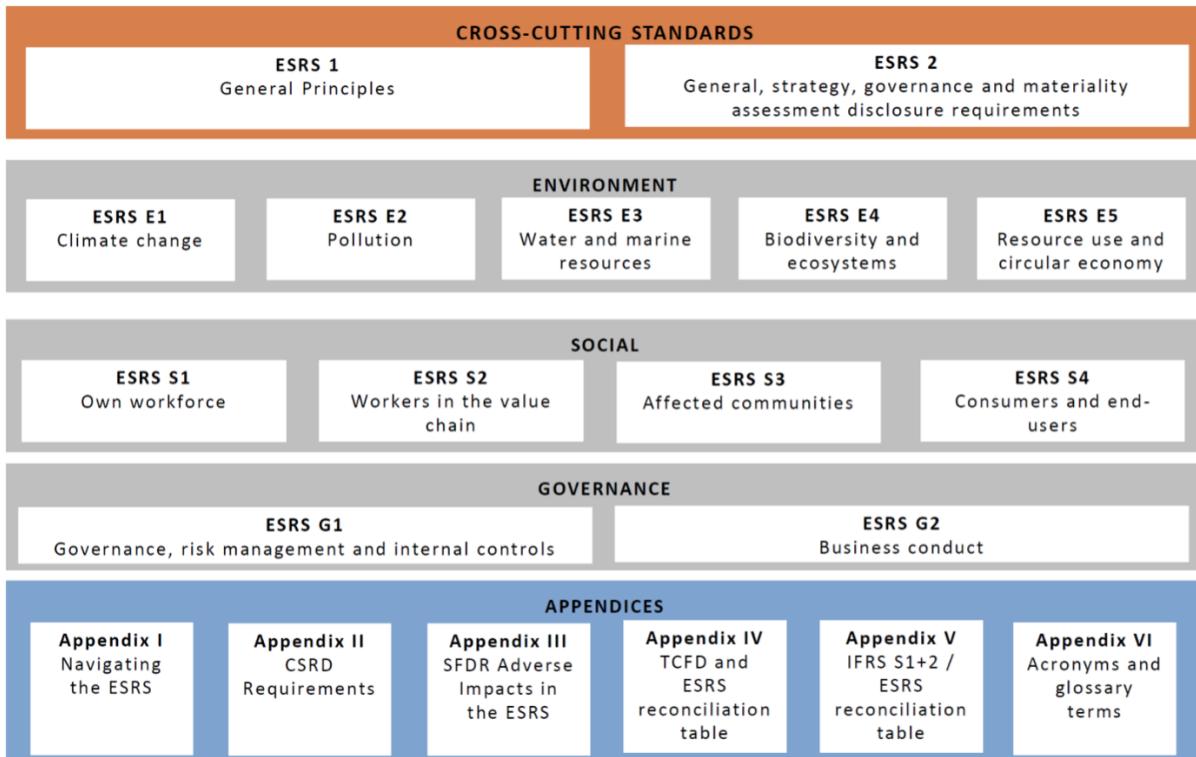


Image n°3 : Cadre réglementaire ESRS couvrant les 3 sujets ESG et les 3 dimensions sous l'angle sector-agnostic et entity-specific issus de l'EFRAG¹¹

Ainsi, au sein du Pilier « Environnement », le **bloc « ESRS (E)1 »** - dédié au changement climatique - contient les attendus normatifs institués en matière de mesures de performance, élaborées par les entreprises selon un strict cahier des charges. Le corpus est le suivant :

Energy		
E1-5: Energy consumption & mix	SFDR	
E1-6: Energy intensity per revenue	SFDR	
GHG emissions / removals		
E1-7: Scope 1 GHG emissions	SFDR	ISSB US SEC
E1-8: Scope 2 GHG emissions	SFDR	ISSB US SEC
E1-9: Scope 3 GHG emissions	SFDR	ISSB US SEC
E1-10: Total GHG emissions		
E1-11: GHG intensity per net turnover	SFDR	ISSB US SEC
E1-12: GHG removals	CSRD*	
E1-13: Carbon credits	CSRD*	ISSB US SEC
Optional E1-14: Avoided GHG emissions from products and services		
Financial effects		
E1-15: Financial effects from physical risks	ISSB	US SEC
E1-16: Financial effects from transition risks	ISSB	US SEC
E1-17: Financial opportunities	Taxo**	ISSB US SEC
* in recital 41 ** indirect link		

Image n°4 : Zoom sur le Pilier 'Environnement' et les sous-catégories associées

¹¹Il s'agit d'un draft de l'EFRAG (*European Financial Reporting Advisory Group*) publié en novembre 2022

Ainsi, l'EFRAG vise avec le « *Disclosure requirement E1-9(a)* » de son « *Standard ESR E1 Climate change* »¹² à mieux prendre en compte les impacts financiers potentiels du **risque physique**. Dès lors, ces impacts financiers potentiels inhérents aux risques *physiques et de transition* significative facilitent la compréhension du mécanisme selon lequel **ces risques ont une influence significative** - ou sont susceptibles d'avoir une influence significative - sur certains paramètres relevant de la gouvernance d'une entreprise, tels que :

- ses flux de trésorerie;
- le pilotage de sa performance;
- son positionnement et ses pistes de développement;
- son coût du capital ou son accès au financement à court, moyen et long terme.

Dès lors, *les informations sur les effets financiers potentiels des risques physiques significatifs* exigées au paragraphe 61, point a) du document de l'EFRAG, intègrent de facto :

- a. Le **montant monétaire et la proportion (pourcentage) des actifs exposés à un risque physique important** à court, moyen et long terme. Les montants monétaires de ces actifs étant dès lors, ventilés par risque physique aigu et chronique ;
- b. La **proportion d'actifs présentant un risque physique important** pris en compte par les **mesures d'adaptation au changement climatique** ;
- c. La **localisation des actifs significatifs** présentant un risque physique important ;
- d. Le **montant monétaire et la proportion (en pourcentage) du revenu net** de ses activités commerciales présentant un risque physique important à court, moyen et long terme.

L'EFRAG précise que les informations nécessaires à la quantification du risque physique dans ce document de reporting comptable extra-financier est « en ligne » avec les exigences décrites par le pilier III de l'ITS de l'EBA (Cf. Template 5 – risque physique) et fournit des précisions quant à la prise en compte du risque physique via l'annexe B. Ainsi, *l'EFRAG confirme qu'il n'existe pas de méthodologie communément acceptée pour évaluer ou mesurer la façon dont les risques physiques significatifs peuvent affecter la situation financière et les performances futures de l'entreprise*.

Par conséquent, la divulgation de ces effets dépendra de la méthodologie interne de l'entreprise et de l'exercice d'un jugement important pour déterminer les données et les hypothèses nécessaires pour quantifier leurs effets financiers potentiels.

S'il n'existe pas de méthodologie spécifique, l'EFRAG propose cependant une "*calculation guidance*" visant à estimer les impacts financiers éventuels résultants d'un risque physique matériel où l'entreprise se doit d'expliciter l'approche de son évaluation :

- a. *des effets financiers potentiels pesant sur les actifs et activités présentant un risque physique important*, y compris leur champ d'application, leurs horizons temporels, la méthode de calcul, les hypothèses et paramètres critiques et les limites de l'évaluation ;
- b. *du volume des actifs et des activités considérés comme exposés à un risque physique important* sur la base du processus de détermination des risques physiques importants, tel que prévu au paragraphe 18 - point b) -, à l'AR 12 (*Application Requirement*), ainsi que sur le processus de détermination des scénarios climatiques visés au paragraphe 19 et aux AR 13 à AR 14. En particulier, l'entreprise explicitera la méthodologie retenue afin de déterminer les horizons temporels à moyen et long terme. Il sera précisé - par ailleurs - la manière dont ces définitions sont liées à *la durée de vie prévue des actifs de l'entreprise*, aux *horizons de planification stratégique* ainsi qu'*aux plans d'affectation des capitaux*.

¹²Il s'agit d'un draft de l'EFRAG publié en novembre 2022

Lors de la préparation des informations sur les actifs présentant un risque physique important qui doivent être publiées en vertu du paragraphe 61, point a), l'entreprise doit :

- a. Calculer les actifs présentant un risque physique important en termes de montant monétaire et de proportion (pourcentage) du total des actifs à la date de déclaration (c'est-à-dire que la proportion est une estimation de la valeur comptable des actifs présentant un risque physique important divisée par la valeur comptable totale indiquée dans l'état de la situation financière ou le bilan). L'estimation des actifs relevant d'un risque physique important doit être établie sur la base des actifs comptabilisés dans les états financiers. L'estimation des montants monétaires et de la proportion d'actifs exposés à un risque physique peut être présentée sous la forme d'un montant unique ou d'une fourchette.
- b. Tous les types d'actifs - y compris les actifs faisant l'objet d'un contrat de location-financement ou d'un droit d'utilisation - doivent être pris en considération pour déterminer les actifs présentant un risque physique important.
- c. Pour contextualiser ces informations, l'entreprise doit :
 - i. Indiquer l'emplacement de ses actifs significatifs exposés à un risque physique important. Les **actifs significatifs situés sur le territoire de l'UE** sont agrégés par codes NUTS (Nomenclature des Unités Territoriales Statistiques) de niveau 3. S'agissant **des actifs significatifs situés en dehors du territoire de l'UE**, leur ventilation par code NUTS ne sera fournie que le cas échéant.
 - ii. Ventiler les montants monétaires des actifs à risque par risque physique aigu et chronique.
- d. Calculer la **part des actifs exposés à un risque physique** important résultant du paragraphe AR 63 (a), couverte par les mesures d'adaptation au changement climatique, sur la base des informations communiquées au titre de l'exigence de publicité E1-3. Cette méthode vise à obtenir une approximation des risques nets.

1.3.3 Le risque physique dans le Guide BCE

Le Guide relatif aux risques liés au climat et à l'environnement émis par la BCE a pour objectif d'exposer sa conception d'une *gestion sûre et prudente des risques liés au climat et à l'environnement dans le cadre prudentiel actuel*. Par ailleurs, ce guide recommande également la prise en compte du **risque physique inhérent aux aléas climatiques**. Ce document explicite la façon dont la *BCE entend que les établissements de crédit considèrent ce facteur de risque*, lorsqu'ils formulent et mettent en œuvre leur stratégie. Cette prise en compte inclue, par ailleurs, leurs *dispositifs de gouvernance et de gestion des risques*. Bien que non contraignant, le document précité constitue néanmoins une base solide de **dialogue prudentiel**, visant à homogénéiser les attentes formulées par l'autorité de surveillance et de régulation.

Du point de vue de la BCE, le **risque physique** a majoritairement une incidence sur les *activités économiques* de l'entreprise, mais il impacte également la *résilience du modèle opérationnel* des établissements concernés à moyen-long terme, **en particulier lorsque le modèle est centré sur des secteurs et des marchés particulièrement vulnérables aux risques liés au climat et à l'environnement**.

Par ailleurs, le risque physique est également susceptible de générer des **pertes additionnelles**, découlant - directement ou indirectement - de *recours juridiques* (« *risque de responsabilité* ») ainsi que de *pertes de réputation* résultant d'une relation de cause à effet, établie par les divers acteurs concernés (grand public, contreparties et/ou investisseurs de l'établissement) entre l'opérateur bancaire quel qu'il soit et les effets négatifs constatés sur l'environnement (« *risque de réputation* »).

Ainsi le *risque physique* est susceptible d'impacter à la fois les **grandes catégories de risque du Pilier I** (crédit, contrepartie, marché...), **mais également celles du Pilier II** (migration, CSRB du banking book, immobilier...) auxquels sont exposés les institutions financières.

Types de risques influencés	Risque physique	
	Facteurs liés au climat	Facteurs liés à l'environnement
	<ul style="list-style-type: none"> • Événements climatiques extrêmes • Schémas climatiques chroniques 	<ul style="list-style-type: none"> • Stress hydrique • Pénurie de ressources • Perte de biodiversité • Pollution • Autres
Risque de crédit	La probabilité de défaut (PD) et la perte en cas de défaut (<i>loss given default</i> , LGD) dans les secteurs et zones géographiques vulnérables au risque physique peuvent être influencées, par exemple par le biais d'une diminution des valorisations des sûretés dans les portefeuilles immobiliers due à une hausse du risque d'inondation.	
Risque de marché	Des événements physiques graves peuvent provoquer des revirements des anticipations des marchés qui se traduirait par de soudaines revalorisations, un regain de volatilité et des moins-values sur actifs sur certaines places.	
Risque opérationnel	Les activités d'une banque peuvent être perturbées par des dommages physiques causés à ses biens immobiliers, ses filiales et ses centres de données par suite d'événements climatiques extrêmes.	
Autres types de risques (risque de liquidité, risque lié au modèle d'activité)	Le risque de liquidité peut être influencé dans le cas où des clients effectuent des retraits sur leur compte pour financer les réparations des dommages.	

Image n°5 : Exemples de facteurs de risques liés au climat et à l'environnement issus du Guide BCE

Ainsi, d'après la BCE, les secteurs les plus susceptibles de subir l'impact des *effets physiques du changement climatique* sont notamment l'**agriculture**, la **sylviculture**, les **pêcheries**, la **santé humaine**, l'**énergie**, les **mines**, les **transports et infrastructures** ainsi que le **tourisme**.

Dans le cadre de son analyse, la BCE a également analysé les déclarations publiques des établissements de sa zone d'expertise ainsi que les résultats du dépouillement d'un échantillon de soumissions ICAAP. Ainsi, elle souligne que la majorité des établissements ont mis en œuvre une ou plusieurs politiques en matière de durabilité, mais que *la plupart de ces derniers ne disposent pas des instruments nécessaires à l'appréciation de l'incidence des risques climatiques et environnementaux sur leur bilan*. De plus, Parmi les établissements qui fournissent des informations sur leurs risques liés au climat et à l'environnement *très peu sont transparents quant aux définitions et méthodologies utilisées*.

Concernant les *attentes prudentielles relatives aux modèles et à la stratégie opérationnelles* - pour ce qui relève de l'environnement économique - une des principales attentes de la BCE s'appuie sur la prise en compte par les établissements concernés, des connaissances scientifiques les plus récentes, nécessaires à l'amélioration de leur compréhension des modifications de leur environnement économique susceptibles d'advenir dans le futur.

Pour ce qui concerne *l'obligation de déclaration*, la BCE entend que les établissements soient en mesure de « produire en temps utile des données agrégées et actualisées sur les risques liés au climat et à l'environnement » et ce, sur la typologie de risque déclinée en trois volets :

- **Risque de crédit**

La BCE fournit un exemple de bonne pratique observée dans le cadre du risque de crédit sous tendu par la calibration des probabilités de défaut, afin d'introduire un spread issu d'une analyse détaillée des risques physique et de transition pour des contreparties plus exposées, décelées à travers un processus de filtrage voire, par l'introduction de variables environnementales dans ses modèles internes de notation de crédits.

En théorie, les établissements devraient *intégrer les risques liés au climat et à l'environnement, dans les calculs de valorisations de leurs garanties*. À cet égard, les établissements seraient bien avisés d'accorder une attention particulière à la *situation géographique et au rendement énergétique des biens immobiliers résidentiels et commerciaux*. Idéalement, ils devraient intégrer ces considérations au processus d'établissement de la valeur de la garantie, comme d'ailleurs au processus de contrôles réguliers prescrit par les réglementations applicables.

De la même manière, il est attendu que la tarification des *prêts accordés par un établissement reflète les différents coûts entraînés par les risques liés au climat et à l'environnement*. Les zones exposées à des risques climatiques physiques croissants, telles que les inondations et les sécheresses, peuvent enregistrer une hausse de leurs pertes de crédit. Il est attendu des établissements qu'ils tiennent compte de ces évolutions et les reflètent dans la tarification de leurs prêts, par exemple en fixant les coûts de crédit à un niveau plus élevé, afin de traduire l'incidence des risques liés au climat et à l'environnement. En outre, les établissements devraient idéalement répercuter dans leur tarification toute hausse des coûts de financement des actifs particulièrement concernés par le risque physique ou le risque de transition.

- **Risque opérationnel**

La BCE indique que les établissements devraient évaluer l'incidence des risques physiques sur leurs activités en général. La zone géographique dans laquelle un établissement mène ses activités peut le rendre plus vulnérable aux risques physiques. Il est rappelé aux établissements qu'ils doivent évaluer le caractère significatif du risque opérationnel engendré par le risque physique, surtout en ce qui concerne les services externalisés et les activités informatiques, spécialement si les prestataires sont établis dans des lieux susceptibles de connaître des événements climatiques extrêmes ou d'autres vulnérabilités environnementales.

- **Risque de marché**

La BCE précise qu'il convient de suivre en permanence la valeur des expositions sur actions pour déterminer si elle est affectée par un *changement de perception du niveau de risque* attaché à l'émetteur, tout spécialement en raison des risques liés au climat et à l'environnement.

1.3.4 Le risque physique dans le processus actuariel de l'ORSA

L'Autorité européenne des assurances et des pensions professionnelles EIOPA¹³ - agence de l'UE chargée de la surveillance des secteurs de l'assurance dans l'UE - est en charge de l'établissement des normes et des lignes directrices pour l'application de la réglementation de l'assurance. A ce titre, et dans le cadre de l'exercice ORSA¹⁴, l'EIOPA propose d'utiliser Climada¹⁵. Ce logiciel vise à estimer sur une zone géographique spécifique, le **risque physique** assorti.

Ainsi, l'EIOPA estime que les modèles open source de type Climada - qui portent intrinsèquement un potentiel de *réduction des coûts d'exécution des analyses du changement climatique* - sont facteur de développement de l'innovation en la matière, et - de surcroit - constituent un vecteur de sensibilisation à la problématique des risques de toute nature. De plus, cela permet également une meilleure auditabilité de la méthodologie déployée par chaque institution si la structure de l'outil est la même partout. In fine, cette approche pourrait s'avérer bénéfique aux assurés, ainsi qu'au secteur de l'assurance et à la communauté des superviseurs.

1.3.5 Risque physique et règlementation

Depuis quelques années, le risque de transition et le risque climatique est de plus en plus fréquemment pris en compte par les régulateurs bancaire et assurance, sur la base de leurs textes législatifs spécifiques.

Plus récemment, les impacts météorologiques liés au dérèglement climatique ont accéléré ce développement législatif inhérent à ces risques, lesquels sont susceptibles d'engendrer à court/moyen terme, un impact significatif sur la stabilité financière.

C'est la raison pour laquelle, la modélisation du risque physique pour les banques et les assureurs s'avère désormais un véritable sujet. Qu'il s'agisse du secteur assurantiel à travers les processus d'ORSA ou également du secteur financier, via la présentation d'un reporting prudentiel des expositions au risque physique au titre du Pilier III (CRR), voire d'un reporting comptable extra-financier lié au risque ESG du CSRD, le risque physique est présent dans la majorité des secteurs sensibles de l'Economie au sens large, sans qu'aucun régulateur ne définisse de façon claire une méthodologie d'estimation de ce risque.

1.3.6 Le rapport Langreney, accroissement de la sinistralité et conséquences pour les acteurs financiers

Le 2 avril 2024 a été remis le rapport de mission dite « Langreney » aux ministres Bruno Le Maire et Christophe Béchu. Ce rapport a pour objet d'élaborer des recommandations afin d'adapter le système assurantiel français face à des risques climatiques - à la hausse - sur le territoire national.

L'introduction de ce rapport donne les précisions suivantes :

« *Au cours des deux dernières décennies, le climat a évolué et on observe une dérive importante de la sinistralité. Les observations et les modélisations disponibles montrent que cette dérive est cohérente avec les effets attendus du changement climatique. D'ici à 2050, le changement climatique agravera encore davantage les aléas climatiques, et ainsi plus largement aura une incidence notable sur les sécheresses, les inondations, les submersions marines et les aléas cycloniques notamment.*

Cette augmentation de la sinistralité sera d'autant plus importante que le niveau de réchauffement sera élevé. La Caisse centrale de réassurance - entreprise à capitaux publics proposant une réassurance, avec la garantie publique, des risques de catastrophes naturelles - estime ainsi que la hausse de la sinistralité du seul fait du climat serait comprise entre 27% (scénario RCP 4.5) et 62% (scénario RCP 8.5) en moyenne à horizon 2050. L'accroissement des enjeux assurés dans les zones à risques, les pressions inflationnistes et les améliorations apportées à la couverture des assurés seront des causes supplémentaires d'inflation des dommages climatiques. Tous les territoires ne sont pas exposés de manière homogène aux aléas naturels, et

¹³European Insurance and Occupational Pensions Authority

¹⁴Own Risk and Solvency Assessment. Processus interne que les compagnies d'assurance doivent mettre en œuvre pour évaluer leurs propres risques et leur solvabilité ainsi que la prise en compte des mesures appropriées pour les gérer.

¹⁵CLIMATE ADaptation : outil *open-source* de modélisation de risques - dont il existe 2 versions – est dédié à la modélisation via son *interface python*. Il autorise une grande flexibilité dans la modélisation du risque et une interface *user-friendly*.

tous les aléas ne connaîtront pas une évolution comparable en termes de fréquence, d'intensité et de cinétique. Pour le régime d'indemnisation des catastrophes naturelles, le retrait-gonflement des argiles apparaît comme un péril particulièrement préoccupant actuellement compte-tenu du montant des dommages qu'il engendre et de leur forte évolution récente. Les risques naturels dépendent non seulement du climat et de son évolution, mais aussi de l'exposition et de la vulnérabilité des populations, des biens, des activités et des écosystèmes aux catastrophes naturelles, de la capacité à prévenir et à protéger de ces catastrophes, et des moyens déployés pour la prévention et l'adaptation. »

Ainsi, le rapport Langreney met en lumière l'importance croissante du risque physique lié au changement climatique pour tous les acteurs financiers, y compris les banques. Il souligne aussi que ces risques, tels que les catastrophes naturelles (cyclones tropicaux, inondations, tempêtes, sécheresses...), peuvent affecter la stabilité des actifs et des garanties adossées aux prêts.

Le rapport appelle à une meilleure intégration de ces risques dans les évaluations financières, notamment à travers des méthodes de modélisation plus sophistiquées. Il met également en avant l'importance d'utiliser des outils et des données pour anticiper ces impacts, afin de garantir une résilience accrue du secteur face aux effets des événements climatiques extrêmes.

Le régime d'assurance Catastrophes Naturelles (Cat Nat) en France est en pleine transformation sous l'effet de l'augmentation de la fréquence et de l'intensité des sinistres liés aux phénomènes climatiques, tels que les cyclones, les inondations, et le retrait-gonflement des argiles. Face à cette montée des risques due au réchauffement climatique, la Caisse Centrale de Réassurance (CCR) a récemment annoncé la création d'un observatoire de l'assurabilité afin de mieux comprendre et gérer ces risques à l'échelle nationale.

Cet observatoire, dont les premières cartes seront publiées au printemps 2025, permettra d'identifier les zones géographiques les plus exposées aux risques naturels. Il s'agit principalement des inondations, du retrait-gonflement des argiles, et des **cyclones tropicaux**, trois périls majeurs couverts par le régime Cat Nat. Cette cartographie servira également à suivre la présence des assureurs dans les zones à risque, afin de déterminer s'ils se retirent des marchés locaux en raison des sinistres répétitifs.

La mission Langreney, qui a influencé la création de cet observatoire, a souligné l'urgence de réformer le système d'assurance face à l'augmentation des sinistres climatiques. Son rapport de 2024 prône également un système de bonus-malus pour encourager les assureurs à rester actifs dans les zones à risque. Ce mécanisme vise à récompenser les compagnies qui continuent de couvrir les territoires exposés, en ajustant la rétrocommission que la CCR leur verse annuellement en fonction de leur présence dans ces zones. Ce principe s'inscrit dans la volonté d'assurer une pérennité du régime Cat Nat dans un contexte de changement climatique, où la fréquence et l'intensité des événements naturels extrêmes rendent le système d'indemnisation de plus en plus coûteux.

1.4 Problématique du mémoire

Ce mémoire s'inscrit dans un contexte de réglementation financière renforcée pour les banques, avec des exigences croissantes sur la prise en compte des risques climatiques physiques dans le reporting (CRR III, ITS de l'EBA), les obligations comptables, et les directives des régulateurs comme la BCE.

Ainsi, les institutions sont incitées à prendre en considération l'impact futur des risques climatiques (en particulier le risque physique) sur la valeur de leurs actifs financiers situés dans des zones vulnérables (cf. garanties financières dans le cadre de ce mémoire).

De plus, le rapport Langreney et le nouvel observatoire en préparation de la Caisse Centrale de Réassurance incitent à une transformation du régime d'assurance Catastrophes Naturelles (Cat Nat) en France, sous l'effet conjugué de l'augmentation de la fréquence et de l'intensité des sinistres liés aux phénomènes climatiques, tels que les cyclones, les inondations, et le retrait-gonflement des argiles. Les cyclones tropicaux (« cyclones » dans la suite du mémoire), en tant que phénomènes climatiques extrêmes, représentent une des menaces majeures pour les actifs physiques servant de garanties au sein des portefeuilles de prêts bancaires.

*Dans le cadre de ce mémoire, nous nous focaliserons sur le **risque physique climatique** généré par ces phénomènes.*

De quelle manière, dès lors, modéliser efficacement le risque physique climatique lié aux cyclones tropicaux sur un portefeuille de garanties financières afin de répondre aux attentes réglementaires et d'assurer une gestion proactive des risques climatiques ?

Sur la base des futurs scénarios climatiques issues du GIEC, ce mémoire propose un modèle d'estimation du risque physique climatique associé au cyclones tropicaux appliqué à un portefeuille de garanties bancaires. Il offre ainsi aux institutions bancaires un modèle destiné à ajuster la valorisation de leurs garanties financières (via une *green value* ou un *spread climatique*), en tenant compte des risques climatiques à long terme, afin de renforcer leur résilience face aux défis climatiques futurs.

Tel que proposé par l'EIOPA¹⁶, le recours à l'outil open-source CLIMate ADAptation (Climada par la suite) m'a semblé pertinent. Il s'agit d'un outil open-source développé pour modéliser les impacts du changement climatique via l'utilisation d'un historique de données météorologiques. L'objectif étant dès lors d'associer à cet outil, une base de données ad-hoc constituée de garanties financières (liées à des prêts) mis à disposition par une institution financière. Cette dernière visait à estimer l'impact du risque physique climatique liés aux cyclones tropicaux sur son portefeuille de garanties financières.

¹⁶EIOPA : European Insurance and Occupational Pensions Authority est une institution de régulation financière de l'UE.

2 Base de données initiale et anonymisation

2.1 Méthodologie utilisée

A la lumière du préambule précédemment exposé, l'objectif du présent mémoire est par conséquent d'estimer le **risque physique** imputable aux cyclones, appliqué à une base d'expositions financières identifiés constituant les garanties immobilières associées aux prêts adossés. Sur la base des adresses mondiales géographiques des lieux considérés, il a été - au préalable - nécessaire d'anonymiser la base de données afin d'assurer la confidentialité des sources et des contenus. Pour se faire, une série de règles a été mise en place afin de conserver l'ordre de grandeur des montants et d'anonymiser les adresses. De plus, toujours par souci de confidentialité, la base de données a été réduite, afin de réduire la possibilité d'identification de celle-ci par un tiers.

La base de données comporte les informations suivantes :

Numéro de dossier
Produit - Produit commercial
Date de signature du Dossier
Date de mise en force
Date de Fin du Dossier
Phase active
Montant Signé
Montant Décaissé
Flag définitive
Mode de valorisation
Date de valorisation
Phase
Objet du financement
Nature du bien
Genre du bien
Année d'achèvement ou dernière rénovation
Etat
Taille réelle (SHON) en m ²
Localisation du bien
N° voie
Lieu-dit
Voie
Commune
Adresse postale
Code postal du bien
Département
Montant valorisation au 31/12/2023

Tableau 1 : Différentes informations disponibles dans la base de données initiale

Un travail sur la *data quality* et l'anonymisation de la base de données a été réalisé, afin d'en favoriser son exploitation :

1. Expurgation de certaines lignes d'informations essentielles manquantes (adresse introuvable ou non renseignée, garantie manquante...)
2. Élaboration d'une méthodologie d'anonymisation générale des montants d'encours visant à réduire la base initiale à ses 2/3, tout en maintenant une cohérence des montants des garanties de la base vis-à-vis de la répartition géographique mondiale des éléments fournis. Pour conserver cette cohérence dans les montants d'encours, la méthodologie suivante a été retenue.

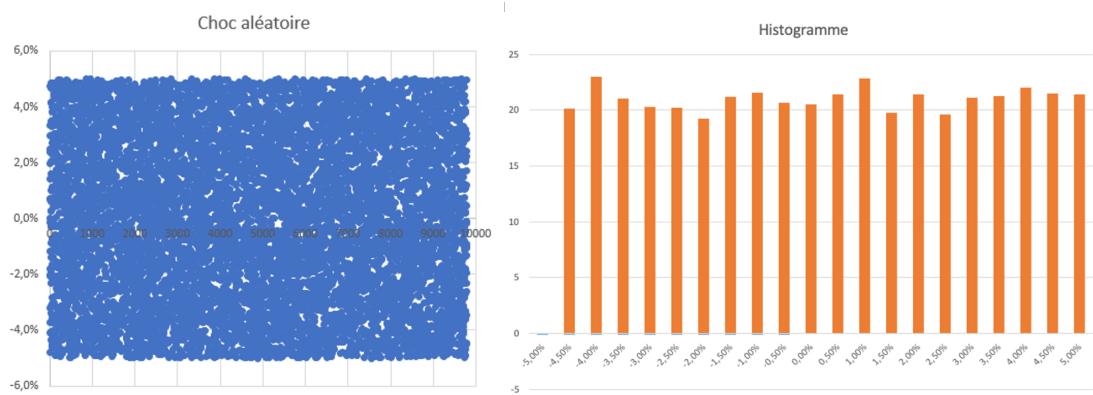
La méthodologie d'anonymisation de la base de travail est la suivante :

1. **Anonymisation des adresses** : Sur la base des adresses des voies allant de 0 à 534. Les règles sont les suivantes :

- Si $x=0$, alors $x = 1$
- Si $x > 5$, nombre aléatoire entre -5 et +5 que l'on ajoute au numéro x
- Si $x=5$, nombre aléatoire entre -4 et +4 que l'on ajoute au numéro x
- Si $x=4$, nombre aléatoire entre -3 et +3 que l'on ajoute au numéro x
- Si $x=3$, nombre aléatoire entre -2 et +2 que l'on ajoute au numéro x
- Si $x=2$, nombre aléatoire entre -1 et +1 que l'on ajoute au numéro x

Résultat : Permet d'anonymiser les adresses sans exagérer la modification de la base d'adresses initiales des garanties et sans dégrader outre mesure la précision géographique de l'ensemble.

2. **Anonymisation des montants des garanties** : génération d'une loi uniforme des chocs relatifs compris entre -5% et 5%. La taille du choc retenu permet d'anonymiser individuellement les montants d'encours entre +/- 5% tout en conservant le montant global d'encours de la base. Les chocs sont donc ensuite appliqués à l'ensemble des montants de garanties :

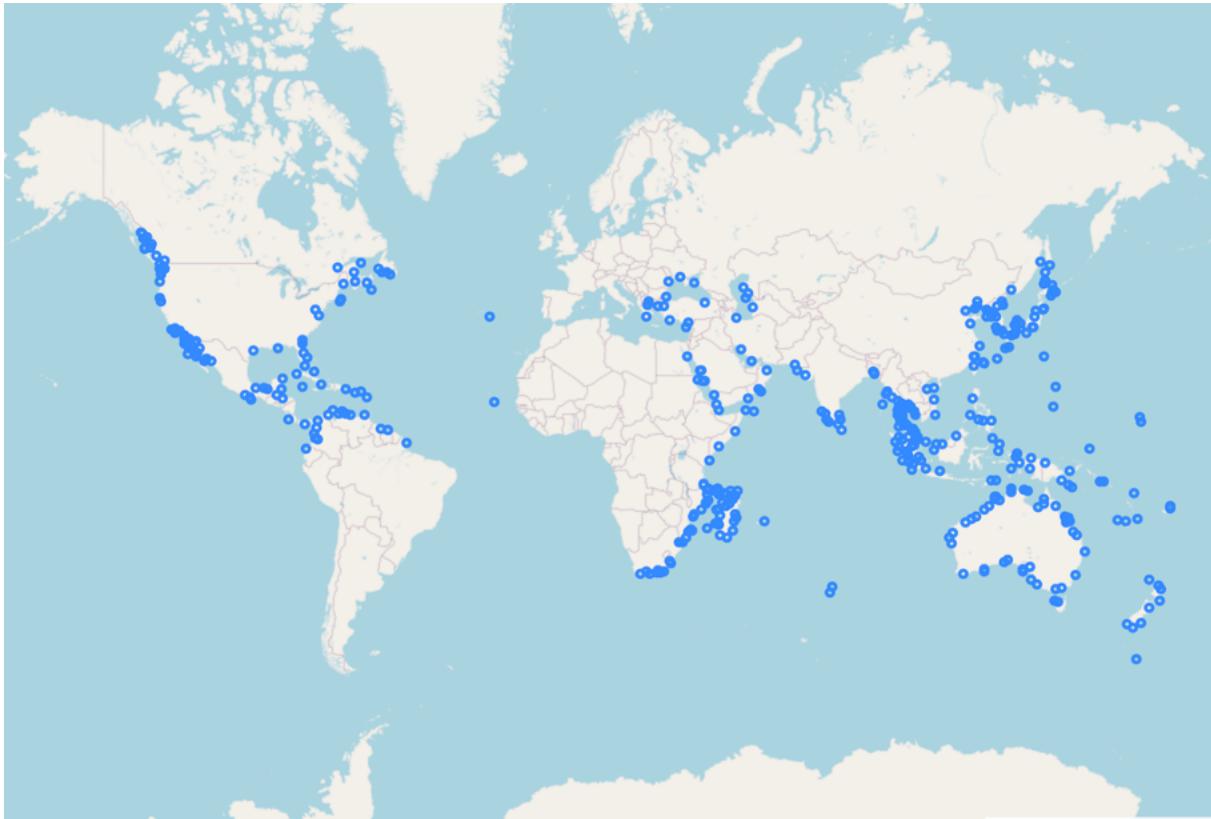


Graphiques 1 et 2 : Représentation des chocs aléatoires appliquées et répartition sous forme d'histogramme

Cette disposition permet le maintien d'une homothétie entre les 2 sets de garanties (avant et après retraitement).

2.2 Visualisation des expositions

Ci-dessous, la répartition géographique de l'ensemble des garanties immobilières retenues suite au processus d'anonymisation de la base de données initiale. L'ensemble de ce portefeuille de garanties immobilières correspond donc aux expositions identifiées comme sensibles au risque physique climatique issu des cyclones tropicaux :



*Image 6 : Représentation de la répartition géographique de la base de garanties immobilières dans le monde
(1 cercle bleu correspond à une garantie)*

Le nombre de garanties immobilières (expositions) retenues est de : 420.

3 Méthodologie générale et justification de l'outil open-source

Comme proposé par l'EIOPA, le recours à l'outil open-source *Climada* m'a semblé pertinent.

À l'aide de Climada - outil développé initialement par l'organisation *Climate Economics Chair* de l'Université de Zurich - j'ai pu concevoir un modèle modulaire et adaptable permettant de calibrer l'impact physique climatique lié aux cyclones tropicaux. Ce modèle offre la possibilité de déduire une *green value* (et impliciter un *spread climatique*) à partir du portefeuille de garanties financières fourni, et ce, pour des zones géographiques variées à travers le monde. L'outil Climada permet d'intégrer de manière flexible certains éléments modélisés indépendamment (fonctions d'impact, simulations stochastiques de taux...). Cette capacité d'adaptation fait de cet outil une solution particulièrement utile pour les institutions bancaires, car elle permet d'évaluer précisément les impacts des cyclones tropicaux sur leurs actifs financiers, tout en répondant aux besoins croissants des banques confrontées à des risques climatiques de plus en plus pressants à l'échelle mondiale.

L'outil se décline en deux versions distinctes, adaptées aux différents besoins des utilisateurs en matière de modélisation du risque climatique :

- La première version est *low code*, offrant une interface simplifiée où les utilisateurs peuvent accéder à des fonctionnalités prédéfinies pour modéliser les impacts des événements climatiques, comme les cyclones, sans avoir besoin de connaissances techniques approfondies. Cette version permet aux banques, aux assureurs ou à tout acteur financier de réaliser rapidement des simulations pour évaluer l'exposition de leurs actifs ou collatéraux aux risques physiques.
- La deuxième version de Climada est open-source et personnalisable, ce qui implique pour les utilisateurs, un accès au code sous-jacent (Python) afin de le paramétrier à l'aune de leurs besoins spécifiques. Cette flexibilité est idéale pour ceux qui souhaitent adapter les modèles, intégrer des données supplémentaires, ou ajuster certains paramètres afin d'obtenir des analyses plus fines et spécifiques à leurs portefeuilles. En permettant cette personnalisation, Climada offre une transparence totale (favorisant ainsi l'auditabilité du code en évitant tout phénomène de « black box ») et encourage l'innovation dans la modélisation du risque climatique.

La seconde version de Climada est celle qui a été retenue dans le cadre de ce mémoire. En effet, elle permet d'introduire de nouveaux modules inexistants dans le code initial et de le faire converger, d'un simple calculateur d'impact, vers un outil de modélisation du risque physique climatique (uniquement dédié aux risques cycloniques à ce stade¹⁷).

Tels que précédemment évoqués, les différents packages Python de l'outil Climada sont open-source, ils sont en conséquence plus aisément configurables pour une adaptation aux besoins de l'utilisateur (adaptation de la courbe de sévérité, courbe de vulnérabilité, courbe de taux...). Étant donné la forte disparité des actifs financiers/assurance, Climada apparaît - par conséquent - comme une solution efficace de calcul de l'exposition de chaque élément sensible au(x) risque(s), en fournissant une estimation fine des différents risques de l'environnement dans lequel il est géographiquement situé, en fonction des coordonnées GPS associées.

La méthodologie open-source de Climada vise à estimer les risques climatiques pour un lieu donné en partant du constat que le risque considéré correspond à une fonction de la probabilité de survenance d'un évènement sévère :

$$\text{Risque} = f(\text{Probabilité} ; \text{Sévérité})$$

Et que la **sévérité de l'évènement** dépend de son *intensité*, de la *valeur de l'actif exposé* au risque de l'élément faisant face à l'évènement et enfin, de la *vulnérabilité de l'actif exposé* face à cet évènement. Concrètement, il en ressort que :

$$\text{Sévérité} = f(\text{Intensité} ; \text{Exposition} ; \text{Vulnérabilité})$$

¹⁷Cf. section n°7 consacrée aux limites

On peut donc appréhender le risque comme une fonction de :

$$\text{Risque} = f(\text{Probabilité} ; \text{Intensité} ; \text{Exposition} ; \text{Vulnérabilité})$$

Si l'on appréhende une fonction de danger - souvent identifiée comme dépendante de la probabilité de l'évènement et de son intensité (ex : carte de la distribution géoréférencée de la vitesse du vent) - il en découle que :

$$\text{Danger} = f(\text{Probabilité} ; \text{Intensité})$$

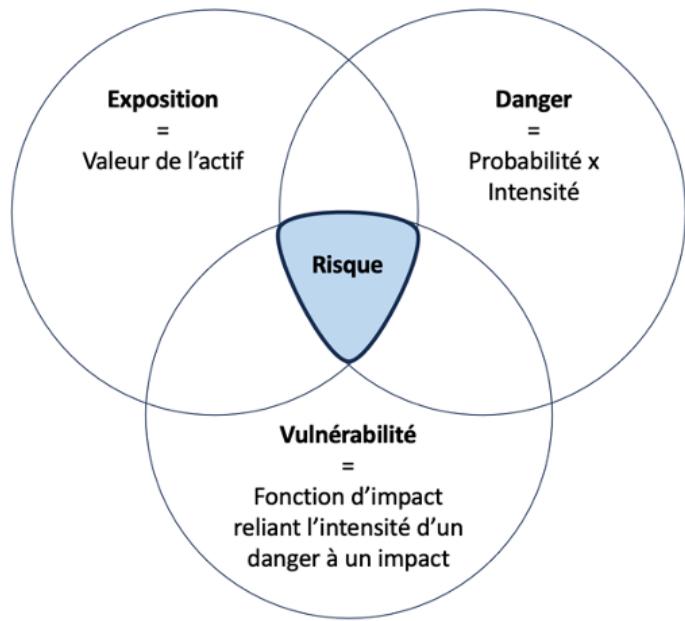
Il en résulte par conséquent que :

$$\text{Risque} = f(\text{Danger} ; \text{Exposition} ; \text{Vulnérabilité})$$

La fonction « Danger » décrite précédemment est ici liée à la probabilité de survenance d'un évènement et à son intensité, « Exposition » désigne l'exposition de l'actif et « Vulnérabilité » reflète l'étendue des dommages causés pour une intensité d'évènement donnée.

