Collège Doctoral
Languedoc-Roussillon

THÈSE DE DOCTORAT

Risque grêle et assurance en France :

Diagnostics et stratégies d'adaptation

Présentée en vue de l'obtention du grade de docteur
en **Géographie et aménagement de l'espace** de **l'université Paul-Valéry Montpellier 3**

*Ecole Doctorale n°60 – *Territoires, temps, société et développement**

Présentée par **Maxime TREVISANI**

Dirigée par **Freddy Vinet**

Soutenue publiquement **03 juillet 2024** devant le jury composé de

Edwige Dubos-Paillard Professeure, Université Paris 1	Rapporteure
Vincent Dubreuil Professeur, Université Rennes 2	Rapporteur
Stéphanie Defossez MCF, Université Paul-Valéry Montpellier 3	Examinatrice
Anne Peggy-Hellequin Professeure, Université Paris-Nanterre	tNJŞăƛŘŜyűŜ Řdz ƨdzNJè
Freddy Vinet Professeur, Université Paul Valéry Montpellier 3	Directeur de thèse
Laurent Boissier Manager, Generali Climate Lab	Invité

Université Paul Valéry Montpellier 3 — École Doctorale ED60 Territoires, Temps, Sociétés, Développement TTSD — LAGAM — Generali Climate Lab — Anticiper l'évolution des risques climatiques pour mieux vous protéger

Comité de suivi individuel

Le **comité de suivi individuel** (CSI) est déterminé par l'article 11 de l'arrêté du 26 août 2022 modifiant l'arrêté du 25 mai 2016 : *« Un comité de suivi individuel du doctorant veille au bon déroulement du cursus en s'appuyant sur la charte du doctorat et de la convention de formation ».*

Le rôle du comité de suivi individuel est d'assurer un accompagnement du doctorant pendant toute la durée du doctorat au regard de la charte de la convention de formation.

Pour la préparation de cette thèse, le comité de suivi individuel a été composé de :

Frederic Leone Professeur HDR, Université Paul Valéry	Membre spécialiste de la discipline ou en lien avec le domaine de thèse
Jean-Philippe Cherel Ingénieur de recherche, Université Paul Valéry	Membre non-spécialiste extérieur au domaine de recherche du travail de thèse
Karl Hoarau MCF, Université de Cergy-Pontoise	Membre extérieur à l'établissement dans lequel s'est déroulé la thèse

Les comités de suivi individuel se sont déroulés :

- **Le 09 juin 2021**
- **Le 15 juin 2022**
- **Le 14 juin 2023**

Résumé

En France les coûts provoqués par les périls naturels, indemnisés par les assurances, sont pour moitié causés par les tempêtes, la grêle et le poids de la neige (couverts par une garantie nommée TGN). Ces trois aléas représentent plus de 80 % du nombre de sinistres sur la période 1988-2013 (FFA, 2015). Le risque de grêle est rarement isolé dans les études sur la garantie TGN. Pourtant, il constitue une préoccupation grandissante pour les assureurs tant pour l'agricole (assurance récolte) que pour le dommage aux biens (auto et habitation). Cette préoccupation est d'autant plus grande qu'elle s'inscrit dans un contexte stressé de changement climatique, où les incertitudes sont nombreuses quant à la mesure de l'augmentation de la fréquence et de l'intensité des phénomènes. Les méthodes de lutte active (Cazac et al., 2017) n'offrent pas les solutions espérées et les méthodes de protection passives (filet), très coûteuses, sont réservées aux enjeux à haute valeur ajoutée (vergers, parcs automobiles…).

Par ailleurs, la grêle est un phénomène très ponctuel, difficile à mesurer et encore plus à cartographier. La mesure spécifique de l'intensité de la grêle se fait par des capteurs appelés grêlimètres. Ces grêlimètres n'existent que dans certaines régions et sur des périodes en général courtes. Les données des réseaux d'observation officiels (Météo-France pour la France) ne sont pas fiables car elles reposent sur des observations directes par des observateurs. Or de plus en plus de stations météorologiques sont automatisées et ne mesurent pas les phénomènes tels que le brouillard, la grêle, la foudre….

Aussi, pour mettre en place des solutions assurantielles justes et efficaces, les assureurs doivent améliorer leur connaissance du risque grêle en recherchant et structurant des informations nouvelles. L'objectif est d'être plus performant dans la mesure de l'intensité et de la fréquence du phénomène grêle, afin de mieux préparer la profession assurantielle aux enjeux du changement climatique et surtout mieux protéger/accompagner les assurés à travers des stratégies d'adaptation efficaces.

Mots-clés : Grêle ; Risque ; Assurance ; Dommage ; Prévention

Abstract

In France, half of the costs caused by natural perils, and compensated by insurance, are caused by storms, hail and the weight of snow (covered by a guarantee called TGN). These three hazards account for over 80% of the number of claims over the period 1988-2013 (FFA, 2015). The risk of hail is rarely isolated in studies of TGN cover. Yet it is a growing concern for insurers in both agricultural (crop insurance) and property (auto and home) lines of business. This concern is all the greater given the stressful context of climate change, and the many uncertainties surrounding the extent to which the frequency and intensity of these phenomena will increase. Active control methods (Cazac et al., 2017) do not offer the solutions hoped for, and passive protection methods (netting), which are very costly, are reserved for high value-added issues (orchards, car fleets...).

Moreover, hail is a very specific phenomenon, difficult to measure and even more difficult to map. Hail intensity is measured specifically by sensors called hail meters. Hailmeters only exist in certain regions, and generally only for short periods. Data from official observation networks (Météo-France in France) are unreliable, as they are based on direct observations by observers. However, an increasing number of weather stations are automated and do not measure phenomena such as fog, hail or lightning....

So, to implement fair and effective insurance solutions, insurers need to improve their knowledge of hail risk by researching and structuring new information. The aim is to be more effective in measuring the intensity and frequency of hail, so as to better prepare the insurance industry for the challenges of climate change, and above all to better protect and support policyholders through effective adaptation strategies.

Keywords : Hail ; Risk ; Insurance ; Damage ; Prevention

Remerciements

Cette thèse n'aurait pu aboutir sans les nombreuses personnes qui m'ont entourées. Je tiens à leur exprimer toute ma reconnaissance.

Mes remerciements vont tout d'abord à mon directeur de thèse, Freddy Vinet, pour sa confiance, son encadrement et sa disponibilité tout le long de ce travail de recherche. Ses remarques, ses conseils et ses relectures ont largement participé à l'aboutissement de ce travail.

Je souhaite également adresser mes remerciements à Jean-Louis Charluteau, directeur de la réassurance de Generali France et du Generali Climate Lab, son successeur Simon Blaquière, Laurent Boissier, responsable R&D du Generali Climate Lab, pour avoir eu l'opportunité de réaliser une thèse dans le cadre concret d'une société d'assurance comme Generali France.

Ensuite, je remercie aux membres du jury, Edwige Dubos-Paillard, Professeure de l'Université Paris 1, et Vincent Dubreuil, Professeur de l'Université Rennes 2, rapporteurs de ce travail, Stéphanie Defossez, Maîtresse de Conférence de l'Université Paul-Valéry Montpellier, et Anne Peggy-Hellequin, Professeure de l'Université Paris-Nanterre, d'avoir accepté d'évaluer ce travail.

Puis, j'adresse mes remerciements aux membres du Comité de Suivi individuel, Frederic Leone, Professeur de l'Université Paul Valéry, Jean-Philippe Cherel, Ingénieur de recherche au sein de l'Université Paul Valéry, et Karl Hoarau, Maître de Conférence de l'Université de Cergy-Pontoise, pour leur soutien et leurs conseils tout le long de cette thèse.

Je tiens également à remercier l'ensemble des membres du LAGAM, mes collègues (anciens et actuels) de la réassurance et du Generali Climate Lab pour m'avoir accompagné durant ce projet. Un grand merci pour ces conseils, accompagnements, souvenirs et d'avoir été des collègues exceptionnels. Mes remerciements vont tout particulièrement auprès de Arthur Perringaux, Ilyes Arfa, Noel Philmon Mzungu, Laura Hasbini, Andrea Poletti, Quentin Henaff, Camille de Carolis, Luna Caceres, Clara Hidoux-Le Henaff, Angèle Blais, Nicolas Leroux, Wiame Lemsoudi, Anouar Oussalah, Cylia Mezzar et Valentin de Billy.