Ainsi, l'intérêt de l'outil Climada est double : *sa capacité à estimer un risque* une fois les fonctions de Danger, Exposition et Vulnérabilité calibrées correctement, et l'avantage *d'offrir toute latitude (l'algorithme sous-jacent étant open-source) dans la calibration des différents paramètres nécessaires au calcul du risque.*

Dès lors, le fonctionnement de Climada peut se résumer de la façon suivante :



Graphique 3 : Représentation de la modélisation d'un risque à partir d'une exposition

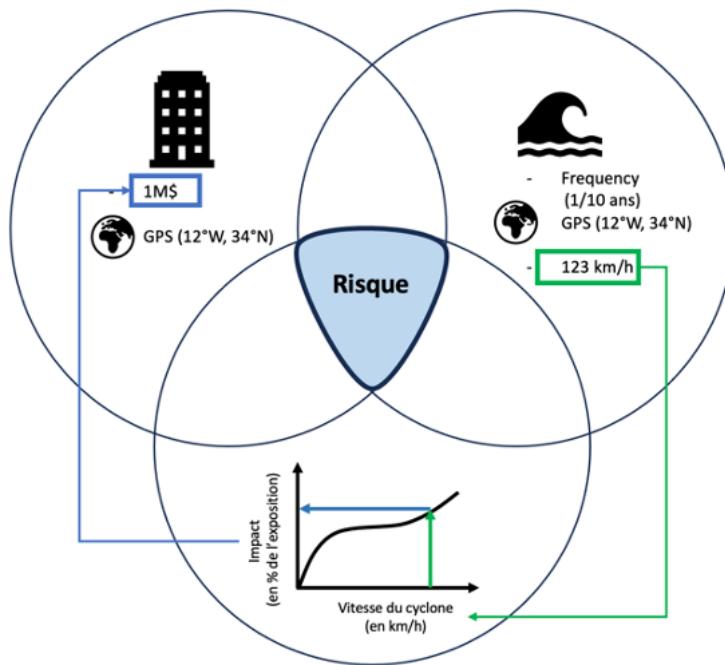
Le modèle probabiliste de dommages, qui constitue la colonne vertébrale de l'outil Python/Climada est présenté ici. Cet outil de modélisation des risques climatiques repose sur une méthodologie structurée autour de trois composantes principales : l'*exposition*, la *vulnérabilité* et le *danger* induit par les événements climatiques. L'outil permet de quantifier les impacts économiques des catastrophes naturelles en reliant ces trois éléments pour estimer les dommages potentiels. Climada se distingue également par sa capacité à intégrer en entrée des données historiques d'événements climatiques, issues de bases de données publiques, afin de fournir des analyses basées sur des informations empiriques.

Par exemple, les systèmes de suivi météorologique tels que l'International Best Track Archive for Climate Stewardship (IBTrACS), qui génère des données historiques précises sur les cyclones tropicaux, peuvent être aisément intégrés à Climada via des requêtes spécifiques. Cela permet d'étudier les événements passés et de calibrer les modèles sur des enregistrements historiques.

Un autre atout important de Climada est qu'il offre nativement aux utilisateurs la possibilité de personnaliser les modèles probabilistes pour chacun des trois éléments constitutifs du calcul des risques. Les utilisateurs peuvent ainsi adapter les modèles en Python en fonction de leurs besoins spécifiques, modifiant par exemple les courbes de vulnérabilité ou les scénarios d'exposition pour mieux refléter leur portefeuille d'actifs ou de collatéraux. Différents modules ont donc été introduits pour ajuster le code initial.

L'outil ne permettant pas de diffusion stochastique des taux sur des courbes observées de marché, un module a été introduit dans ce mémoire pour permettre l'actualisation de flux via des simulations stochastiques de taux. Cette approche dynamique offre une plus grande précision dans l'évaluation des risques économiques futurs liés aux événements climatiques, en tenant compte des variations du marché et des projections économiques à long terme. Climada combine ainsi des capacités de modélisation avancées avec une flexibilité open-source, offrant aux utilisateurs une solution robuste pour gérer les risques climatiques.

Voici un exemple simple permettant de comprendre le principe général de calcul d'impact à partir des données géographiques des actifs :



Graphique 4 : Représentation de la modélisation d'un risque via Climada

4 Modélisation

4.1 Définition de la matrice d'exposition

Il est nécessaire de définir une matrice d'exposition (Centroid) afin de cartographier mathématiquement la zone sur laquelle effectuer les simulations d'impact. Cette matrice, représentée par une grille régulière de points géographiques, permet de délimiter précisément les zones à risque (selon la granularité souhaitée). Cette matrice d'exposition, une fois définie, sert de référence pour évaluer l'impact du risque sur chaque valeur de la matrice (point dans une grille), facilitant ainsi les simulations et l'analyse des effets climatiques sur les différentes zones géographiques définies préalablement.

4.1.1 Récupération de l'adresse et de l'exposition

Afin de permettre une évaluation des différents impacts générés par un cyclone tropical sur une exposition, cette dernière doit faire l'objet - au préalable - d'un paramétrage adapté. Les deux informations essentielles sont *sa position GPS* ainsi que *le montant associé à l'exposition* à l'évènement climatique défini. Il existe au sein de Climada, des fonctions prédéfinies permettant de récupérer - via des bases de données socio-économiques - les valeurs des expositions par pays (bâtiments, entreprises). Ainsi, on peut identifier des montants d'expositions les plus importants dans les grosses villes vis-à-vis des villes moyennes.

Considérant que ces présents travaux portent sur un portefeuille d'actif préexistant, sur lesquels nous souhaitons évaluer l'impact, il convient de générer notre propre matrice d'exposition. **Le module d'exposition** a uniquement pour intérêt d'uniformiser les différents éléments contenus dans la base de données et de les rendre exploitable par Climada, lorsqu'il va lui appliquer les fonctions d'impact, ainsi que l'événement climatique associé. Parmi les différentes informations contenues dans la base de données pour chacune des expositions, les informations qui nous intéressent le plus ici, correspondent au montant de la *dernière évaluation financière de l'exposition* (en euros en date du 31/12/2023) ainsi que *l'adresse où est indiquée l'exposition*.

Cependant, pour résoudre les problématiques d'adressage des expositions et pour uniformiser la base de données, un algorithme dans le but de *convertir l'adresse en une position GPS selon sa longitude et sa latitude* a été développé.

Résultat : In fine, les différentes expositions obtenues en fonction de leur position GPS permettent de visualiser leurs positions géographiques respectives. Elles sont projetées sur une carte, afin de s'assurer de la cohérence d'ensemble du modèle (absence d'aberration notamment).

4.1.2 Crédit d'une zone d'exposition

Les fonctions natives de Climada ne permettent pas d'identifier l'impact physique d'un évènement climatique répertorié par les coordonnées géographiques associées (latitude, longitude) du lieu considéré. En effet, *l'application nécessite de définir une zone à l'intérieur de laquelle l'impact va être généré*. La zone consiste en un carré situé autour du point géographique de l'exposition étudiée.

De plus, au sein de la zone considérée ("carré d'analyse" précédent), il est nécessaire de définir la précision avec laquelle on souhaite analyser l'impact climatique. En effet, la fonction génère une grille de points dans le carré et évalue (une fois l'impact généré), le **facteur de risque** (dans notre cas la vitesse du vent) entre les divers points de la grille. Il est également possible de paramétriser le niveau de précision de cette grille (plus il est fin, plus l'impact sera mesuré finement, mais plus la charge de calcul sera importante). Dans le cas étudié, la valeur de 0.01 degré de latitude (environ 1,1 km) a été retenue.

Cette valeur retenue, les paramètres attachés au "carré d'analyse" situé autour de l'exposition ont été calibrés. Pour se faire et suite à de nombreux tests effectués par itérations successives, une surface approximative de 4 000 km^2 a été sélectionnée. Cette valeur (carré de 63 kms de côté) résulte d'un compromis permettant de disposer d'une granularité suffisamment fine sur une surface significative, sans toutefois rendre rédhibitoires les durées de calcul, au regard de la puissance des calculateurs disponibles.

Ce faisant, une fonction permettant de transformer une surface terrestre en radians a été codée afin d'identifier les latitudes hautes et basses, ainsi que les longitudes hautes et basses encadrant la zone désirée.

Dans ce cas précis, 4 inputs s'avéraient nécessaires :

1. la latitude (lat) du lieu de l'exposition,
2. la longitude (lon) du lieu de l'exposition,
3. une approximation du rayon terrestre (R) équatorial (6 378 137 m),
4. la surface du carré (S) que définie autour de l'exposition ($4\ 000\ km^2$).

L'estimation des coordonnées du carré dérive des éléments suivants :

$\text{square half} = \frac{\sqrt{S}}{2}$ correspondant à la distance vers le nord et l'est qu'il faut appliquer à la position de l'exposition pour obtenir la latitude et la longitude du carré. Une fois ces distances obtenues, elles vont devoir être converties en radian :

$$dLat_{radian} = \frac{\text{square half}}{2} \text{ et } dLon_{radian} = \frac{\text{square half}}{(R \times \cos(lat \times \frac{\pi}{180}))}$$

En effet, seul le passage par les radians autorise une conversion des décalages de latitudes et de longitudes de mètres en degrés pour obtenir les nouveaux décalages de latitude et de longitude en degrés, puis *in fine* les nouvelles coordonnées :

$$dLat_{degres} = dLat_{radian} \times \frac{180}{\pi} \text{ et } dLon_{degres} = \frac{\text{square half}}{(R \times \cos(lat \times \frac{\pi}{180}))} \times \frac{180}{\pi}$$

Et donc :

$$\left\{ \begin{array}{l} lat_{\max} = lat + dLat_{degres} \\ lat_{\min} = lat - dLat_{degres} \\ lon_{\max} = lon + dLon_{degres} \\ lon_{\min} = lon - dLon_{degres} \end{array} \right.$$

Compte tenu de la forme arrondie de la Terre, il est nécessaire de raisonner en unités d'angle. En effet, pour passer d'une distance à la surface de la Terre, la surface n'étant pas plane (rotundité de la Terre), il est nécessaire de convertir ces mètres en radians afin d'ajuster la longitude et de latitude (exprimées en degrés). Elles peuvent être converties en radians en utilisant 2π radians correspondant à la circonférence d'un cercle (360°). Ainsi, exprimer une mesure en degrés revient à multiplier une mesure en radian par $\frac{180}{\pi}$.

Résultat : Cette phase étant finalisée, nous obtenons alors pour chaque exposition "i" (420 expositions au total), les coordonnées en latitude et en longitude (minimales et maximales) formant un carré situé autour de l'exposition. **Cette approche permet ainsi de définir une zone (Centroid) sur laquelle appliquer l'impact climatique.**

$$\forall i \in [1 : nbr_{expos}], \exists! Centroid(i)$$

4.2 Historique des événements climatiques

A l'issue du paramétrage des expositions au sein de Climada, tel qu'exposé dans la partie précédente, ces dernières doivent être « soumises » aux données d'événements climatiques, caractérisés par les éléments issus des bases de données, afin d'en objectiver le (ou les) impact(s). Dans le cadre de ces travaux, il s'agit de cyclones tropicaux dont l'historique a dû faire l'objet d'une compilation préalable des caractéristiques associées.

Climada a également pour atout majeur de disposer de la faculté d'extraction d'éléments intégrés à des bases de données de risques physique. Une fonction permet d'extraire les informations ainsi que les caractéristiques de cyclones historiques provenant de la base de données *International Best Track Archive for Climate Stewardship* (IBTrACS). Ainsi, il est possible de :

- Récupérer les informations d'un cyclone en particulier, en indiquant son identifiant « IBTrACS id »
- Récupérer les informations de l'ensemble des cyclones d'une période historique d'année et d'un bassin¹⁸ en particulier.

Dans le cadre de ces travaux - et afin d'optimiser la récupération des données - les informations des TCs (Tropical Cyclones) seront filtrées par bassin et période de temps. Cette fonction va donc permettre l'extraction, dans la base de données historiques, de l'ensemble des TCs qui ont pour *origine le bassin concerné sur la période de temps spécifiée* (1982 – 2023)¹⁹.

A l'aide de cette base de données, l'évolution des cyclones est « tracée » dans le temps. Outre ce suivi, il est possible de disposer d'informations complémentaires relatives aux paramètres structurels de l'œil du cyclone, telles que :

Coordonnées :

- Heure
- Latitude
- Longitude

Variables descriptives :

- pas de temps (en heures)
- rayon auquel la vitesse maximale du vent a été mesurée (en milles marins)
- vent moyen mesuré le plus élevé sur une minute
- pression mesurée au cœur du cyclone tropical

Attributs :

- unité des vitesses de vents
- unité de la pression fournisseur de données
- bassin
- id du cyclone
- catégorie du cyclone

A l'aide de ces informations, les rafales de pointe soutenues dans le laps de temps d'une minute, sont calculées comme la résultante d'un champ de vent circulaire statique (d'après Holland, 2008) associé à la vitesse de translation du vent résultant du mouvement de la tempête. Ensuite, le déclin de la composante translationnelle depuis le centre du cyclone est multiplié par un facteur d'atténuation²⁰ (d'après Geiger et al. - 2018). Pour la suite de ces travaux, il est convenu de désigner le paramètre « vitesse du vent », comme reflétant les caractéristiques des rafales de pointe soutenues, pendant la durée d'une minute.

Résultat : Ainsi pour l'ensemble des TCs présents au sein de chaque bassin sur la période mesurée, la vitesse du vent sera récupérée (mesurée ou interpolée) via la fonction *Track()* si toutefois cette dernière est supérieure à une certaine vitesse²¹ :

¹⁸Le terme de bassin fait référence aux endroits où sont générés les cyclones tropicaux. Il en existe 7 : 'NA' (North Atlantic), 'SA' (South Atlantic), 'EP' (Eastern North Pacific, incluant la région centre pacifique), 'WP' (Western North Pacific), 'SP' (South Pacific), 'SI' (South Indian), 'NI' (North Indian).

¹⁹La période de temps historique choisie a été calibrée sur la base de l'historique choisi par les scientifiques pour calibrer des paramètres de la fonction d'impact. Ces éléments autorisent une simulation de cyclones cohérente avec sa calibration.

²⁰Les vitesses du vent sont converties en vents soutenus sur 1 minute en les divisant par 0,88 (cette valeur est tirée de Bloemendaal et al. - 2020)

²¹La fonction Climada utilisée est *climada classmethod from_tracks*

$$histo_{period} = 1982 - 2023$$

$$bassins = ['EP', 'NA', 'NI', 'SI', 'SP', 'WP', 'SA']$$

$$\forall bassin \in bassins, tr_{deck}[bassin] = Track(bassin, histo_{period})$$

De plus, à chaque événement historique, la fréquence annuelle de chaque évènement est également intégrée au process. Pour se faire, on divise chaque événement par la période historique en année (2023-1982+1). Dans le mémoire, la période historique est de 42 années.

Par exemple, dans le cas où 90 cyclones ont historiquement eu lieu entre 2020 et 2023 (sur 4 ans) sur une zone géographique donnée, on obtient un vecteur dont la taille correspond au nombre de cyclones sur la période (ici 90 cyclones historiques) et contenant la fréquence annuelle de chaque évènement (ici 1/4). La fréquence historique observée sur cette période est donc de 90/4.

Ainsi : $\forall bassin \in bassins, f[bassin_{historique}] = \frac{1}{42 \text{ ans} \times 1 \text{ cyclone historique}}$ au sein d'un vecteur de la taille suivante : *nombre de cyclones historiques observés sur la période*.

Climada offre également la possibilité de générer des cyclones synthétiques²² en ajustant, à la façon d'une marche aléatoire, la trace historique du cyclone.

Par conséquent, si l'on souhaite générer 9 cyclones synthétiques pour 1 cyclone historique sur la même période de temps (4 ans) que l'exemple précédent, on obtient alors le même vecteur de fréquence, cette fois-ci de taille (90 x 10) car, il y a initialement 90 cyclones historiques sur la période multiplié par 10 (1 cyclone historique + 9 cyclones synthétiques) donc la fréquence historique (1/4) est divisée par le nombre de cyclones historique et synthétiques (ici 10).

Le vecteur de fréquence historique (90 cyclones de fréquence 1/4) devient alors un vecteur de fréquence historique et synthétique (900 cyclones de fréquence 1/40). La fréquence modélisée sur cette période est donc également celle de la fréquence historique de 900/40 (90/4).

Dans le cadre de ce mémoire, il est proposé de retenir 3 cyclones synthétiques par cyclone historique afin d'augmenter la base de données historique par des évènements « théoriques ».

Ainsi : $\forall bassin \in bassins, f[bassin_{synth}] = \frac{1}{42 \text{ ans} \times (1 \text{ cyclone historique} + 3 \text{ cyclones synthétiques})}$ au sein d'un vecteur de la taille suivante : *nombre de cyclones historiques observés sur la période x (nombre de cyclones synthétiques générés + 1)*.

4.3 Modélisation de la fonction d'impact

La ***fonction d'impact*** est une fonction permettant la mise en correspondance de la *vitesse du cyclone* (collectée depuis l'historique des simulations) et de *son impact (en %) sur l'exposition*.

La forme des fonctions d'impact fait l'objet d'une abondante documentation. Ces fonctions sont susceptibles de varier en complexité et en précision, tantôt basées sur des modèles empiriques simples, parfois faisant l'objet d'approches plus sophistiquées intégrant divers facteurs environnementaux et culturels. *La diversité des modèles reflète la complexité de la relation établie entre la vitesse du vent et les dommages causés sur la structure, les caractéristiques du terrain et les mesures d'atténuation mis en place. In fine, il n'existe pas de consensus unilatéral sur le meilleur choix de fonction d'impact lié au risque cyclonique.*

Suite à lecture du « Special Report » (dans le 6^{ème} rapport du GIEC) dans la partie « 3.3.6 Tropical Cyclones and Extratropical Storms », un certain nombre de travaux font l'objet de publications ayant pour objet la modélisation scientifique des cyclones et leur tendance future en termes de fréquence et d'intensité. On notera en particulier les auteurs cités dans la section 8.4.

²²A l'aide de la fonction calc_perturbed_trajectories

4.3.1 Fonction d'impact et calibration

Parmi ces scientifiques cités dans le rapport, Emanuel (2011) propose dans une publication « *Global Warming Effects on U.S. Hurricane Damage* » de modéliser la fonction d'impact de la façon suivante :

« *On physical grounds, we expect that damage should vary as the cube of the wind speed over a threshold value. Finally, we require that the fraction of the property damaged approach unity at very high wind speeds; in any event, we cannot allow it to exceed unity. A plausible function that meets these requirements is:*

$$f = \frac{v_n^3}{1 + v_n^3}$$

where f is the fraction of the property value lost and

$$v_n \equiv \frac{\text{Max}[(V - V_{\text{thresh}}), 0]}{V_{\text{half}} - V_{\text{thresh}}}$$

where V is the wind speed, V_{thresh} is the wind speed at and below which no damage occurs, and V_{half} is the wind speed at which half the property value is lost. »

Ainsi, K. Emanuel propose l'utilisation d'une fonction assez simple permettant de simuler cet impact de la vitesse du vent du cyclone sur un cyclone.

Cependant, à l'instar de nombreux modèles, celui-ci présente des limites. K. Emanuel en fournit les suivantes :

« *These functions are highly idealized ; in reality, property damage depends on much more than the peak wind speed experienced during a storm (e.g., the direction of the wind, its degree of gustiness, and the duration of damaging winds all influence the amount of damage). Also, we do not consider damage from fresh-water flooding or storm surge, though the latter is, to some extent, also a non-linear function of wind speed. »*

Ainsi, c'est une fonction très simplifiée et généraliste mais qui nécessite d'être correctement calibrée, car ses paramètres sont susceptibles de dépendre de la zone géographique (bassin) dans laquelle se trouve l'exposition.

Pour répondre à la calibration des paramètres, un autre auteur cité dans le rapport du GIEC, David N. Bresch, a publié une note explicative, en collaboration avec Samuel Eberenz et Samuel Lüthi nommé « *Regional tropical cyclone impact functions for globally consistent risk assessments* ».

Collectivement, ces chercheurs ont tenté de répondre à la problématique de la calibration de la fonction d'impact proposée par K. Emanuel. Comme indiqué précédemment, il s'agit d'une fonction sigmoïdale proposée où la vitesse du vent (V) est définie sur \mathbb{R}_+ dans $[0, 1]$ (ratio d'impact), se calibre selon 2 paramètres $[V_{\text{thresh}}, V_{\text{half}}]$.

- Calibration de V_{thresh}

K. Emanuel a proposé la valeur de 50 kn lors de son étude pour les cyclones étant apparus aux Etats-Unis. Cette valeur a été confirmée empiriquement pour les cyclones étant apparus en Chine par Elliott et al. (2015). Dans le cadre des présents travaux, il est proposé de retenir cette valeur commune à l'ensemble des cyclones comme demeurant *le seuil à partir duquel il est avéré que la vitesse du vent commence à impacter la structure de l'exposition, quel que soit son emplacement*. Afin de garder de la constance, nous convertirons les vitesses de vents en $m.s^{-1}$. Ainsi en convertissant la vitesse de noeuds en mètres par seconde, on obtient :

$$V_{\text{thresh}} \approx 25.7 \text{ } m.s^{-1}$$

Le choix consistant à conserver cette valeur constante durant toute la calibration du modèle est également approuvé par S. Eberenz et al., lesquels reprennent l'étude de Lüthi (2019) suggérant que la *variation de plus d'un paramètre linéairement dépendant* (le paramètre variable sélectionné ici est V_{half}) entraîne très probablement un surajustement (*overfitting*) lors de la calibration avec des valeurs de vitesse de vent pour V_{thresh} incohérente dans certaines régions du monde.

- Calibration de V_{half}

Si la valeur de V_{thresh} semble faire consensus au sein du groupe de scientifiques concernés, la calibration de V_{half} semble plus ardue. Pour rappel, cette vitesse correspond au seuil à partir duquel l'exposition est « détruite » à 50% (le ratio d'impact est de 0.5). *C'est également le niveau où la pente est la plus forte.*

Ainsi, dans un article rédigé par Elliott et al. (2015), sur la base de l'historique des données fournies par la « *Federal Emergency Management Agency* » (FEMA) en 2010, la valeur de V_{half} sur les buildings peut s'étendre de 52 à 89 $m.s^{-1}$ en fonction du type de bâtiment et du type de surface.

En appliquant les fonctions d'impact de FEMA vérifiées avec des données de dommage signalées pour les cyclones tropicaux américains Andrew (1992), Eric (1995) et Fran (1996) ; les scientifiques Sealy et Strobl dans un article de 2017 ont, eux, estimés que la plage de variation de V_{half} était comprise entre 71.7 et 77.8 $m.s^{-1}$ en fonction du type de bâtiment. La valeur moyenne constatée était de 74.7 $m.s^{-1}$.

Dans leur article, S. Eberenz et al. S'appuient sur le constat que la forme sigmoïdale de la fonction d'impact calibrée à partir des valeurs moyennes de V_{half} et de V_{thresh} permet de se faire une idée significativement positive de l'impact sur l'exposition. Cependant, ils s'interrogent sur la possibilité d'affiner cette fonction d'impact au niveau régional (par « sous-bassin »²³).

Les données utilisées dans leur étude proviennent de « *International Disaster Database EM-DAT* » (EM-DAT). Ces dernières contiennent les différentes données pour la calibration telles que les cyclones tropicaux, les pays concernés et l'estimation d'impact.

A partir de ces données, S. Eberenz et al. ont calculé les Event Damaged Ratio (EDR) pour chaque cyclone E comme le ratio entre les « Simulated Event Damage » (SDR) et les « Normalized Reported Damage » (NRD) à partir de fonctions d'impact donc la valeur de V_{half} est variable et où la valeur de V_{thresh} est fixée à 25.7 $m.s^{-1}$:

$$EDR_E = \frac{SED_E}{NRD_E} \quad (1)$$

SED_E correspond ici au montant d'impact simulé via le paramètre de V_{half} et NRD_E correspond au montant d'impact constaté depuis la base de données EM-DAT. Dès lors, une surestimation de l'impact pour un cyclone E par le modèle transparaît via un $EDR_E > 1$ et inversement pour une sous-estimation.

L'agrégation au niveau de l'ensemble des cyclone E de chaque région R se calcule via la fonction « Total Damage Ratio » (TDR) calculée de la façon suivante :

$$TDR_R = \frac{\sum_{E=1}^N SED_E}{\sum_{E=1}^N NRD_E} \quad (2)$$

²³Nous avions jusqu'à présent 7 bassins.

Avec N le nombre total de cyclones par région R . Comme indiqué, les régions correspondent ici à des « sous-bassins » :

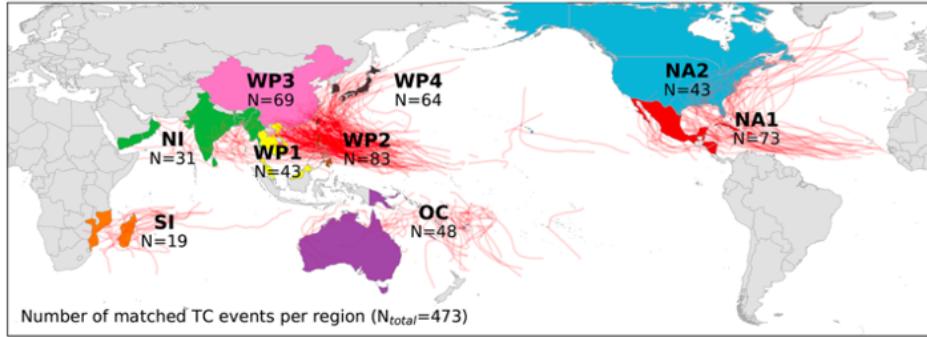


Figure 3. World map highlighting the 53 countries used for calibration, color coded per calibration region. The tracks of 376 TCs used for calibration are plotted as red lines. The number of resulting matched events N is displayed per region. Regions by color: red: the Caribbean with Central America and Mexico (NA1); blue: the USA and Canada (NA2); green: North Indian Ocean (NI); purple: Oceania with Australia (OC); orange: South Indian Ocean (SI); yellow: South East Asia (WP1), brown: the Philippines (WP2); rose: mainland China (WP3); black: the rest of the north West Pacific Ocean (WP4). The countries per region are listed in Table A1.

Image 7 : Carte représentant les différentes sous-régions sur lesquels les fonctions d'impacts ont été calibrées

Plus précisément, S. Eberenz et al. ont défini ces régions de la façon suivante :

Table A1. List of countries per calibration region. Countries marked with an asterisk (*) are considered for calibration (53 in total).

Region	N countries (calibration)	Countries
North Atlantic 1 (NA1)	48 (21)	Anguilla; Antigua and Barbuda*; Argentina; Aruba; Bahamas*; Barbados; Belize*; Bermuda*; Plurinational State of Bolivia; Cabo Verde*; Cayman Islands; Chile; Colombia; Costa Rica; Cuba*; Dominica*; Dominican Republic*; Ecuador; El Salvador; Falkland Islands (Malvinas); French Guiana; Grenada; Guadeloupe; Guatemala; Guyana; Haiti; Honduras*; Jamaica*; Martinique; Mexico*; Montserrat*; Nicaragua*; Panama; Paraguay; Peru; Puerto Rico*; Saint Helena, Ascension and Tristan da Cunha; Saint Kitts and Nevis*; Saint Lucia*; Saint Vincent and the Grenadines*; Sint Maarten (Dutch part); Suriname; Trinidad and Tobago*; Turks and Caicos Islands*; Uruguay; Bolivarian Republic of Venezuela; British Virgin Islands*; US Virgin Islands*
North Atlantic 2 (NA2)	2 (2)	Canada*; United States of America*
North Indian (NI)	36 (6)	Afghanistan; Armenia; Azerbaijan; Bahrain; Bangladesh*; Bhutan; Djibouti; Eritrea; Ethiopia; Georgia; India*; Islamic Republic of Iran; Iraq; Israel; Jordan; Kazakhstan; Kuwait; Kyrgyzstan; Lebanon; Maldives; Mongolia; Myanmar*; Nepal; Oman*; Pakistan; Qatar; Saudi Arabia; Somalia; Sri Lanka*; Syrian Arab Republic; Tajikistan; Turkmenistan; Uganda; United Arab Emirates; Uzbekistan; Yemen*
Oceania (OC)	26 (11)	American Samoa; Australia*; Cook Islands; Fiji*; French Polynesia*; Guam*; Kiribati; Marshall Islands; Federated States of Micronesia*; Nauru; New Caledonia*; New Zealand; Niue; Norfolk Island; northern Mariana Islands; Palau; Papua New Guinea*; Pitcairn; Samoa*; Solomon Islands*; Timor-Leste; Tokelau; Tonga*; Tuvalu; Vanuatu*; Wallis and Futuna
South Indian (SI)	11 (2)	Comoros; Democratic Republic of the Congo; Eswatini; Madagascar*; Malawi; Mali; Mauritius; Mozambique*; South Africa; United Republic of Tanzania; Zimbabwe
North West Pacific 1 (WP1)	6 (4)	Cambodia*; Indonesia; Lao People's Democratic Republic; Malaysia*; Thailand*; Viet Nam*
North West Pacific 2 (WP2)	1 (1)	Philippines*
North West Pacific 3 (WP3)	1 (1)	Mainland China*
North West Pacific 4 (WP4)	5 (5)	Hong Kong*; Japan*; Republic of Korea*; Macao*; Taiwan*

Tableau 2 : Tableau représentant les pays/espaces associés aux différentes régions

Une fois ces 2 fonctions élaborées, la méthodologie employée par S. Eberenz et al. consiste à calibrer les différentes valeurs de V_{half} afin de faire tendre les valeurs de ces 2 fonctions vers 1 (synonyme d'ajustement parfait entre les impacts modélisés via la fonction d'impact et les impacts observés).

Pour se faire, S. Eberenz et al. proposent 3 modèles :

1. **UNC** : Uncalibrated. Dans ce cas, aucune calibration n'est effectuée et la valeur par défaut pour V_{half} correspond à la valeur moyenne observée par Sealy et Strobl : 74.7 m.s^{-1} .
2. **RMSF** : Root-Mean-Squared Fraction. Il s'agit ici de minimiser les écarts quadratiques de la fonction EDR_E (1) via la formule de minimisation suivante :

$$RMSF_R = e^{\left(\sqrt{\frac{1}{N} \times \sum_{E_R=1}^{N_R} [\ln(EDR_E_R)]^2} \right)}$$

Ainsi, le but initial étant de faire tendre EDR_E vers 1, on chercher alors à faire tendre vers 0 la

moyenne des carrés des logarithmes des EDR_E vers 0 et, via le passage à l'exponentiel, à faire tendre la fonction RMSF vers 1.

3. **TDR** : Total Damage Ratio. Il s'agit ici d'optimiser les TDR_R au niveau de chaque région. L'optimisation se fait donc à un niveau moins granulaire que via RMSF étant donné que l'on raisonne ici déjà au niveau régional. La logique reste cependant la même et vise à faire tendre les TDR_R vers 1 avec :

$$TDR_R = \frac{\sum_{E_R=1}^{N_R} SED_{E_R}}{\sum_{E_R=1}^{N_R} NRD_{E_R}}$$

Suite à calibration et en gardant une valeur de V_{thresh} à 25.7 m.s^{-1} , les valeurs de V_{half} pour chaque région proposée par S. Eberenz et al. sont les suivantes :

Régions	UNC	RMSF	TDR
NA1	74.7	59.6	66.3
NA2	74.7	86	89.2
NI	74.7	58.7	70.8
OC	74.7	49.7	64.1
SI	74.7	46.8	52.4
WP1	74.7	56.7	66.4
WP2	74.7	84.7	188.4
WP3	74.7	80.2	112.8
WP4	74.7	135.6	190.5
Global	74.7	73.4	110.1

Tableau 3 : Tableau représentant les valeurs calibrées selon les 3 méthodologies pour les différentes sous-régions

Ainsi, Eberenz et al. concluent sur leur calibration en affirmant ce qui suit :

“For calibration, two complementary optimization approaches were applied, one aiming at minimizing the deviation of single event damage from the reported data and one aiming at minimizing the deviation for total damage aggregated over 38 years of data (1980 – 2017).”

De plus ils recommandent l'utilisation de fonctions adaptées en utilisant l'optimisation du TDR pour l'évaluation des risques à un niveau agrégé. En supposant que les dommages rapportés sont plus susceptibles de sous-estimer les impacts réels, il pourrait être conseillé d'échantillonner les fonctions d'impact dans la plage comprise entre les résultats de calibration.

C'est la méthodologie retenue dans le cadre de ce mémoire. Ainsi les 3 méthodes de calibration « UNC », « RMSF » et « TDR » seront mise à profit pour permettre une comparaison efficace des impacts en fonction des 3 calibrations et d'obtenir une vision la plus exhaustive possible sur les impacts liés à la méthodologie de calibration proposée.

Ainsi, pour chacun des 3 scénarios et pour chaque région, une fonction a été définie permettant d'ajuster la fonction d'impact selon la zone concernée.

$$\forall i \in [1 : nbr_{expos}], \text{ region}(i) \in ['NA1', 'NA2', 'NI', 'OC', 'SI', 'WP1', 'WP2', 'WP3', 'WP4', 'DZ']$$

'DZ' désignant ici, la région *defaultée* sur laquelle est appliquée le facteur de calibration de V_{half} calibré sur l'ensemble des pays (« Global »).

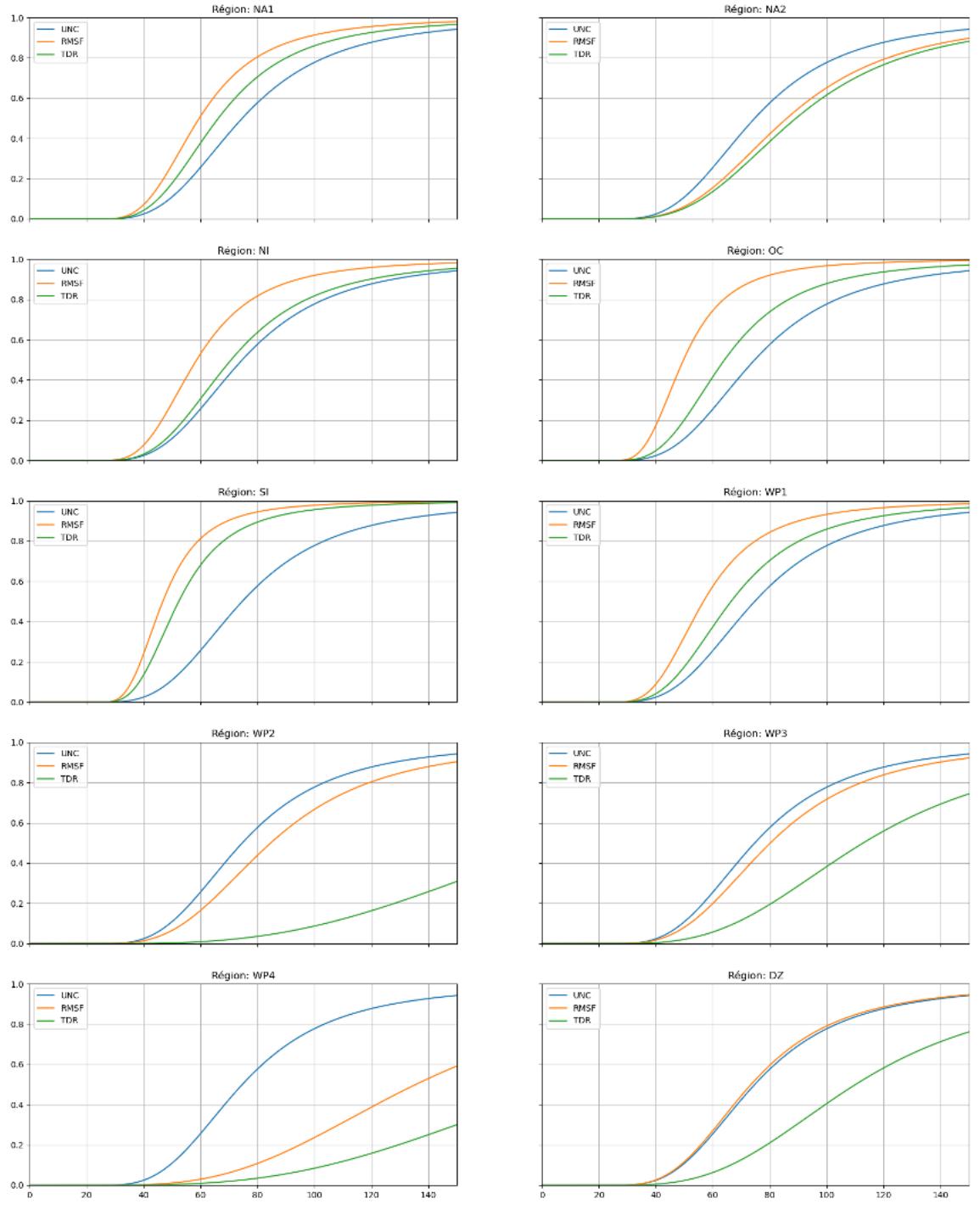
Une fois la région identifiée, ainsi que le modèle choisi, une fonction va récupérer la valeur de V_{half} pour la zone et le modèle choisi, ainsi que V_{thresh} et construire - in fine - la fonction d'impact associée, sur la base de la formule d'Emanuel :

$$\forall i \in [1 : nbr_{expos}], \forall model \in ['UNC', 'RMSF', 'TDR']$$

$$\exists \text{ Fonction d'impact}(\text{region}(i), \text{model})$$

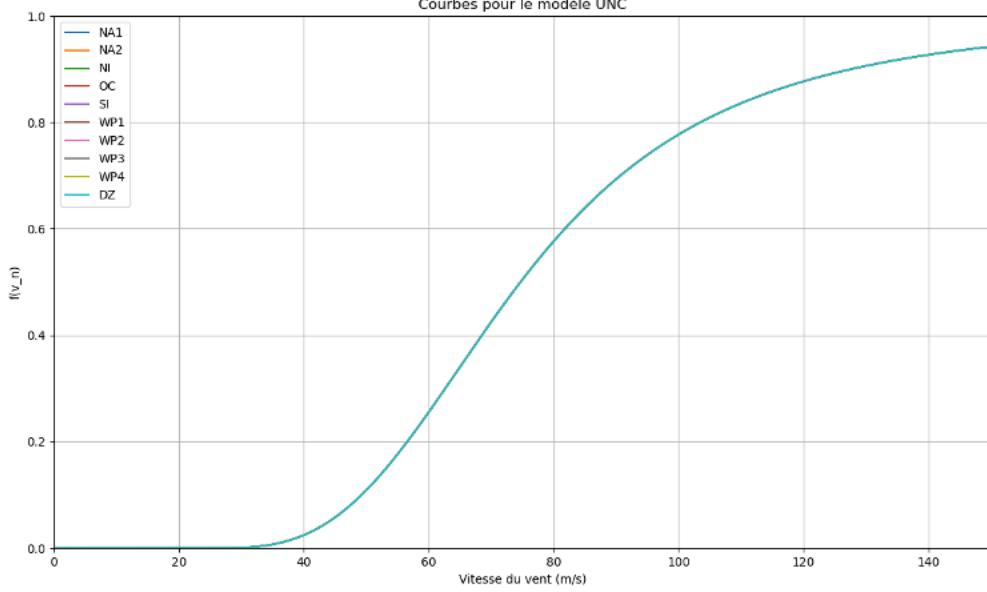
On obtient alors les résultats suivants :

Courbes pour chaque région avec les modèles UNC, RMSF, TDR



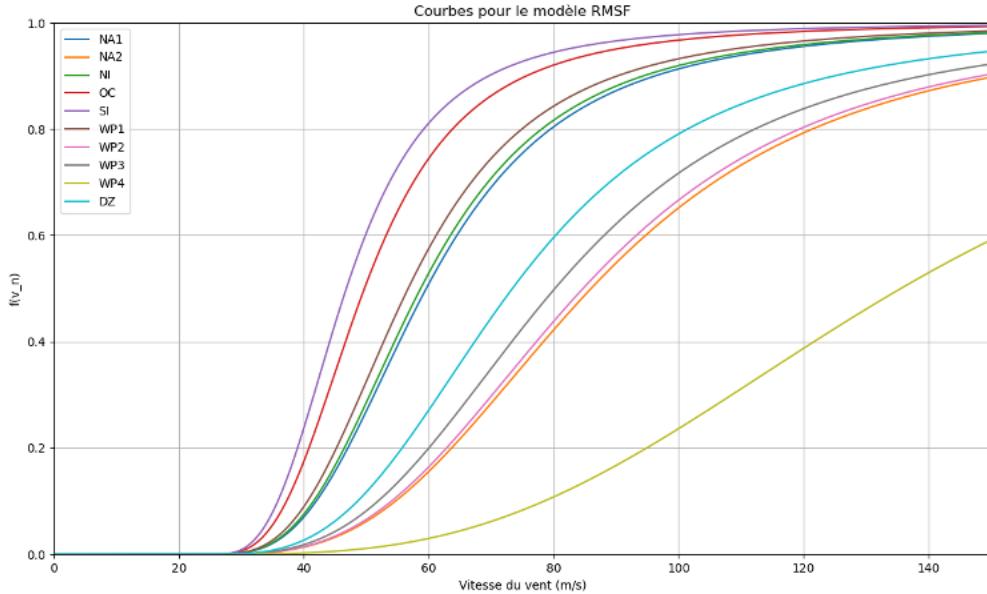
Graphique 5 : Courbes représentants les fonctions d'impacts par région x modèle

Chacune des 10 images représente une des sous-régions identifiées comme pouvant être impactée par des cyclones. Au sein de chaque image est représenté l'évolution des 3 fonctions d'impacts calibrées à partir des propositions d'Eberenz et al. en fonction de la vitesse du vent (en abscisse en m/s).



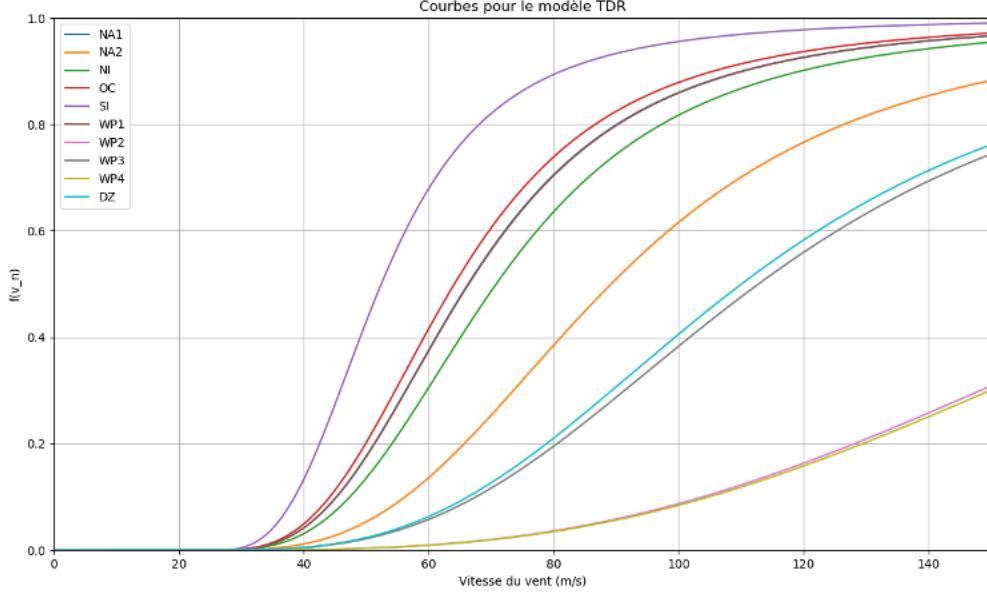
Graphique 6 : Courbe représentant les fonctions d'impact du modèle UNC par sous-région

Sur ce graphique est représenté la courbe du modèle UNC pour l'ensemble des régions. Ce modèle est le modèle « Uncalibrated » (UNC). Par conséquent, les paramètres de la fonction d'impact V_{thresh} et V_{half} sont constants quelle que soit la région.



Graphique 7 : Courbe représentant les fonctions d'impact du modèle RMSF par sous-région

Le modèle « RMSF » est un peu plus « agressif » étant donné que le niveau d'impact à 50% est obtenu sur des vitesses de vent moins élevées (tout région égale par ailleurs) par rapport au modèle TDR.



Graphique 8 : Courbe représentant les fonctions d'impact du modèle TDR par sous-région

Le modèle « TDR » est le modèle intermédiaire de par sa calibration de la fonction d'impact entre celle du modèle « UNC » (sans calibration) et celle du modèle « RMSF ».

4.3.2 Association de l'exposition à sa fonction d'impact

Comme indiqué précédemment, les valeurs par zones proposées par Eberenz et al. ont été calibrées sur les expositions identifiées, dans certains pays de ces régions.

Néanmoins, il n'est pas toujours aisé d'associer la position géographique de la base de données fournie. Dans le cadre de ces travaux - et pour affiner l'ajustement - a été élaboré une fonction qui agit de la façon suivante :

1. A partir des coordonnées de l'exposition : associer cette dernière à un pays via une fonction permettant (ou non) d'identifier le pays dans lequel se trouve l'exposition à l'aide d'une base de données mondiale. En fine, il n'existe que deux solutions possibles : soit le pays a été détecté, soit il ne l'a pas été.
2. Dans l'hypothèse où il n'existe pas de relation mapping/pays, il convient d'identifier la zone globale à laquelle l'exposition appartient.

Ainsi à partir de la carte des zones, une identification des macro-zones à partir des positions GPS a été effectuée :

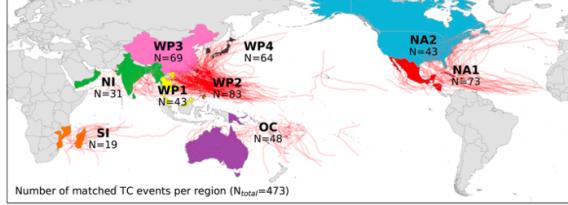
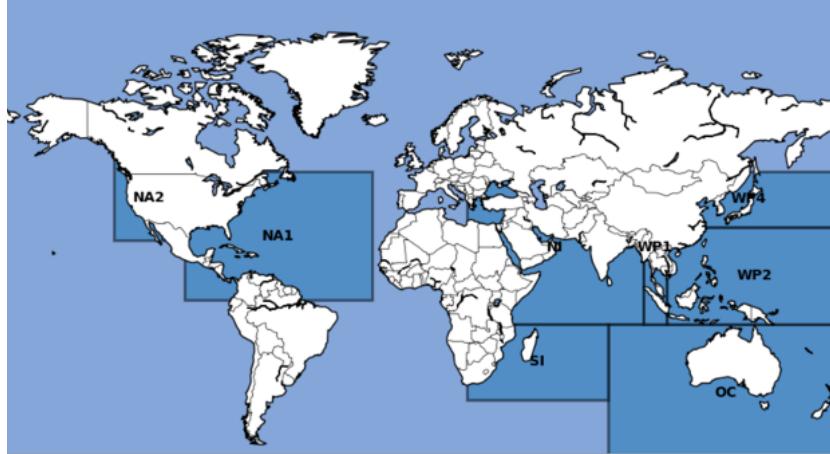


Figure 3. World map highlighting the 53 countries used for calibration, color coded per calibration region. The tracks of 376 TCs used for calibration are plotted as red lines. The number of resulting matched events N is displayed per region. Regions by color: red: the Caribbean with Central America and Mexico (NA1); blue: the USA and Canada (NA2); green: North Indian Ocean (NI); purple: Oceania with Australia (OC); orange: South Indian Ocean (SI); yellow: South East Asia (WP1), brown: the Philippines (WP2); rose: mainland China (WP3); black: the rest of the north West Pacific Ocean (WP4). The countries per region are listed in Table A.1.



Images 8 et 9 : Mapping effectué entre les sous-régions du modèle Eberenz et al. et le module de defaulting d'exposition vers sa région dans le cas où le pays n'est pas spécifié dans le modèle initial

Si l'exposition se trouve dans la zone concernée, alors cette zone est validée, à contrario, la zone est defaultée sur « DZ » (Defaulted Zone)

3. Dans le cas (plus probable) où l'on est parvenu à identifier le pays de l'exposition, il est envisageable de mapper le pays à la zone concernée à partir de la liste communiquée dans la documentation de Eberenz et al. (cf ; Tableau 2).

Si l'on est parvenu à identifier le pays de l'exposition, mais qu'elle n'est pas présente dans la liste de Eberenz et al, dans ce cas-là, on va defaulter sur « DZ » (Defaulted Zone).

De cette manière, pour chaque exposition i , on utilise la fonction suivante :

$$\forall i \in [1 : nbr_{expos}], \exists! region(i)$$

4.3.3 Mesure d'adaptation au réchauffement climatique

Les mesures d'adaptation aux cyclones représentent un levier essentiel dans la réduction des dommages subis par les biens immobiliers exposés à ces phénomènes extrêmes. Parmi les adaptations couramment mises en œuvre, on note le recours à des toits inclinés à faible pente, conçus pour réduire la prise au vent et diminuer le risque d'arrachement. De même, l'installation de volets anticycloniques permet de protéger efficacement les ouvertures, telles que les fenêtres et les portes, contre les vents violents et les débris projetés. Les structures en béton renforcé offrent également une résistance accrue aux pressions exercées par les vents cycloniques. Enfin, des réglementations spécifiques dans certaines régions imposent des normes de construction adaptées, renforçant encore davantage la résilience des bâtiments.

Dans le cadre de ce mémoire, les fonctions d'impact calculées permettent d'évaluer le pourcentage d'impact sur l'actif immobilier en fonction de la vitesse des vents cycloniques. Cependant, il est important de souligner que la base de données utilisée ne contenait pas d'informations détaillées sur les mesures d'adaptation spécifiques

mises en œuvre pour chaque bien. Si de telles données avaient été disponibles, il aurait également été envisageable d'affiner les fonctions d'impact afin de refléter plus précisément la vulnérabilité réelle des biens, en tenant compte de leur niveau de préparation face aux cyclones. Ces dispositions auraient conduit à réduire significativement la sensibilité de la fonction d'impact à la vitesse du vent.

Néanmoins, les fonctions d'impact utilisées intègrent implicitement ces mesures d'adaptation grâce à leur calibration par zones géographiques. En effet, dans les régions régulièrement exposées aux cyclones tropicaux, les mesures d'adaptation sont souvent généralisées en raison des normes de construction locales et de l'expérience acquise face à ces événements récurrents. Ces adaptations sont donc implicitement prises en compte dans les fonctions d'impact, car les données historiques utilisées pour leur élaboration reflètent déjà une certaine résilience accrue des biens dans ces zones. Ainsi, bien que l'absence d'informations détaillées sur les mesures d'adaptation individuelles limite la précision des évaluations, les résultats restent représentatifs des vulnérabilités observées à l'échelle régionale.

4.4 Calcul de l'impact physique climatique sur l'exposition

A cette étape, le grand avantage de Climada est de pouvoir *agréger l'exposition, la fonction d'impact et l'événement climatique* afin d'obtenir un impact sur l'exposition.

Ainsi, à l'aide du positionnement géographique de l'exposition ainsi que du montant de valorisation associé, la module identifie la vitesse du vent au niveau de l'exposition, et associe à cette vitesse, un pourcentage d'impact à l'aide de la fonction d'impact.

Enfin, le **pourcentage d'impact est affecté au montant de valorisation de l'exposition concernée afin d'obtenir un montant d'impact physique dans la devise de l'exposition** (ici l'euro).

Dans le cas de figure selon lequel plusieurs cyclones sont simulés (historique + synthétique) sur une période donnée (entre 1980 et 2010 par exemple), chaque cyclone est alors associé à une fréquence d'observation annuelle telle que décrite dans la section 4.2.

4.5 Module de projection des paramètres selon les scénarios climatiques

Le module précédent permet de modéliser les montants d'impacts historiques sur la base de la fréquence et du montant d'impact. Néanmoins, dans le cadre de ce mémoire, l'intérêt est de pouvoir *estimer les évolutions futures des deux paramètres impactés par le réchauffement climatique*, c'est-à-dire la *fréquence des TC (Tropical Cyclone)* ainsi que de la *vitesse des vents cycloniques*.

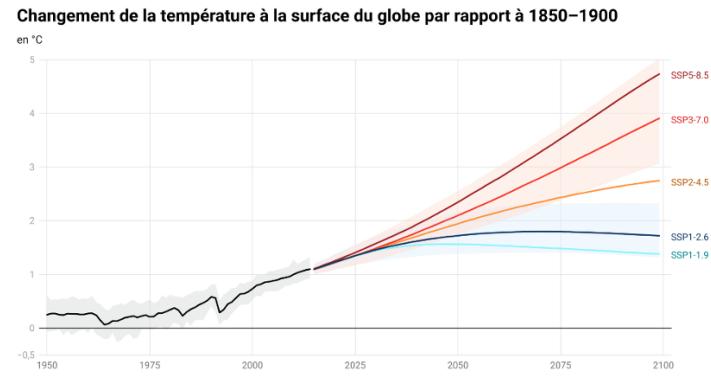
Dans son dernier rapport, le GIEC a défini cinq scénarios basés à la fois sur les niveaux d'émissions de gaz à effet de serre et sur des trajectoires socio-économiques, qui prennent en compte des facteurs comme la démographie, la croissance économique, les choix politiques et le niveau technologique. Ces scénarios, appelés trajectoires socio-économiques partagées (ou SSP pour *Shared Socioeconomic Pathways* en anglais), décrivent différentes évolutions possibles :

- SSP1 : un monde engagé sur la voie du développement durable ;
- SSP2 : un monde qui suit les tendances historiques de développement ;
- SSP3 : un monde marqué par de fortes rivalités régionales ;
- SSP4 : un monde avec des inégalités croissantes ;
- SSP5 : un monde qui continue à exploiter massivement les énergies fossiles.

Ces cinq scénarios sont construits à partir de trajectoires associées à une valeur de forçage radiatif **à l'horizon 2100**. Le forçage radiatif représente la quantité d'énergie supplémentaire retenue dans le système Terre en fonction des émissions de gaz à effet de serre, exprimée en watts par mètre carré (W/m^2). Par exemple, le scénario RCP 2.6 correspond à un forçage de $+2,6 \text{ W}/\text{m}^2$, tandis que le scénario RCP 8.5 correspond à $+8,5 \text{ W}/\text{m}^2$. Plus la valeur est élevée, plus le réchauffement du système Terre-atmosphère est important.

Ces scénarios, qui ne sont pas des prédictions mais des projections, sont les suivants :

- SSP1-1,9 : baisse des émissions de GES dès 2025 et zéro émission nette de CO₂ avant 2050, suivi d'émissions négatives ;
- SSP1-2,6 : similaire au précédent, mais le seuil de zéro émission nette de CO₂ est atteint après 2050 ;
- SSP2-4,5 : stabilisation des émissions jusqu'en 2050, puis division par quatre d'ici 2100 ;
- SSP3-7,0 : doublement des émissions de GES d'ici 2100 ;
- SSP5-8,5 : augmentation rapide des émissions, avec un doublement prévu d'ici 2050.



Graphique 9 : Graphique représentant l'évolutions de la température suivant les différents scénarios du GIEC

Dans le cadre de son précédent rapport (5^{ème} rapport du GIEC), l'introduction des scénarios *RCP* visaient à modéliser le climat futur. Dans le cinquième rapport d'évaluation du GIEC (*AR5*, paru en 2014) et sur la base de quatre hypothèses différentes concernant la quantité de gaz à effet de serre qui sera émise dans les années à venir (période 2000-2100), chaque scénario *RCP* offrait une variante jugée probable du climat qui résultera du niveau d'émission choisi comme hypothèse de travail.

Dans le sixième rapport d'évaluation du GIEC, les trajectoires socio-économiques partagées sont désormais intégrées avec les trajectoires initiales. Ce rapport introduit trois nouveaux niveaux de forçage radiatif : RCP 1.9, RCP 3.4 et RCP 7. Voici un aperçu des différents scénarios :

- **RCP 1.9** : Ce scénario vise à limiter le réchauffement climatique à moins de 1,5 °C, conformément à l'objectif ambitieux de l'Accord de Paris.
- **RCP 2.6** : Ce niveau représente une trajectoire très stricte en matière de réduction des émissions.
- **RCP 3.4** : Il s'agit d'une trajectoire intermédiaire entre le RCP 2.6, qui est très rigoureux, et les efforts d'atténuation plus laxistes associés au RCP 4.
- **RCP 4.5** : Classé par le GIEC comme un scénario intermédiaire, il est considéré comme un équilibre entre réduction des émissions et impacts climatiques.
- **RCP 6** : Les émissions atteignent leur pic vers 2080 avant de commencer à diminuer.
- **RCP 7** : Ce scénario est un point de référence plutôt qu'un objectif d'atténuation.
- **RCP 8.5** : Les émissions continuent d'augmenter au cours du 21^e siècle.

Les nouveaux RCP introduits dans le sixième rapport sont le RCP 1.9, le RCP 3.4 et le RCP 7. Il est à noter qu'il y a eu peu de recalibration des scénarios RCP entre le cinquième et le sixième rapport du GIEC.

À la suite de l'analyse des différentes études scientifiques sur ce thème, y compris le dernier rapport du GIEC, le scientifique Thomas Knutson s'est distingué en 2015 pour ses travaux sur *Global projections of intense tropical cyclone activity for the late twenty-first century from dynamical downscaling of CMIP5/RCP4.5 scenarios* à travers les divers scénarios RCPs. En se basant sur les travaux de « Kang & Elsner », ce chercheur a publié un document décrivant les évolutions prévues en termes de fréquence d'apparition et d'intensité, en fonction des zones et des catégories de cyclones simulés.

Climada propose une fonction construite sur les données de ce scientifique qui projette donc ces 2 informations à horizon 2100, selon le scénario RCP indiqué et permet également d'interpoler linéairement la fréquence, ainsi que l'intensité entre les dates de 2023 et 2100. Cette fonction va - par conséquent - nous permettre de simuler divers scénarios RCPs/SSPs dans le futur.

4.6 Module d'actualisation financière des impacts futurs

Climada comporte nativement un module permettant d'actualiser - de manière approximative - les flux financiers, en utilisant notamment un *discount factor* (exemple : 3%) appliqué linéairement sur toute la courbe. L'objectif étant alors d'actualiser les flux futurs d'impacts, à la date d'observation. Cependant, **un modèle de taux constant n'a aucun sens financier**, en particulier sur du long terme, car il ne prend pas en compte la variabilité naturelle des taux d'intérêt, ni l'incertitude qui caractérise l'évolution économique sur le long terme. Pour obtenir un modèle financier pertinent, il est donc nécessaire d'utiliser des simulations stochastiques de taux, qui permettent de modéliser les fluctuations des taux d'intérêt au fil du temps. Ces simulations permettent de refléter la réalité des marchés financiers, où les taux d'actualisation sont soumis à des facteurs économiques et à des événements imprévus, offrant ainsi une évaluation plus réaliste et précise des flux futurs. Dans le cadre de ce mémoire, le modèle "Hull-White à 1 Facteur" (HW1F) a été retenu pour simuler les taux zéro-coupon. Cependant, pour intégrer de manière plus réaliste les conséquences des risques climatiques, une extension du modèle Hull-White pourrait être envisagée. Cette dernière vise - in fine - à introduire un facteur climatique dans la dynamique des taux, afin de lier les flux financiers aux évolutions climatiques.

4.6.1 Choix du modèle de taux

Dans le cadre de ce mémoire, une composante stochastique a été intégrée à l'actualisation des flux financiers pour permettre une variabilité des taux d'actualisation en fonction des scénarios simulés. Le modèle Hull-White à "1 Facteur" (HW1F) a été retenu pour simuler des taux zéro-coupon. Ce modèle, couramment utilisé pour projeter l'évolution des taux d'intérêt futurs, offre une simplicité de mise en œuvre tout en reproduisant les principales dynamiques des taux d'intérêt. Le modèle Hull-White peut également être utilisé dans une version à "2 Facteurs" (HW2F), permettant de capturer la structure de corrélation entre les taux courts et les taux longs. Cependant, étant donné que l'objectif de ce mémoire n'est pas de reproduire cette dynamique complexe, le modèle HW1F a été préféré pour sa simplicité et son adéquation avec les besoins actuels.

La dynamique du modèle HW1F pour le taux court r_t est donnée par l'équation différentielle stochastique suivante :

$$dr_t = (\theta_t - a.r_t) dt + \sigma dW_t$$

où r_t est le taux court, a le paramètre de vitesse de retour à la moyenne, σ la volatilité, W_t le mouvement brownien et θ_t la fonction calibrée pour ajuster la courbe initiale des taux zéro-coupon.

L'utilisation de modèles de taux stochastiques est particulièrement justifiée pour actualiser des flux comportant une dimension optionnelle, c'est-à-dire des flux dont la valeur ou la survenance dépend de conditions futures incertaines. Toutefois, dans le cadre de ce mémoire, les flux modélisés ne contiennent pas encore d'optionalité explicite, ce qui limite l'intérêt immédiat d'un tel modèle. En effet, la moyennisation de flux non optionnels à l'aide du modèle HW1F revient à retrouver la courbe *forward* initiale, ce qui implique que l'actualisation des flux ne présente pas de variabilité additionnelle, ni d'incertitude au-delà de celle définie par cette courbe. Afin de rendre l'actualisation des flux plus représentative des risques climatiques et mieux intégrer les interactions entre les modules financier et climatique, une extension du modèle Hull-White pourrait être envisagée.

Cette modification consisterait à introduire un facteur climatique au sein du modèle original d'HW1F, reflétant ainsi dans la dynamique du taux, des indicateurs climatiques tels que la fréquence, l'intensité des catastrophes naturelles ou encore les trajectoires de réchauffement climatique dans sa dynamique.

Ainsi, cette extension rendrait l'évolution des flux financiers dépendante des évolutions climatiques via une relation explicite dans la dynamique du taux, renforçant ainsi la cohérence entre les scénarios financiers et

climatiques.

L'introduction d'un modèle de taux stochastique permet également de quantifier le coût de l'optionalité dans les flux futurs. Ce coût, défini comme la différence entre la meilleure estimation stochastique ($BE_{\text{stochastique}}$) et la meilleure estimation moyenne (BE_{moyenne}), reflète la valeur de la variabilité et des options implicites associées aux scénarios futurs. Si les flux modélisés ne contiennent pas encore d'optionalité explicite dans ce mémoire, cette approche pose néanmoins les bases d'une modélisation future plus sophistiquée. En intégrant la dépendance aux scénarios climatiques via un facteur dans le modèle HW1F, il deviendrait envisageable d'évaluer cette optionalité dans un cadre où les interactions entre phénomènes climatiques et financiers sont explicitement prises en compte.

4.6.2 Choix du modèle de calibration

Une fois le modèle de taux spécifié, il va devoir être calibré. Pour se faire, le recours à une calibration « risque neutre » ou « monde réel » est envisageable :

- Calibration risque neutre (en AOA²⁴) : cette calibration vise principalement à valoriser des dérivés sur taux d'intérêt. Elle permet de calibrer les paramètres du modèle sur la base des paramètres implicitement récupérés sur des produits dérivés, évalués sur le marché (tels que des caps ou des swaptions).
- Calibration monde réel (historique) : cette calibration a pour but de capturer la dynamique des taux d'intérêts telle qu'observée sur le marché. Principalement utilisée pour la simulation et l'actualisation des scénarios de taux futurs, cette calibration vise à refléter les changements historiques des taux d'intérêts passés.

Dans le cadre de ce mémoire, le modèle de taux nous permet de générer différents types de taux d'actualisation. Par cohérence, le choix de calibration en *monde réel* (historique) est retenu.

4.6.3 Données historiques et interpolation

Etant donné que le calcul des taux d'actualisation est effectué à partir de fin d'année 2023 (date de la dernière évaluation des expositions), les données de taux de taux zéro-coupon pour différentes maturités (de EONIA/ESTER à 50 ans) ont été récupérées sur Reuters sur un historique mensuel du 30/04/2011²⁵ au 29/12/2023.

L'ensemble des tenors annuels de maturités 1 à 50 ans n'étant pas disponibles et afin d'obtenir une courbe zéro-coupon la plus propre possible sur laquelle procéder à la calibration du modèle, une interpolation entre les tenors non-présents (11, 13, 14, 16, 17, 18, 19, 21, 22, 23, 24, 26, 27, 28, 29, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48 et 49 ans) a été effectuée.

Pour se faire 3 modèles d'interpolation ont été choisis :

- Linéaire : interpolation à l'aide de 2 points de la courbe : (x_0, y_0) et (x_1, y_1)

On obtient alors l'évaluation de la valeur interpolée y au point x de la façon suivante :

$$y = y_0 + \frac{(x - x_0)}{(x_1 - x_0)} \times (y_1 - y_0)$$

- Quadratique : interpolation à l'aide de 3 points de la courbe via un polynôme de degré 2 : (x_0, y_0) , (x_1, y_1) et (x_2, y_2)

On obtient alors l'évaluation de la valeur interpolée y au point x de la façon suivante :

$$y = y_0 \times \frac{(x - x_1) \times (x - x_2)}{(x_0 - x_1) \times (x_0 - x_2)} + y_1 \times \frac{(x - x_0) \times (x - x_2)}{(x_1 - x_0) \times (x_1 - x_2)} + y_2 \times \frac{(x - x_0) \times (x - x_1)}{(x_2 - x_0) \times (x_2 - x_1)}$$

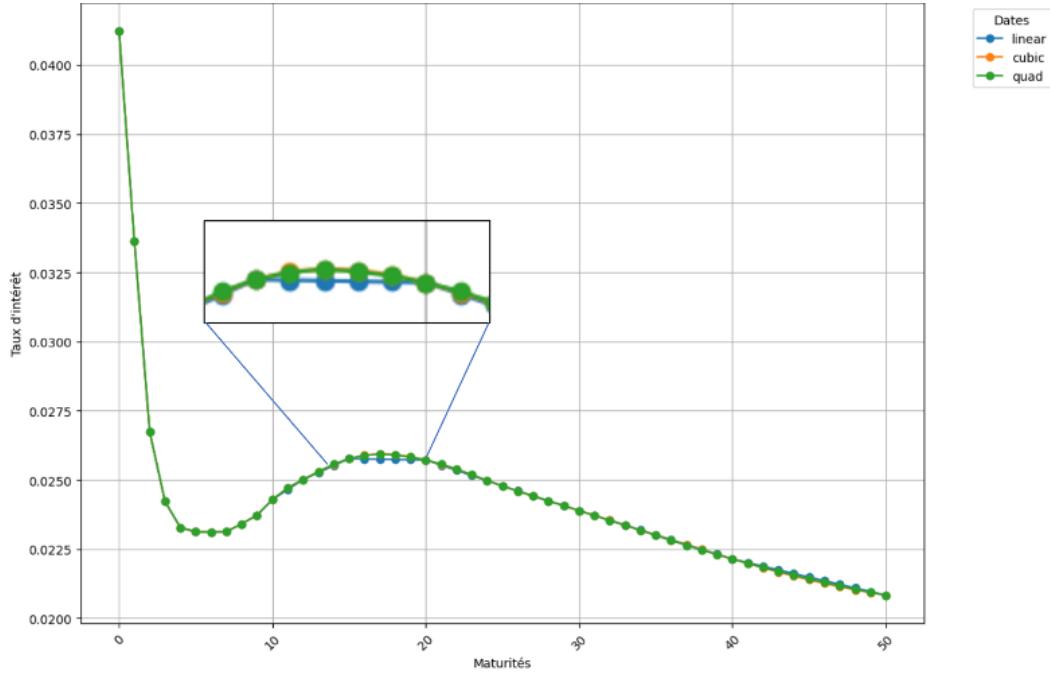
²⁴Absence d'Opportunité d'Arbitrage

²⁵Le tenor du taux ZC 50 ans est disponible à partir du 30/04/2011.

- Cubique : interpolation à l'aide de 4 points de la courbe via un polynôme de degré 3 : (x_0, y_0) , (x_1, y_1) , (x_2, y_2) et (x_3, y_3)

$$y = y_0 \times \frac{(x - x_1) \times (x - x_2) \times (x - x_3)}{(x_0 - x_1) \times (x_0 - x_2) \times (x_0 - x_3)} + y_1 \times \frac{(x - x_0) \times (x - x_2) \times (x - x_3)}{(x_1 - x_0) \times (x_1 - x_2) \times (x_1 - x_3)} \\ + y_2 \times \frac{(x - x_0) \times (x - x_1) \times (x - x_3)}{(x_2 - x_0) \times (x_2 - x_1) \times (x_2 - x_3)} + y_3 \times \frac{(x - x_0) \times (x - x_1) \times (x - x_2)}{(x_3 - x_0) \times (x_3 - x_1) \times (x_3 - x_2)}$$

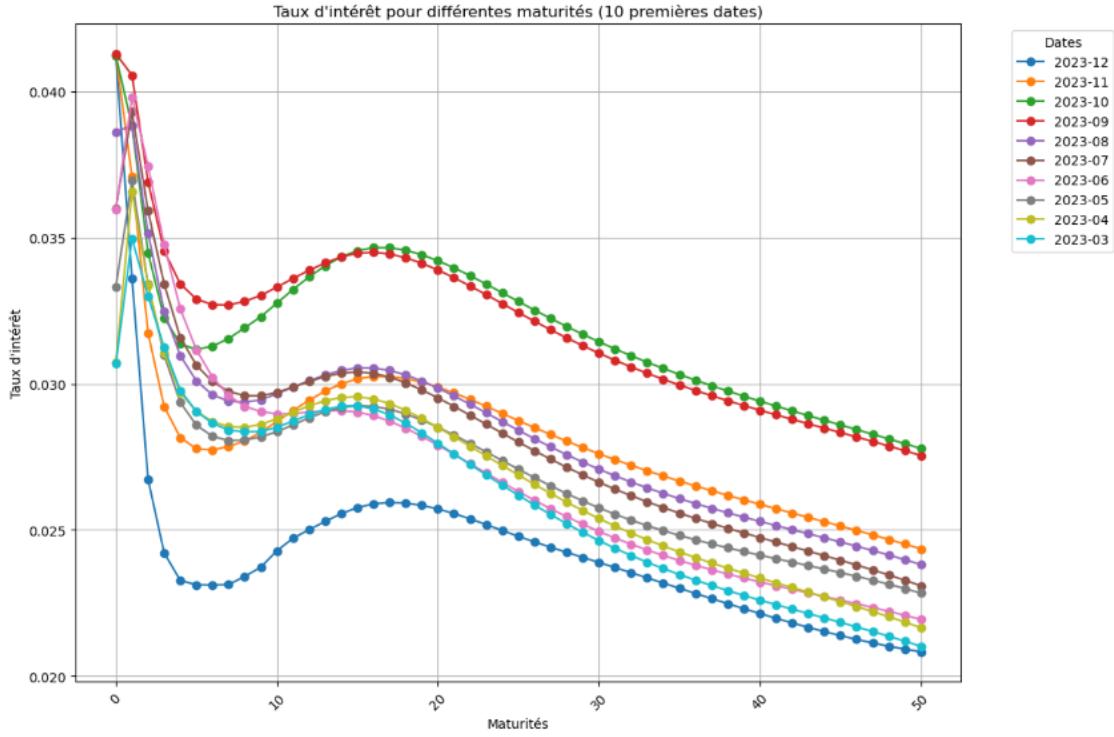
Voici la comparaison des 3 interpolations sur les valeurs de la courbe ZC du 29/12/2023 :



Graphique 10 : Graphique représentant la comparaison des 3 interpolations sur les valeurs de la courbe ZC

De par l'utilisation du polynôme de degré 3, on remarque que l'interpolation cubique fonctionne est optimale sa capacité à « capter » la dérivée de la pente au niveau du tenor 16, 17 et 18 ans. Pour cette raison, cette méthode d'interpolation sera retenue par la suite sur l'ensemble des dates.

Voici un exemple sur les 10 premières dates :



Graphique 11 : représentation des courbes forward pour 10 mois différents

4.6.4 Description du modèle Hull White 1 facteur

Le modèle Hull-White à 1 facteur est construit sur la base de la diffusion d'un taux court qui est ensuite transformé pour obtenir un taux long. La dynamique de diffusion du taux d'intérêt court est le suivant :

$$dr_t = (\theta_t - a.r_t) dt + \sigma dW_t \quad (1)$$

Avec :

t , le temps (en années)

r_t , le taux court

θ_t , une fonction positive déterministe du temps

a , la vitesse de retour à la moyenne

σ , la volatilité (non dépendante du temps ici)

W_t , un mouvement brownien

La fonction θ_t est une fonction déterministe du temps, calibrée pour ajuster le modèle aux données du marché. Ainsi, elle reproduit ici la courbe des taux zero-coupons du marché décrite précédemment en $t=0$ (29/12/2023). La valeur de la courbe de taux zero-coupon en date du 29/12/2023 sera notée $r_0(t)$ avec t le temps en année. Par convention, on notera $r_0(0)$, simplifié en r_0 correspond au taux *overnight* de l'ESTER au 29/12/2023.

Cette fonction est construite de la façon suivante :

$$\theta_t = \frac{\partial f_M(0, t)}{\partial t} + a.f_M(0, t) + \frac{\sigma^2}{2a} \cdot (1 - e^{-2at})$$

Avec $f_M(0, t)$, le taux *forward* instantané issu de la courbe de taux de marché en date t vu de 0. Pour obtenir une approximation de ce taux *forward* instantané, nous calculerons la dérivée première de la courbe $r_0(t)$ par rapport au temps, puis sa dérivée seconde pour obtenir le premier terme de l'équation. Lors du calcul des dérivés successives dans l'équation et afin d'obtenir une valeur la plus précise possible de $f_M(0, t)$, nous interpolerons de façon très fine les valeurs entre les années afin de faire tendre ε vers 0 dans l'équation :

$$f_M(0, t) = \lim_{\delta_t \rightarrow 1 \text{ day}} \frac{r_0(t + \delta_t) - r_0(t)}{\delta_t}$$

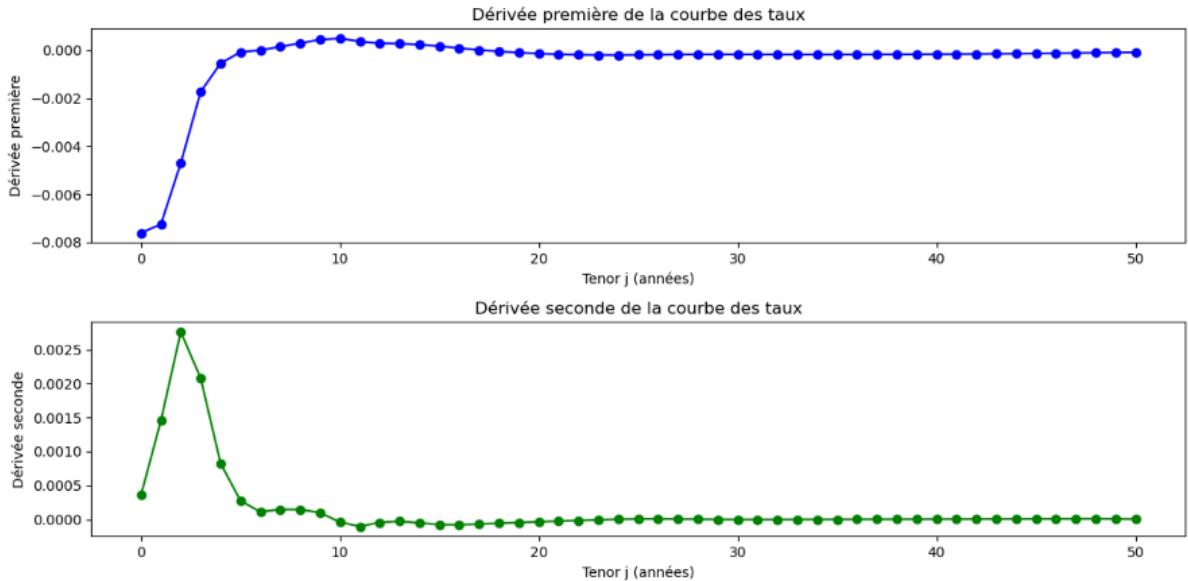
Dans notre modèle δ_t correspondra à un jour vis-à-vis d'un an.