Merci à mes partenaires de Dutch (ils se reconnaitront) pour avoir dynamiser les pauses de midi avec une géopolitique complexe (alliance et trahison), et bon courage à mes collègues doctorants pour la suite et la fin de votre thèse.

Pour finir, je souhaite remercier ma famille et ma compagne, Margot Demuynck, sans qui ce travail n'aurait pas été possible. Merci de m'avoir soutenu (et supporté) tout le long de ces trois années de travail.

Sommaire

Remerciements I

Lexique des sigles IV

Introduction générale 1

1. Les risques climatiques 1

1.1 Une préoccupation grandissante 1

1.2 Les risques climatiques dans le système français d'assurance 2

2. Le risque grêle 3

2.1 La notion de risque 3

2.2 La grêle : une sous composante des systèmes convectifs 7

2.3 Un aléa orphelin complexe à anticiper 7

2.4 Les données grêle disponibles en France hexagonale 8

2.5 Une zone d'étude à l'échelle du territoire hexagonal à maille fine 9

3. Les enjeux du risque grêle 10

3.1 Un risque « non catastrophique » 10

3.2 Une montée en puissance qui inquiète les assureurs 10

4. Problématique et annonce du plan 11

Partie 1 Le phénomène grêle et ses impacts sur une société d'assurance 14

Chapitre 1 : Formation d'une chute de grêle 15

1.1 Un nuage d'orage producteur de grêle : le cumulonimbus 15

1.2 Microphysique de la formation des grêlons 19

1.3 Facteurs d'intensité des chutes de grêle 22

1.4 Conclusion du chapitre 1 28

Chapitre 2 : Un aléa difficile à appréhender 29

2.1 Un aléa ponctuel dans le temps et l'espace 29

2.2 La mesure de la grêle : le grêlimètre 31

2.3 Nouvelles méthodes de détection des chutes de grêle 34

2.4 Limites des cartographies de la grêle en France pour une société d'assurance 39

2.5 Une anticipation très limitée des évènements grêligènes en France 47

2.6 Conclusion du chapitre 2 48

Chapitre 3 : La grêle dans le système assurantiel français 50

3.1 Des aléas naturels qui inquiètent le marché français, en particulier la grêle 50

3.2 Périmètre assurantiel concerné par la grêle 55

3.3 La grêle chez Generali France 61
3.4 La grêle en 2022 : une année exceptionnelle en France 69
3.5 Conclusion chapitre 3 75
Conclusion de la partie 1 76
Partie 2 Besoins opérationnels de Generali France pour appréhender le risque grêle en France 78
Chapitre 4 : Une nouvelle base de données pour caractériser la grêle en France hexagonale : la BD HD 79
4.1 Sources retenues dans la constitution de la BD HD 79
4.2 Constitution de la base de données grêle (BD HD) 84
4.3 Caractéristiques des chutes de grêle en France 86
4.4 Distribution de la taille des grêlons 93
4.5 Distribution de la fréquence des chutes de grêle 96
4.6 Conclusion du chapitre 4 101
Chapitre 5 : Estimation de l'endommagement sur le portefeuille Generali lors d'un évènement grêle intense 103
5.1 Analyse de la vulnérabilité des biens exposés à la grêle 103
5.2 Modèle d'estimation de la sinistralité grêle 109
5.3 Stratégies d'adaptation aux chutes de grêle 120
5.4 Conclusion du chapitre 5 124
Chapitre 6 : Cartographie de la grêle en France 126
6.1 $\boldsymbol{IH}$, un nouvel indice pour caractériser l'aléa grêle en France 126
6.2 $\boldsymbol{H}$, un indice aléa grêle amélioré approchant le risque grêle 135
6.3 Evolution du risque grêle en France 141
6.4 Conclusion du chapitre 6 143
Conclusion de la partie 2 145
Conclusion générale 147
Bibliographie 149
Table des figures 161
Table des tableaux 167
Sommaire détaillé 169

Lexique des sigles

ACMG : Association de Climatologique de Moyenne Garonne

Anelfa : Association Nationale d'Etudes et de Lutte contre les Fléaux Atmosphériques

AZI : Atlas des Zones Inondables

BD HD : Base de données grêle réalisée dans cette thèse

CAPE : Convective Available Energy (i.e. énergie disponible de convection)

CatNat : Régime d'indemnisation des Catastrophes Naturelles

DAB : Dommage aux Biens

ESSL : European Severe Storms Laboratory

ESWD : European Severe Weather Database

FA : France Assureurs

FEADER : Fonds Européen Agricole pour le Développement Rural

FNGRA : Fond National de Gestion de Risques en Agriculture

G&C : Produit d'assurance multirisques climatiques sur les Garages et les Concessions automobiles

G/T : Contrat d'assurance récolte couvrant la Grêle et la Tempête

LI index : Lift index, aussi appelé indice de soulèvement, une mesure de l'instabilité de l'atmosphère

MRA : Produit d'assurance multirisques climatiques sur les structures agricoles

MRC : Produit d'assurance multirisques climatiques sur les commerces

MRH : Produit d'assurance habitation

MRI : Produit d'assurance multirisques climatiques sur les immeubles

MRN : Mission Risques Naturels

MUCAPE : Most Unstable Convective Available Energy. C'est le maximum des "énergies potentielles utilisables convectives" calculées dans les 3000 premiers mètres au-dessus du sol

PPRI : Plan de Prévention des Risques naturels d'Inondation

RGA : Retrait-Gonflement des Argiles

RI : Produit d'assurance multirisques climatiques sur les biens industriels

rMRC : Contrat d'assurance récolte multirisques climatiques

SP : Cellule de nature supercellulaire, pouvant être à haute précipitation (**HP**) ou basse précipitation (**LP**)

TGN : Régime d'indemnisation des Tempêtes-Grêle-Neige

WMO : World Meteorological Organization

Introduction générale

1. Les risques climatiques

1.1 Une préoccupation grandissante

L'appréhension des risques, notamment les risques climatiques, est une question primordiale à laquelle doit répondre notre société. C'est donc naturellement qu'elle se retrouve au cœur des préoccupations des acteurs publics comme privés (Kouloukoui et al., 2019; Nyberg et al., 2022) et qu'elle suscite l'intérêt de la recherche dans le but de les anticiper, les réduire, voire même les prévenir (Lung et al., 2013; Niehaus, 2002).

Les risques climatiques connaissent un regain d'intérêt dans le monde depuis une vingtaine d'années, à la fois au niveau des sphères politiques et médiatiques mais aussi dans l'univers de la recherche. La première raison en est la multiplication d'évènements climatiques majeurs dans le monde, en particulier en Europe et en France. On pense par exemple à l'ouragan Katrina ayant ravagé les Etats-Unis (157 Md$) en 2005 (Burton and Hicks, 2005; Waters, 2016), les tempêtes Lothar et Martin (7Md€ en 1999) en France, les inondations catastrophiques (14 Md€) de juillet 2021 en Allemagne[1] (Fekete and Sandholz, 2021), ou bien encore les chutes de grêle en France (5,2 Md€) de l'été 2022 ("La grêle de 2022 en France marque une nouvelle ère pour le secteur de l'assurance," 2022) ; la liste est longue et non exhaustive. La deuxième raison est la mise en lumière récente du changement climatique, apparaissant régulièrement dans la recherche (Grieneisen and Zhang, 2011), les médias (Barkemeyer et al., 2017; Bromley-Trujillo et al., 2023; Schmidt et al., 2013; Wonneberger et al., 2020), et les programmes politiques (Giddens, 2009) comme par exemple le Plan Climat 2024-2030 de la ville de Paris en France[2]. Il existe en outre de nombreux mouvements sociaux dans le monde ayant pour but de sensibiliser la population sur ce sujet (marche pour le climat et la fresque du climat en France, Sunrise aux USA…) : les aléas climatiques inquiètent la société.

C'est notamment le cas en France, où France Assureurs[3] estime que les évènements climatiques les plus coûteux se sont tous situés sur la période récente[4]. Le Tableau 1 illustre à grosse maille les caractéristiques du risque grêle, sécheresse et tempête en France.

[1] Le coût considérable des inondations en Allemagne, le Monde, 2021
[2] « Plus vite, plus local, plus juste » : le nouveau Plan Climat de Paris, Ville de Paris, 2023, consulté le 28/02/2023
[3] https://www.franceassureurs.fr/
[4] L'assurance française : données clefs 2022, France Assureurs, 2023

Tableau 1 Bilan Comparatif entre la grêle et d'autres aléas climatiques en France. L'ordre de grandeur de la durée, la fréquence nationale et la surface impactée sont renseignées, France Assureurs

	Grêle	*Sécheresse*	*Tempête*
Durée	Minutes	Semaines	Journée(s)
Fréquence nationale	~ 100 / an	~ 1 / an	~ 10 / ans
Surface impactée	1-100 km²	100 – 300 000 km²	100 – 300 000 km²
Dégâts potentiels	Dégâts sur les cultures et sur les véhicules, plus rarement sur les bâtiments. Blessés directs exceptionnel	Dégâts sur les cultures et bâtiments, morts directs rare	Dégâts sur les automobiles et sur les bâtiments, blessés / morts rare
Coût cumulé (2018-2022)	4,6 M€	2,9 M€	4,5 M€

Le changement climatique impacte directement les risques climatiques en modifiant l'aléa dans sa fréquence, son intensité, et son empreinte spatio-temporelle ; comme c'est par exemple le cas pour la sécheresse (Dai, 2011), l'inondation (He et al., 2022), la grêle (Raupach et al., 2021). Le changement climatique intervient également sur l'exposition de la population aux risques climatiques, avec l'apparition de réfugiés climatiques (Milán-García et al., 2021), mais également par la modification des enjeux avec par exemple la multiplication des sources d'énergies renouvelables (ÓhAiseadha et al., 2020; Suman, 2021).

Pour faire face à l'évolution de ces risques climatiques en France, l'Etat cherche à mettre en place une culture du risque depuis plusieurs années dans le but de sensibiliser et de préparer sa population à la survenance de ces risques comme en témoigne la mission menée en 2021 par le ministère de l'Écologie[5]. La prévention reste en effet le moyen le plus efficace pour limiter les impacts d'un évènement climatique sur notre société (McBean and Rodgers, 2010).

1.2 Les risques climatiques dans le système français d'assurance

L'assurance est le dernier filet de sécurité de la société face aux aléas climatiques. Elle repose sur le principe de mutualisation des risques, permettant ainsi d'homogénéiser, de disperser, et de diviser ces risques, afin de limiter leurs impacts économiques. Lorsqu'un risque est trop important pour un assureur, il peut faire appel à de la coassurance[6] ou à de la réassurance[7] pour céder une partie du risque.

En France, il est obligatoire de couvrir un bien appartenant à la famille du « dommage au bien » (DAB)[8] à l'aide d'un contrat d'assurance qui couvre différents périls, notamment les climatiques. On distingue les risques climatiques « assurables » des « non assurables ». Les risques « assurables » concernent la tempête, la grêle et la neige. Ces derniers sont pris en charge dans la garantie « Tempête-Grêle-Neige » (TGN). Les risques « non assurables » rassemblent de leur côté les évènements pouvant avoir un impact majeur à l'échelle nationale, tels que les inondations, la sécheresse, les séismes, les avalanches,

[5] Mission sur la transparence de l'information et de la participation de tous à la gestion aux risques majeurs, technologiques ou naturel, ministère de la Transition Ecologique, 2021

[6] Partage proportionnel d'un même risque entre plusieurs assureurs.

[7] Opération par laquelle une société d'assurance (la cédante) s'assure elle-même auprès d'une autre société (le réassureur ou le cessionnaire) pour une partie des risques qu'elle a pris en charge moyennant une part des primes.

[8] Il inclut les produits Multirisques agricole (MRA), Multirisques commerces (MRC), Risques industriels (RI), Multirisques industriels (MRI), Multirisques habitations (MRH).

les mouvements de terrain, les ouragans et cyclones, le volcanisme, et le tsunamis. Ils sont couverts par l'intermédiaire de la garantie « Catastrophes Naturelles ». Cette garantie, contrairement à la TGN, nécessite la reconnaissance par l'Etat d'un état de « catastrophe naturelle » au niveau de la commune afin de déclencher une indemnisation. Ces deux régimes sont donc complémentaires plutôt qu'en concurrence (Figure 1). Les assurances sur les récoltes ne sont pas obligatoires en France. C'est pourquoi elles ne couvrent qu'une faible proportion des surfaces cultivées. Environ un tiers des surfaces cultivées est assuré en 2022[9]. Les différents régimes des assurances récoltes ont été unifiés par décret en 2022 dans le but de favoriser la diffusion de l'assurance climatique des récoltes auprès des agriculteurs. Le nouveau régime est plus simple que l'ancien, et ne distingue plus les risques « assurables » des « non assurables ». De même, l'assurance des évènements climatiques n'est pas obligatoire pour les véhicules, contrairement à l'assurance « responsabilité civile ». L'assurance des évènements climatiques pour les véhicules est généralement comprise dans la garantie « dommage ». Nous reviendrons dans une partie ultérieure sur les contrats d'assurances climatiques en France. Les différents régimes d'indemnisation des produits assurantiels concernant les risques climatiques sont schématisés sur la Figure 1.

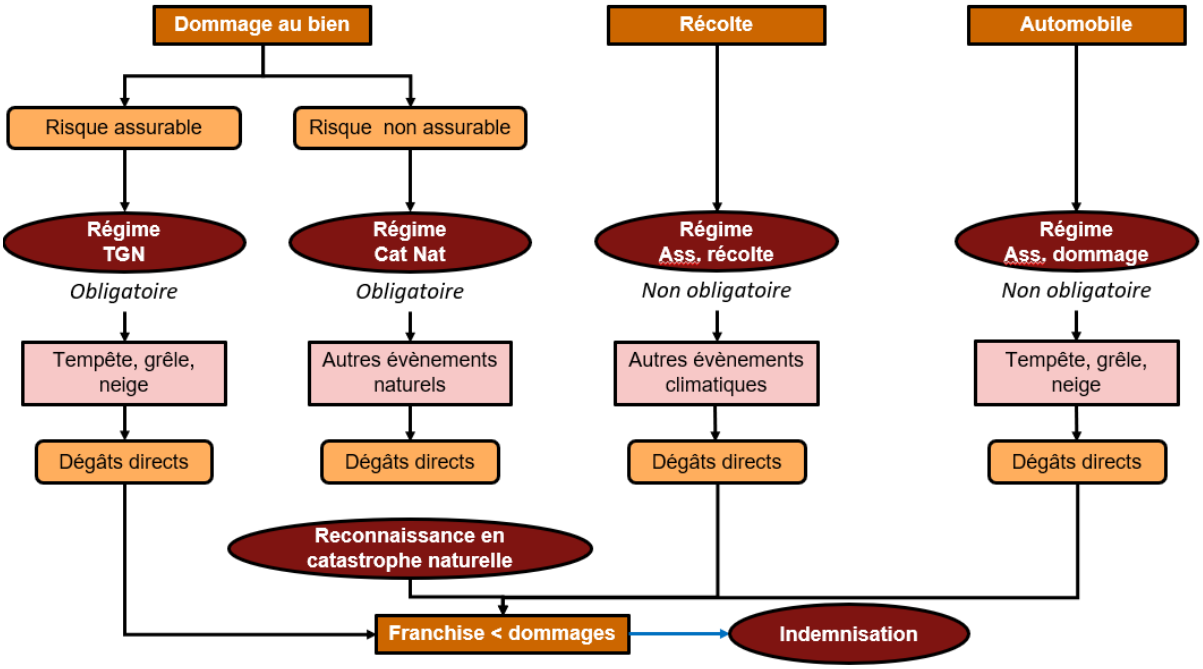


Figure 1 Régimes d'indemnisation des produits assurantiels concernant les risques climatiques, ©M. Trevisani.