4.6.5 Méthodes de calibration historiques du modèle

Différentes méthodes de calibration d'un modèle Hull-White à 1 facteur existent. Cependant, dans le cadre de la calibration historique sur des zéro-coupons, 2 méthodes sont couramment utilisées :

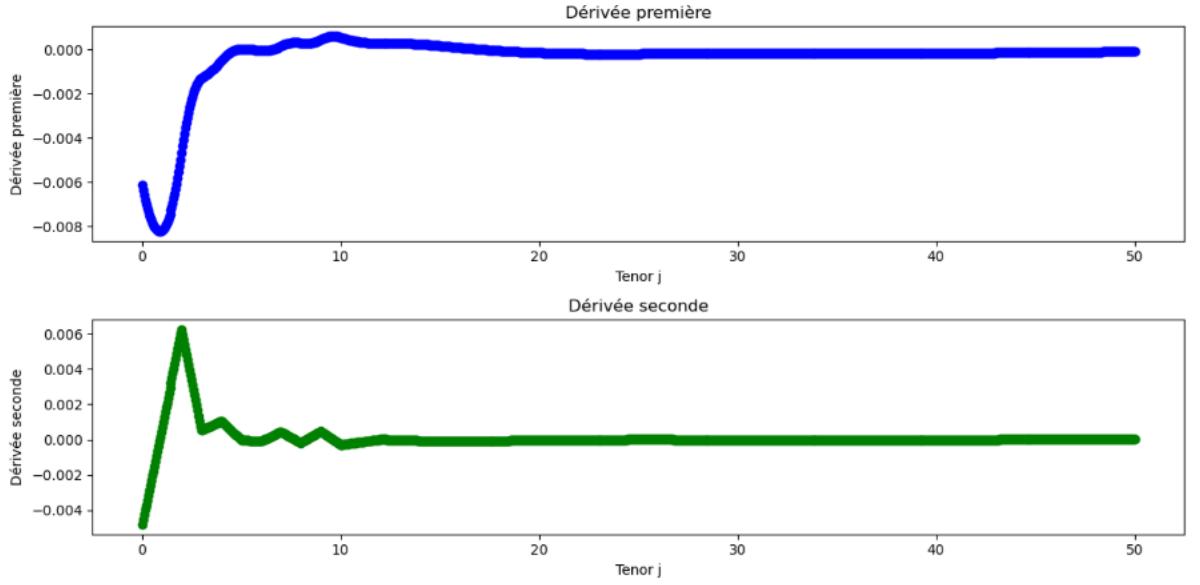
- Méthode 1 : fixation du paramètre de **retour à la moyenne** a à partir d'une formule du modèle puis calibration du paramètre de **volatilité** σ via une fonction de minimisation
- Méthode 2 : calibration simultanée du paramètre de **retour à la moyenne** a et de **volatilité** σ via une fonction de minimisation

Les deux méthodes seront utilisées lors de la calibration. Lors du processus de calibration, il est nécessaire d'obtenir les dérivées première et seconde de la courbe *forward* instantanée. Afin d'obtenir une courbe la plus lisse possible entre les mois, une interpolation cubique a également été appliquée. On passe alors d'une dérivée avec un intervalle d'un an de la forme suivante :



Graphique 12 : dérivée 1 et 2 de la courbe forward instantanée (annuellement)

... à une courbe journalière interpolée :



Graphique 13 : dérivée 1 et 2 de la courbe forward instantanée (quotidiennement)

Une fois la courbe *forward* instantanée de marché (M) : $f_M(0, t)$ modélisée, on peut obtenir le prix de l'obligation zéro-coupon $P(t, T)$ estimé en t pour horizon T sous le modèle Hull-White à l'aide de la relation suivante :

$$P(t, T) = A(t, T) \times e^{-B(t, T) \cdot r_t} \quad (2)$$

Avec :

$$\begin{cases} A(t, T) = \frac{P(0, T)}{P(0, t)} \times e^{\left[B(t, T) \times f_M(0, t) - \frac{\sigma^2}{4a} \times (1 - e^{-2at}) \times B(t, T)^2 \right]} \\ B(t, T) = \frac{1}{a} \times (1 - e^{-a(T-t)}) \end{cases}$$

On dispose alors de l'ensemble des N dates (153) historiques mensuelles t_i de l'ensemble des prix des zéro-coupons sur les maturités M allant de 0 à 50 ans. Ainsi :

$$\forall i \in [0 : N], \forall M \in [0 : 50], P(t_i, t_i + M)$$

Pour chaque maturité M et chaque date t_i , on peut alors calculer la valeur suivante :

$$\forall i \in [0 : N], \ln[P(t_i, t_i + M)] - \ln \left[\frac{P(t_{i-1}, t_i + M)}{P(t_{i-1}, t_i)} \right]$$

On obtient alors une matrice de 152 valeurs sur 51 maturités.

A partir de la formule (2), et après passage au logarithme, on peut en déduire que la formule peut se réécrire :

$$\forall i > 0, \ln[P(t_i, t_i + M)] - \ln \left[\frac{P(t_{i-1}, t_i + M)}{P(t_{i-1}, t_i)} \right] = -\frac{V_r}{2} \times B_M^2 - B_M \times \frac{\sigma^2}{2a} \times (1 - e^{-a \cdot \delta_t})^2 + \sqrt{V_M} \cdot Z \quad (3)$$

Avec :

$$B_M = B(t, t + M) = \frac{1}{a} \times (1 - e^{-a \cdot M}) \text{ indépendante de } t$$

$$\delta_t = t_i - t_{i-1}$$

$$V_r = \frac{\sigma^2}{2a} \times (1 - e^{-2.a.\delta_t})$$

$$Z \sim \mathcal{N}(0, 1)$$

Et

$$V_M = {B_M}^2 \times V_r = \frac{1}{a^2} \times (1 - e^{-a.M})^2 \times \frac{\sigma^2}{2a} \times (1 - e^{-2.a.\delta_t})$$

De plus, on trouve que :

$$\mathbb{E} \left[\ln [P(t_i, t_i + M)] - \ln \left[\frac{P(t_{i-1}, t_i + M)}{P(t_{i-1}, t_i)} \right] \right] = -\frac{V_M}{2} - B_M \cdot \frac{\sigma^2}{2 \times a^2} \times (1 - e^{-a.\delta_t})^2$$

Et

$$\mathbb{V} \left[\ln [P(t_i, t_i + M)] - \ln \left[\frac{P(t_{i-1}, t_i + M)}{P(t_{i-1}, t_i)} \right] \right] = V_M \quad (4)$$

4.6.5.1 Optimisation suivant la méthode 1

A l'aide de la définition de V_M , on a :

$$\ln \left(\frac{\partial \sqrt{V_M}}{\partial M} \right) - \ln (\sqrt{V_r}) = -a \times M \quad (5)$$

Ainsi, il existe une relation linéaire entre les tenors M et l'écart type des différentiels de logarithme des différents V_M .

A l'aide de la formule (4), on peut donc calculer le coefficient directeur de la droite faisant la relation entre la maturité M et l'écart type des différentiels de logarithme des différents V_M sur l'ensemble des dates t_i :

Afin de calculer le premier terme $\frac{\partial \sqrt{V_M}}{\partial M}$ dans la relation (5), on peut en calculer une approximation via la fonction suivante entre 2 maturités j :

$$\frac{\partial \sqrt{V_M}}{\partial M} \approx \frac{\sqrt{V_{M_{j+1}}} - \sqrt{V_{M_j}}}{M_{j+1} - M_j}$$

On obtient alors comme valeur :

$$a = 0.0003$$

PS : étant donné qu'il est nécessaire d'approximer $\sqrt{V_r}$, je pourrais obtenir une valeur du coefficient a pour chaque maturité mais ce n'est pas le but recherché, étant donné l'objectif d'une calibration de a et de sigma sur l'ensemble des maturités.

Une fois la valeur de a estimée, on va estimer la valeur de σ à l'aide d'une fonction de minimisation. En effet, d'après la formule (5), on connaît la valeur théorique de l'écart type de la fonction suivante : $\ln [P(t_i, t_i + M)] - \ln \left[\frac{P(t_{i-1}, t_i + M)}{P(t_{i-1}, t_i)} \right]$ et on peut la calculer empiriquement.

Ainsi, $\forall i$ on peut calculer la valeur empirique de la valeur suivante sur l'ensemble de l'historique pour chaque maturité M :

$$\widehat{\sqrt{V_M}} = \text{stdev} \left[\ln [P(t_i, t_i + M)] - \ln \left[\frac{P(t_{i-1}, t_i + M)}{P(t_{i-1}, t_i)} \right] \right]$$

En parallèle, on peut calculer la valeur théorique de $\sqrt{V_M}$ à l'aide de la valeur calibrée du retour à la moyenne a et d'une volatilité σ comme :

$$\sqrt{V_M} = \sqrt{B_M^2 \times V_r} = B_M \times \sqrt{V_R}$$

Par conséquent, pour chaque maturité M_j et chaque date t_i , on peut construire une fonction de minimisation suivante visant à estimer la valeur optimale de $\widehat{\sigma}$ en minimisant la somme pondérée de l'erreur au carré des variances empiriques et théoriques moyennées comme suit :

$$\widehat{\sigma} = \arg \min_{\sigma} \left\{ \sum_j \sum_i \frac{1}{M_j^2} \left(\widehat{\sqrt{V_M}} - \sqrt{V_M} \right)^2 \right\}$$

On peut alors optimiser cette fonction de minimisation non linéaire soit en utilisant des algorithmes avec contraintes ('SLSQP' & 'COBYLA') ou sans contraintes. Les résultats sont affichés dans le tableau suivant :

Method	Sigma	Somme_formula
<hr/>		
BFGS	0.002103	0.000001
CG	0.002103	0.000001
L-BFGS-B	0.002103	0.000001
Powell	0.002103	0.000001
Nelder-Mead	-0.002109	0.000001
TNC	0.002103	0.000001
COBYLA	0.002248	0.000002
SLSQP	0.002103	0.000001
Method	Sigma	Somme_formula
<hr/>		
COBYLA	0.000000	0.000220
SLSQP	0.002103	0.000001

Tableau 4 : Valeur de σ en fonction des différents modèles utilisés avec et sans contraintes

La valeur de σ qui ressort principalement est la suivante :

$$\sigma = 0.0021$$

4.6.5.2 Optimisation suivant la méthode 2

La seconde optimisation est plus directe et vise à optimiser conjointement les paramètres a et σ . Pour se faire, on utilise la fonction de minimisation suivante :

$$\widehat{(a, \sigma)} = \arg \min_{a, \sigma} \left\{ \sum_j \sum_i \frac{1}{M_j^2} \left(\widehat{\sqrt{V_M}} - \sqrt{V_M} \right)^2 \right\}$$

De même, on peut alors optimiser cette fonction de minimisation non linéaire soit en utilisant des algorithmes avec contraintes ('SLSQP' & 'COBYLA') ou sans contraintes. Les résultats sont affichés dans le tableau suivant :

Method	a	Sigma	Somme_formula
<hr/>			
BFGS	-0.003210	0.002006	0.000220
CG	-0.003062	0.002010	0.000220
L-BFGS-B	-0.003208	-0.002006	0.000220
Powell	-0.003207	0.002006	0.000220
Nelder-Mead	-0.003229	0.002005	0.000220
TNC	-0.003405	0.002001	0.000220
COBYLA	1.420853	-0.017002	0.000187
SLSQP	0.305143	0.006258	0.000198
Method	a	Sigma	Somme_formula
<hr/>			
COBYLA	2.236700	0.000000	0.000177
SLSQP	0.316917	0.005945	0.000198

Tableau 5 : Valeur de a et σ en fonction des différents modèles utilisés avec et sans contraintes

Les valeurs de a et σ qui ressort principalement sont les suivantes :

$$a = -0.003$$

$$\sigma = 0.0020$$

4.6.5.3 Choix du modèle d'optimisation

De par l'obtention de valeur de retour à la moyenne négative selon la méthode n°2, nous choisirons la méthode 1 qui permet d'obtenir des valeurs cohérentes de vitesse de retour à la moyenne.

Les valeurs retenues sont donc les suivantes :

$$a = 0.0003$$

$$\sigma = 0.0021$$

4.6.6 Diffusion du modèle Hull White 1 facteur

4.6.6.1 Discréétisation du taux court

Pour rappel, dans le modèle Hull-White à 1 facteur, la dynamique du taux court suit la diffusion suivante :

$$dr_t = (\theta_t - a \cdot r_t) dt + \sigma dW_t \quad (1)$$

Dans le document d'Andersen et Piterbarg « Interest Rate Modelling », ces derniers suggèrent de ne pas diffuser le taux court r_t , mais plutôt la fonction suivante :

$$x_t = r_t - f_M(0, t)$$

En effet, le calcul du taux *forward* instantané $f_M(0, t)$ implique de prendre des dérivés de la courbe. Le résultat dépendrait alors fortement de l'interpolation de la courbe de rendement. Afin d'éviter que l'interpolation ne vienne perturber la diffusion, via le changement de variable précédent, on peut obtenir l'EDS suivante :

$$\begin{cases} x_0 = 0 \\ dx_t = (y_t - a \cdot x_t) dt + \sigma dW_t \end{cases}$$

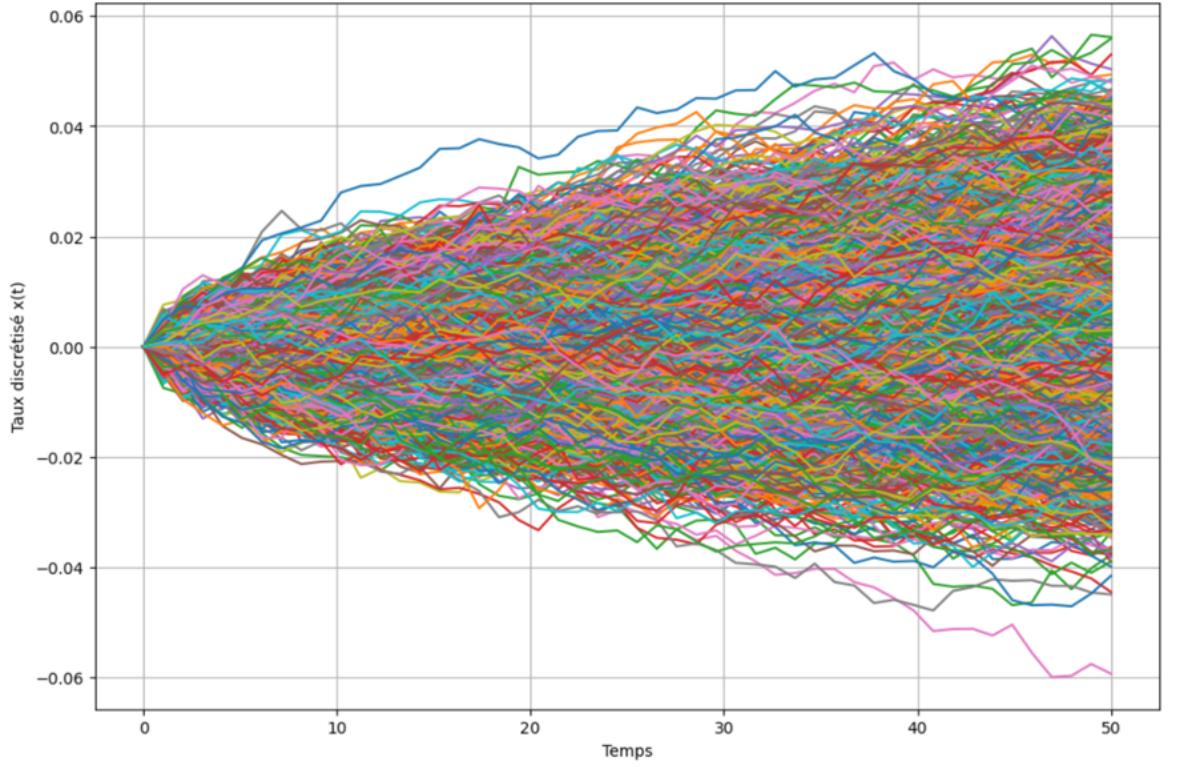
Avec $y_t = \frac{\sigma^2}{2a} (1 - e^{-2at})$

On peut alors discréteriser cette EDS à partir du schéma d'Euler. Ainsi, après discréétisation, on obtient, pour un pas de temps

$$\begin{cases} \Delta_t = 1 \text{ an} \\ Z \sim \mathcal{N}(0, 1) \end{cases}$$

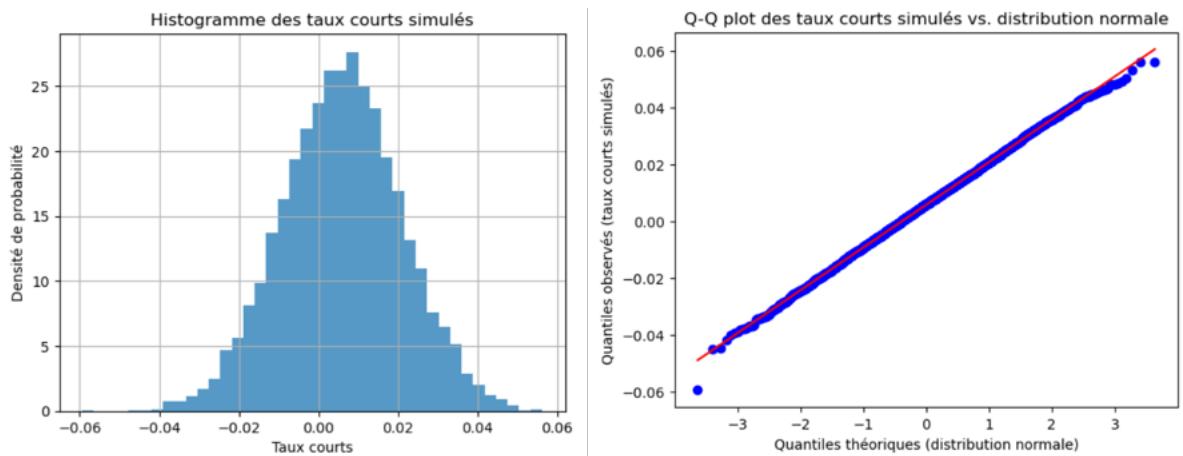
$$x_{t+\Delta_t} = x_t + (y_t - a \cdot x_t) \times \Delta_t + \sigma \times \sqrt{\Delta_t} \times Z$$

Sur la base de ce schéma d'Euler, on peut alors procéder à la simulation du taux x_t :



Graphique 14 : Diffusion stochastique du taux court du modèle Hull-White 1 Facteur (HW1F) dans le temps

Analysons maintenant sa distribution afin de s'assurer que celle-ci est normale :



Graphique 15 et 16 : Histogramme et QQ plot de la distribution des simulations des taux courts HW1F

Les tests de Shapiro-Wilk et de Agostino-Pearson nous confirment également la normalité de la distribution :

Tests de normalité	Statistique de test	p-value
Shapiro-Wilk	0.999	0.70
Agostino-Pearson	0.986	0.61

Tableau 6 : Résultats des test statistiques de la distribution

4.6.6.2 Obtention des simulations de taux d'actualisation

La valeur du prix de l'obligation zéro-coupon s'écrit comme :

$$P(t, T) = \frac{P(0, T)}{P(0, t)} \times e^{-\frac{1}{2} \cdot B(t, T)^2 \cdot y_t - B(t, T) \cdot x_t}$$

Avec :

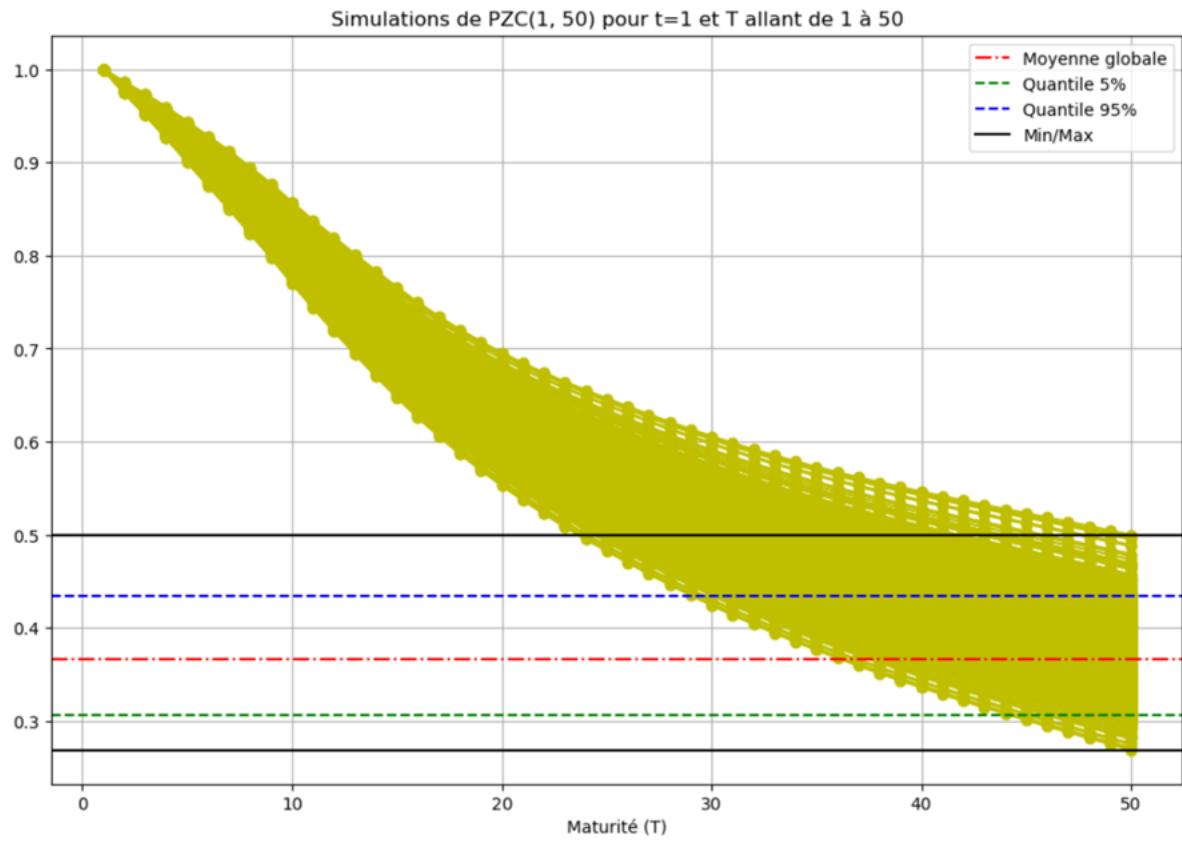
$$B(t, T) = \frac{1 - e^{-a(T-t)}}{a}$$

L'une des principales caractéristiques du modèle Hull-White est qu'il fait correspondre le marché à $t=0$. Cela signifie qu'à $t=0$, non seulement les prix des obligations à coupon zéro (à partir de zéro) ne dépendent pas de la volatilité, mais ils ne dépendent pas non plus du niveau de retour à la moyenne. Ces prix dépendent uniquement de la courbe zéro observée sur le marché.

Dans le cadre de ce mémoire, l'objectif est l'élaboration de différentes évolutions du taux d'actualisation pour les prochaines années, via les évolutions de prix des obligations zéro-coupons vues d'aujourd'hui $PZC(0, T)$ avec T correspondant aux différentes maturités souhaitées.

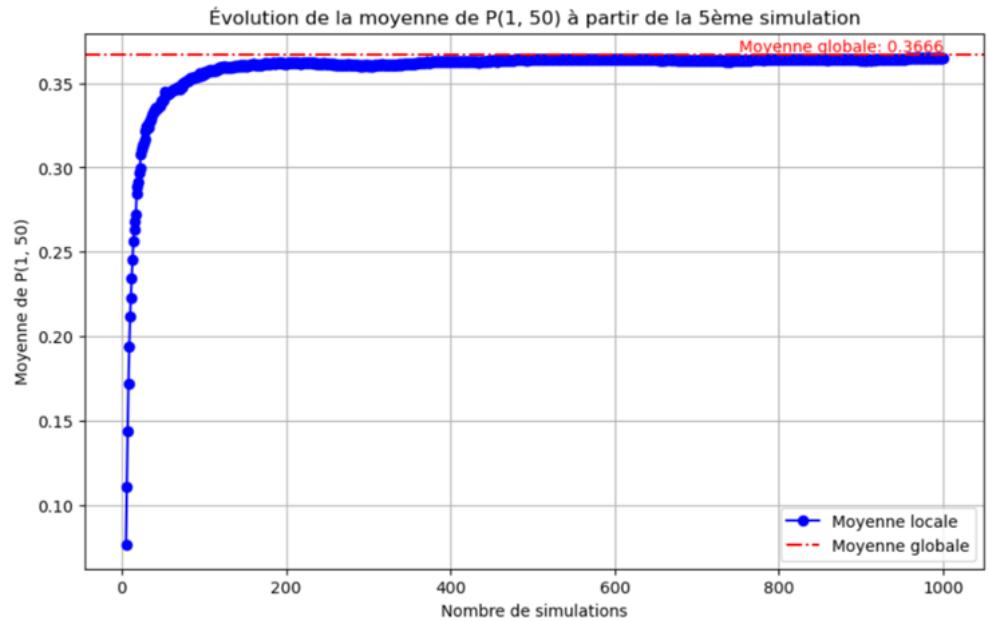
Néanmoins, de par la calibration du modèle en $t=0$ sur la courbe *forward*, l'application des différentes simulations du taux court ne permet pas de simuler plusieurs taux d'actualisations stochastiques différentes. Le taux à $PZC(1, T)$ est simulé pour introduire de l'aléa dans la courbe de discount (avec $T \geq 1$). On se place aujourd'hui : $PZC^{théorique}(0, T-1) = PZC^{réel}(1, T)$ avec $T \in [1; 50]$ et donc $PZC^{réel}(1, 1) = PZC^{théorique}(0, 0)$

Les simulations sont les suivantes pour les différents zéro-coupons :



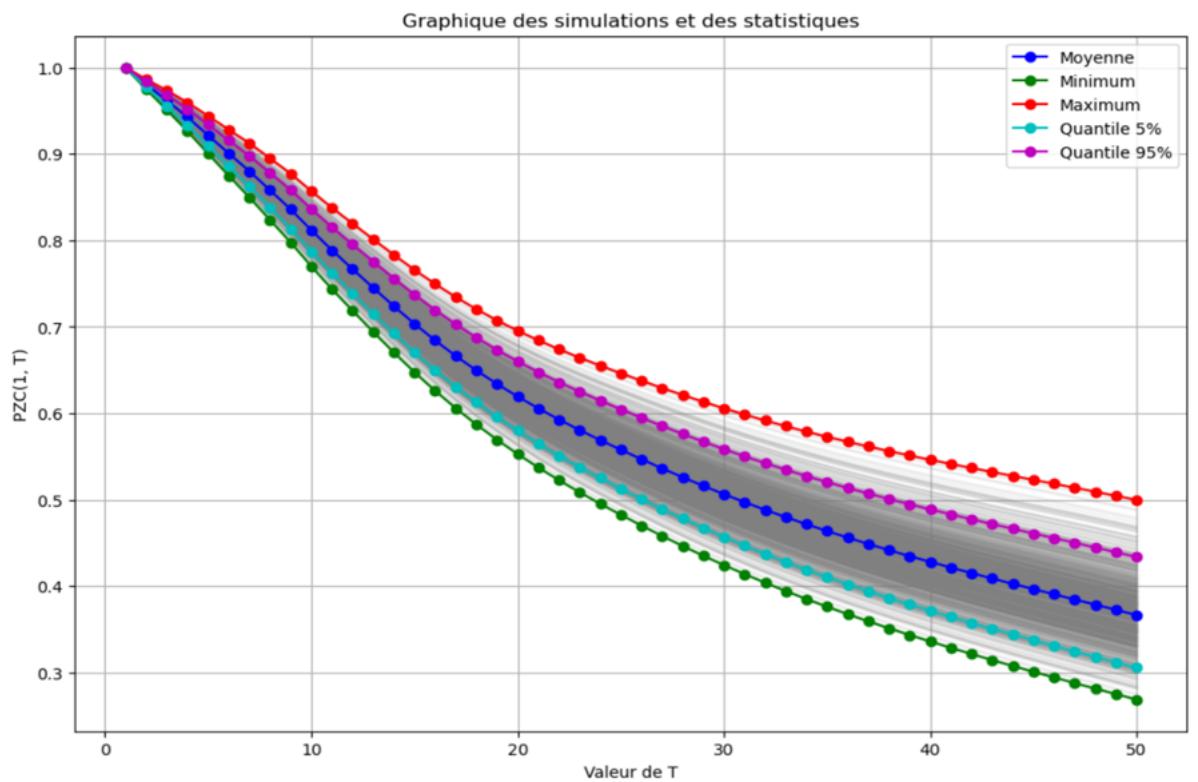
Graphique 17 : Diffusion stochastique des simulations des taux d'actualisations

Un test de convergence des simulations a été effectué. On remarque que la moyenne se stabilise vers 1000 simulations. On retiendra donc par la suite un nombre de 1000 simulations pour la modélisation.



Graphique 18 : Analyse de stabilisation du PZC(1,50) sur 1000 simulations

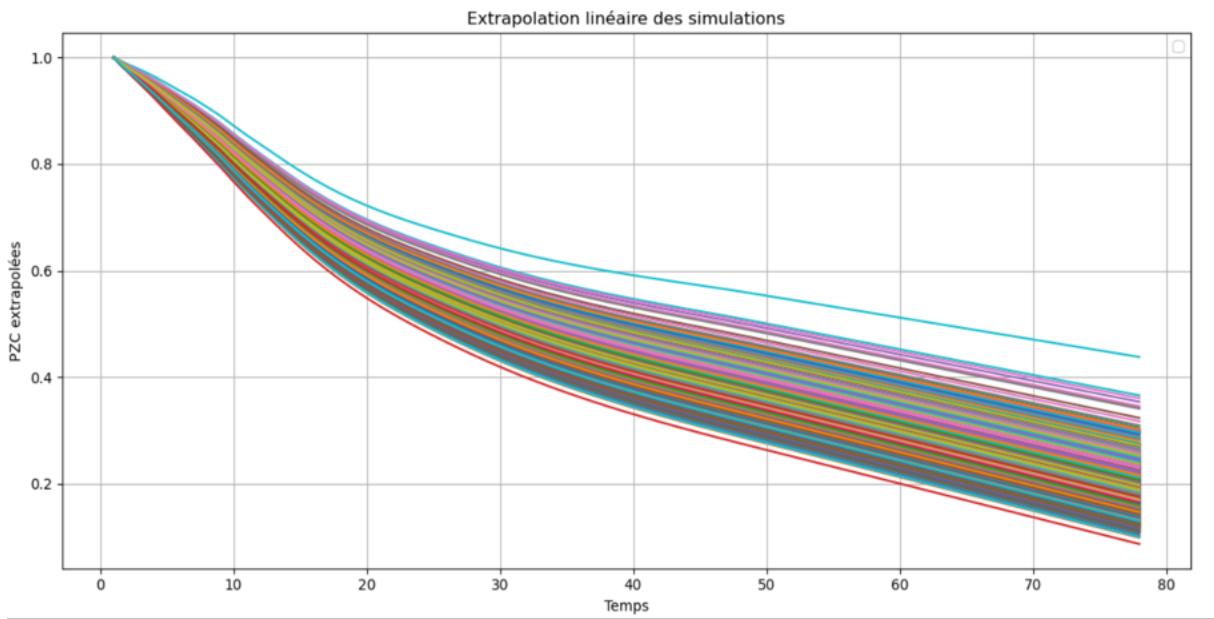
On peut également projeter l'ensemble des simulations dans le cône de simulation :



Graphique 19 : Analyse du cône de diffusion des simulations des taux d'actualisations jusqu'à 50 ans

4.6.6.3 Extrapolation des taux d'actualisation

L'objectif résidant dans une actualisation des flux jusqu'à 2100, on extrapolera linéairement les différentes simulations de taux d'actualisation sur 28 années supplémentaires jusqu'à 2100 :



Graphique 20 : Extrapolations des projections des taux d'actualisations jusqu'à 2100

Ces taux d'actualisations seront utilisés pour actualiser les différents flux pour chaque année t : $PZC(0, t)$

4.7 Module final de simulations de Monte-Carlo

A ce stade, nous disposons des différents éléments qui nous permettent de procéder aux simulations de Monte-Carlo, à l'aide de plusieurs boucles de codage. Le schéma suivant permet de se faire une idée du fonctionnement du code :

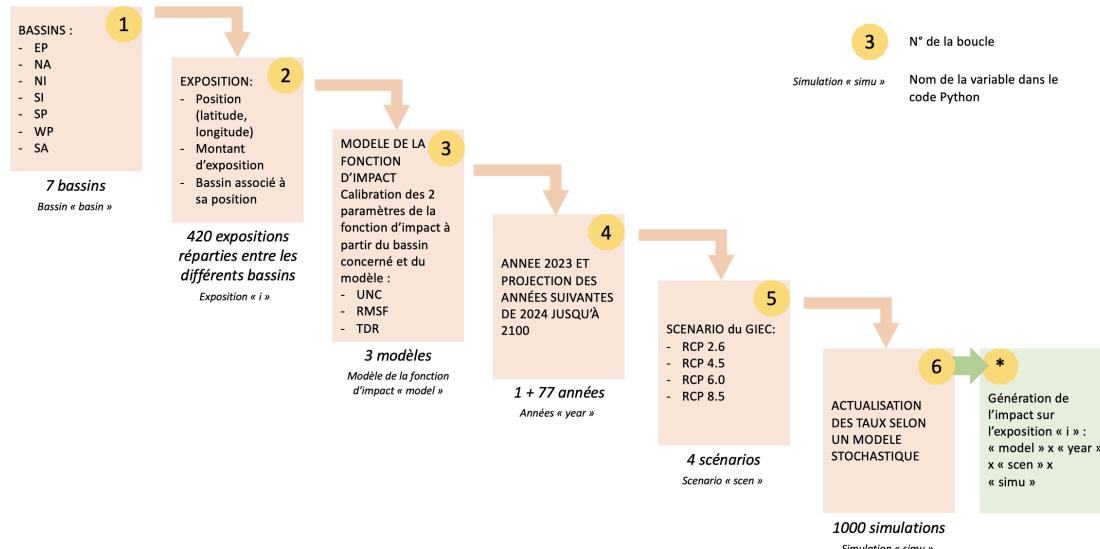


Image 10 : Schéma du fonctionnement du code du mémoire

Le fonctionnement du code suit alors la logique suivante :

1. La première boucle permet de sélectionner le bassin sur lequel on souhaite se concentrer. En effet, la récupération des données de cyclones au niveau de chaque bassin permet d'éviter de surcharger l'algorithme en lui fournissant des caractéristiques de cyclones absents dans la zone de positionnement des expositions.

Ainsi, sur la base de la période d'historiques des études scientifiques ayant permis de proposer une calibration des paramètres (i.e. 1982 – 2020), et de chaque bassin (il en existe 6), les informations historiques des différents cyclones sont récupérées.

Par exemple : dans la 1^{ère} boucle, le choix se portera sur la zone Nord Atlantique « NA » pour retrouver l'ensemble des caractéristiques des cyclones (intensité, catégorie associée à l'échelle de Saffir-Simpson²⁶...)

2. Une fois les caractéristiques des cyclones récupérées par zones, la construction de l'exposition peut être initiée. Dès lors, une 2^{ème} boucle permet de récupérer chaque ligne d'exposition (dont le montant de l'exposition) ainsi que les positions GPS préalablement définies. La fonction Centroid permet alors de générer un carré d'analyse autour de la position sur laquelle sera mesurée l'intensité du cyclone qui a sévi.

Par exemple : dans la 2^{ème} boucle, sera choisie l'exposition n°1 (parmi l'ensemble des expositions présentes dans notre portefeuille) qui contient le montant de valorisation au 29/12/2023, ainsi que son adresse.

3. Une fois ce travail préalable réalisé, il va s'avérer nécessaire d'impacter l'exposition à l'aide de la fonction d'impact. Comme explicité précédemment, cette fonction d'impact provenant d'Emanuel est susceptible d'évoluer selon le modèle de calibration, ainsi que selon la zone où se situe l'exposition. N'étant pas en capacité de vérifier quel est le meilleur modèle, on générera la visualisation de l'impact selon les 3 modèles de calibration (à l'aide d'une 3^{ème} boucle). A ce stade, 3 choix de modèle sont possibles pour chacune des zones où se situe l'exposition. Étant donné que ces zones constituent des "sous-zones" insérées dans des "macro-zones" utilisées dans l'étape 1 (bassin), un algorithme d'association de l'exposition à sa "sous-zone" selon sa position GPS a été développé, en se basant sur la classification utilisée par K. Emanuel.

Par exemple : dans la 3^{ème} boucle, j'associe d'abord l'exposition définie en (2) à sa sous-zone par rapport à sa position GPS. Puis sur la base de cette sous-zone, on récupère les 3 couples de paramètres (v_half et v_thresh) pour la sous-zone concernée selon le modèle 1, 2 et 3.

Une fois la fonction d'impact récupérée, le calcul d'impact historique sur l'exposition (définie en 1.) sur la base du carré « Centroid » (défini en 2.) à l'aide des 3 fonctions d'impact calibrées (définis en 3.) va être réalisé. De ce calcul va ressortir 2 informations :

- La fréquence d'observation des sinistres. Donc chaque cyclone de la zone définie en (1) aura une fréquence de 1/(période d'observation).
- L'impact sur l'exposition (résultat de la fonction d'impact en % x Montant de l'exposition)

Le montant d'impact sur l'exposition issu de ce processus, correspond donc à un impact théorique (en date du 29/12/2023) qui aurait été causé par un historique des sinistres sur la période de 1982 à 2023. In fine, sur la base la fréquence et du montant de sinistre par cyclone, il en ressort un montant cumulé de sinistre en 2023.

Par exemple : pour la première exposition, on obtiendra pour chaque cyclone de la zone définie en (1), les montants des impacts (selon les 3 scénarios de calibration de la fonction d'impact) ainsi que la fréquence de chaque cyclone identique pour tous les cyclones étant donné que la période d'observation est fixe : 1/période d'observation.

²⁶L'échelle de Saffir-Simpson classe les ouragans en cinq catégories, de 1 (le moins intense) à 5 (le plus intense), en fonction de la vitesse du vent et des dommages potentiels, allant de dégâts modérés à catastrophiques.

4. Ainsi, à ce stade, pour chaque exposition, l'impact théorique annuel (sur la base de la fréquence et de l'intensité historique) peut être estimé. Lors de l'étape suivante, l'idée de cette nouvelle boucle est d'estimer comment pourrait évoluer ce montant de sinistre annuel estimé en 2023 pour les années futures en tenant compte du réchauffement climatique (impactant à la fois la fréquence ainsi que l'intensité selon différents scénarios et selon la zone où est l'exposition). Ainsi, à l'aide d'un module d'extrapolation au sein de Climada, cela nous permet d'interpoler la fréquence ainsi que l'intensité des sinistres entre 2020 et 2100 (sur les 3 autres scénarios RCPs du GIEC) sur la base des valeurs terminales proposées par le scientifique sur la base du scénario RCP4.5 proposé par le GIEC.

Dans le code, 3 boucles intriquées vont donc permettre d'obtenir un montant d'impact sur chaque exposition selon [année x paramètre calibration x scenario GIEC]

Par exemple : pour la première exposition, on obtiendra pour chaque cyclone de la zone définie en (1), les montants de 12 impacts choqués par la fonction d'impact (selon les 3 scénarios de calibration de la fonction d'impact x les 4 scénarios du GIEC) ainsi que la fréquence choquée (selon les 3 scénarios de calibration de la fonction d'impact x les 4 scénarios du GIEC) pour chaque année spécifiée entre 2024 et 2100. Ainsi, à l'aide de la fonction d'impact et de la fréquence une estimation de l'évolution de l'impact annuel théorique pour chaque année et pour chaque couple [GIEC x Calibration] va pouvoir être reconstruite.

5. L'ensemble des simulations futures des impacts annuels au-delà de 2023 selon [année x paramètre calibration x scenario GIEC] calculées lors de l'étape précédente doivent être ré-évaluées en date d'aujourd'hui (31/12/23). Pour se faire, sur la base des simulations stochastiques du modèle HW introduites afin d'apporter de l'aléa, 1000 simulations de taux zéro coupons et donc de taux d'actualisation ont été réalisées. Une nouvelle boucle est donc proposée pour actualiser chaque année (de 2024 à 2100) les montants annuels selon 1000 scénarios différents et obtenir des montants d'impacts annuels actualisés en date d'aujourd'hui.

Par exemple : pour obtenir l'estimation de la valeur actualisée de l'impact [« 2030 » x « UNC » x « 8.5 »], l'exposition va être actualisée à l'aide du PZC (0,30) selon les 1000 simulations puis en faire la moyenne. En effet, comme cet impact théorique aura lieu en 2030, il me faut l'actualiser en date d'aujourd'hui afin de pouvoir la comparer aux autres impacts ayant lieu à des dates différentes.