2. Le risque grêle

2.1 La notion de risque

Le mot « risque » trouverait son étymologie en Italie durant la Renaissance à l'époque de l'essor des échanges maritimes et des assurances sous le terme de « resecare », signifiant « rocher escarpé, écueil » en référence au danger qu'encouraient les navires en mer et dont le navigateur se devait

[9] Projet de loi portant réforme des outils de gestion des risques climatiques en agriculture. Loi n° 2022-298 parue au Journal officiel n° 52 du 3 mars 2022, Senat, 2022.

absolument d'éviter. Ce mot aurait donc été chargé d'un double sens à l'époque : un sens négatif évoquant le danger et un positif faisant allusion à une réussite après une prise de risque. L'idée de risque en géographie apparait la première fois durant XVIIIème siècle et découlerait d'une prise de conscience collective dénonçant une dégradation des ressources naturelles par les sociétés. Il a fallu pourtant attendre les travaux de l'école de Chicago en 1950 pour voir apparaître pour la première fois un concept de risque étroitement associé à l'écologie humaine (Veyret and Reghezza-Zitt, 2005).

Le risque naturel est défini fondamentalement comme l'interaction entre le système naturel et le système anthropique (Pigeon, 2002). Le système naturel représente ainsi l'aléa, facteur influençant les répartitions et les caractéristiques de l'endommagement (sans être influencé en retour par le peuplement humain), alors que le système anthropique serait plutôt assimilé aux facteurs de peuplement inégalement favorables à l'endommagement (Figure 2).

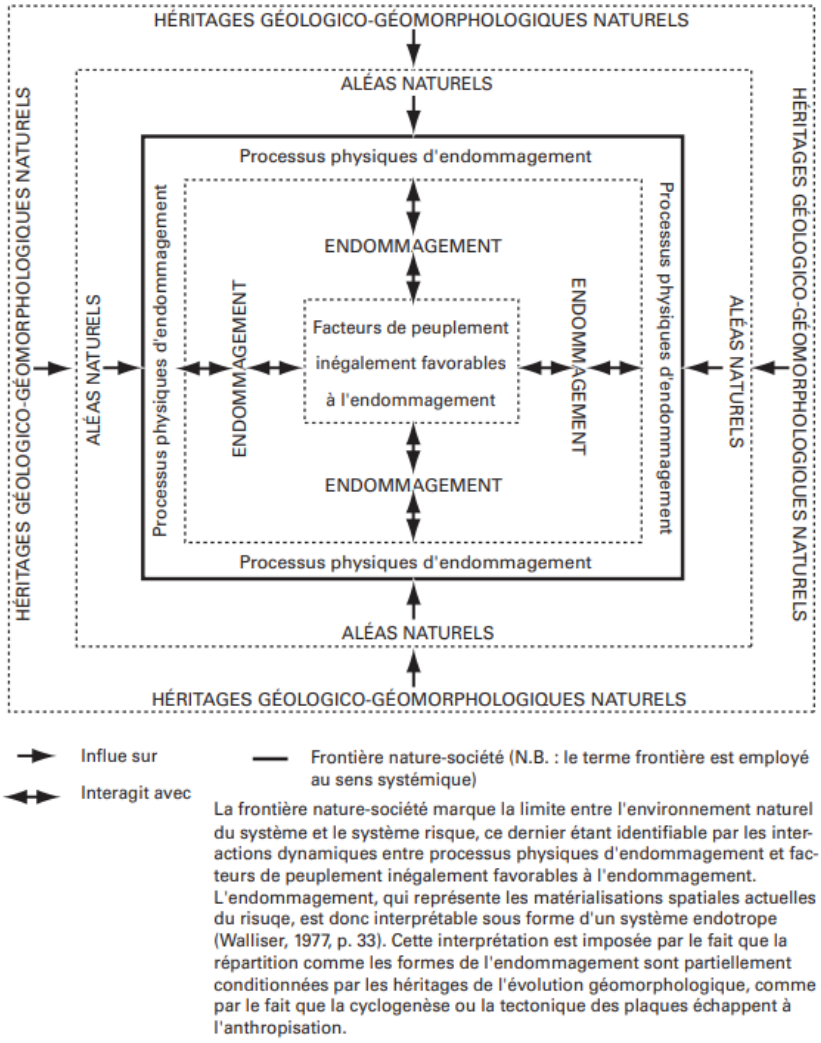


Figure 2 Le système risque et son environnement naturel ©Pigeon, 2002.

Depuis les années 2000, les risques naturels ont été particulièrement étudiés par les géographes en France, entrainant de ce fait une sémantique de plus en plus précise et acceptée (risque, vulnérabilité…) dans le but d'établir un corpus théorique, terminologique et méthodologique propre à la géographie des risques. Le concept de risque naturel évolue et devient ainsi l'intersection entre le phénomène naturel et la vulnérabilité des enjeux exposés (Leone et Vinet, 2006).

Les phénomènes naturels potentiellement dommageables liés à la géodynamique interne (géophysique) ou externe (hydrométéorologique, etc.) représentent ce que l'on appelle en Français des aléas qui s'expriment par un champ d'action (espace), une magnitude ou intensité, une fréquence, une saisonnalité qui leur sont propres, ainsi que l'ensemble des facteurs aggravants (comme le vent pour la grêle) (Thouret and d'Ercole, 1996). Un aléa peut ainsi être prédit en fonction de ses caractéristiques. L'affirmation de la naturalité d'un phénomène naturel varie d'un auteur à l'autre : chez Thouret et d'Ercole, le phénomène naturel correspond à un danger potentiel pour les personnes, et les biens dans une zone et une période définie, alors que pour Tamru (Tamru, 2002) il se rapporterait plutôt à une manifestation probable d'une catastrophe. On regroupe de nos jours les phénomènes naturels sous la notion d'« aléa ». Le terme d'aléa peut s'exprimer sous la forme d'une probabilité d'occurrence d'un phénomène naturel d'une intensité donnée. Pour les chutes de grêle, l'aléa se mesure par le nombre et le diamètre des grêlons par unité de surface. L'intensité de l'aléa grêle correspond quant à elle plutôt à l'intégration de l'énergie cumulée de chaque grêlon par unité de surface, en J/m².

La vulnérabilité lato sensu s'inscrit dans un système englobant les préjudices corporels et moraux aux personnes, ainsi que l'endommagement potentiel des enjeux exposés (biens de production, patrimoine, activité socio-économique), visible sur la Figure 3. Elle obéit donc à une série de facteurs structurels (socio-économiques, socio-démographiques, techniques ou physiques vis-à-vis du bâti et des matériaux exposés), fonctionnels (qualité de la prévention et de l'organisation des secours en cas de catastrophe), géographiques et conjoncturels. La vulnérabilité correspond ainsi à une évolution complexe relevant de tendances générales ou de cas particuliers de mutation des lieux. Tamru parle même de « processus de vulnérabilisation » pour prendre en considération la complexité des changements que connait les espaces (Tamru, 2002).

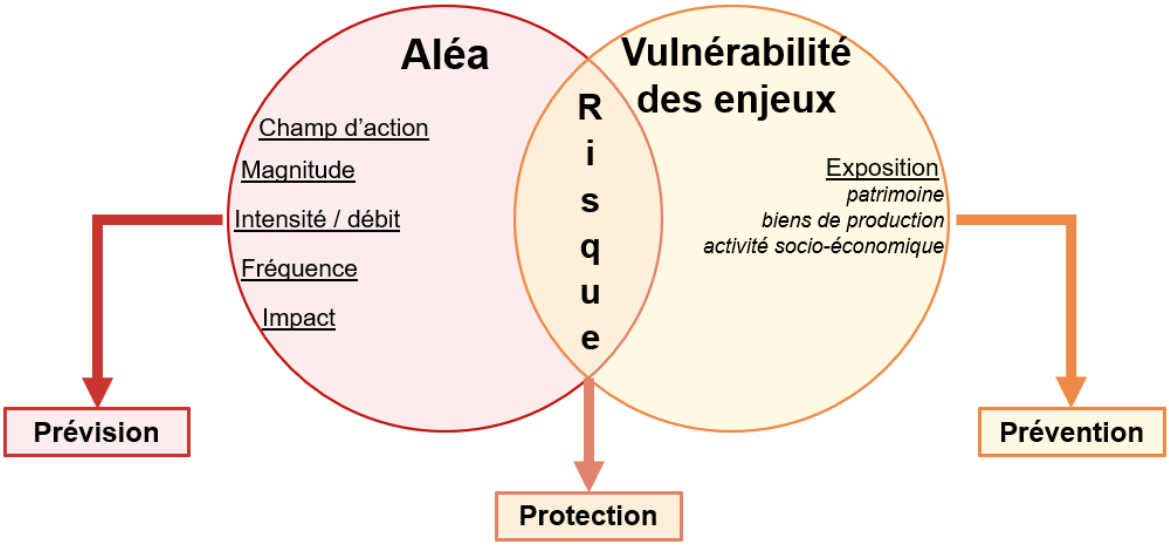


Figure 3 Définition du risque utilisée dans notre étude selon les travaux de Thouret, d'Ercole, Tamru, Vinet et Leone, ©M. Trevisani

L'analyse des facteurs de vulnérabilité rend possible l'estimation de l'amplitude des préjudices potentiels lors de la survenance d'un aléa climatique, en fournissant une mesure quantitative de l'exposition ainsi qu'une mesure qualitative de la capacité de réponse d'un individu ou d'un groupe exposé à un sinistre. En effet, la vulnérabilité se trouve modifiée par la qualité de la réponse d'un individu ou d'un groupe. Lorsque la manifestation catastrophique d'un phénomène naturel dépasse largement la capacité de réponse d'une société sinistrée, elle se traduit habituellement par une crise

temporelle, une perturbation socio-économique et une dévastation spatiale. Lorsque la capacité de réponse est partiellement dépassée ou défectueuse (ex : plans de gestion des secours existants mais communications difficiles durant la crise), les effets d'un sinistre peuvent être plus ou moins accentués ou parfois même déboucher sur de véritables catastrophes lorsque la défaillance s'avère capitale. Il convient alors de distinguer les capacités de réponse d'un individu, d'un groupe et celles d'une société.

Concernant la grêle, l'apparition de nouvelles vulnérabilités dans les années récentes a entraîné une modification des coûts associés à la sinistralité grêle, avec par exemple l'essor des panneaux solaires et l'apparition de « fermes solaires » en France et à l'étranger, le développement de l'isolation par l'extérieur et des volets roulants en PVC. Les fermes solaires représentent un des principaux enjeux du risque grêle au regard du coût par unité de surface (entre 6 000 et 20 000 € / m² pour un particulier en fonction de la puissance totale de l'installation[10,11]). La survenance de chutes de grêle importantes sur une ferme solaire peut entraîner de lourds dégâts, comme ce fut le cas le 21 juin 2022 où 80% des panneaux photovoltaïques (sur 26 000 m²) de la ferme solaire de Vitry-en-Charollais ont été endommagés[12] (Figure 4).



Figure 4 Les panneaux photovoltaïque de la ferme solaire de Vitry-en-Charollais après les chutes de grêle du 21 juin 2022, ©Luxel

Ces nouvelles vulnérabilités ont ainsi pu modifier localement le risque grêle estimé dans les précédents travaux (Vinet, 2001).

[10] 3 kWc, 6 kWc ou 9 kWc : Quel prix pour une installation solaire selon vos besoins ?, EDF ENR, 2023
[11] Quel est le prix d'un panneau solaire ? Voici les coûts réels, Engie, 2024
[12] Grêle en Saône-et-Loire : le parc photovoltaïque de Vitry-en-Charollais détruit aux trois quarts, juste avant sa mise en service, France 3 régions, 2022

2.2 La grêle : une sous-composante des systèmes convectifs

Selon l'atlas des nuages de la World Meteorological Organization[13], on considère toute particule de glace supérieure à 5 mm de diamètre comme un grêlon. La précipitation des grêlons forme le phénomène de chute de grêle. Elle impacte principalement les latitudes moyennes dans le monde, c'est-à-dire celles comprises entre 30° et 50° (Eccel et al., 2012).

La taille et la densité des grêlons sont très variables et dépendent des conditions atmosphériques dans lesquelles les grêlons se sont formés. Le plus gros grêlon jamais enregistré dans le monde est tombé en Dakota du Sud le 23 juillet 2010 avec un diamètre de 20,3 cm. En France, le record historique national est de 12 cm (Punge and Kunz, 2016), atteint à quatre reprises :

- Dans le Nord le 25 juin 2009
- Dans le Loiret le 10 juin 2014
- Dans les Deux-Sèvres le 22 mai 2022
- Dans les Hautes-Pyrénées le 20 juin 2022

Souvent de telles dimensions résultent de l'agglomération de grêlons plus petits. Aussi ces « méga-grêlons » n'ont pas des formes ovoïdes mais très irrégulières.

Les processus physiques à l'origine de la formation des grêlons sont complexes et pas encore parfaitement compris (Kang et al., 2007; Michaud et al., 2014). Les études s'accordent cependant pour dire que la grêle est une sous-composante des systèmes convectifs, elle se forme donc exclusivement dans les nuages convectifs de type cumulonimbus. La temporalité des chutes de grêle est donc étroitement liée à celle des phénomènes convectifs intenses, c'est-à-dire en France entre mai et septembre.

2.3 Un aléa orphelin complexe à anticiper

Les principaux travaux sur le risque grêle en France se cantonnent presque exclusivement au Sud-Ouest de la France (Berthet et al., 2013; Dessens, 1986; Dessens et al., 2001; Andrés Merino et al., 2014), région fortement viticole et donc sensible aux chutes de grêle. Il existe une unique étude du risque grêle à l'échelle du territoire hexagonal, réalisée par Vinet en 1998 (Vinet, 1998). La France est donc en retard vis-à-vis de ses européens, où les études sur la grêle ont été en moyenne réalisées en 2005 (Punge and Kunz, 2016) , soit presque 10 ans après. La grêle est ainsi ce qu'on appelle un aléa « orphelin » en France. Ce manque d'étude s'explique par plusieurs facteurs. D'une part la grêle n'est – à juste titre – pas considérée comme un risque majeur car n'engendrant pas de victime. Elle ne figure pas à l'agenda des politiques de prévention du Ministère de l'Ecologie. De plus, les réseaux de mesures climatologiques officiels (Météo France) ne fournissent pas de données fiables et homogènes à l'échelle nationale pour pouvoir quantifier et spatialiser l'aléa. Enfin, coté assurance, la grêle est associée à d'autres périls climatiques dans le cadre de la garantie TGN (Michel, 2018). Elle est plutôt englobée dans les « severes convectives storms » (phénomènes convectifs / orageux) dans les études européennes et internationales, en particulier au sein des sociétés d'assurance et de réassurance.

La grêle est un phénomène physique complexe à modéliser et à anticiper. En effet, même si les chutes de grêle sont exclusivement associées aux phénomènes convectifs, on estime que seulement 10% des orages produisent[14] des grêlons touchant le sol. Les couloirs de grêle, témoins des chutes de grêle,

[13] https://cloudatlas.wmo.int/en/hail.html
[14] Note technique, Meteo France, 2007

sont étroits : de l'ordre du kilomètre. Ils ne concernent donc qu'une très faible proportion de la surface impactée par l'orage, donnant aux chutes de grêle un caractère très localisé dans l'espace mais aussi dans le temps.

Actuellement, les chutes de grêle ne peuvent être mesurées qu'avec l'aide d'un détecteur mécanique appelé « grêlimètre », appareil enregistrant les impacts de grêlons. Il est également possible d'observer les chutes de grêle par l'intermédiaire de témoin, ou bien par l'intermédiaire de la sinistralité. Malgré ces difficultés autour de la mesure de la grêle, il reste cependant possible d'estimer la position et l'intensité d'une chute de grêle à l'aide de proxys météorologiques et d'algorithmes. Ces estimations sont complexes et font l'objet de nombreuses recherches dans le monde (Féral et al., 2003; Skripniková and Řezáčová, 2014). C'est pour toutes ces raisons que le risque grêle est peu étudié en France.

2.4 Les données grêle disponibles en France hexagonale

L'étude des risques naturels est plus souvent une étude « phénoménologique » que « statistique » en géographie. La survenance d'un évènement climatique permet en effet la recherche et la caractérisation du risque associé (aléa, vulnérabilité). L'analyse de l'aléa à l'échelle nationale relève plus de l'accumulation de chutes de grêle que de quelques évènements sporadiques. L'échelle d'analyse doit donc être suffisamment fine pour capter les disparités territoriales mais également suffisamment large pour avoir une statistique fiable à ce niveau d'analyse. La maille d'analyse qui semble répondre au mieux à ces critères correspond donc à la maille communale, soit une surface d'environ 16 km² en 2022.