6. Ainsi, au sein du code, chaque impact va être calculé à l'aide de différentes boucles. Chaque impact aura donc un bassin x calibration x année x scénario GIEC différent :

- a. Bassins des cyclones (basin in *basins*) :
 - i. EP
 - ii. NA
 - iii. NI
 - iv. SI
 - v. SP
 - vi. WP
 - vii. SA
- b. Expositions (i in nbr_expo)
 - i. De 1 à 1000
- c. Calibration de la fonction d'impact (model in scen_v_half)
 - i. UNC
 - ii. RMSF
 - iii. TDR

d. Années projetées (year in year_proj)

- i. De 2023 (historique du passé – pas de simulation dessus / point de départ)
- ii. 2024 -> 2100 (simulations futures)

e. Scénarios du GIEC (scen in scenarios_clim):

- i. RCP 2.6
- ii. RCP 4.5
- iii. RCP 6.0
- iv. RCP 8.5

On obtient alors une matrice contenant pour chaque bassin (6 matrices au total) :

- Lignes : les i expositions (nbr_expo)
- Colonnes (927):
 - Exposition Historique 2023 selon model : UNC (1)
 - Exposition Historique 2023 selon model : RMSF (1)
 - Exposition Historique 2023 selon model : TDR (1)
 - Expositions Simulées [year x model x scen] (77 x 3 x 4)
 - a. On va ensuite analyser l'ensemble des résultats au sein des 3 scénarios de calibration de la fonction d'impact (model). Ainsi on va obtenir pour chaque bassin (6 matrices au total) :
- Pour chaque impact (de chaque modèle de calibration) dans la matrice de [exposition x year x scen], on faire la somme de chaque colonne (77 x 4 + 1) afin d'obtenir un montant total d'impact sur l'ensemble des expositions de chaque model qu'on va ensuite actualiser au sein des 3 data frames :
 - df_TCD_1 pour le scénario UNC
 - df_TCD_2 pour le scénario RMSF
 - df_TCD_3 pour le scénario TDR

Puis on va actualiser les flux sur toute la période (2023 – 2100) selon les 1000 scénarios de DF puis en faire la moyenne pour chaque année afin d'obtenir un total d'impact moyen sur l'ensemble des simulations de taux d'actualisation. La matrice va donc devenir un vecteur pour chaque bassin (7 vecteurs au total).

5 Résultats de l'analyse et introduction d'une « green value »

Le but initial de ce mémoire est d'estimer l'impact physique climatique issu des cyclones tropicaux sur un portefeuille d'actifs financiers (en l'occurrence des garanties bancaires), en prenant en compte différents scénarios climatiques envisagés par le GIEC.

Les simulations futures d'impacts financiers projetées par le modèle répondent donc à cette problématique. Néanmoins, l'étape suivante consiste à quantifier la "vraie valeur" de l'actif financier (*fair value*) sous le prisme climatique (*green value*) via un retraitement de la valeur actuelle de l'actif en y soustrayant l'impact physique climatique actualisé calibré selon la zone géographique concernée, le scénario climatique retenu, ainsi que le modèle de calibration de la fonction d'impact choisi (**Méthode 1**).

Une autre manière de représenter cet impact physique climatique consiste à appliquer un *spread climatique* à une courbe d'actualisation, telle que celle des zéro-coupon de l'EIOPA, utilisée sur les marchés financiers. Ce *spread climatique* vient s'ajouter à la courbe d'actualisation "sans risque" qui sert à actualiser les flux futurs, en tenant compte du risque physique climatique. Il représente ainsi la portion du risque climatique qui réduit la valeur actuelle des flux futurs générés par une exposition située dans une zone à risque. Ce *spread climatique* est donc calibré en fonction de la zone géographique concernée, du scénario climatique retenu, ainsi que du modèle de calibration de la fonction d'impact choisi, permettant ainsi une évaluation précise et contextuelle du risque physique climatique (**Méthode 2**).

La première méthode consiste donc à actualiser l'ensemble des flux d'impacts futurs, de 2024 à 2100, en utilisant les simulations stochastiques de la courbe d'actualisation. Cette actualisation permet de calculer un montant d'impact total en valeur actuelle ($t=0$), que l'on peut rapporter à la valeur actuelle de la garantie afin d'obtenir un pourcentage d'impact. En retranchant ce montant de la valeur actuelle de la garantie, on reflète alors une nouvelle valeur de la garantie (en date d'arrêté) reflétant sa « green value »²⁷ en tenant compte de l'impact physique climatique des cyclones.

La seconde méthode proposée dans ce mémoire implique l'ajustement de la courbe de discount, via l'introduction d'un *spread climatique* constant sur toute la courbe d'actualisation. En finance, les courbes d'actualisation permettent de refléter la valeur temporelle de l'argent en tenant compte des taux d'intérêt, et dans ce cadre, elles peuvent être ajustées pour refléter des risques supplémentaires. L'introduction d'un *spread* constant sur la courbe d'actualisation permet d'augmenter ou de réduire les taux de discount utilisés pour actualiser les flux futurs, modifiant ainsi la valeur actualisée.

L'objectif ici est d'ajuster cette courbe de manière à ce que la valeur dite "choquée" (intégrant l'impact des risques ou des événements futurs) soit égale à la valeur actuelle non choquée. Cet ajustement reflète la prise en compte du risque de manière intégrée dans les taux d'actualisation, à contrario d'un calcul de montant d'impact explicite sur la valeur présente de la garantie, comme dans la première méthode.

Que ce soit dans la cadre de la première vision de l'impact physique climatique (pourcentage d'impact physique) ou de la seconde (spread sur la courbe de discount), les simulations permettent d'obtenir un impact par « région x modèle de calibration x scénario climatique ».

Ainsi, une fois calibré le modèle permet d'ajuster l'ensemble des garanties (actuelles ou futures) présentent dans une région (via les coordonnées GPS) en appliquant le 'pourcentage d'impact' (**Méthode 1**) ou en choquant la courbe d'actualisation utilisée pour actualiser des futurs cash-flows générés par une garantie dans une région (**Méthode 2**).

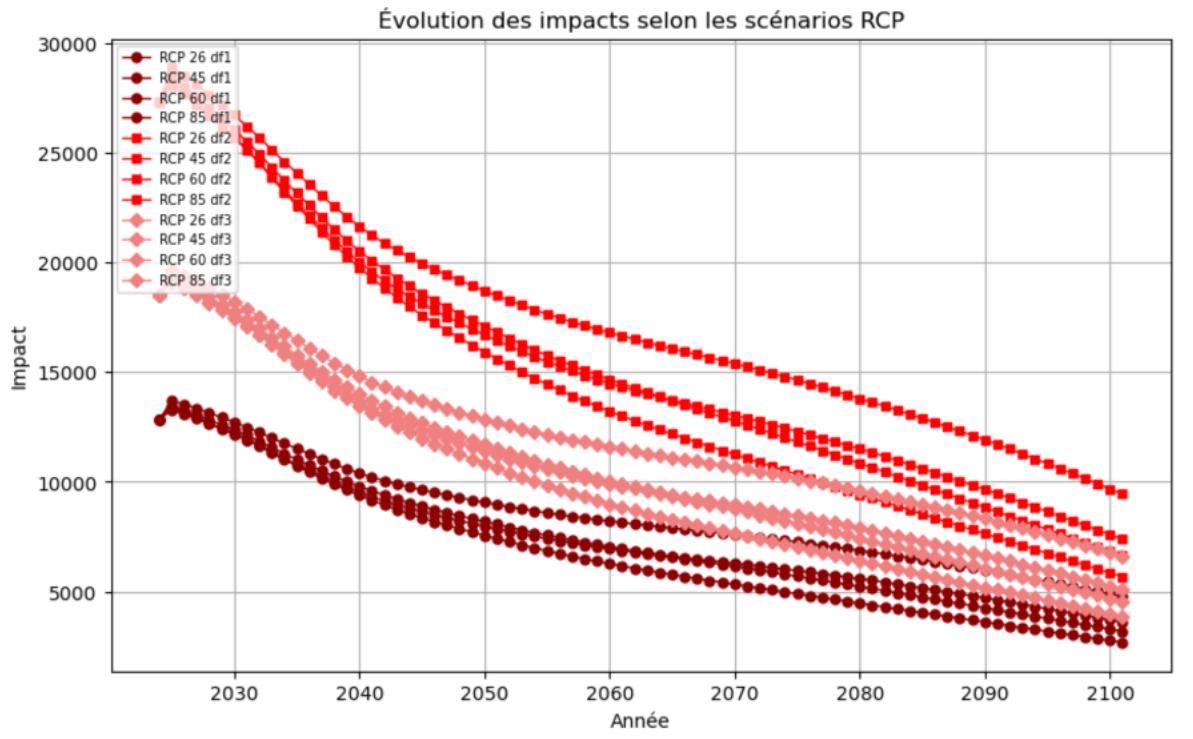
5.1 Impact physique actualisé

A l'issue des simulations, on obtient l'évolution dans le temps des différentes valeurs actualisées²⁸ des impacts financiers physiques climatiques selon le triplet : « région x modèle de calibration x scénario climatique ».

Ci-dessous l'exemple pour la région « North Atlantique » (NA) :

²⁷L'introduction de ce terme dans le cadre de ce mémoire permet d'apporter un parallèle avec la « fair value » de marché utilisée pour refléter la valeur actuelle d'un produit financier via l'actualisation de ses flux futurs.

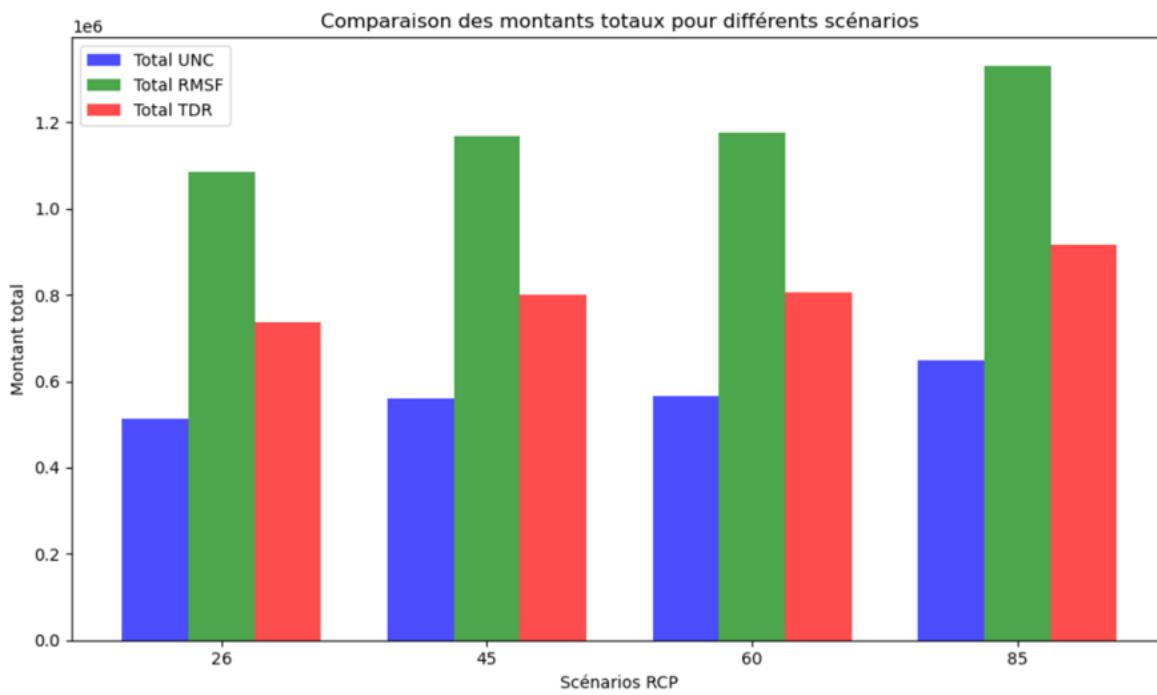
²⁸Les montants sont déjà actualisés



Graphique 21 : Évolution des impacts financiers actualisés pour la région « NA »

Dans ce graphique (df1 = modèle UNC, df2 = modèle RMSF et df3 = modèle TDR), on visualise ici les évolutions d'impacts annuels (issus du modèle de combinaison de fréquence et d'intensité des sinistres) selon le modèle de calibration de la fonction d'impact (couleur différente), le scénario climatique (RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 6.0 et RCP 8.5) pour la zone NA.

Afin de se faire une idée du montant final de l'impact sur l'ensemble des garanties dans cette région, selon le modèle et le scénario climatique sélectionnés, ce graphique permet de comparer la somme des impacts actualisés pour l'ensemble des garanties de la région. Le modèle créé permet également de travailler à un niveau plus granulaire au niveau de chaque exposition. Si les évolutions en termes de fréquence et d'intensité pour les scénarios climatiques RCP 4.5 et 6.0 sont assez proches - ce qui engendre des impacts assez similaires -, on remarque toutefois de fortes disparités au sein de chaque scénario climatique entre les modèles de calibration retenus. En effet, comme indiqué dans la section 4.3.1, la fonction d'impact calibrée à l'aide du modèle RMSF est plus agressive, car plus sensible sur des vitesses cycloniques même moyennes. Ainsi, il est logique d'obtenir des montants d'impacts plus importants sur ce modèle.



Graphique 22 : Histogramme des montants totaux d'impacts financiers sur le portefeuille de garanties pour la région « NA » selon les scénarios climatiques RCPs et le modèle de calibration retenu

Dès lors, selon le modèle choisi, on peut obtenir la valeur à impacter sur son portefeuille de garanties selon le scénario RCP de son choix (plus ou moins conservateur) et un modèle de calibration (plus ou moins pénalisant).

A l'issue du "run" effectué sur l'ensemble des simulations, voici les résultats des montants d'impacts actualisés (en euros) obtenus par région x scénario RCP x Modèle de calibration pour le portefeuille concerné avec la somme des valorisations des garanties par région.

Région	Scénario RCP	Modèle UNC	Modèle RMSF	Modèle TDR	Encours
EP	2.6	109 400	230 143	152 006	4 300 000
	4.5	183 894	374 883	251 399	4 300 000
	6.0	197 843	398 800	268 635	4 300 000
	8.5	400 470	760 779	525 309	4 300 000
NA	2.6	511 797	1 078 651	734 318	6 200 000
	4.5	557 120	1 162 938	795 126	6 200 000
	6.0	561 472	1 170 680	800 849	6 200 000
	8.5	645 117	1 322 419	911 628	6 200 000
NI	2.6	40 559	109 642	50 654	4 800 000
	4.5	41 405	112 132	51 728	4 800 000
	6.0	41 467	112 313	51 806	4 800 000
	8.5	42 865	116 429	53 582	4 800 000
SI	2.6	423 396	2 372 711	1 379 750	5 400 000
	4.5	441 220	2 412 184	1 414 733	5 400 000
	6.0	442 340	2 412 372	1 416 051	5 400 000
	8.5	469 966	2 453 162	1 462 388	5 400 000

Région	Scenario				
	RCP	Modèle UNC	Modèle RMSF	Modèle TDR	Encours
SP	2.6	375 263	1 542 653	648 492	6 500 000
	4.5	283 545	1 177 214	491 177	6 500 000
	6.0	276 888	1 150 692	479 760	6 500 000
	8.5	125 277	546 622	219 718	6 500 000
WP	2.6	1 918 780	895 524	93 425	12 700 000
	4.5	2 062 424	963 444	100 129	12 700 000
	6.0	2 070 099	967 276	100 428	12 700 000
	8.5	2 275 306	1 065 593	108 999	12 700 000
SA ²⁹	2.6	-	-	-	-
	4.5	-	-	-	-
	6.0	-	-	-	-
	8.5	-	-	-	-
DZ ³⁰	-	-	-	-	2 100 000

Tableau 7 : Tableau des montants totaux d'impact actualisés par région x scénario x modèle

Ainsi, le modèle, une fois exécuté fourni le montant actualisé d'impact (schéma de Monte-Carlo effectué sur l'ensemble des simulations de taux) pour les garanties financières se situant dans chaque zone (EP, NA, NI, SI, SP, WP, SA et DZ), pour chaque scénario RCP (2.6, 4.5, 6.0 et 8.5) et selon le modèle de fonction d'impact choisi (UNC, RMSF et TDR).

Le tableau ci-dessus présente les résultats de cette analyse et indique également le montant d'encours total des garanties financières situées dans une zone donnée et valorisées à la date de simulation (29/12/2023). Ces résultats répondent donc directement à la problématique initiale de ce mémoire - estimation du risque physique climatique lié aux cyclones tropicaux sur un portefeuille de garanties immobilières - en permettant d'estimer l'ampleur des impacts sur les garanties bancaires dans diverses régions géographiques et sous plusieurs scénarios de changement climatique.

En intégrant ces projections à partir de données météorologiques historiques et de données spécifiques aux garanties, la modélisation renforce la capacité des banques à mieux intégrer les risques climatiques physiques dans leur stratégie de gestion et de conformité, conformément aux recommandations de l'EIOPA.

5.2 Introduction du spread climatique

Dans l'hypothèse selon laquelle l'évaluation de notre portefeuille de garanties soit obtenue comme suit :

$$Valo_{2023} = \sum_{t=0}^{77} CF_t \times PZC(0, t)$$

$$Valo_Clim_spread_{2023} = \sum_{t=0}^{77} CF_t \times PZC(0, t) \times (1 + choc)$$

Il serait nécessaire de calibrer le choc afin d'obtenir le montant $Valo_Clim_{2023}$ qui ressort de notre modèle, calculé sans impact sur la courbe ZC. Avec :

$$Valo_Clim_{2023} = \sum_{t=0}^{77} impact\ actual_t = \sum_{t=0}^{77} impact_t \times PZC(0, t)$$

²⁹Pour rappel, le portefeuille de garanties ne contenait pas d'expositions dans cette zone. Il n'y a donc pas d'impact.

³⁰Cette zone est la *Defaulting Zone* où les expositions du portefeuille ont été consolidées, mais qui n'est pas concernée par une zone où des cyclones sont présents.

L'équation finale permettant d'établir l'importance du choc, s'établirait, par conséquent, de la façon suivante :

$$Valo_Clim_spread_{2023} = Valo_Clim_{2023}$$

$$\Leftrightarrow choc = \frac{\sum_{t=0}^{77} impact_t \times PZC(0, t)}{\sum_{t=0}^{77} CF_t \times PZC(0, t)} - 1 = \frac{\sum_{t=0}^{77} impact_t \times PZC(0, t)}{Valo_{2023}} - 1$$

A l'aide de cette fonction, il est possible d'en déduire une valeur de choc à appliquer sur la courbe de discount selon [bassin x model x scenario]. Une fois ces chocs implicités, on obtient le tableau suivant :

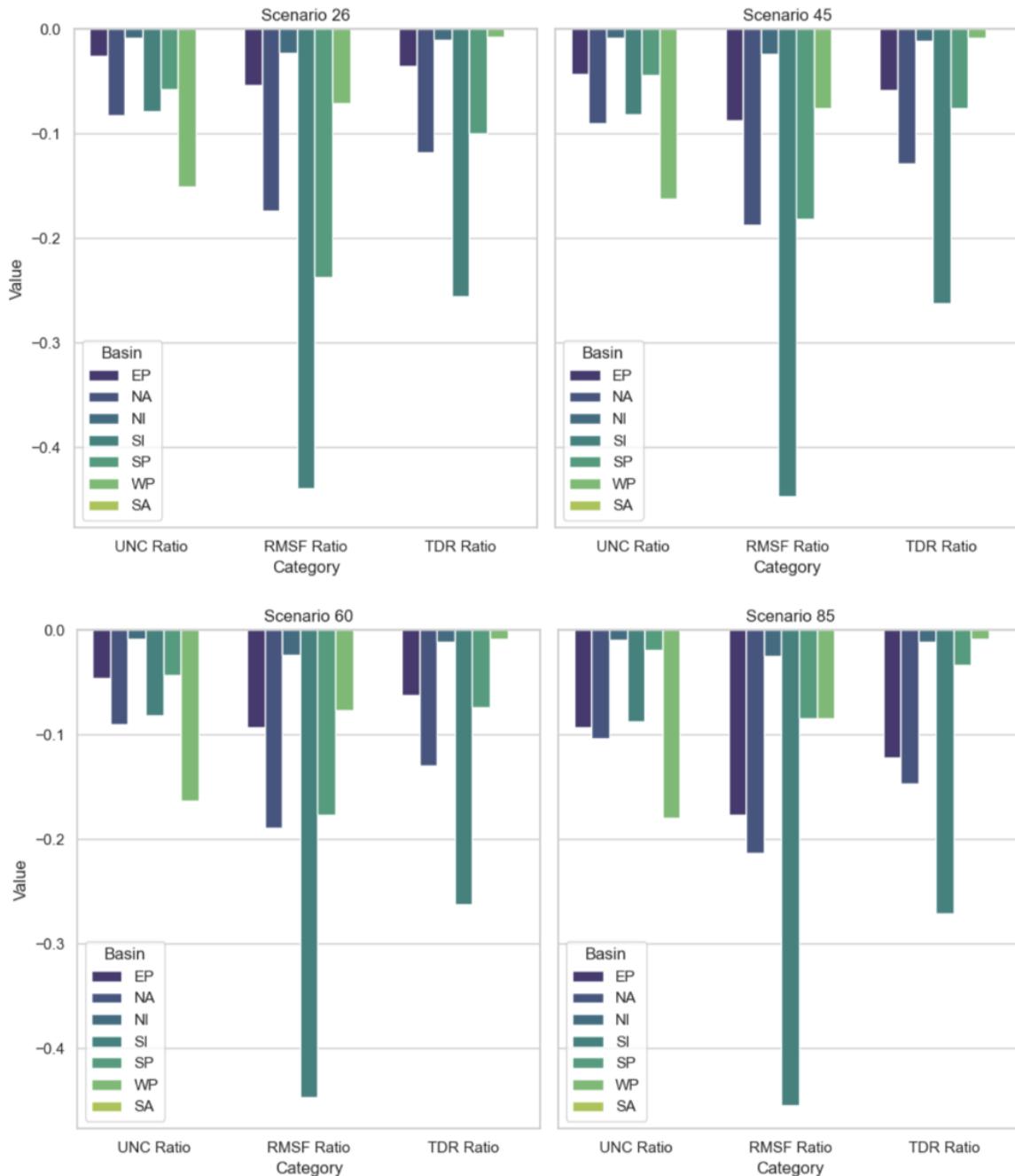
Région	Scenario RCP	Choc UNC	Choc RMSF	Choc TDR
EP	2.6	-2,54%	-5,35%	-3,54%
	4.5	-4,28%	-8,72%	-5,85%
	6.0	-4,60%	-9,27%	-6,25%
	8.5	-9,31%	-17,69%	-12,22%
NA	2.6	-8,25%	-17,40%	-11,84%
	4.5	-8,99%	-18,76%	-12,82%
	6.0	-9,06%	-18,88%	-12,92%
	8.5	-10,41%	-21,33%	-14,70%
NI	2.6	-0,84%	-2,28%	-1,06%
	4.5	-0,86%	-2,34%	-1,08%
	6.0	-0,86%	-2,34%	-1,08%
	8.5	-0,89%	-2,43%	-1,12%
SI	2.6	-7,84%	-43,94%	-25,55%
	4.5	-8,17%	-44,67%	-26,20%
	6.0	-8,19%	-44,67%	-26,22%
	8.5	-8,70%	-45,43%	-27,08%
SP	2.6	-5,77%	-23,73%	-9,98%
	4.5	-4,36%	-18,11%	-7,56%
	6.0	-4,26%	-17,70%	-7,38%
	8.5	-1,93%	-8,41%	-3,38%
WP	2.6	-15,11%	-7,05%	-0,74%
	4.5	-16,24%	-7,59%	-0,79%
	6.0	-16,30%	-7,62%	-0,79%
	8.5	-17,92%	-8,39%	-0,86%
SA ³¹	2.6	-	-	-
	4.5	-	-	-
	6.0	-	-	-
DZ ³²	8.5	-	-	-
	-	-	-	-

Tableau 8 : Tableau des chocs climatiques par région x scénario x modèle

³¹Pour rappel, le portefeuille de garanties ne contenait pas d'expositions dans cette zone, il n'y a donc pas d'impact.

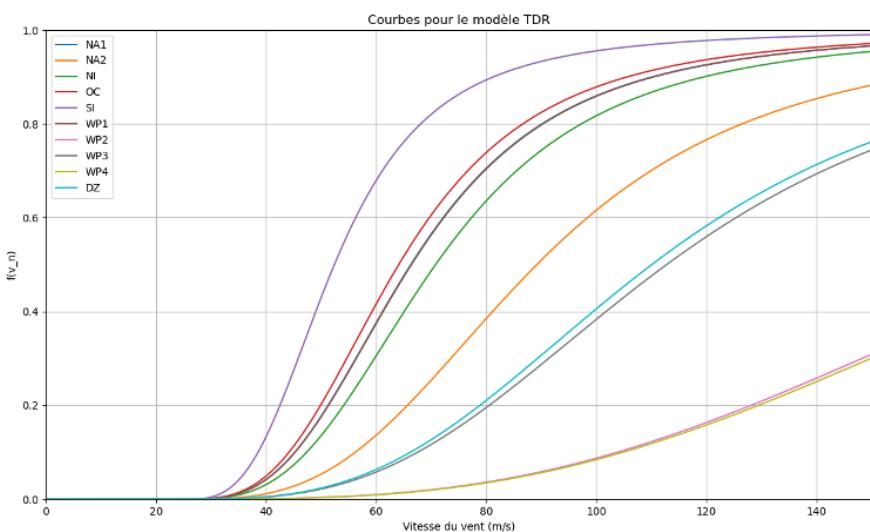
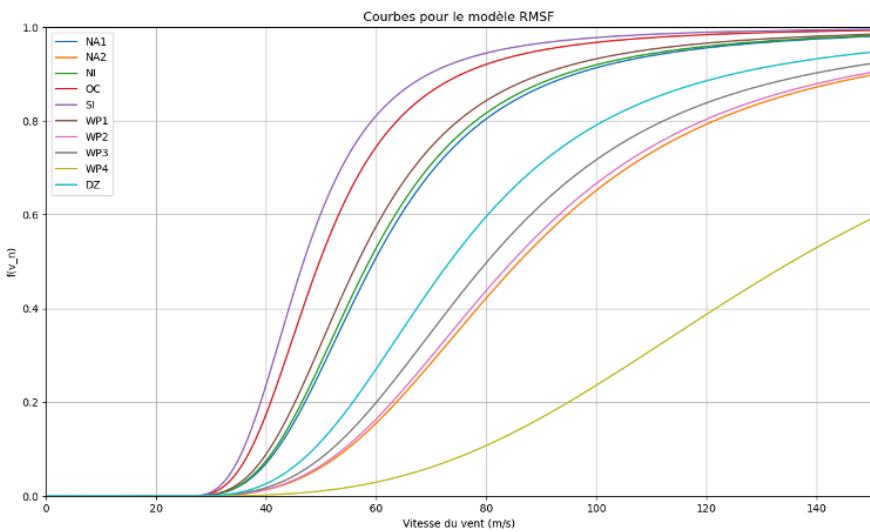
³²Cette zone est la *Defaulting Zone* où les expositions du portefeuille ont été consolidées, mais qui n'est pas concernée par une zone où des cyclones sont présents.

On peut alors en déduire ce graphique :



Graphique 23 : Graphique des chocs climatiques par région x scénario x modèle

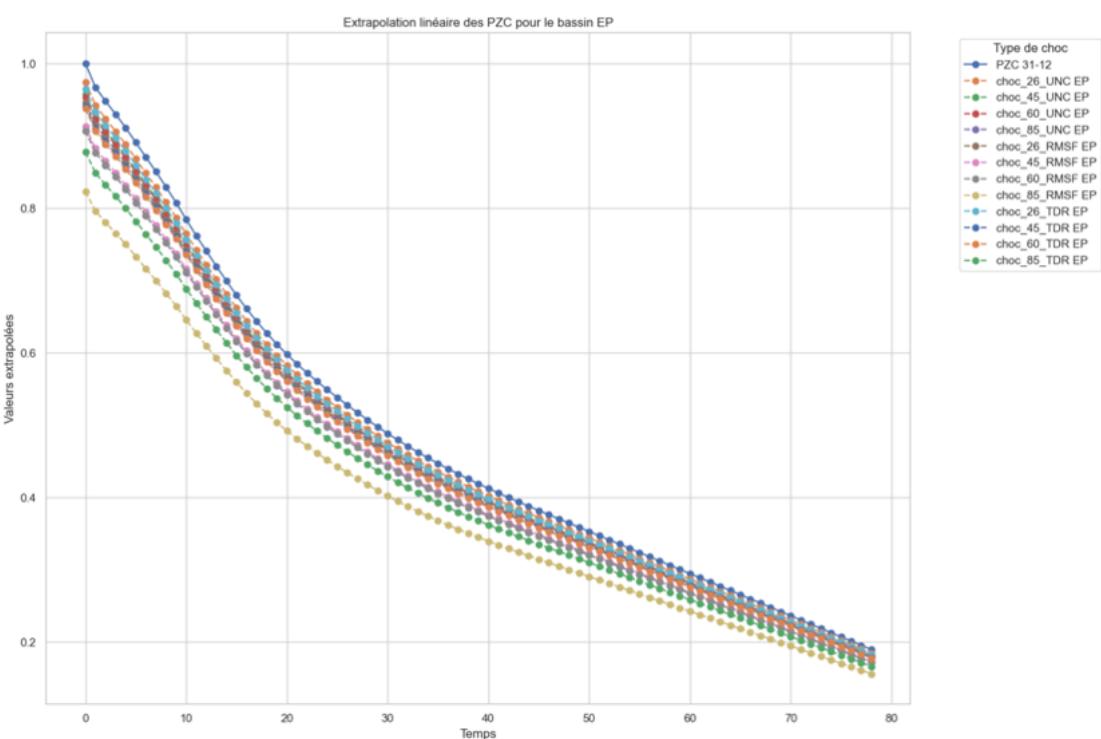
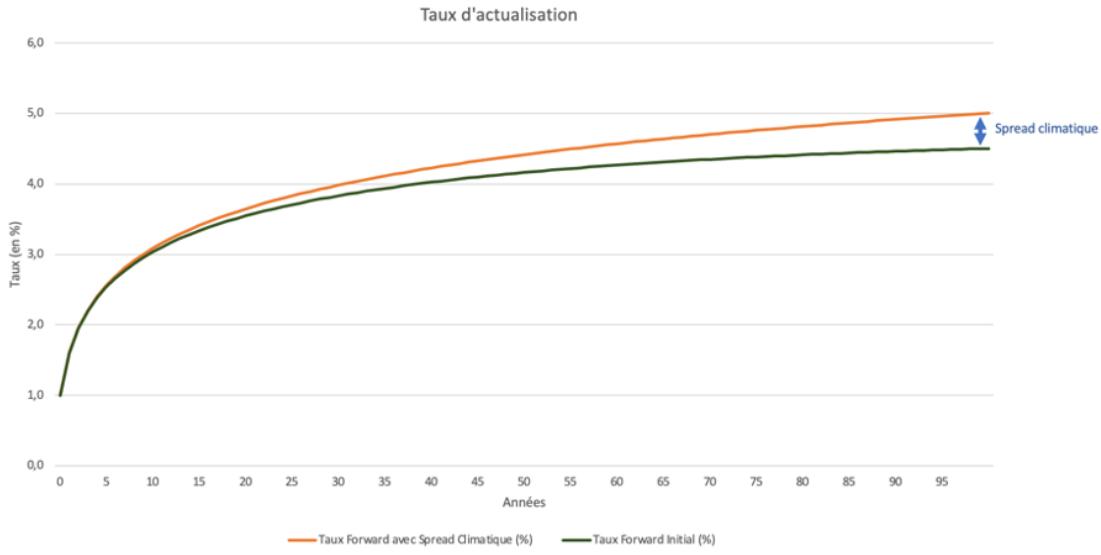
On constate que, comparativement au montant d'exposition, les impacts les plus élevés se concentrent dans la région "SI" (South Indian), notamment lorsque les modèles d'impact RMSF ($\sim 45\%$) ou TDR ($\sim 25\%$) sont appliqués. Cela est logique, car ces modèles d'impact atteignent la valeur de v_{half} (vitesse du vent pour laquelle l'impact est estimé à 50 % de l'exposition) plus rapidement que les autres. Les valeurs spécifiques de v_{half} pour les modèles RMSF et TDR sont rappelées ci-dessous en mauve.



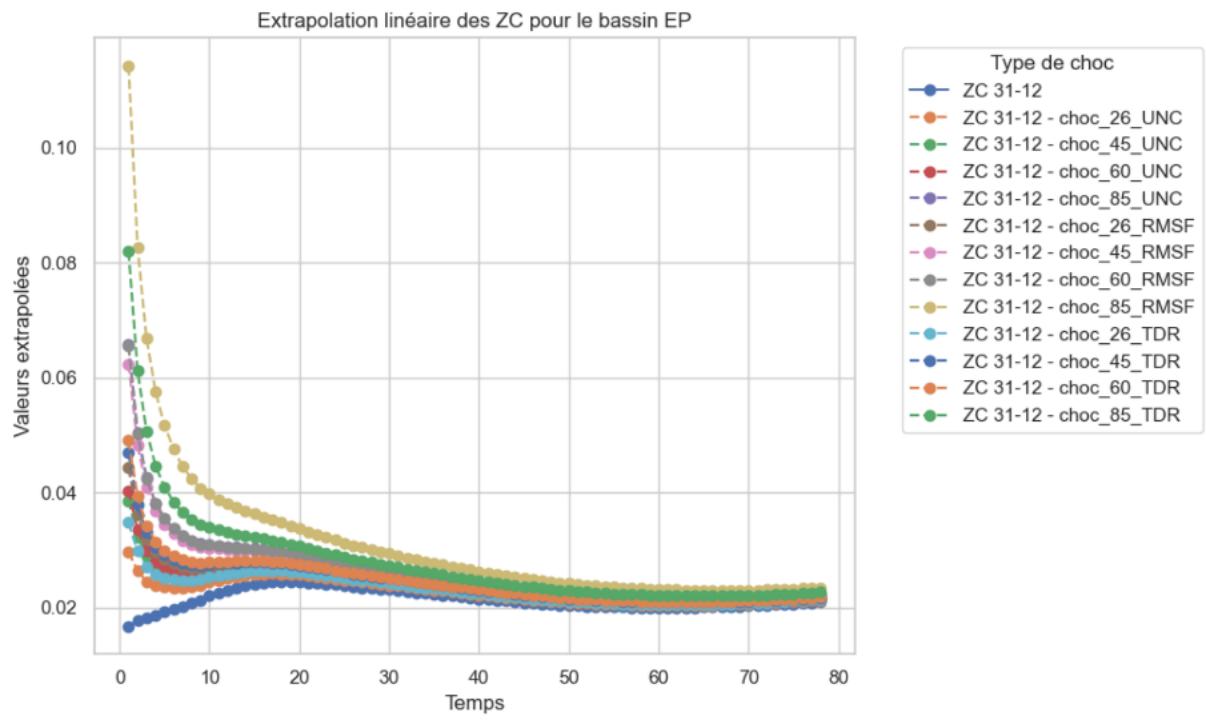
Graphique 24 : Comparaison des fonctions d'impacts et zoom sur la région « SI »

Les différents chocs une fois obtenus, on peut alors impliciter la courbe des ZC choquée à partir de la première année, afin de prendre en compte la déformation sur le portefeuille de garanties.

De ce fait, l'idée est de calculer ce choc (spread climatique) afin d'obtenir pour une région donnée, la courbe des taux *forward* climatique proposée comme dans l'exemple ci-dessous :



On peut par la suite également ré-impliciter la courbe *forward* sous-jacente à partir de la courbe d'actualisation :



Graphique 27 : Courbe de taux ZC initiale vs courbe avec spread physique

Ainsi, en ajoutant un *spread climatique*, les taux de discount employés pour actualiser les flux futurs augmentent ou diminuent, influençant ainsi la valeur actualisée. L'objectif est ici de calibrer la courbe de façon à ce que la valeur « choquée » (qui intègre l'impact de risques ou d'événements futurs) corresponde exactement à la valeur actuelle sans choc. Cette approche permet de prendre en compte le risque de manière intégrée dans les taux d'actualisation, plutôt que d'estimer un montant d'impact spécifique sur la valeur présente de la garantie, comme c'est le cas dans la première méthode.

Dès lors, cette méthode permettra d'actualiser les flux de trésorerie futurs provenant d'actifs financiers présents dans des régions spécifiques (et donc exposés aux risques climatiques de la zone), en fonction du scénario climatique sélectionné. En ajustant la courbe d'actualisation par le *spread climatique* calibré selon le modèle choisi (UNC, RMSF, TDR), il sera ainsi possible de moduler les taux de discount pour chaque scénario climatique selon la zone dans laquelle il se trouve. Ce modèle permet une grande flexibilité et rend possible une estimation plus précise des flux futurs en fonction des risques climatiques de chaque région.

Le modèle développé permet d'estimer l'impact physique climatique d'un portefeuille de garanties bancaires sur le risque cyclonique en fonction de deux approches distinctes. La première approche consiste à ajuster directement la valeur du portefeuille, en déduisant un montant à partir de la dernière valorisation pour obtenir ce que l'on nomme la *green value* du portefeuille. Cela permet d'intégrer une estimation du risque physique en tenant compte de la dévalorisation potentielle des actifs liée aux effets climatiques.

La seconde approche utilise un *spread climatique* appliqué à la courbe de discount des cash-flows futurs. Ce *spread*, déterminé par une combinaison de paramètres, dépend de la zone géographique, du modèle de fonction d'impact employé, et du scénario climatique défini par le GIEC. Cette méthodologie permet de projeter l'impact climatique dans le temps, en ajustant la valeur des flux futurs selon le niveau de risque attendu.

Pour plus de détails techniques, le code Python implémentant ce modèle est disponible en annexe 9.3, incluant les algorithmes et les paramètres de calibration pour chaque zone, chaque modèle de fonction d'impact et chaque scénario climatique.

6 Conclusions du mémoire

En conclusion, le modèle développé dans ce mémoire permet une avancée significative dans l'évaluation du risque physique climatique (lié aux cyclones tropicaux) sur un portefeuille d'actifs financiers (composé de garanties financières).

Ainsi, à partir des coordonnées GPS des garanties financières présentes dans le portefeuille, il est possible de modéliser les impacts physiques des cyclones tropicaux sur ces garanties tout en prenant en compte les prévisions des scientifiques sur l'évolution de l'intensité et de la fréquence de ce type d'évènement climatique d'ici à 2100, selon les différents scénarios du GIEC.

Une fois les impacts potentiels futurs estimés et actualisés, le modèle permet alors de déduire une *green value* de la garantie financière, c'est-à-dire sa valeur théorique actuelle en tenant compte des prévisions climatiques futures, à date. Cette *green value* de la garantie est alors dépendante de la zone géographique dans laquelle elle se situe (EP, NA, NI, SI, SP, WP, SA et DZ), mais également du scénario climatique du GIEC utilisé (RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 6.0 et RCP 8.5) ainsi que des paramètres de calibration de la fonction d'impact issus du modèle choisi (UNC, RMSF et TDR).

Conséutivement à la modélisation des impacts sur le portefeuille de garanties, il ressort du modèle que la région « SI » (South Indian Ocean) devrait vraisemblablement, à l'avenir, s'avérer la région la plus impactée par les cyclones tropicaux.

De plus, le modèle proposé rend possible la calibration d'un *spread climatique* qui ajuste la courbe d'actualisation (sans risque) utilisée. Ce *spread* reflète ainsi l'impact physique implicite du risque climatique (lié aux cyclones tropicaux) sur la valorisation des flux futurs. Il constitue une marge additionnelle - un ajustement sur la courbe d'actualisation utilisée - impactant les flux financiers futurs issus d'actifs présents dans les zones à risque. Ce *spread climatique* autorise une calibration selon la zone dans laquelle pourraient être issus les flux financiers futurs, selon le choix du scénario climatique retenu (RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 6.0 et RCP 8.5).