Les données assurantielles permettent d'estimer la fréquence des chutes de grêle sur un grand périmètre géographique par le biais de l'exposition de la société d'assurance (portefeuille d'assurés), tout en étudiant la vulnérabilité des biens assurés à travers l'endommagement. Les données associées aux grêlimètres, appareils détectant les chocs mécaniques de la grêle, sont les données les plus fiables et précises existantes sur le marché dans le monde (Palencia et al., 2009).

Les grêlimètres permettent l'étude de la fréquence, du diamètre des grêlons et de l'intensité (J/m²) des chutes de grêle. L'unique réseau grêlimétrique actuellement opérationnel en France est tenu par l'Anelfa, il reste cependant principalement concentré sur le quart Sud-Ouest de la France, induisant un fort biais géographique[15].

Les réseaux d'observation amateurs (ou professionnels) sont également une autre source de données et permettent la constitution d'une base de données occurrencielles (présence/absence de grêle en un point donné). Ces réseaux ont connu un fort essor dans les années 2000 à la suite de l'émergence du numérique. La presse et l'avènement des réseaux sociaux ont permis le développement de nombreux réseaux d'observation alimentés par des amateurs et professionnels passionnés de météorologie (Infoclimat[16], Météociel[17], Météo 42[18], Lyon météo[19]…). Ces réseaux, avec une communauté parfois importante (47 000 abonnés Facebook pour Lyon météo), permettent de recueillir des témoignages occurrenciels à maille fine (communale) avec des indications sur la date, voire sur la taille de grêlons et les dommages notables constatés. Ces sources, comme les autres

[15] https://www.anelfa.asso.fr/-Reseaux-.html
[16] https://www.infoclimat.fr/
[17] https://www.meteociel.fr/
[18] https://meteo42.jimdofree.com/
[19] https://www.lyonmeteo.com/

sources de données, restent dépendantes de la répartition géographique et de la densité de population du réseau et de sa communauté associée. Ce biais est difficilement quantifiable, car la position de chaque membre de la communauté n'est pas connue.

En dehors des réseaux grêlimétriques, il n'existe actuellement pas de mesures physiques permettant de savoir avec certitude la présence de grêle. Il est uniquement possible d'estimer la susceptibilité d'occurrence de chutes de grêle à partir de différents paramètres météorologiques (Allen et al., 2017, 2015; Mohr et al., 2015; Murillo et al., 2021; Punge et al., 2017; Taszarek et al., 2019). Cette méthode a permis l'apparition d'un nouveau type de données « hybrides » croisant les données occurrencielles avec des chutes de grêle potentielles reconstituées par modélisation rétrospective. Keraunos[20], bureau d'études français spécialisé dans la prévision et la gestion des risques liés aux phénomènes orageux, possède la base de données grêle la plus exhaustive en France. Le Tableau 2 résume les caractéristiques des différentes sources de données.

Tableau 2 Principales sources de quantification et de spatialisation du risque grêle.

	Assurance	*Grêlimètrie*	*Données occurrencielles*	*Données hybrides*
Emetteur	Generali	Anelfa	Réseaux sociaux, presse…	Keraunos
Couverture	France	Sud-Ouest	France	France
Echelle	Contrat (ponctuelle)	Ponctuelle	Commune	Commune
Intérêt	Quantifier les enjeux financiers Estimer la vulnérabilité Intensité approchée par les dommages	Fiabilité Mesure l'intensité et la fréquence	Faible biais géographique Mesure l'intensité et la fréquence	Faible biais géographique Données très exhaustives
Limites	Dépendance de l'exposition	Faible couverture géographique	Fiabilité, pas toujours une information sur l'intensité	Fiabilité, Proportion des données observées et modélisées non connue

Nous reviendrons en détail sur toutes ces différentes sources évoquées lors du développement de cette thèse.

2.5 Une zone d'étude à l'échelle du territoire hexagonal à maille fine

La zone d'étude choisie est la France hexagonale en raison de la problématique de départ qui est la gestion du risque grêle pour une compagnie d'assurances, Generali France. Les compagnies d'assurances gèrent les risques à l'échelle nationale, ce qui permet de mutualiser le risque grêle tout en ayant un portefeuille équilibré et rentable dans le temps, garant de la stabilité de l'entreprise.

Comme énoncé plus haut, la maille de notre analyse doit être un bon compromis entre une échelle suffisamment fine pour capter les disparités géographiques et suffisamment large pour avoir une statistique suffisante sur un territoire donné. En effet, il existe une très forte variabilité spatio-temporelle des chutes de grêle : elles concernent un territoire très restreint lorsqu'elles se produisent (quartier, commune…) mais peuvent potentiellement impacter l'ensemble du territoire. La maille de notre analyse doit également tenir compte des limites de précision de nos sources de données, qui

[20] https://www.keraunos.org/

sont dans l'incapacité d'avoir une échelle plus fine que celle de la commune, hors données assurantielles.

Le risque grêle a donc été étudié à l'échelle du territoire hexagonal et à la maille de la commune.

3. Les enjeux du risque grêle

3.1 Un risque « non catastrophique »

Le risque grêle n'est pas considéré comme un risque « catastrophique », puisqu'un unique évènement grêligène ne va pas impacter lourdement une grande partie du territoire (Leroy, 2006). En effet, un évènement grêligène ne devrait jamais, en théorie, produire des dégâts matériels de l'ordre d'une « catastrophe naturelle » comme les ouragans, les tempêtes ou les séismes. Les chutes de grêle peuvent cependant être dévastatrices localement, autant pour les biens assurés que pour la faune, comme ce fut le cas par exemple à Vichy le 4 juin 2022 où les chutes de grêle ont tué plus de 10 000 oiseaux ("Intempéries : 10 000 oiseaux sont morts à cause des orages et de la grêle," 2022). Lors d'un évènement grêligène particulièrement marqué au cours de l'été 2022 à La Bisbal d'Empordà en Espagne, à proximité des Pyrénées, une fillette de 20 mois est même décédée[21].

Ces éléments, couplés avec les évènements grêligènes majeurs sur le territoire français en 2022 et sur le territoire italien en 2023, interrogent cependant la qualification de « non catastrophique » associée au risque grêle en France de nos jours.

3.2 Une montée en puissance qui inquiète les assureurs

Les chutes de grêle suscitent de l'inquiétude chez les assureurs et autres professionnels du secteur fortement exposés. La Mission Risques Naturels (MRN) y consacrait d'ailleurs sa lettre d'information n°34[22] en juillet 2020, où elle souligne notamment une absence de cartographie publique de cet aléa orphelin.

En France, France Assureurs (FA)[23] met également en lumière dans son rapport annuel sur l'assurance des évènements naturels en 2018[24] que la sinistralité grêle triple sur le dommage aux biens (DAB), passant de 112 M€ (constant 2019) annuel entre 1990 et 2014 à 291 M€ (constant 2019) annuel sur la période 2014-2019.

La multiplication des évènements grêligènes majeurs sur les années récentes finit de tirer la sonnette d'alarme chez les assureurs. On pense par exemple à l'été 2013 et l'épisode du 8-10 juin 2014 avec environ 1 Md€ (€ constant 2022) de dommages par épisode (15ème et 16ème position des évènements climatiques les plus coûteux pour les assurances depuis 1988), mais aussi et surtout aux 3 vagues grêligènes exceptionnelles de 2022 entrainant près de 6 Md€ de dommages en France, plaçant cet

[21] Espagne : mort d'une fillette de 20 mois dans une tempête de grêle, Le Figaro, 2022
[22] Lettre MRN n°34 – « Aléa grêle : point sur les connaissances », Mission Risques Naturels, 2020
[23] FA est une fédération française regroupant l'ensemble des entreprises d'assurance et de réassurance opérant en France, soit 252 sociétés représentant plus de 99 % du marché global de l'assurance
[24] L'assurance des évènements naturels en 2019, France Assureurs, 2020

évènement en 2ème position, juste derrière les tempêtes Lothar et Martin (1999)[25]. Les pertes associées aux principaux 18 évènements naturels sont visibles sur la Figure 5.

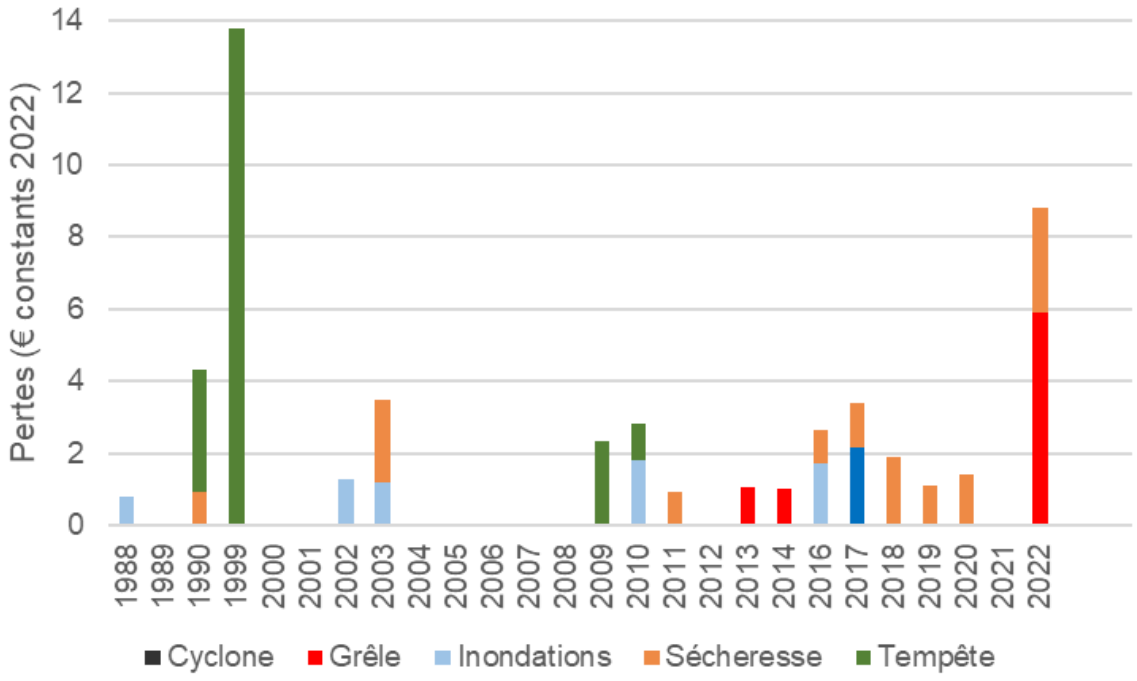


Figure 5 Evolution des Pertes associées aux principaux évènements naturels depuis 1988 selon France Assureurs (Md€ constants 2022). La sécheresse correspond à la sécheresse géotechnique, ©M. Trevisani.

Il se pose ainsi la question de l'influence des facteurs d'augmentation de la sinistralité grêle, suite de l'inflation et l'apparition de nouvelles vulnérabilités sur le marché (induisant une vulnérabilité en croissance des biens assurées), ainsi que l'influence du réchauffement atmosphérique sur l'aléa grêle. En effet, la grêle en 2022 représente près de deux fois l'ensemble de la sinistralité climatique annuelle moyenne de la période 2010-2019, et pose la question de l'évolution du risque en France : 2022, année exceptionnelle ou annonciatrice de l'évolution du risque grêle ?

4. Problématique et annonce du plan

La caractérisation de l'aléa grêle est une préoccupation croissante des assureurs, malgré le peu d'études sur le sujet en France. On observe en effet une récurrence de plus en plus marquée des chutes de grêle caractérisées comme « exceptionnelles » (2014, 2022…), induisant des dommages parfois très lourds sur l'ensemble des biens assurables (dommages aux biens, automobiles et récoltes). C'est notamment le cas pour Generali France.

C'est dans cette problématique que Generali France s'est intéressée à la caractérisation du risque grêle en France en finançant cette thèse. Elle a donc pour objectif d'accompagner au mieux le monde assurantiel et la société, à travers Generali France et son portefeuille d'assurés, à mieux appréhender le risque grêle en France. L'objectif principal de cette thèse est donc de redessiner la cartographie de la grêle en France afin de prendre en compte les évolutions potentielles de l'aléa et des enjeux, tout

[25] Assurance française : données clefs 2022, France Assureurs, 2023

en utilisant les dernières évolutions techniques depuis l'étude de Vinet en 1998 (Vinet, 1998). Ensuite, afin de répondre à des besoins opérationnels de Generali France, cette thèse s'intéresse également au dimensionnement d'une journée grêligène en France dans le but de calibrer la réponse de Generali France à la sévérité de la journée afin d'améliorer au mieux l'expérience client de ses assurés et de préparer la réponse post crise (expertise, traitement des dossiers…).

Cette thèse se déroule ainsi en deux parties : la première partie abordera le phénomène de la grêle et de ses conséquences sur une société d'assurance, en développant le processus de formation d'une chute de grêle, les méthodes pour mesurer une chute de grêle et le positionnement de la grêle dans le bilan économique du monde assurantiel en France et pour Generali France. Une attention toute particulière sera apportée à l'année 2022, année exceptionnelle. Ensuite, la deuxième partie se consacrera aux retombées opérationnelles de cette thèse pour Generali France, en présentant les nouvelles cartographies de l'aléa et du risque grêle en France, ainsi que le modèle d'estimation de la sinistralité grêle à J+1.

Les différentes problématiques abordées au sein de chaque chapitre, ainsi que les méthodes, sources utilisées, ainsi que les objectifs opérationnels sont présentés ci-après :

	Problématique abordée	Méthodes et sources	Objectifs opérationnels
Partie 1	**Analyse multidisciplinaire des chutes de grêle : de la formation aux impacts économiques sur une société d'assurance**		
Chapitre 1	Comment se forme une chute de grêle ?	Bibliographie scientifique et documentation des organismes météorologiques d'Etat.	Formation des nuages d'orages, précurseurs des chutes de grêle. Microphysique derrière la formation des grêlons.
Chapitre 2	Quelle est le processus de formation d'une une chute de grêle ?	Bibliographie scientifique, documentation des sociétés de (re)assurance, Documentation de l'Anelfa, Keraunos et Météo France.	Méthodes pour mesurer une chute de grêle. Cartographies couvrant la grêle en France. Qualifier l'anticipation des chutes de grêle en France.
Chapitre 3	Comment se positionne la grêle dans le système assurantiel français ?	Données marché fournies par FA et la MRN, Données internes de Generali France.	Analyse de la sinistralité grêle marché et de la sinistralité Generali France. Analyse de la sinistralité grêle exceptionnelle de 2022.
Partie 2	**Besoins opérationnels de Generali France pour appréhender le risque grêle en France**		
Chapitre 5	Quelle est la climatologie de la grêle en France hexagonale ?	Constitution d'une base de données grêle « hybride » (BD HD) à partir des données de Keraunos, Generali France et ESWD entre 2013 et 2022.	Analyse de la BD HD pour étudier la climatologie de la grêle à l'échelle nationale et régionale.
Chapitre 6	Comment limiter les coûts d'une chute de grêle pour une société d'assurance ?	Bibliographie scientifique, BD HD, Rapports journaliers Keraunos, Données internes de Generali France	Analyse de la vulnérabilité des biens assurés. Estimation du nombre de sinistres post-évènement à J+1 de Generali France. Analyse des stratégies d'adaptions aux chutes de grêle.
Chapitre 7	Comment se répartit le risque grêle en France ?	Indice aléa grêle à la maille communale à partir de la fréquence et du diamètre maximal des grêlons observés dans la BD HD. Indice risque grêle à la maille communale en croisant l'indice aléa grêle avec la vulnérabilité moyenne de la commune, estimée par l'exposition et la sinistralité de Generali France Bibliographie scientifique.	Caractérisation de l'aléa grêle en France. Caractérisation du risque grêle en France. Analyse des évolutions potentielles du risque grêle en France.

Partie 1
Le phénomène grêle et ses impacts sur une société d'assurance

La première partie de cette thèse se consacre à l'exploration détaillée de la complexité de la grêle en tant qu'aléa météorologique, depuis sa genèse jusqu'à son impact sur le paysage assurantiel français, avec pour objectif de démystifier les raisons sous-jacentes à la relative sous-représentation de l'aléa grêle dans le milieu de la recherche et celui assurantiel.