Les banques disposent ainsi d'un outil permettant de calculer des projections financières robustes, en tenant compte des impacts climatiques issus à la fois de la zone d'exposition géographique et du scénario climatique retenus. Par ailleurs, le *spread climatique* modélisé offre l'opportunité de disposer d'un élément essentiel pour adapter les stratégies de pricing, les marges de capital et l'analyse des portefeuilles à long terme. Cette palette d'outils offre ainsi aux institutions bancaires et assurantielles un levier de résilience destiné à anticiper les impacts climatiques croissants, et ainsi à optimiser les réponses à donner aux conséquences attendues.

L'utilisation d'un tel modèle s'inscrit dans une dynamique de conformité aux exigences réglementaires renforcées, telles que celles prévues par le CRR III et l'ITS de l'EBA, tout en répondant aux directives de la BCE, ainsi qu'aux attentes des régulateurs en matière de préconisation d'une gestion proactive des risques climatiques. De plus, ce modèle répond également aux critères de l'EIOPA, notamment en matière de transparence et d'adaptabilité, car il repose sur un outil open-source.

En utilisant un modèle open-source, les banques sont en mesure d'adapter les paramètres et les hypothèses de la modélisation aux spécificités de leurs processus internes, notamment ceux de l'ORSA (*Own Risk and Solvency Assessment*). Cette approche permet donc aux institutions financières d'intégrer le risque physique climatique dans leurs propres processus d'évaluation des risques, conformément aux exigences de l'EIOPA en matière de personnalisation et de traçabilité des méthodologies utilisées dans l'ORSA.

Le modèle développé dans les présents travaux contribue - in fine - à renforcer l'intégration du risque physique climatique au sein des institutions bancaires, en fournissant notamment des outils de modélisation avancés pour une gestion optimisée des garanties et des flux financiers. Cet ensemble est en parfaite adéquation avec les enjeux climatiques futurs, tels que projetés par les scénarios du GIEC.

7 Limites du mémoire et améliorations dans le futur

Dans le cadre de ce mémoire, des limites ont été identifiées de nature à aborder des pistes de perfectionnement du modèle proposé à l'occasion de travaux ultérieurs.

7.1 Étendre la modélisation du risque physique issus des cyclones, à d'autres risques climatiques

Ce mémoire avait pour but de s'appuyer sur le logiciel open-source Climada (en particulier l'accès à sa base historique de cyclones ainsi que des informations liées, coordonnées GPS et vitesse du vent) pour prévoir les évolutions de ce type d'évènements climatiques (en intensité et en fréquence) en se basant sur les prévisions des scénarios du GIEC. Bien évidemment, d'autres risques physiques climatiques existent et devront être pris en compte, si l'on souhaite disposer d'une vision exhaustive de l'ensemble des risques physiques climatiques.

Il existe au sein de Climada d'autres modules pouvant être exploités pour modéliser d'autres types de risques, tels que le risque inondation ou de feu de forêts. A l'avenir, dans le cadre de la modélisation d'autres types de risques, une partie du code développé dans le cadre de ce mémoire devra être adapté afin de :

1. récupérer les données historiques de l'événement que l'on souhaite modéliser ;
2. adapter la fonction d'impact au risque modélisé et ;
3. calibrer l'évolution des drivers de la fonction d'impact (ici fréquence et intensité) affectés par le réchauffement climatique selon les scénarios proposés par le GIEC.

Ces 3 modules dûment modifiés - à code inchangé - l'algorithme sera en mesure de fournir les impacts souhaités.

7.2 Affiner le modèle de fonction d'impact

Ce mémoire s'appuie sur les travaux les plus récents de scientifiques œuvrant à la modélisation des cyclones et de leurs impacts. Compte tenu de l'incertitude autour du « cœur du modèle », la fonction d'impact s'avérant l'élément prépondérant qui relie l'événement physique (via la vitesse des vents) à l'impact sur l'actif, il semblerait judicieux - dans l'avenir - de suivre l'évolution des modèles de fonction d'impacts pour « affiner » le modèle actuel. Pour prévenir les incertitudes autour de la fonction d'impact, j'ai recouru à 3 modèles différents, pris en compte dans la modélisation, ainsi qu'à une segmentation par sous-secteurs géographiques, afin que la fonction d'impact soit la plus appropriée au site de l'exposition.

7.3 Effectuer un backtesting du modèle

Sur la base des estimations d'impacts générées sur le portefeuille, il pourrait être pertinent d'effectuer une comparaison des résultats du modèle, avec ceux observés suite aux récents évènements climatiques. En effet, les différentes fonctions d'impact ont été calibrées sur l'historique des cyclones récents et - in fine - sur les impacts observés sur les bâtiments. Les prévisions du GIEC anticipent ainsi une variation de la sinistralité différentes selon les régions du globe, ainsi qu'une variation dans la fréquence de ces évènements climatiques. Il sera donc pertinent à l'avenir de suivre les évolutions de sinistralité et de fréquence, afin de les comparer avec les prévisions du modèle pour valider ou ajuster ce dernier. Ce backtesting permettra également de mettre en lumière, a posteriori, le modèle de calibration le plus pertinent parmi les trois proposés (« UNC », « RMSF » et « TDR »).

7.4 Adaptation au réchauffement climatique

A l'aune du degré de prise en compte du réchauffement climatique par les différents pays, différentes mesures d'adaptation seront probablement implémentées pour lutter contre le risque physique. L'implémentation d'un module d'adaptation au réchauffement climatique, dans le modèle actuel, serait pertinent. En effet, celui-ci permettrait de réduire l'impact de l'événement climatique (cyclones). Plus concrètement, si le modèle actuel estime l'impact physique à partir d'une fonction d'impact historique, il faudrait également intégrer dans celle-ci les mesures d'adaptation au réchauffement climatique qui tendraient à augmenter la résistance

des bâtiments aux cyclones dans les années à venir. Dans cette hypothèse, la fonction d'impact devra être ajustée aux endroits où des mesures d'adaptation ont été prises.

7.5 Autres limites du modèle

Le modèle actuel de prévision climatique présente certaines limites, notamment en ce qui concerne la prise en compte de certaines variables océaniques cruciales, telles que les phénomènes El Niño et La Niña. Ces anomalies océaniques, qui influencent significativement le climat global, ne sont pas complètement captées par les modèles actuels, car une partie de la calibration de ces modèles repose sur des données historiques. Cette approche historique peut parfois s'avérer insuffisante pour refléter la réalité des changements climatiques actuels, surtout dans un contexte d'accélération du réchauffement global. En effet, les modèles utilisés aujourd'hui sont basés sur des scénarios relativement stables, alors que les modifications rapides des conditions climatiques dues à l'augmentation des températures terrestres créent de nouvelles dynamiques, notamment en ce qui concerne la fréquence et l'intensité des cyclones. Les projections du GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat) montrent que ces évolutions exacerbées pourraient conduire à des événements climatiques extrêmes de plus en plus fréquents et puissants. En somme, bien que les modèles actuels nous permettent d'étudier certaines tendances, ils ne « traduisent » pas fidèlement les nouvelles instabilités introduites par le réchauffement climatique. Nous continuons donc à nous appuyer sur un environnement modélisé qui ne reflète pas entièrement la réalité fluctuante à laquelle nous faisons face.

8 Bibliographie

8.1 Documentation du GIEC (*Sixth Assessment Report*)

8.1.1 Main reports

- [1] Climate Change 2021 – *The physical Science Basis (Working Group I)* – Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 2021.
- [2] Climate Change 2022 – *Impacts, Adaptation and Vulnerability (Working Group II)* – Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 2022.
- [3] Climate Change 2022 – *Mitigation of Climate Change (Working Group III)* – Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 2022.

8.1.2 Special reports

- [4] *Global warming of 1.5°C*, Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2018
- [5] *Climate Change & Land*, Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2019
- [6] *Ocean & Cryosphere*, Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2019

8.2 Autres sources

- [7] Thierry Langreney, Gonéri Le Cozannet, Myriam Merad. *Adapter le système assurantiel français face à l'évolution des risques climatiques*³³, 2023. Rapport final présenté le 2 avril 2024 aux ministres Bruno Le Maire et Christophe Béchu.
- [8] Elabe. *Journée CCR CAT – « Protégeons l'assurabilité » - État de l'opinion*. 2024.
- [9] EBA (*European Banking Authority*). *Final draft implementing technical standards on prudential disclosures on ESG risks in accordance with Article 49a CRR*, 2022.
- [10] BCE (Banque Centrale Européenne). Guide relatif aux risques liés au climat et à l'environnement, attentes prudentielles en matière de gestion et de déclaration des risques, 2020.
- [11] EFRAG (*European Financial Reporting Advisory Group*). Paper on *Corporate Sustainability Reporting Directive (CSRD)*, 2022.

8.3 Livres et articles de finance quantitative

- [12] D. Lamberton and B. Lapeyre. *Introduction au calcul stochastique*. 1992.
- [13] D. Brigo and F. Mercurio. *Interest rate models-theory and practice: with smile, inflation and credit, volume 2*, 2006.
- [14] R. Portait et P. Poncet. *Finance de marché*. 3e édition, 2012.
- [15] Andersen, L.B.G. and Piterbarg, V.V. *Interest Rate Modeling. Volume II: Term Structure Models*. 2010.

8.4 Articles de recherche scientifique

- [16] Bresch, D. N. and Aznar-Siguán, G.: CLIMADA v1.4.1: Towards a globally consistent adaptation options appraisal tool, Geosci. Model Dev. Discuss., <https://doi.org/10.5194/gmd-2020-151>, 2020.
- [17] Robert J.R. Elliott, Eric Strobl, Puyang Sun, *The local impact of typhoons on economic activity in China: A view from outer space*, Journal of Urban Economics, Volume 88, 2015.
- [18] Emanuel, K.: *Global Warming Effects on U.S. Hurricane Damage*, Weather Clim. Soc., 3, 261–268, <https://doi.org/10.1175/WCAS-D-11-00007.1>, 2011.

³³Dit « Rapport Langreney »

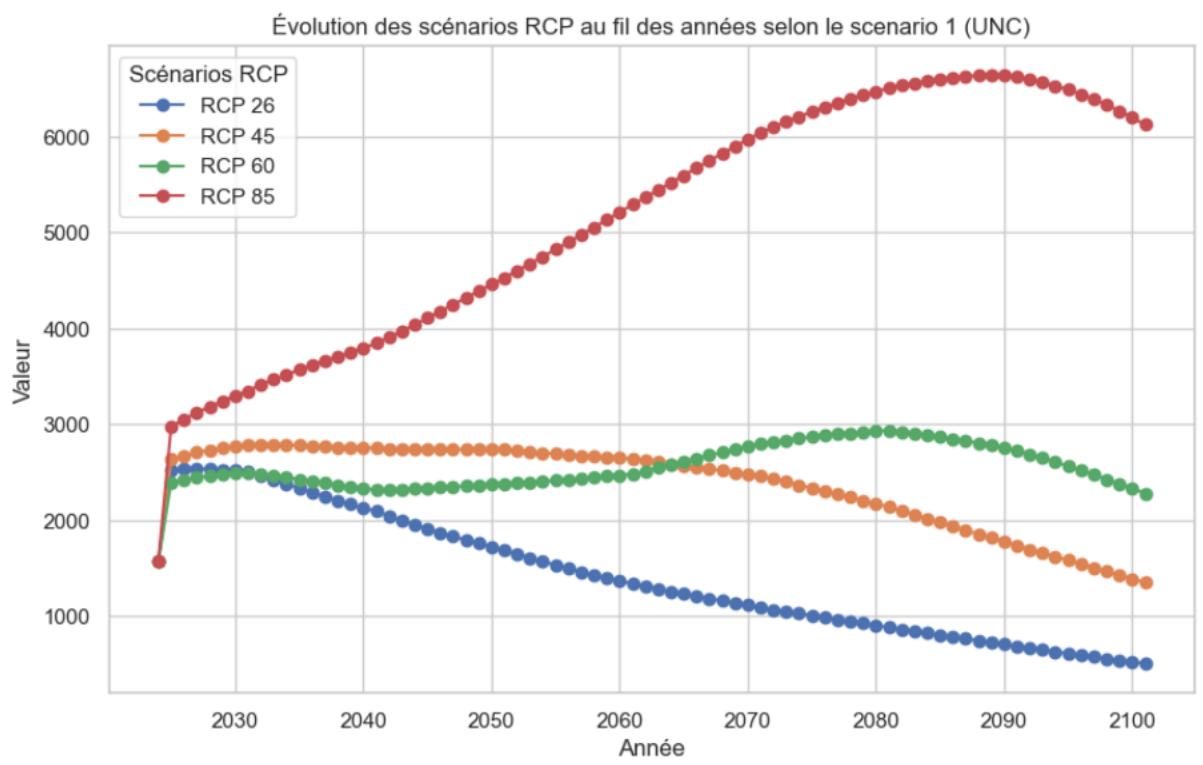
- [19] Kang, N., Elsner, J.B. *Climate mechanism for stronger typhoons in a warmer world*. *J. Clim.* 29 (3), 1051–1057. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-15-0585.1>, 2016.
- [20] Knutson, T.R., Sirutis, J.J., Zhao, M., Tuleya, R.E., Bender, M., Vecchi, G.A., Villarini, G., Chavas, D. *Global projections of intense tropical cyclone activity for the late twenty-first century from dynamical downscaling of CMIP5/rcp4.5 scenarios*. *J. Clim.* 28, 7203–7224. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-15-0129.1>, 2015.
- [21] Geiger, T., Frieler, K., and Bresch, D. N.: A global historical data set of tropical cyclone exposure (TCE-DAT), *Earth Syst. Sci. Data*, 10, 185–194, <https://doi.org/10.5194/essd-10-185-2018>, 2018.
- [22] Bloemendaal, N., Haigh, I.D., de Moel, H. *et al.* Generation of a global synthetic tropical cyclone hazard dataset using STORM. *Sci Data* 7, 40. <https://doi.org/10.1038/s41597-020-0381-2>, 2020.
- [23] Eberenz, S., Lüthi, S., and Bresch, D. N.: *Regional tropical cyclone impact functions for globally consistent risk assessments*, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 21, 393–415, <https://doi.org/10.5194/nhess-21-393-2021>, 2021.

9 Annexes

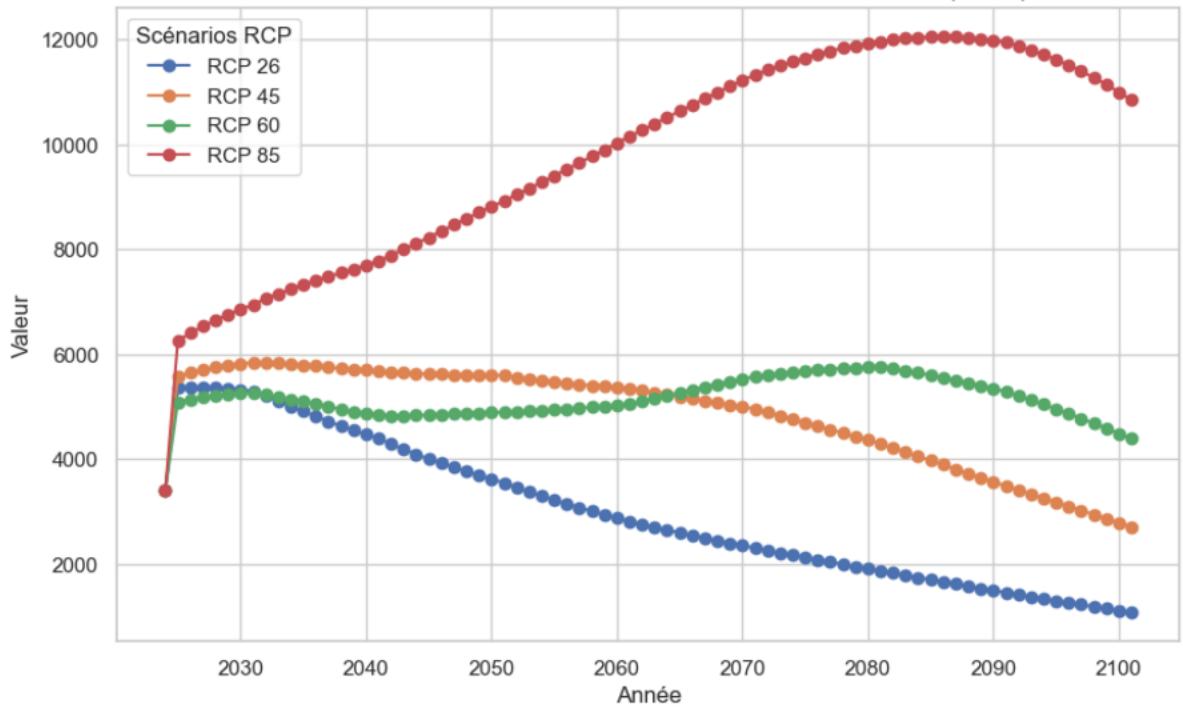
Vous trouverez ci-joint l'ensemble des graphiques issus de la modélisation des impacts physique climatiques sur les encours.

9.1 Courbes d'impacts actualisées et comparaison des montants

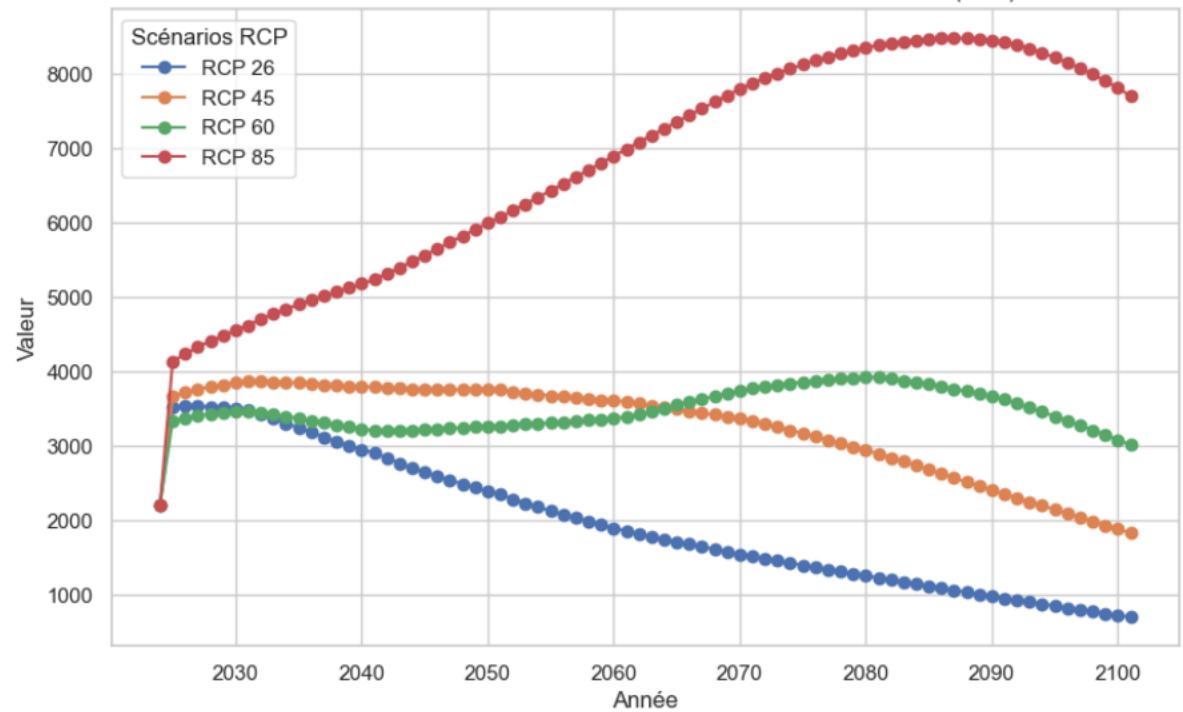
9.1.1 Région « EP »

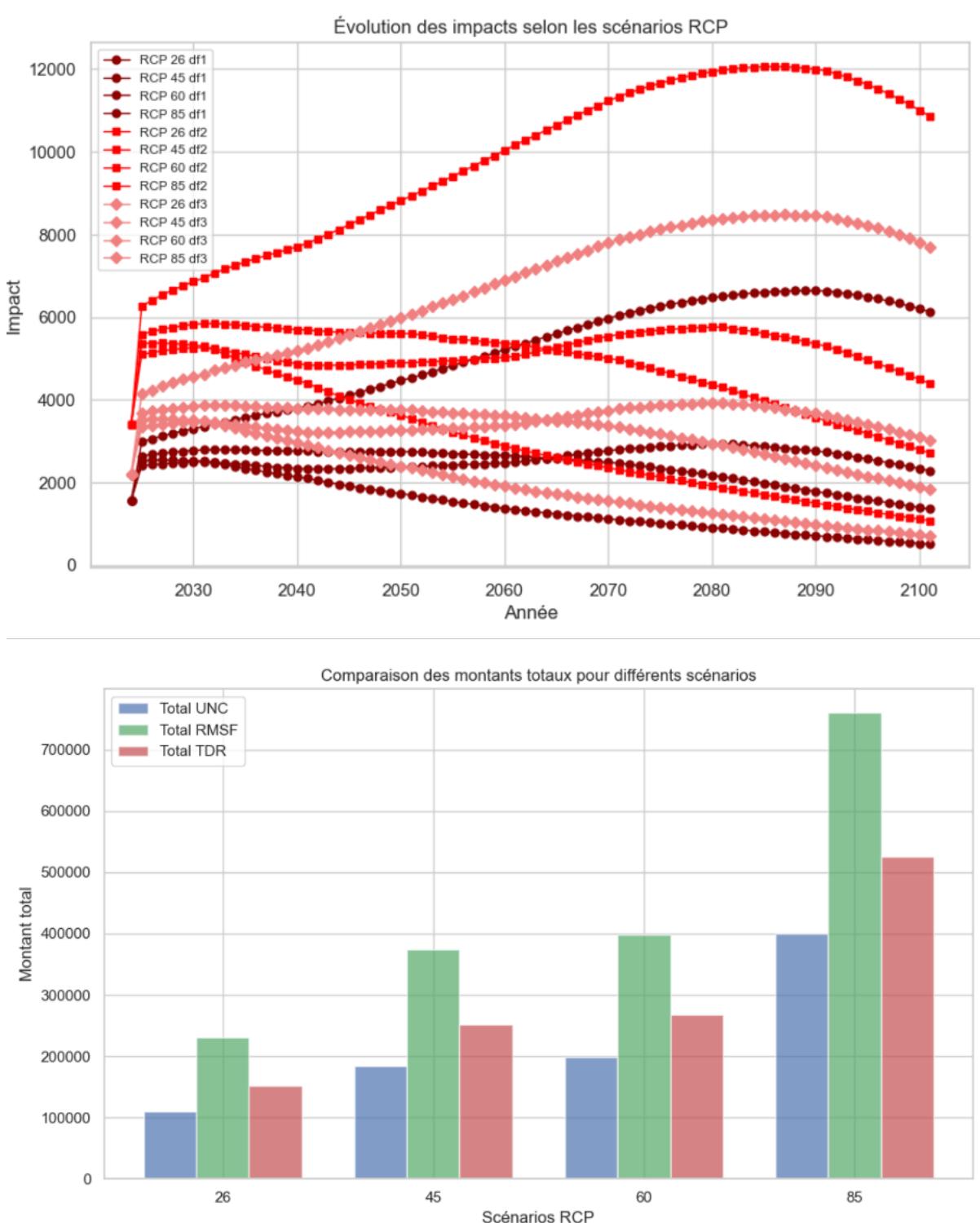


Évolution des scénarios RCP au fil des années selon le scenario 2 (RMSF)

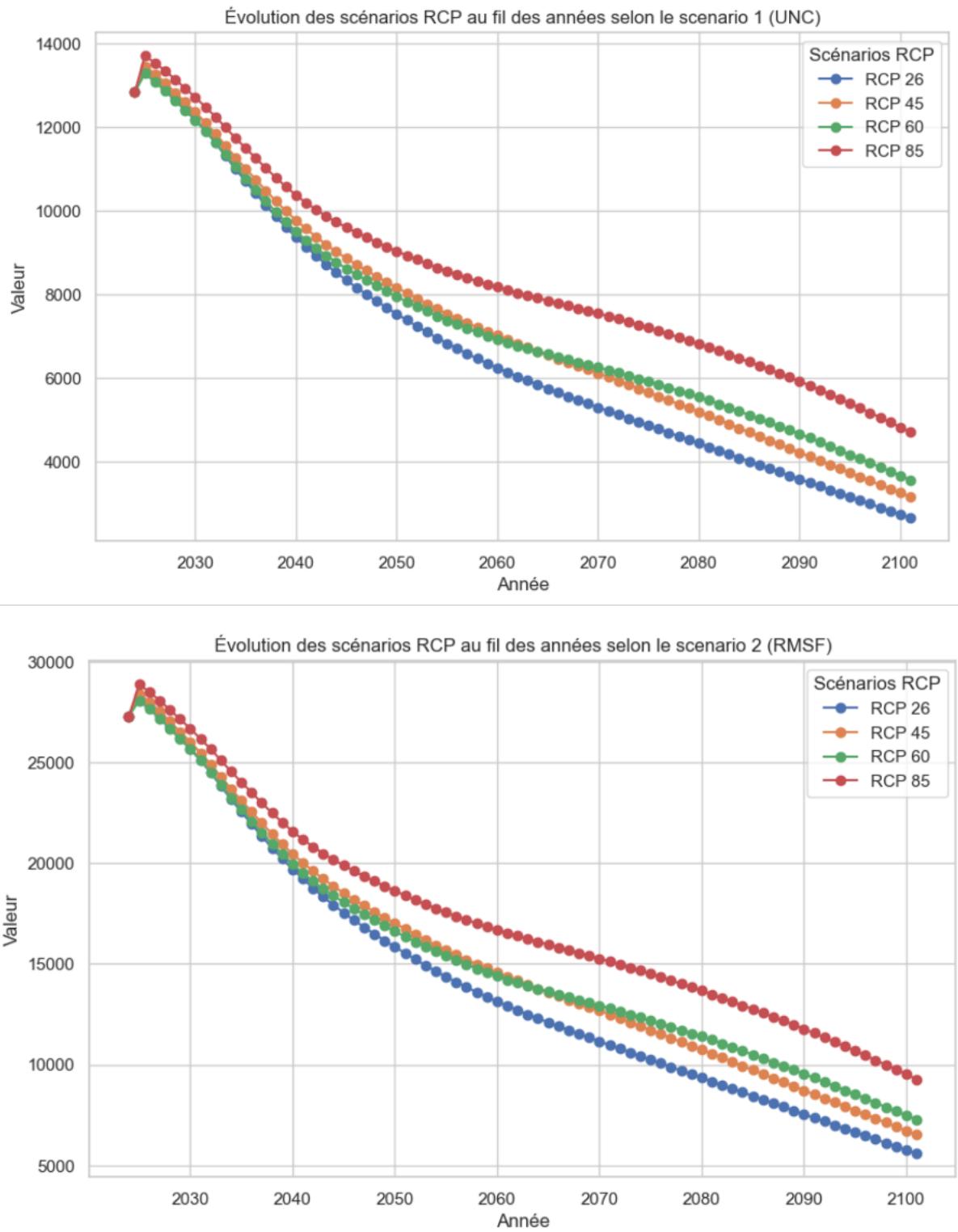


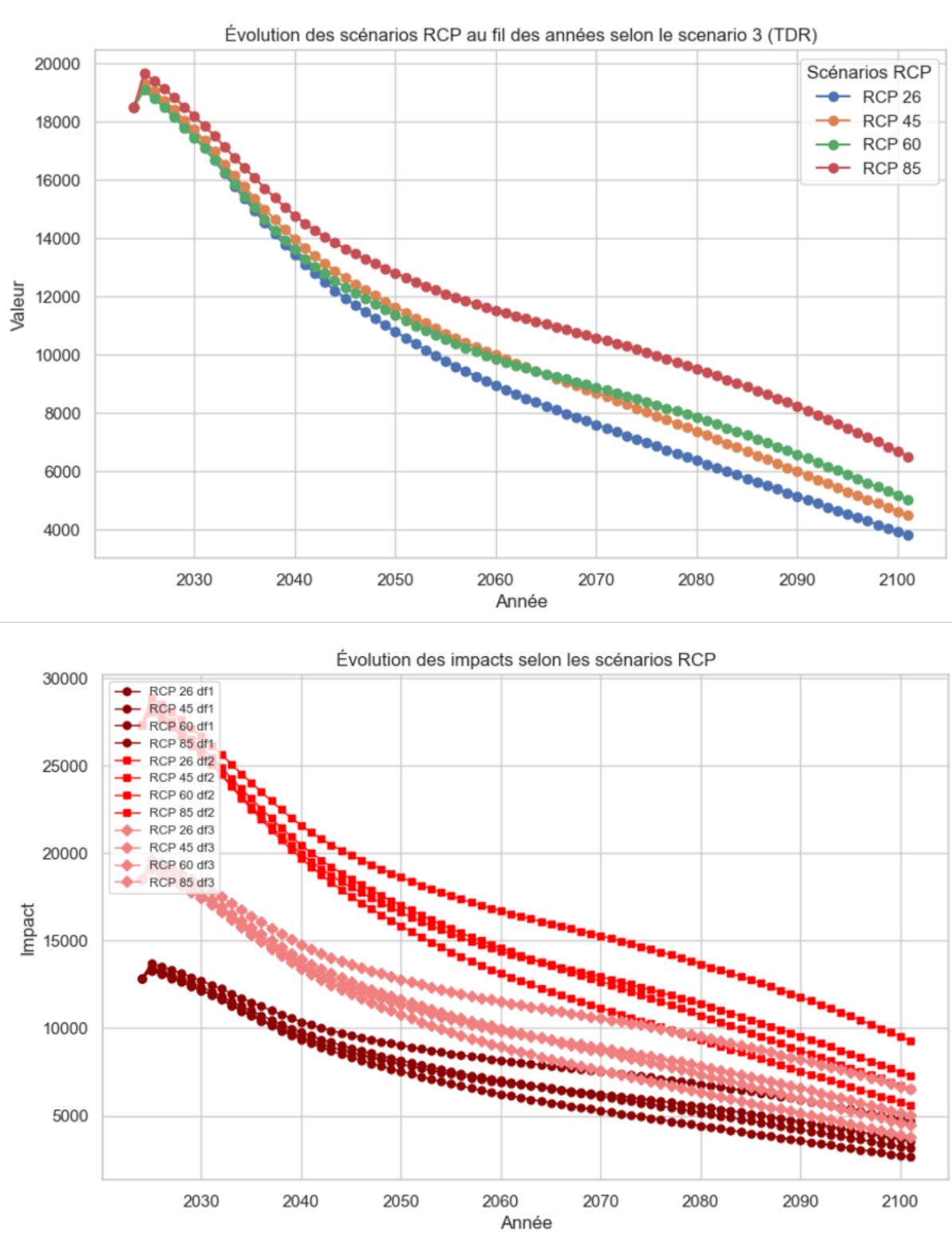
Évolution des scénarios RCP au fil des années selon le scenario 3 (TDR)

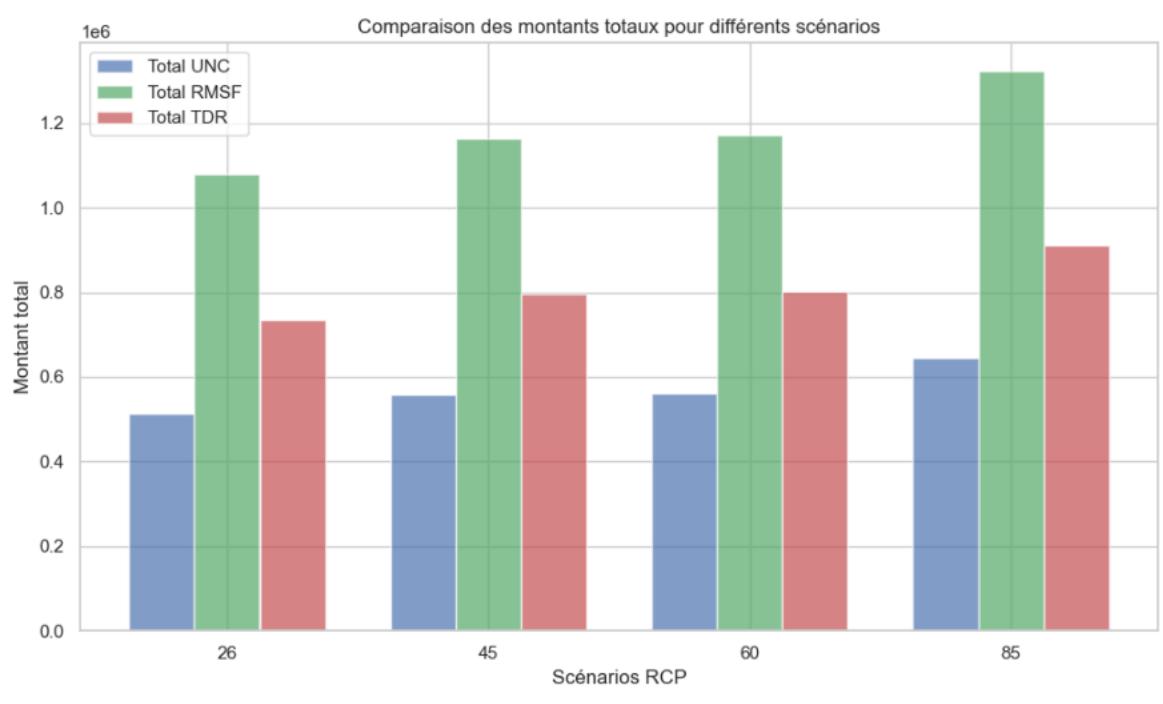




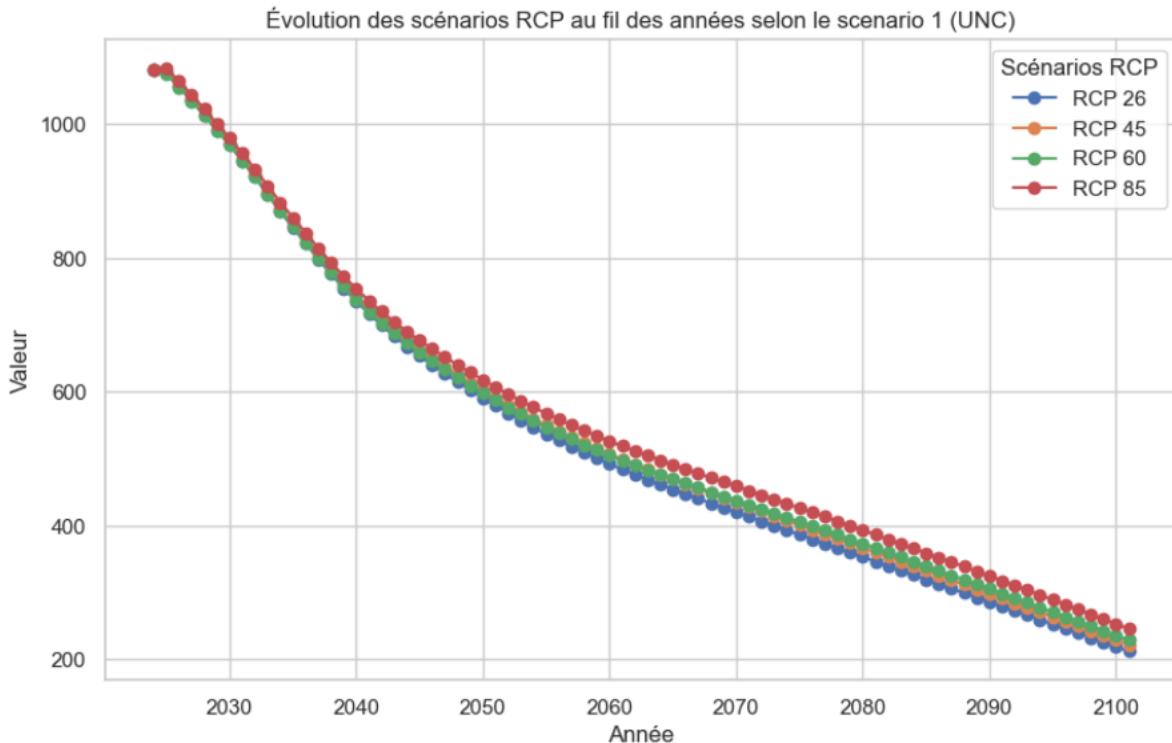
9.1.2 Région « NA »



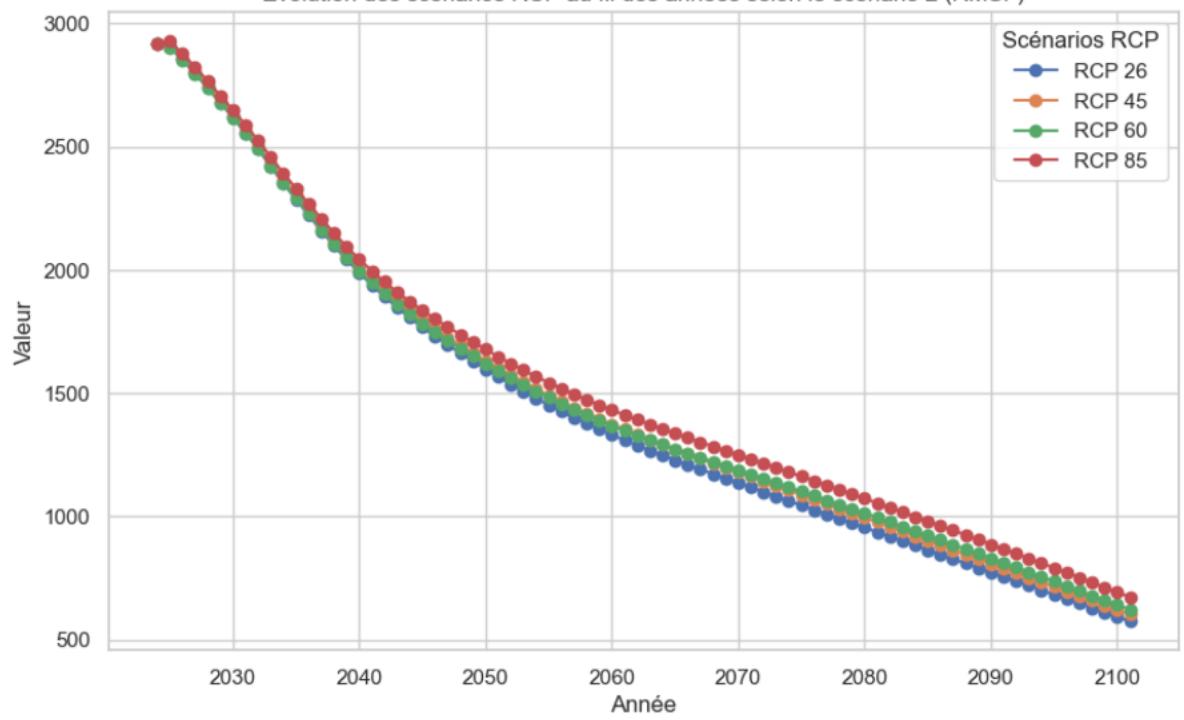




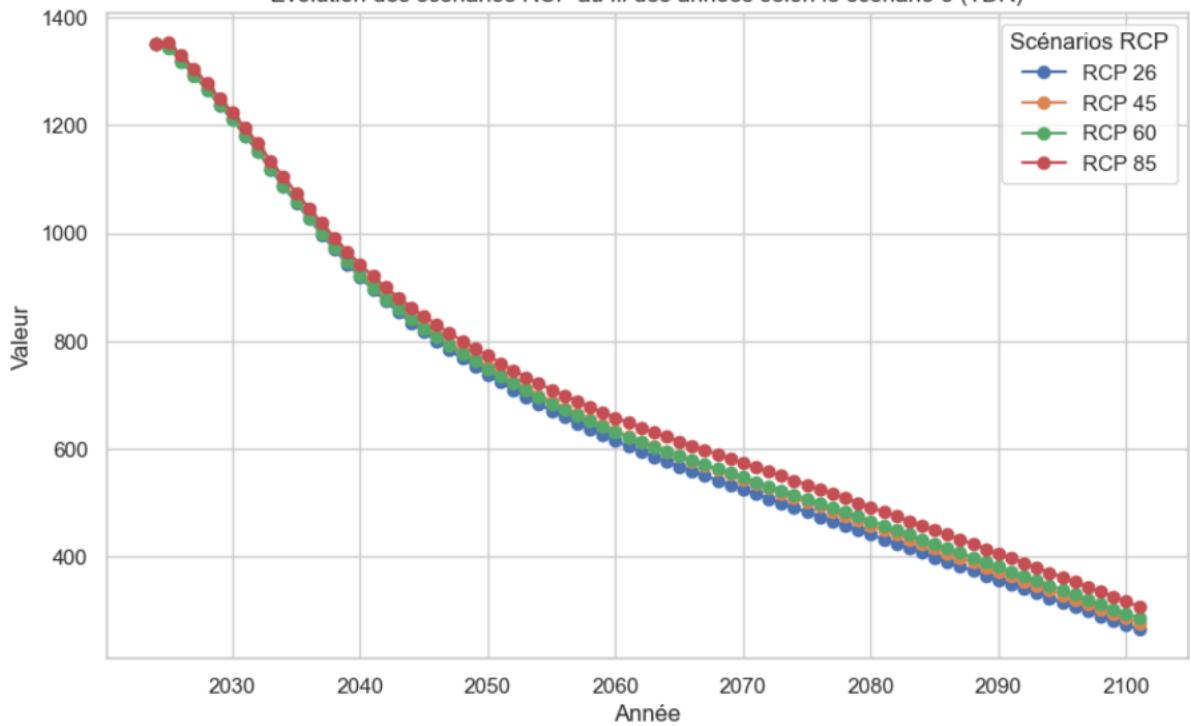
9.1.3 Région « NI »

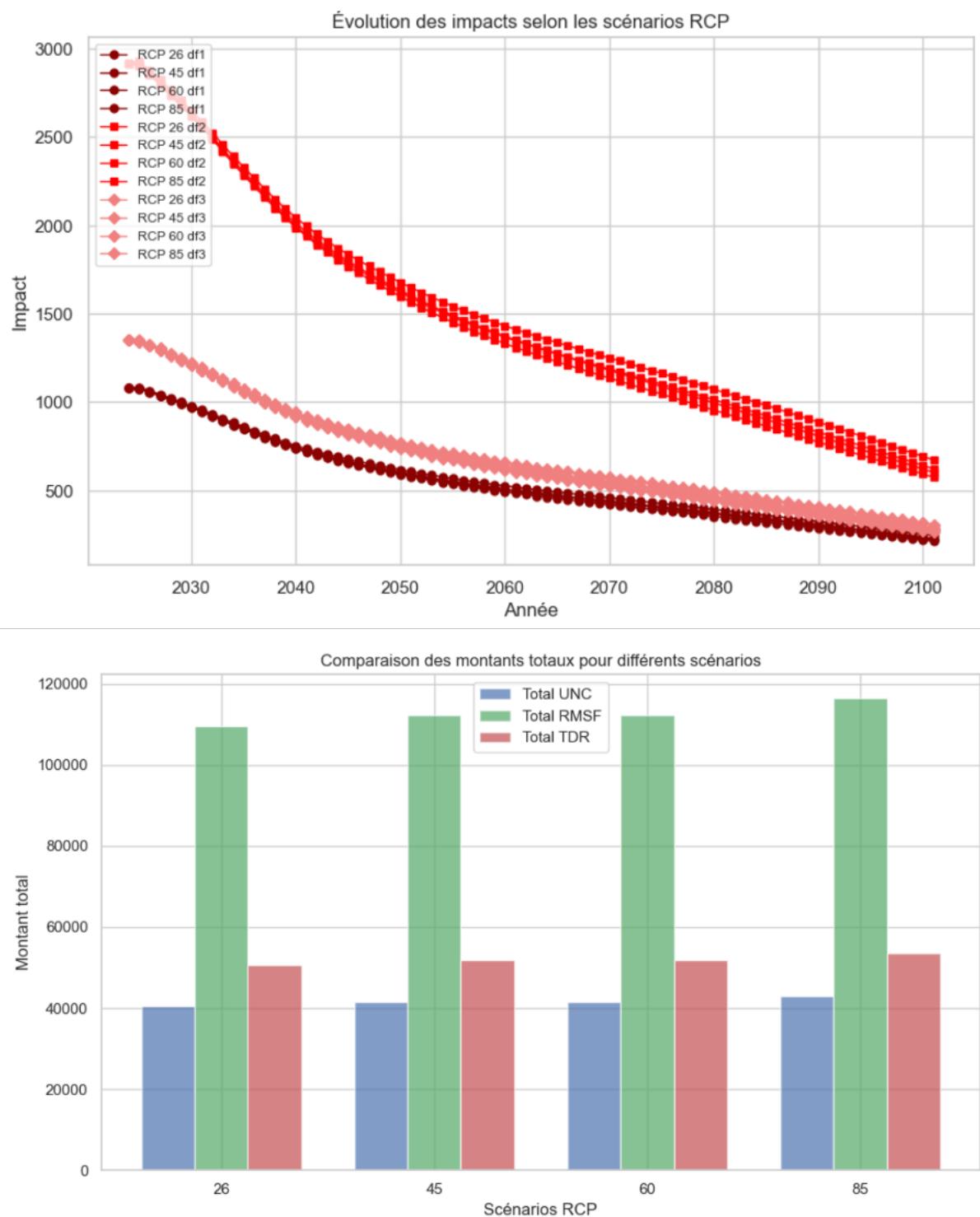


Évolution des scénarios RCP au fil des années selon le scenario 2 (RMSF)

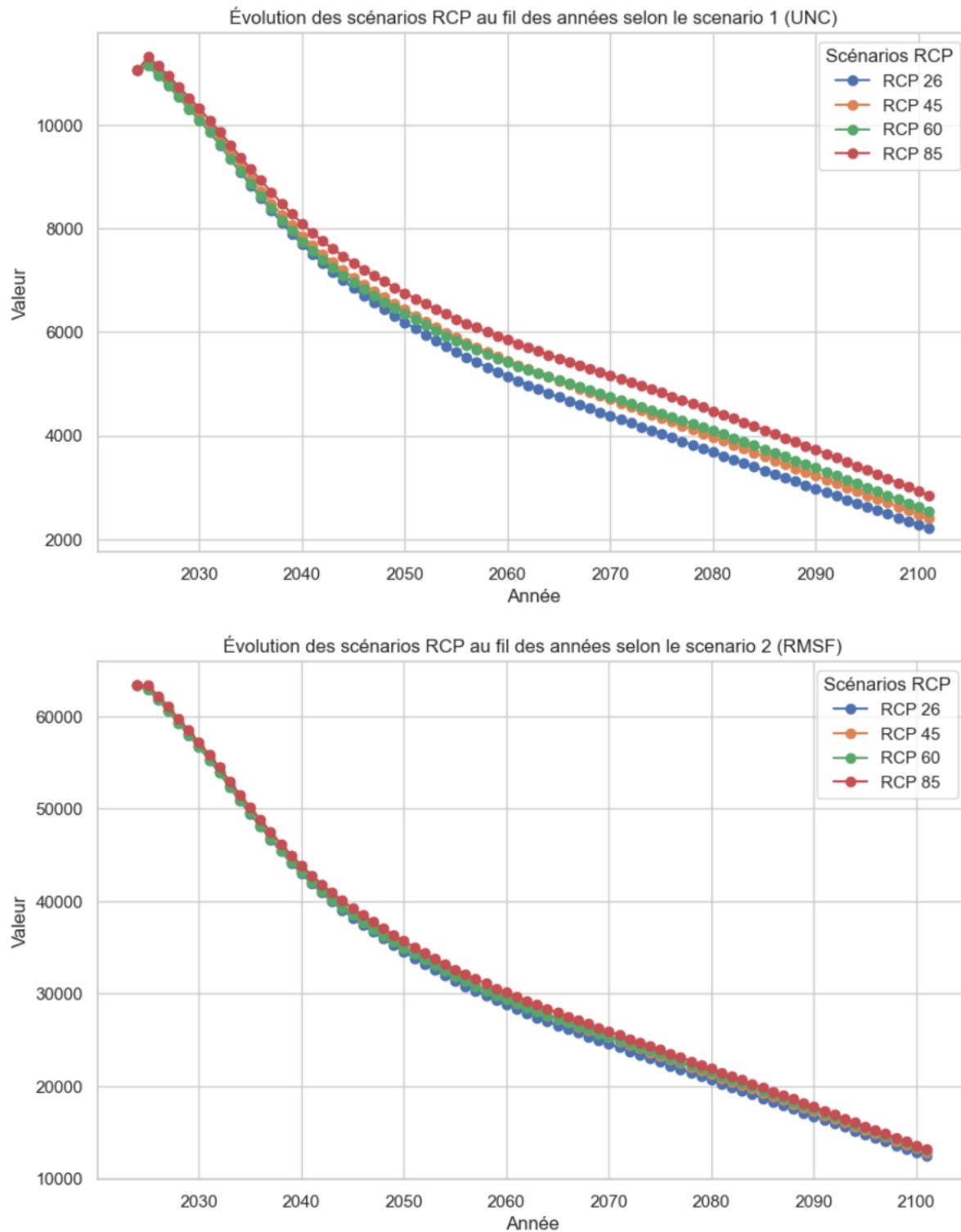


Évolution des scénarios RCP au fil des années selon le scenario 3 (TDR)

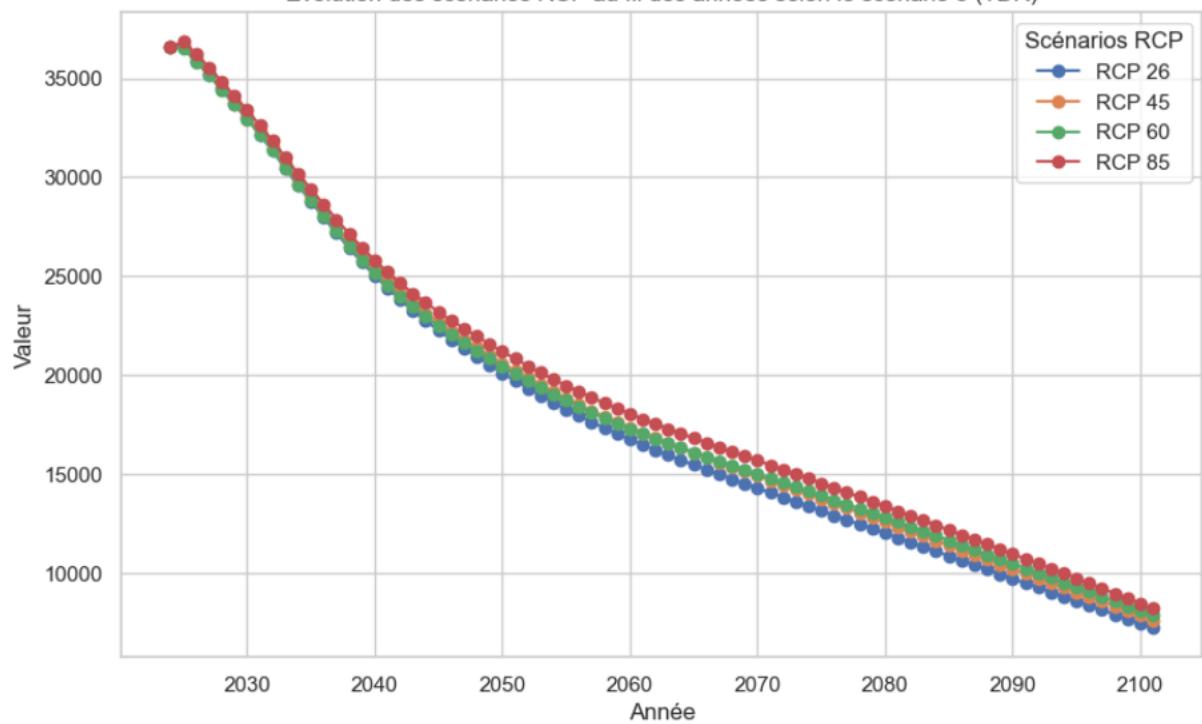




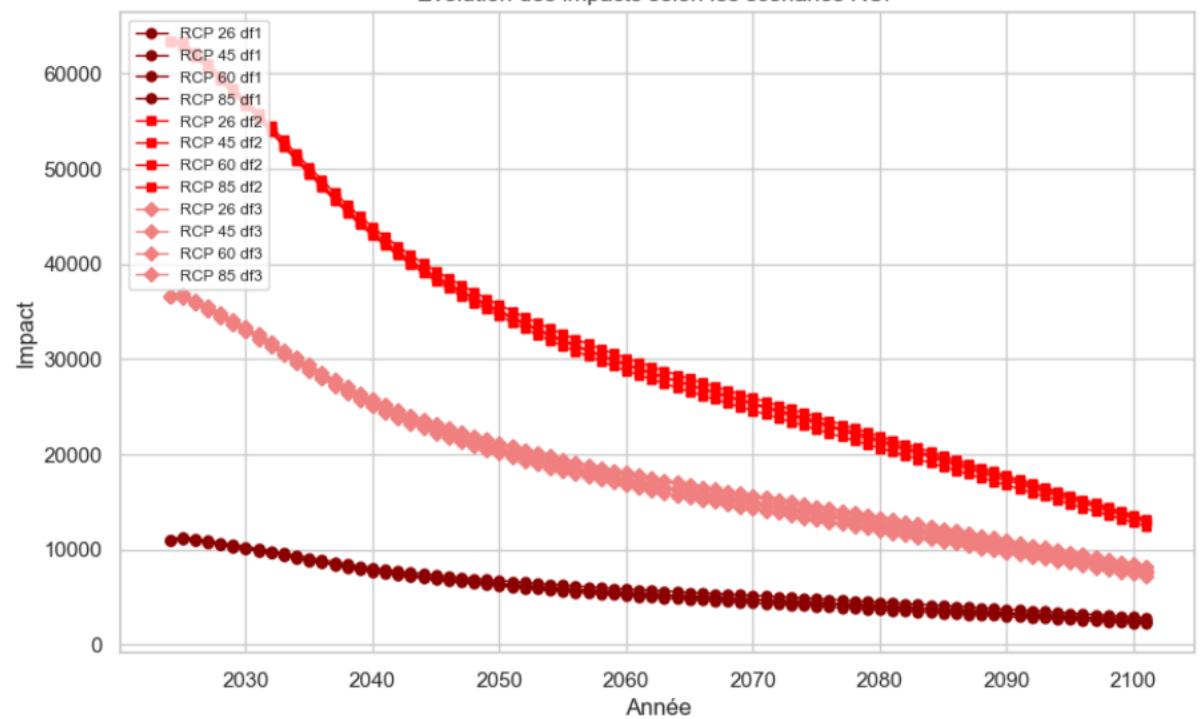
9.1.4 Région « SI »

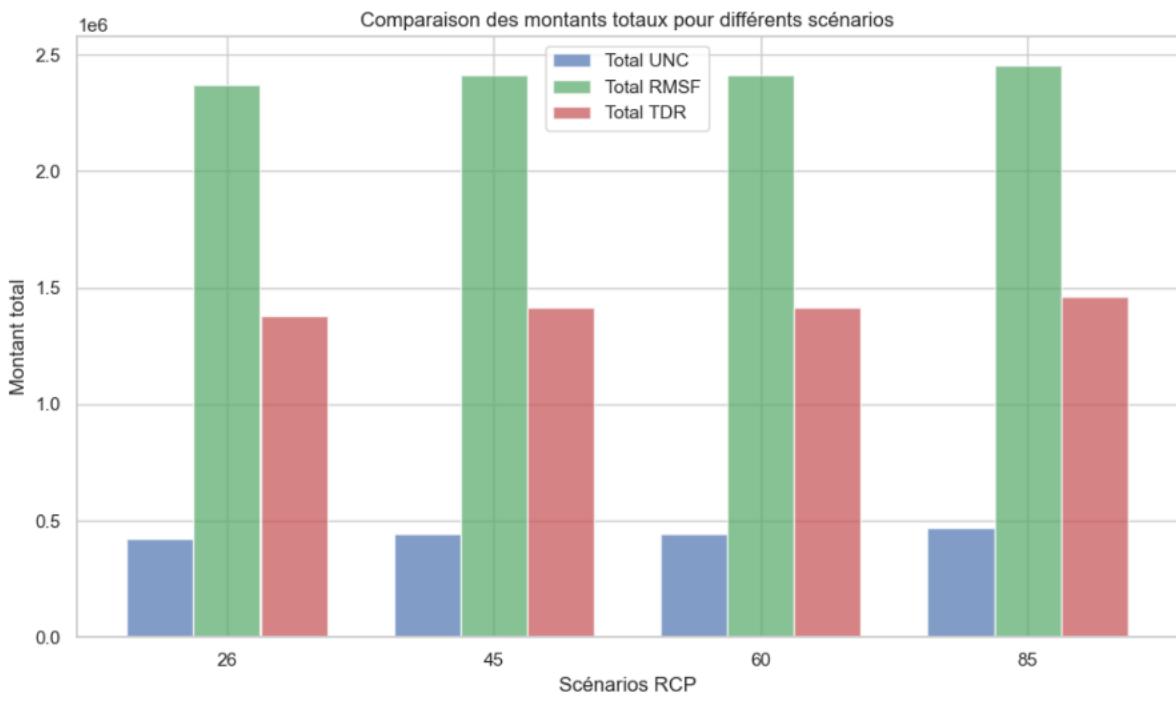


Évolution des scénarios RCP au fil des années selon le scenario 3 (TDR)

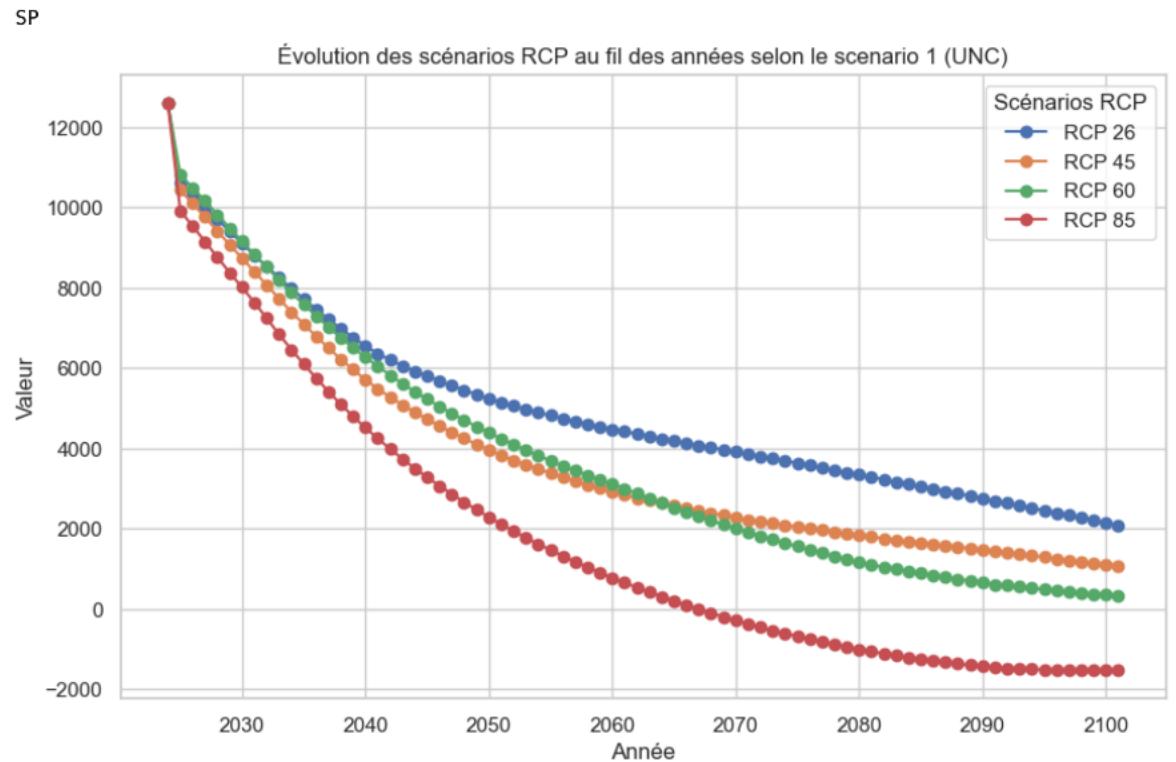


Évolution des impacts selon les scénarios RCP

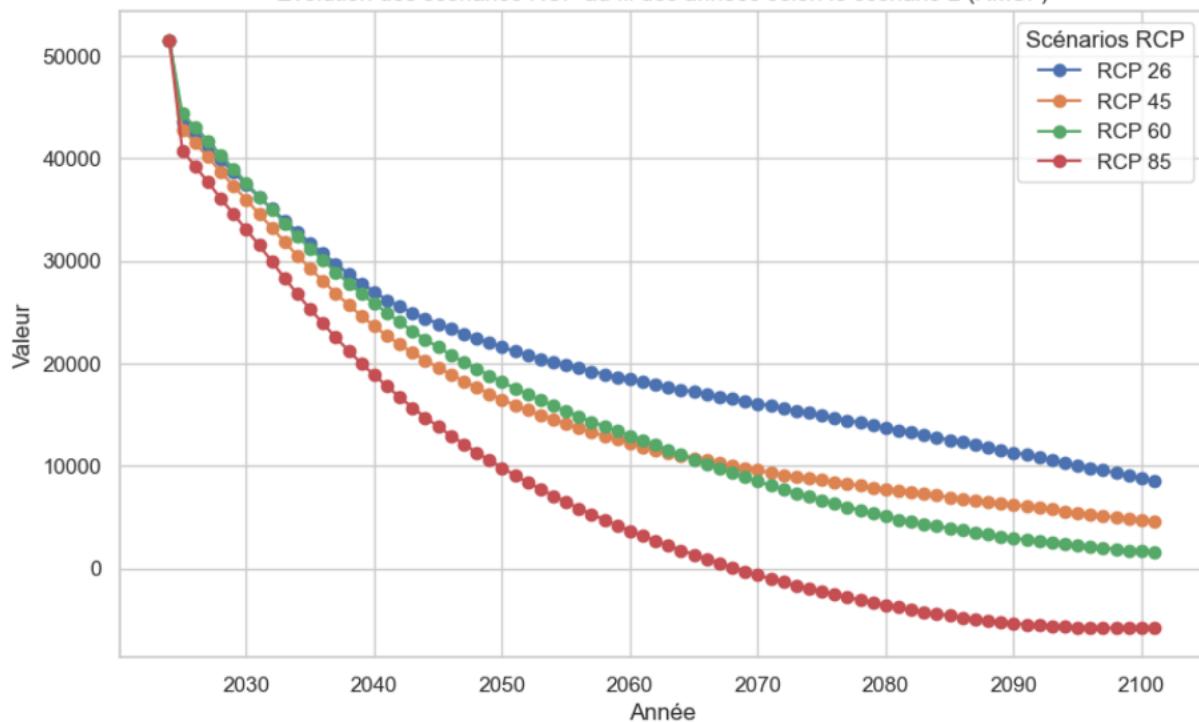




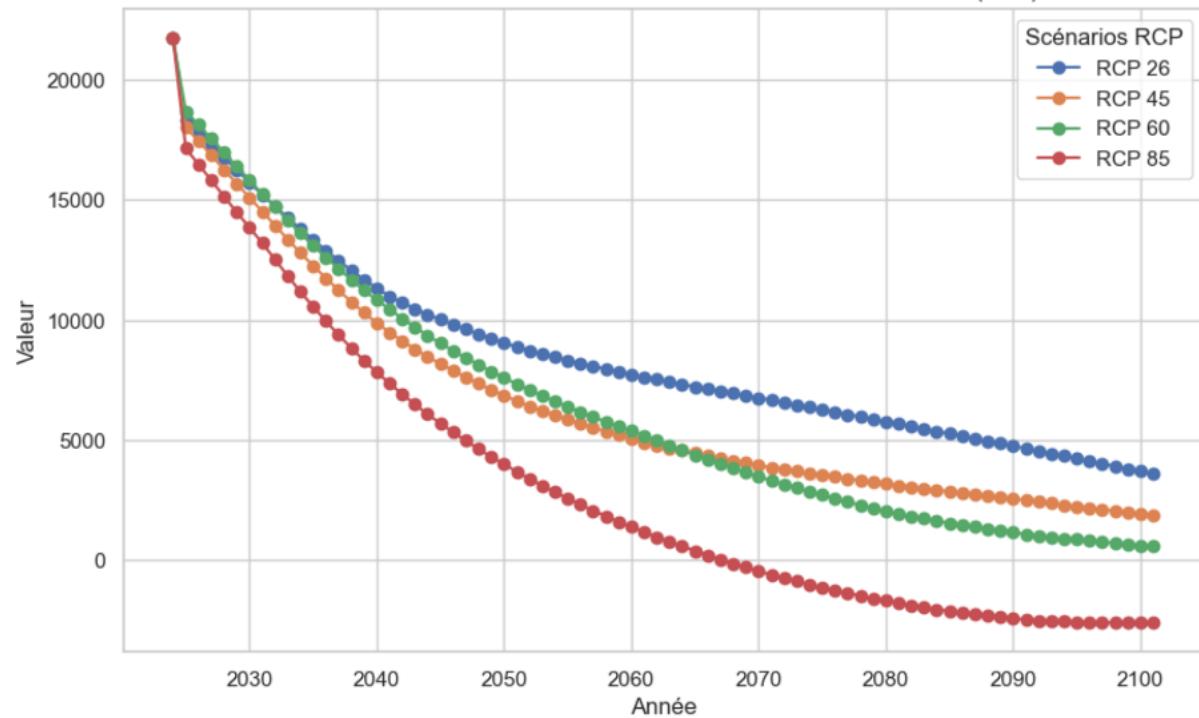
9.1.5 Région « SP »

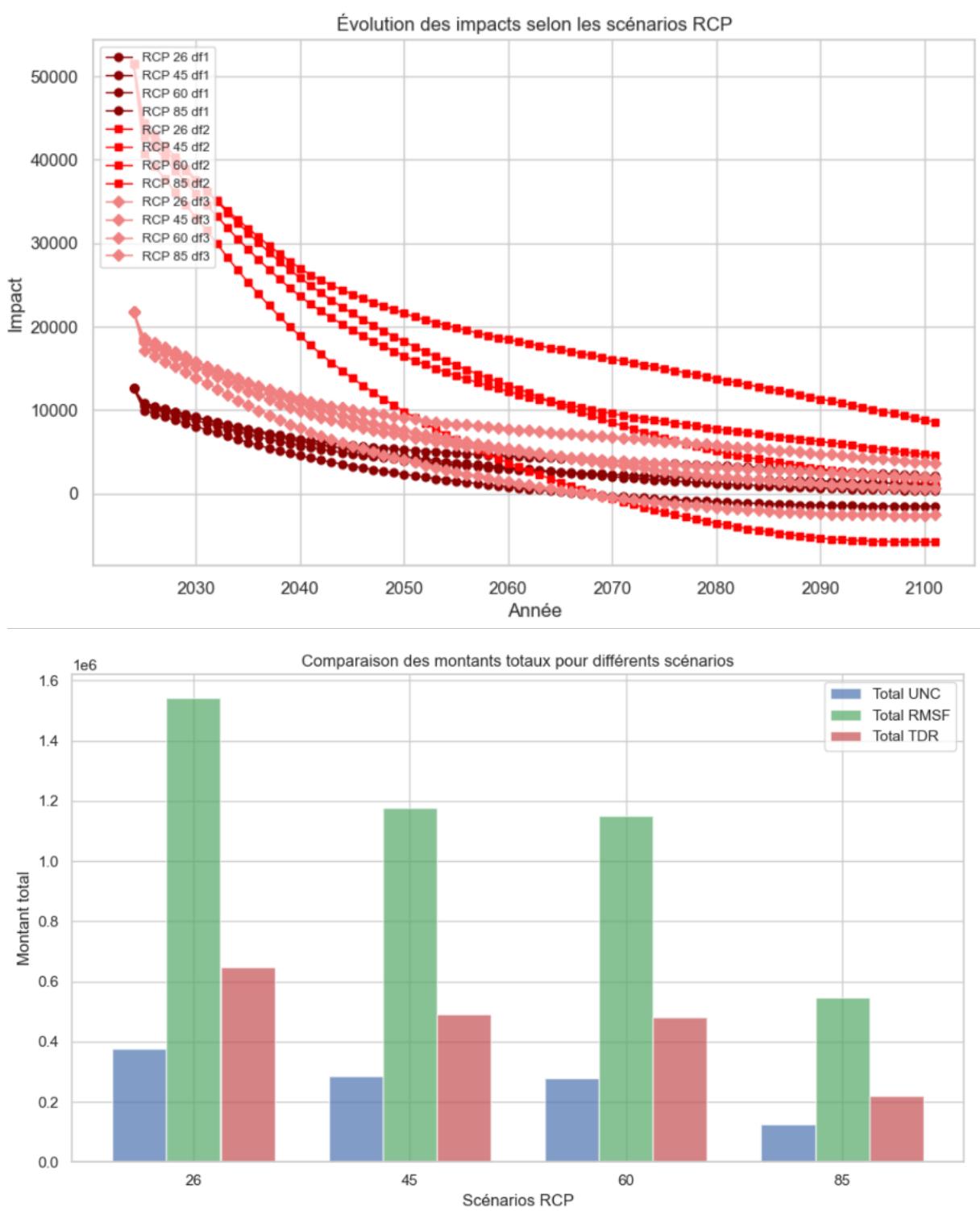


Évolution des scénarios RCP au fil des années selon le scenario 2 (RMSF)

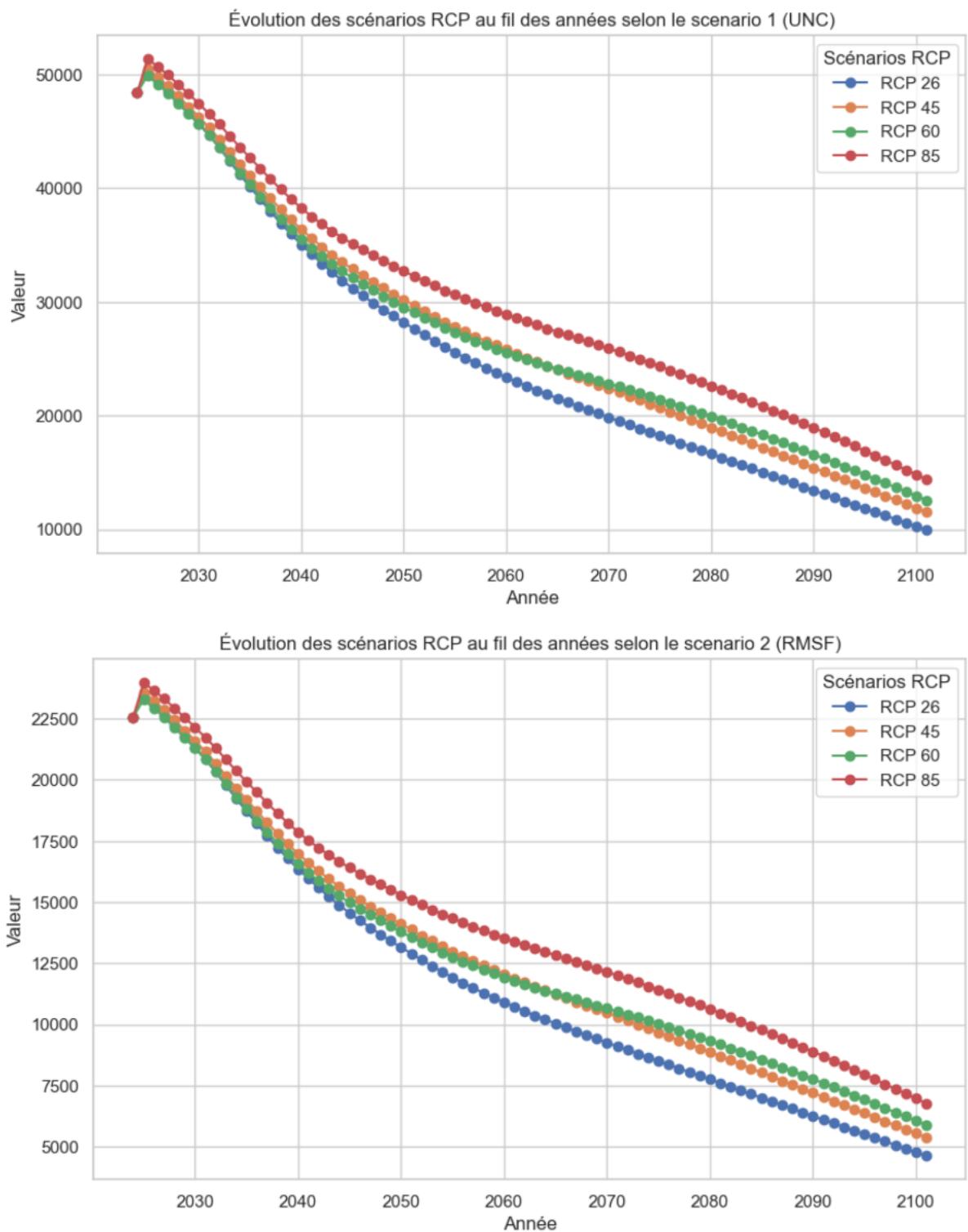


Évolution des scénarios RCP au fil des années selon le scenario 3 (TDR)

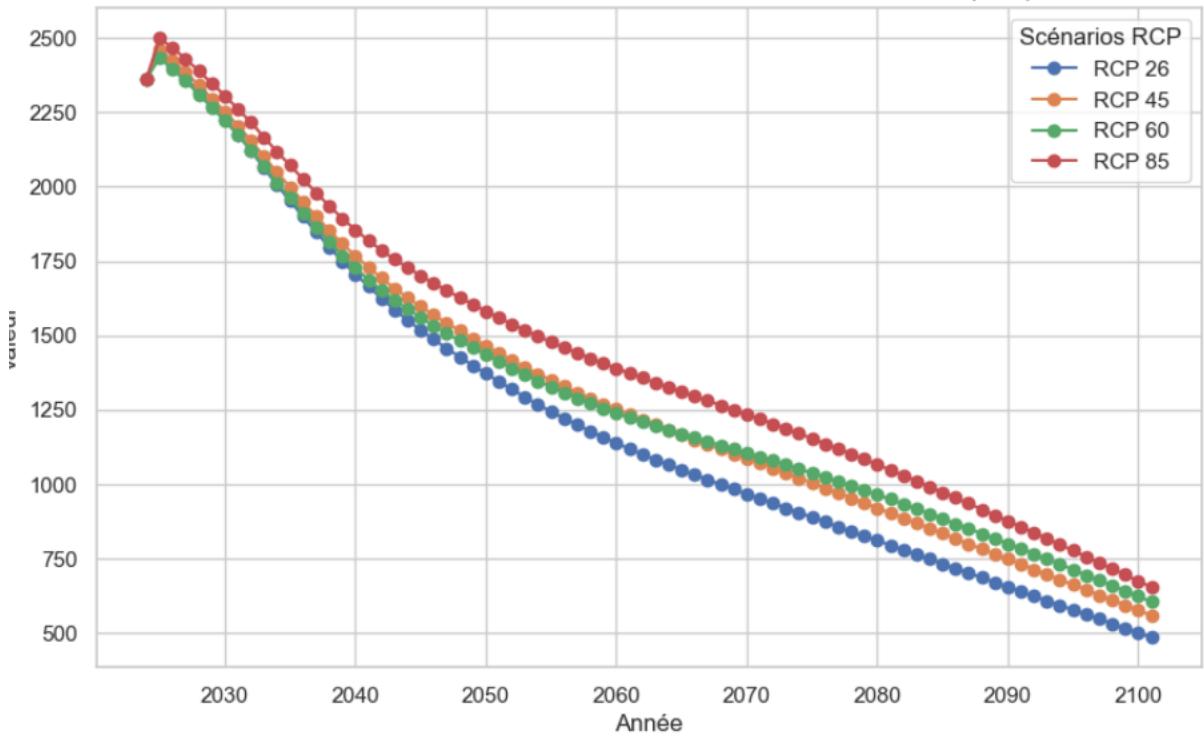




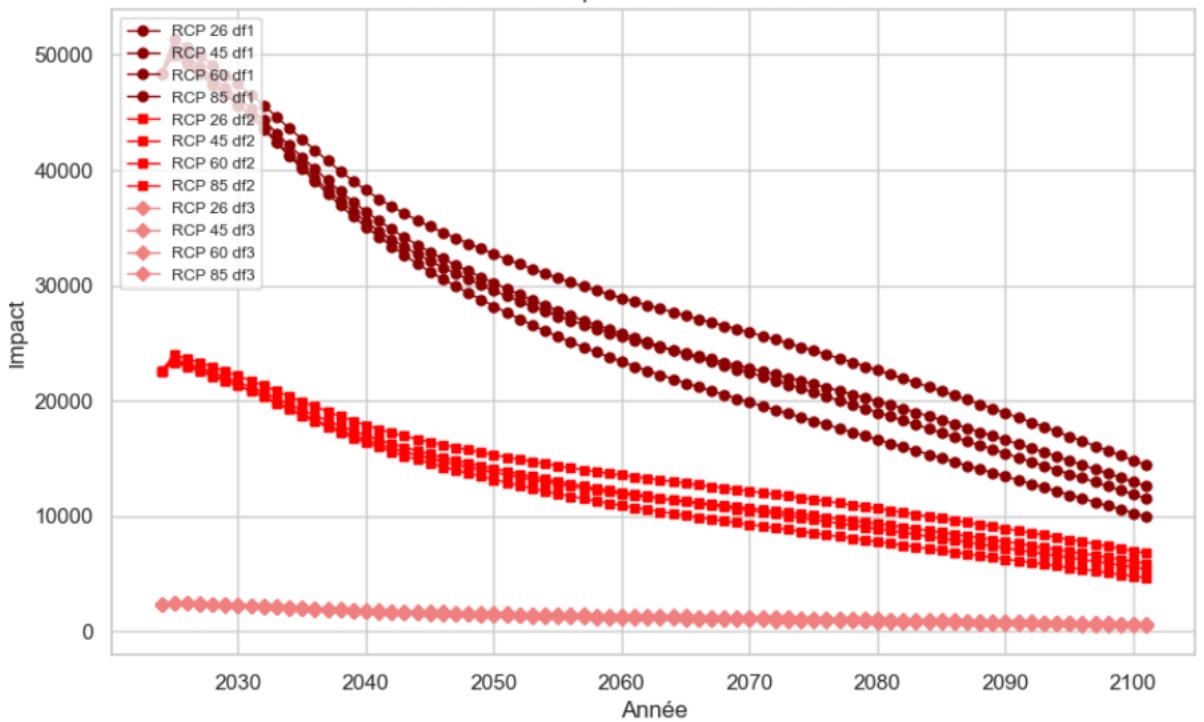
9.1.6 Région « WP »

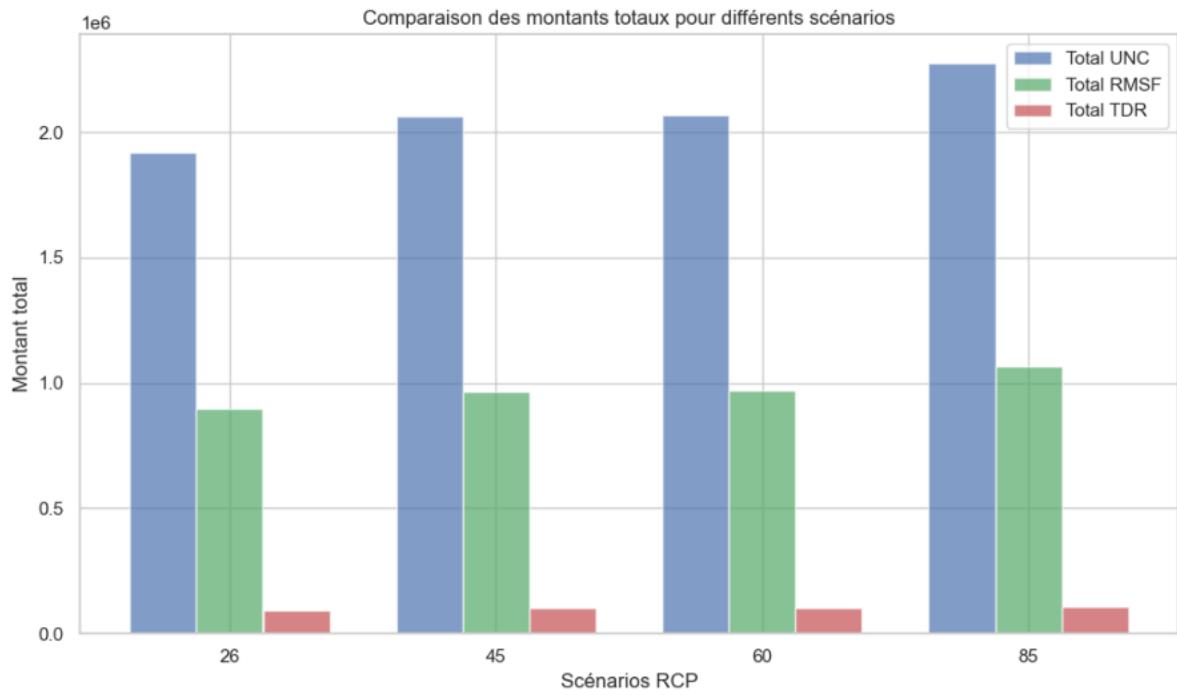


Évolution des scénarios RCP au fil des années selon le scenario 3 (TDR)

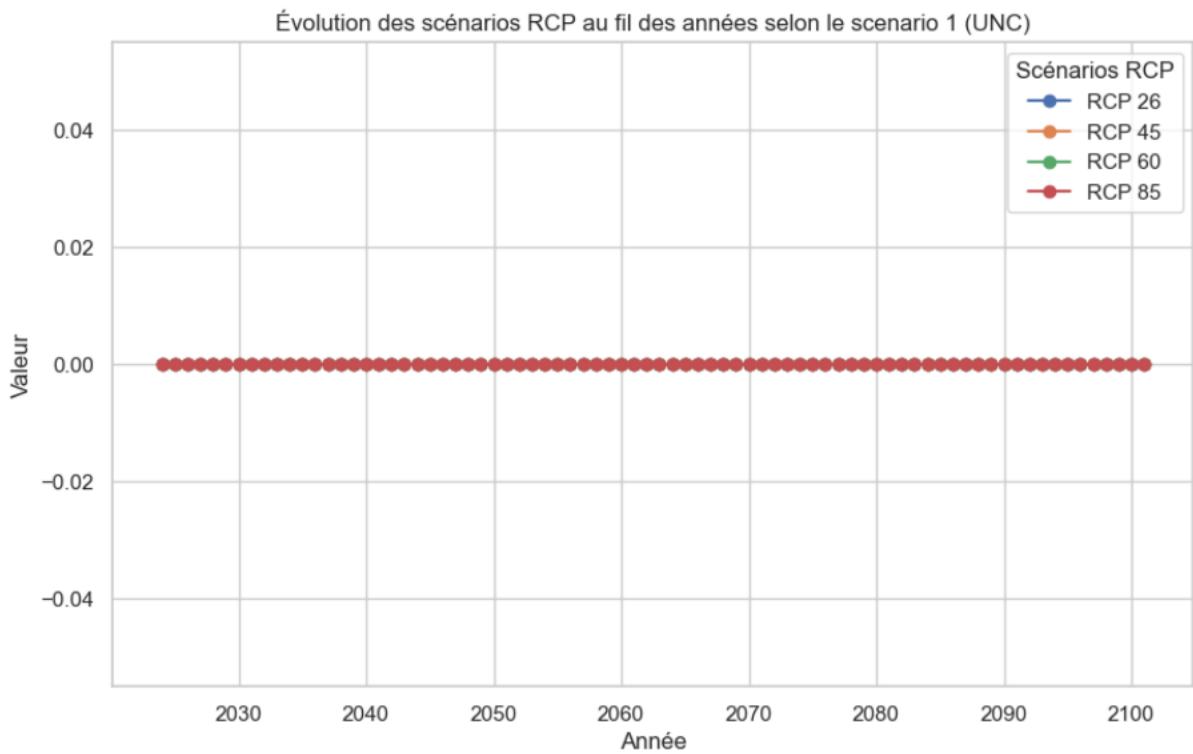


Évolution des impacts selon les scénarios RCP

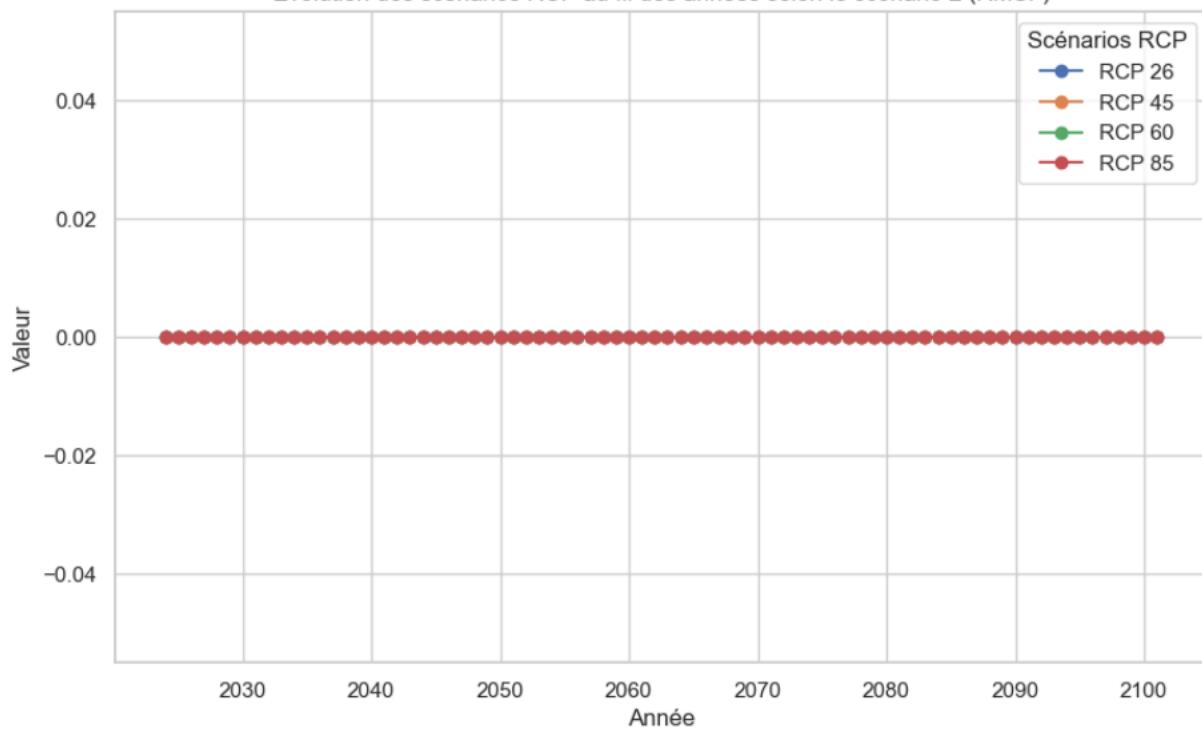




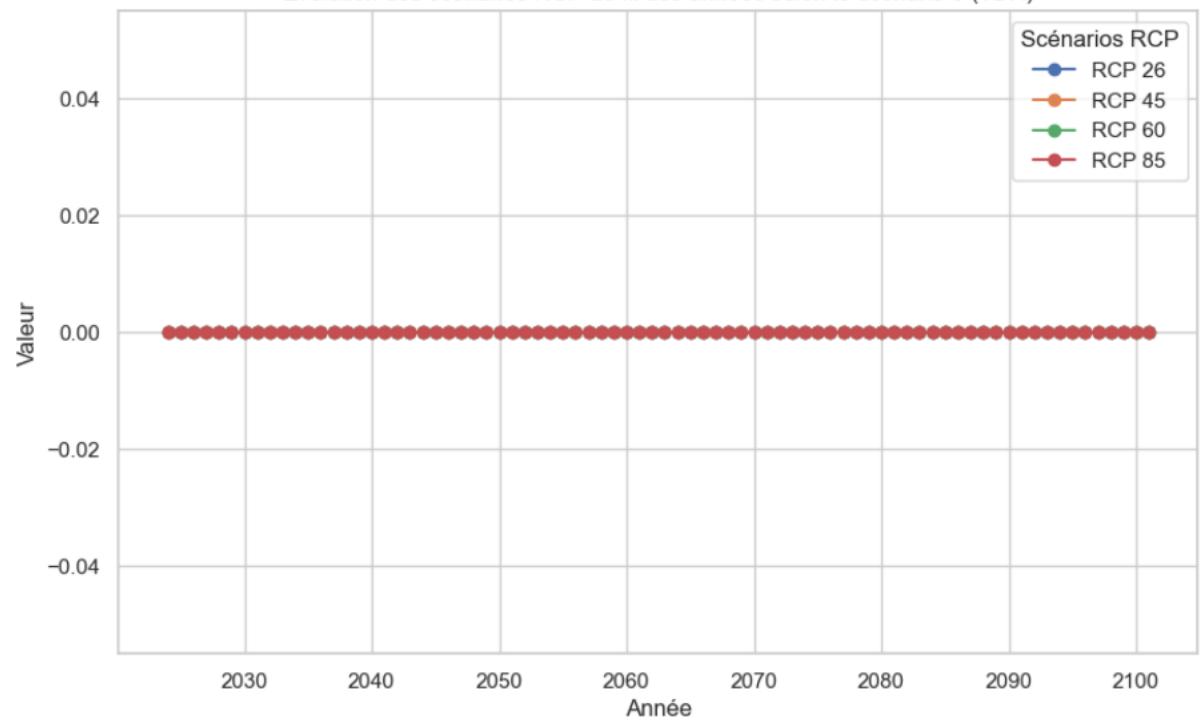
9.1.7 Région « SA »



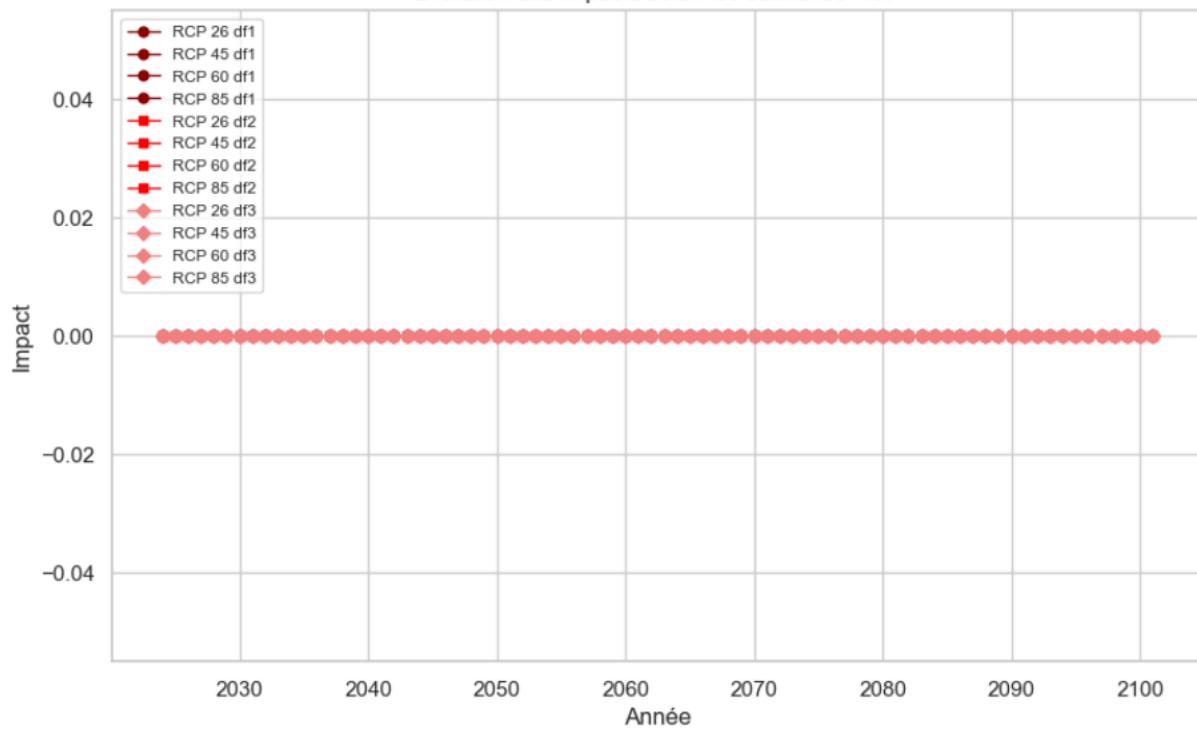
Évolution des scénarios RCP au fil des années selon le scenario 2 (RMSF)



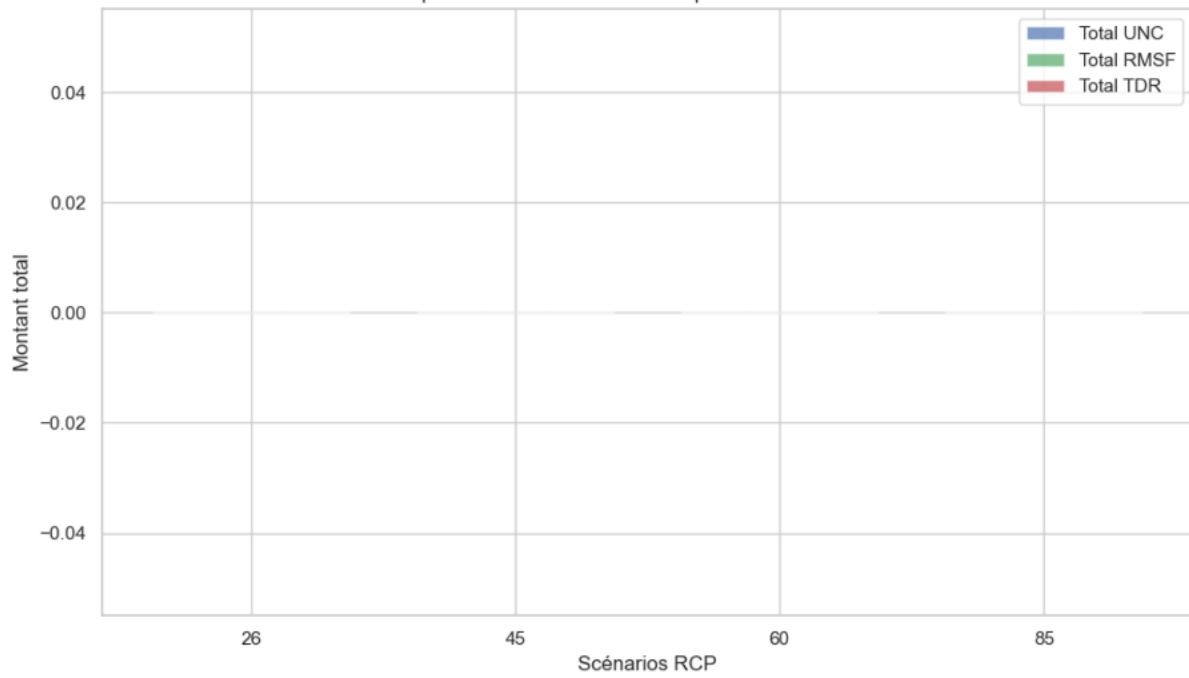
Évolution des scénarios RCP au fil des années selon le scenario 3 (TDR)



Évolution des impacts selon les scénarios RCP

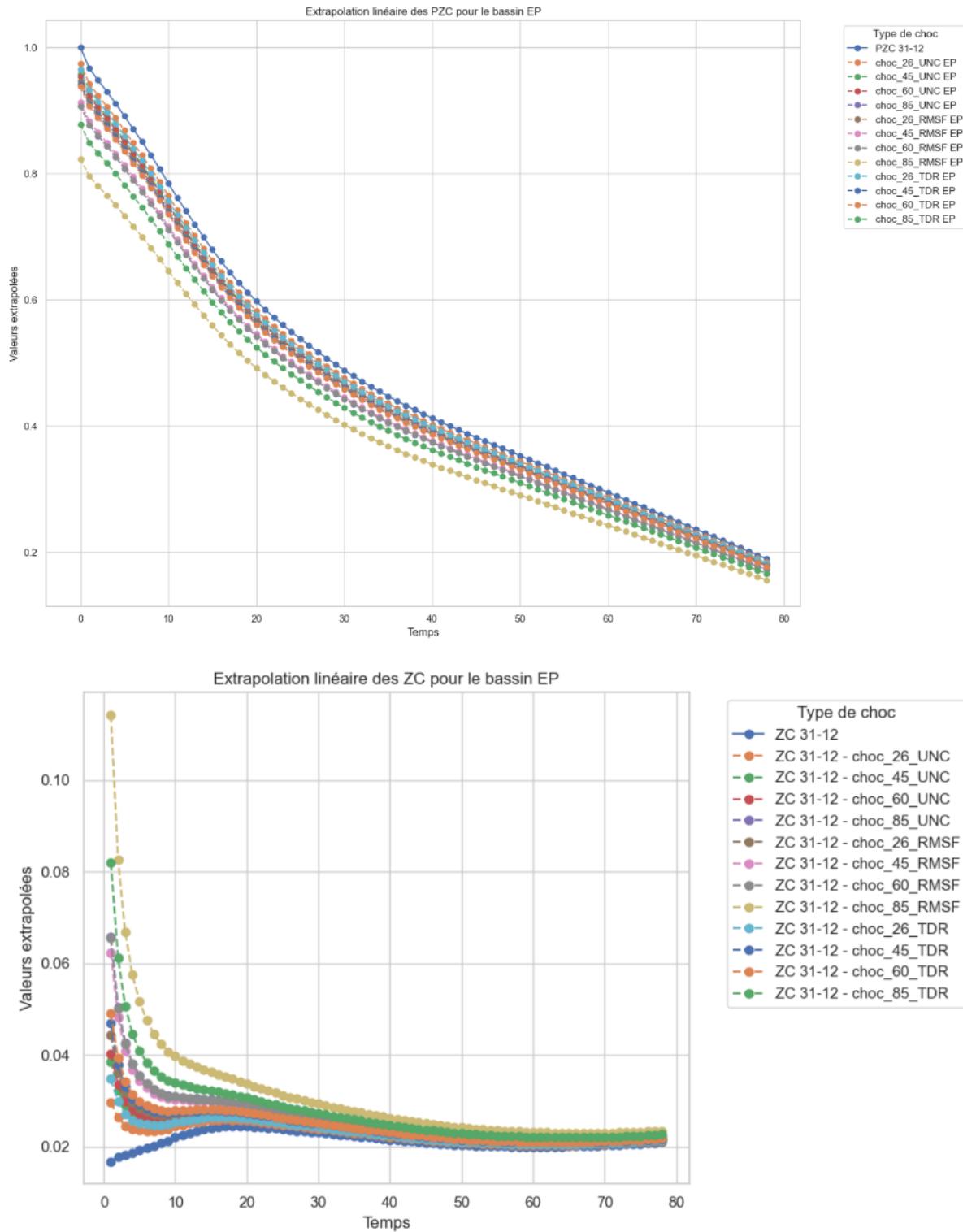


Comparaison des montants totaux pour différents scénarios

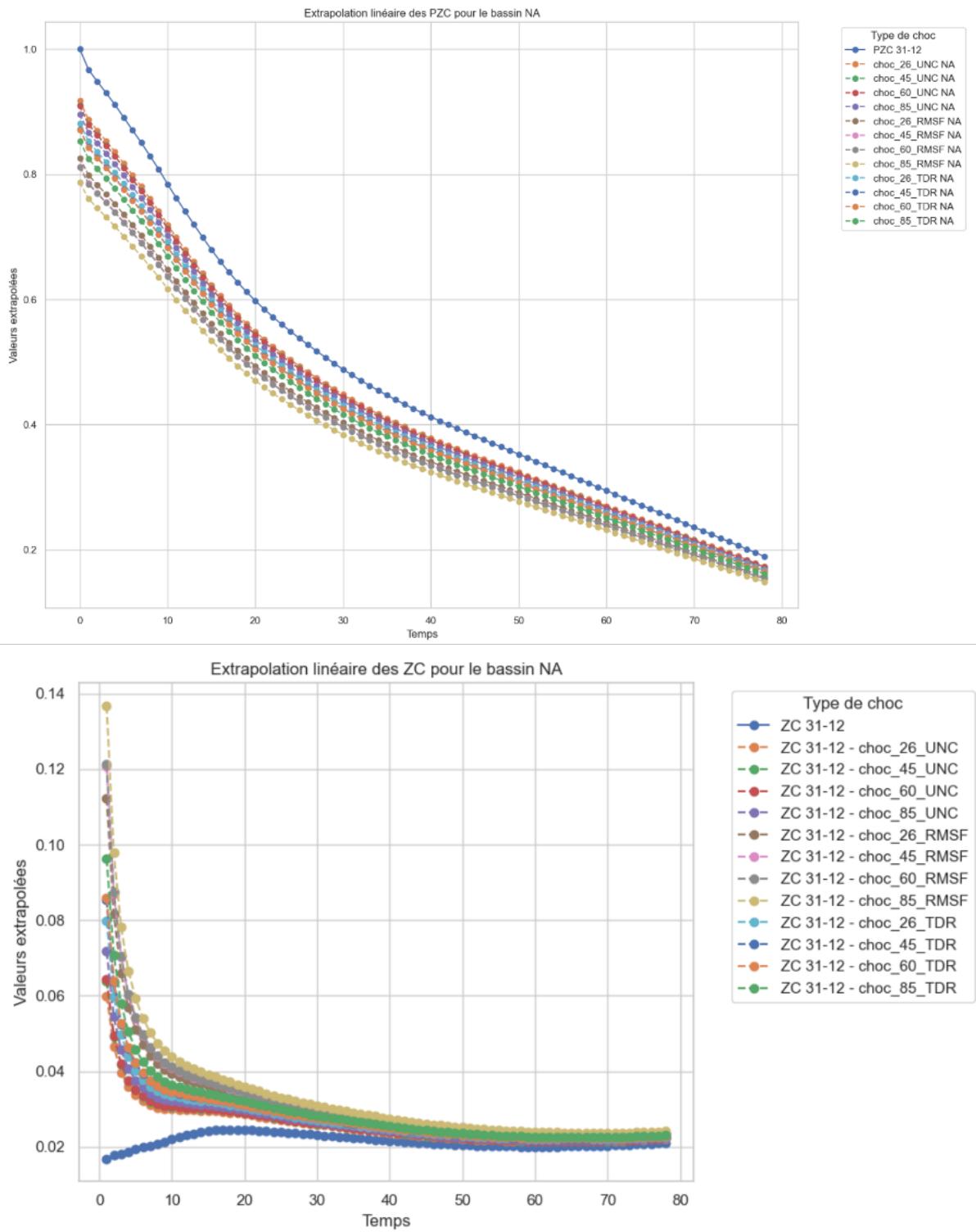


9.2 Courbes d'actualisations et taux forward

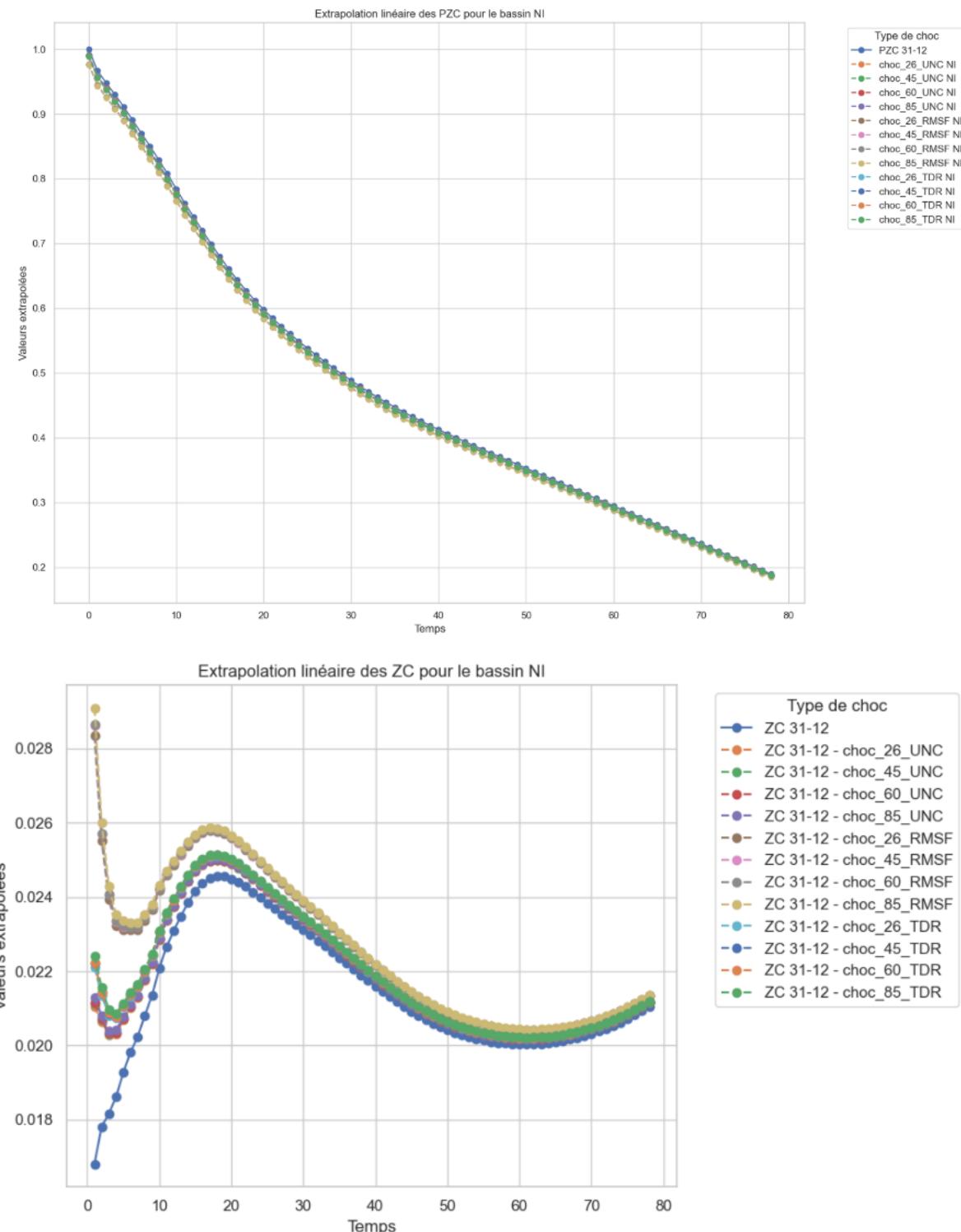
9.2.1 Région « EP »



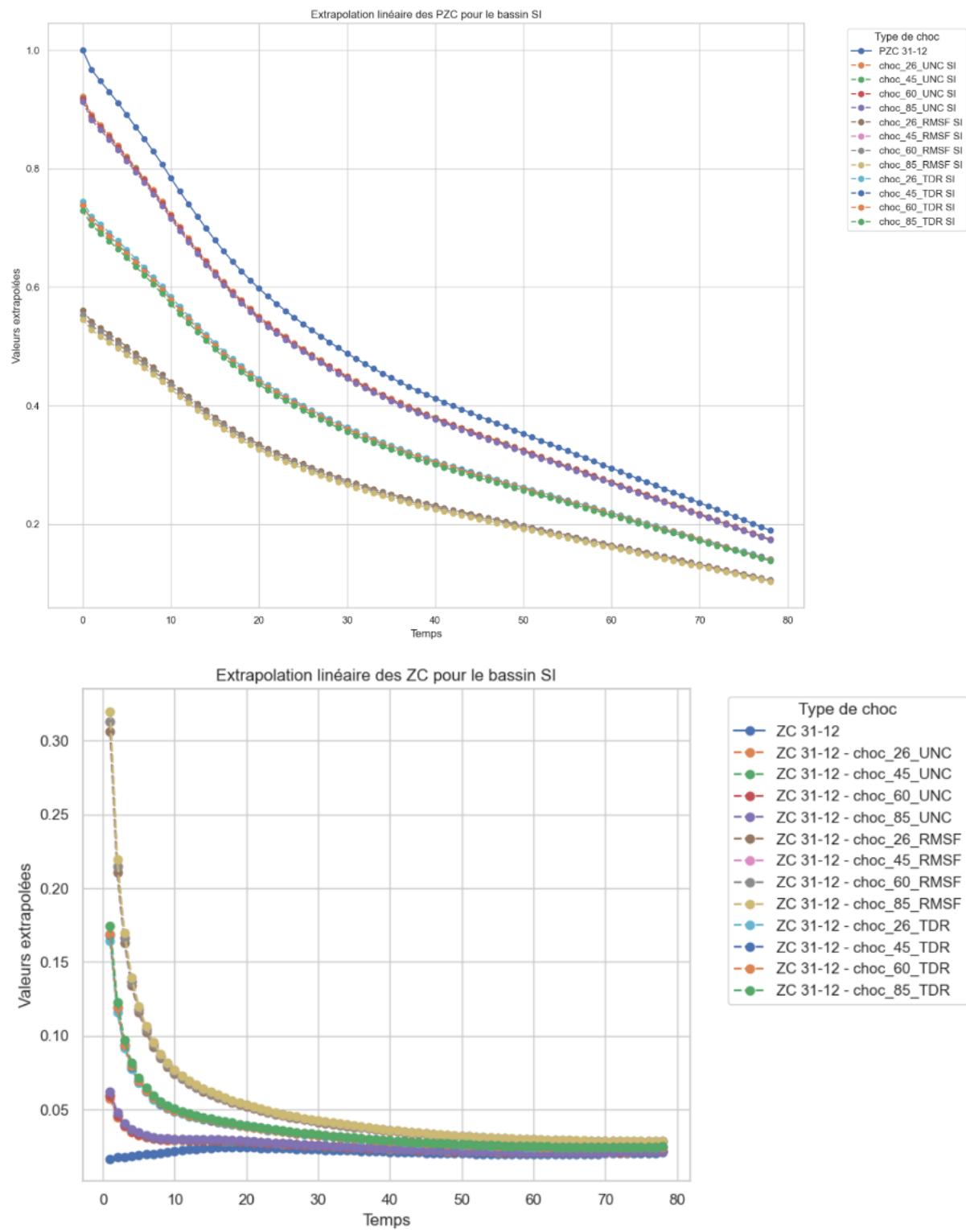
9.2.2 Région « NA »



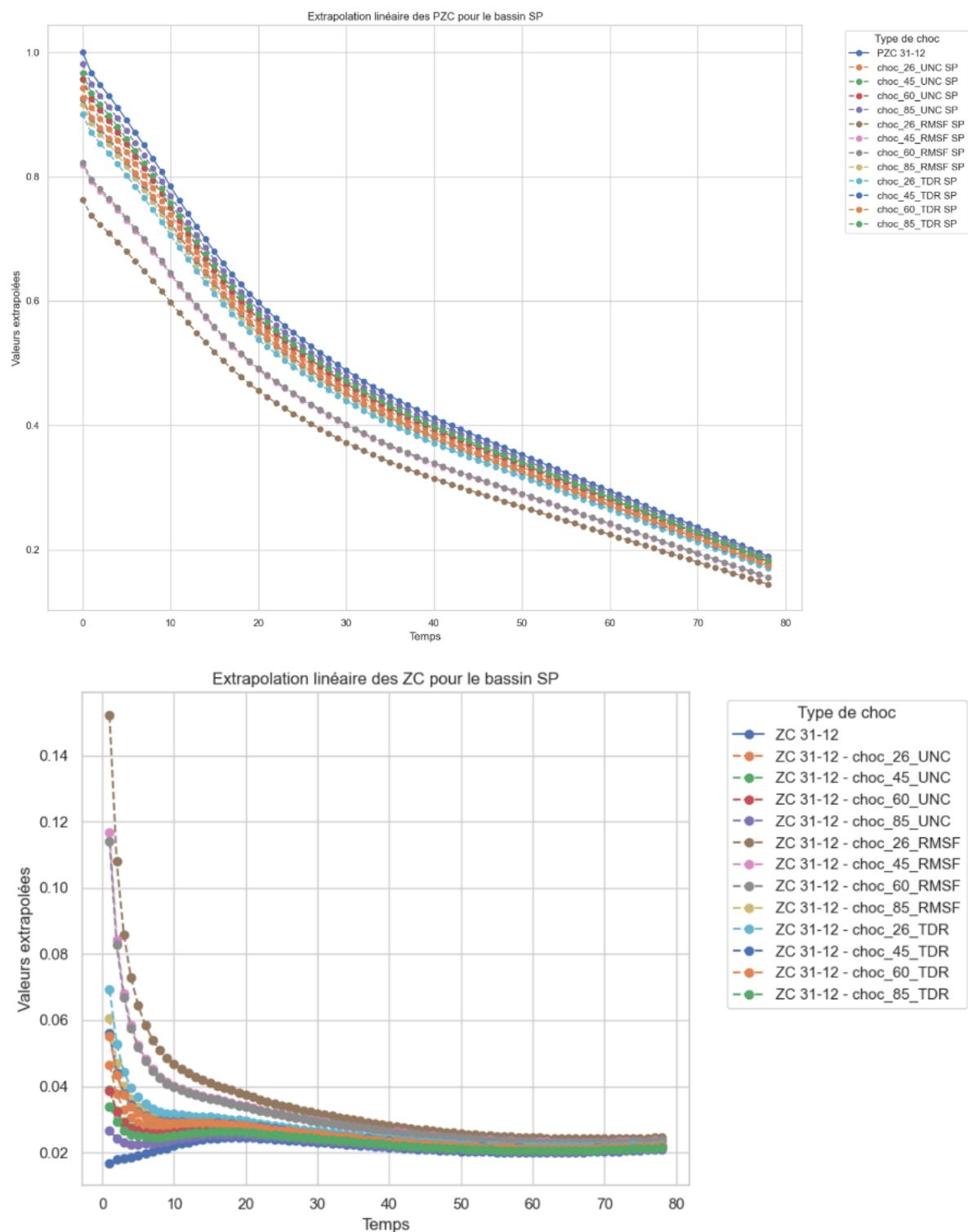
9.2.3 Région « NI »



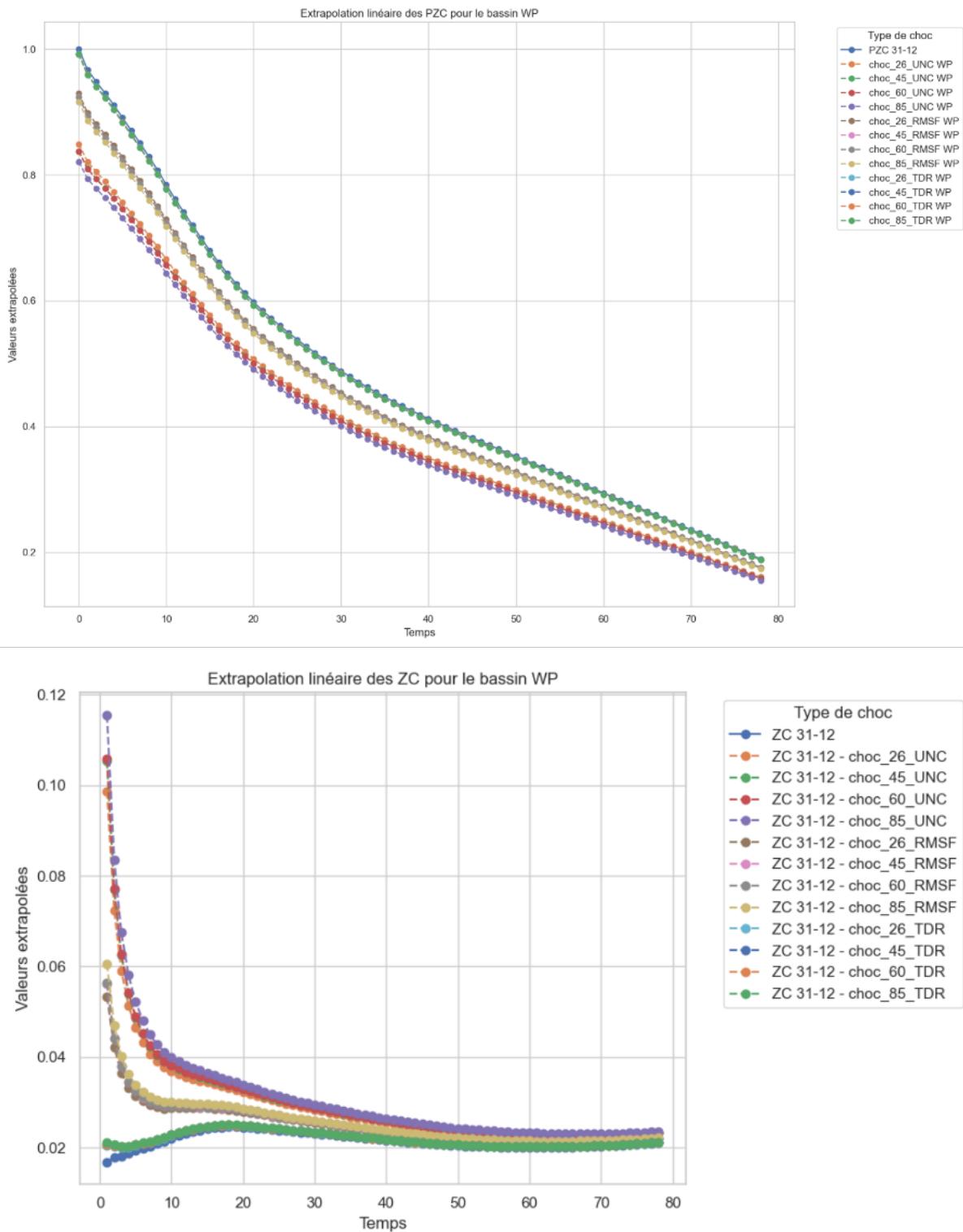
9.2.4 Région « SI »



9.2.5 Région « SP »



9.2.6 Région « WP »



9.2.7 Région « SA »

Pas de courbe obtenue étant donné qu'il n'y a pas eu d'impact (cf. 9.1.7).

9.3 Synthèse du code Python du modèle

9.3.1 Calibration et génération du modèle Hull-White 1 facteur

Le fichier Python utilisé pour cette section s'intitule : `Générateur_HW1F.py`.

9.3.2 Calculateur d'impact climatique

Le fichier Python utilisé pour cette section s'intitule : `Calculateur_Impact_Physique_Climatique.py`.

9.3.3 Module des sorties/projections du modèle

Le fichier Python utilisé pour cette section s'intitule : `Images_outputs.py`.