Le premier chapitre est dédié aux processus de formation d'une chute de grêle, en mettant l'accent sur les mécanismes microphysiques régissant la croissance des grêlons. Nous développerons ainsi en détail la formation d'un nuage et son évolution potentielle en nuage d'orage, à travers l'analyse des conditions atmosphériques et les processus météorologiques favorisant leur développement. Cette démarche analytique approfondie est cruciale pour appréhender la genèse et l'intensité des épisodes de grêle.

Le deuxième chapitre se penche sur les caractéristiques uniques de la grêle qui la distinguent des autres aléas climatiques, en mettant particulièrement l'accent sur les défis associés à sa mesure. Nous passerons en revue les différentes techniques de quantification et de qualification d'une chute de grêle, en soulignant les enjeux liés à la nature locale et transitoire de ce phénomène météorologique complexe, avant de clôturer ce chapitre par les limites des cartographies existantes de la grêle en France.

Enfin, dans le troisième chapitre, nous examinons la place de la grêle sur le marché assurantiel français. Nous analyserons pour cela la sinistralité grêle du marché assurantiel français, ainsi que celle enregistrée par Generali France, afin de mieux appréhender les défis et les opportunités inhérents à la gestion des risques associés à ce phénomène dans le domaine de l'assurance. Les conséquences économiques de l'année 2022, année grêligène exceptionnelle, seront également abordées dans ce chapitre.

Chapitre 1 : Formation d'une chute de grêle

La formation d'une chute de grêle est un processus complexe qui suscite l'intérêt des scientifiques dans le monde. Comprendre les mécanismes à l'origine de ce phénomène météorologique est essentiel pour prédire son occurrence, évaluer son intensité, et appréhender son risque.

Ce chapitre se propose d'explorer en profondeur le processus complexe de formation d'un nuage, en se concentrant sur son évolution potentielle en nuage d'orage et les mécanismes qui conduisent à la formation d'une chute de grêle. Pour cela, nous analyserons les paramètres atmosphériques influençant l'intensité des chutes de grêle, ainsi que les caractéristiques de la grêle au sein de différentes catégories d'orage.

Cette analyse scientifique approfondie nous permettra de mieux comprendre les facteurs météorologiques qui conditionnent la genèse et l'intensité des épisodes de grêle, jetant ainsi les bases nécessaires pour appréhender pleinement cet aléa météorologique souvent redouté.

1.1 Un nuage d'orage producteur de grêle : le cumulonimbus

1.1.1 Définition

Un grêlon est un hydrométéore défini par la World Meteorological Organisation (WMO)[26] et par Météo France[27] comme une particule de glace en suspension dont le diamètre principal est supérieur à 5mm. Dans le cas où le diamètre est inférieur à 5mm, il est appelé grésil. La grêle est une sous composante des orages. Elle est toujours associée à un phénomène orageux, même si tous les nuages d'orage n'induisent pas des chutes de grêle. L'intensité d'une chute de grêle, ainsi que la taille des grêlons associée, est directement dépendante de l'intensité des orages ; plus l'orage est intense, plus les grêlons peuvent atteindre des tailles importantes. De nombreux paramètres qualifiés de « prédicteurs » sont reliés à l'occurrence de grêle (l'altitude de l'isotherme 0°C, la température au sommet du nuage…) et à l'intensité potentielle de la chute.

1.1.2 Formation d'un nuage

Un volume d'air ne peut contenir qu'une quantité limitée de vapeur d'eau avant d'être saturé. Cette quantité est limitée par un seuil appelé « pression de vapeur saturante », correspondant à la pression à laquelle la phase gazeuse d'une substance est en équilibre avec sa phase liquide ou solide à une température donnée dans un système fermé. La valeur de ce seuil est fixée par les conditions de température de la masse d'air, selon la loi empirique de Teten (Tetens, 1930) et sa version améliorée la loi de Clausius-Clapeyron (Koutsoyiannis, 2012): plus la température de l'air est élevée, plus elle peut contenir de la vapeur d'eau avant d'être saturée.

Lorsqu'une parcelle d'air chaud saturée en vapeur d'eau se refroidit (au contact d'une masse d'air plus froide par exemple), sa pression de vapeur saturante d'eau gazeuse diminue. Si la pression de vapeur saturante est inférieure à la pression de la pression partielle de l'eau sous forme gazeuse, alors une partie de l'eau contenue se condense en gouttelettes d'eau liquide en suspension dans la parcelle d'air jusqu'à respecter la pression de vapeur saturante : c'est le début de la formation d'un nuage et d'une cellule convective. Un nuage se forme ainsi par refroidissement de l'air humide

[26] https://wmo.int/
[27] https://meteofrance.fr/

Ce refroidissement peut généralement se provoquer par un soulèvement de la parcelle d'air dans l'atmosphère. Une parcelle d'air dans la troposphère voit en effet sa pression diminuer avec l'altitude ce qui la refroidit ; la compression d'un gaz réchauffe une parcelle d'air, une détente la refroidit.

Dans un premier temps ce soulèvement de la parcelle d'air peut être provoqué par de la convection. L'air présent à proximité d'un sol chaud se réchauffe à son contact et se dilate. Moins dense que l'air environnant, il monte dans l'atmosphère avant de se refroidir en altitude. Lorsque la parcelle d'air est saturée en vapeur d'eau, le nuage se forme. Le processus est visible sur la Figure 6. Ces nuages de convection apparaissent d'autant plus facilement qu'il y a de l'air froid en altitude impactant la stabilité de l'atmosphère ; une parcelle d'air froid aura toujours tendance à vouloir se situer sous une parcelle d'air chaud (différence de densité). Cette situation est fréquence l'été au-dessus des terres et l'hiver au-dessus de la mer.

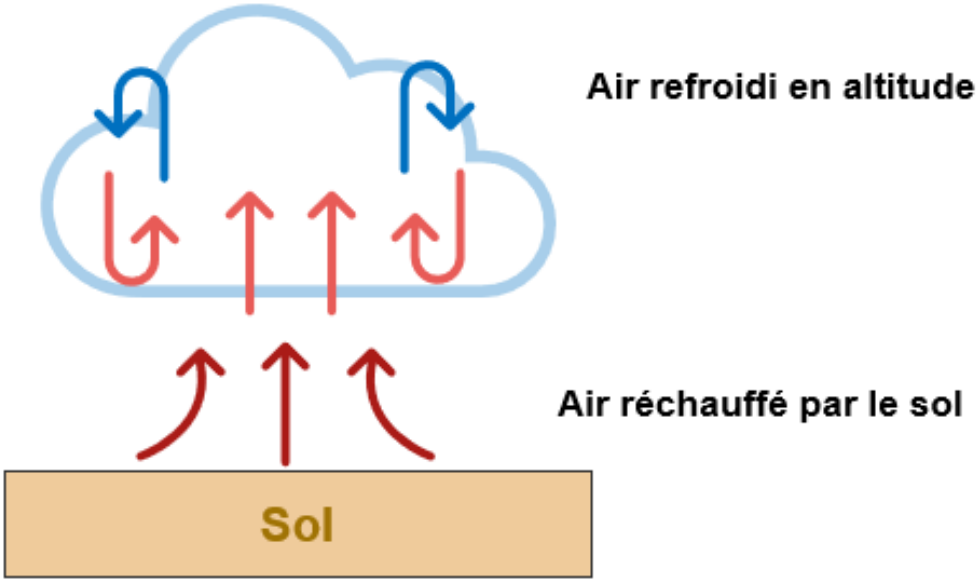


Figure 6 Mécanisme de convection dans la formation d'un nuage, ©M. Trevisani

Le soulèvement de la parcelle d'air peut également être forcé par le relief, on appelle cette situation un soulèvement orographique. Lorsqu'une parcelle d'air est poussée par le vent vers un relief, elle est contrainte de suivre la pente de ce dernier. Sa température s'abaisse ainsi avec l'altitude et lorsque l'air devient saturé en vapeur d'eau, la vapeur d'eau condense et forme le nuage. Ce nuage se forme alors sur le versant du relief situé « au vent » et il se dissipe sur le versant « sous le vent ». Si le nuage a provoqué des précipitations lors de son ascension, alors la température finale du nuage sur le versant « sous le vent » sera inférieure à celle du versant situé « au vent » à iso-altitude (Houze Jr., 2012; Kleissl et al., 2007; Purdy and Austin, 2003). C'est l'effet de Foehn. On peut voir ce soulèvement orographique sur la Figure 7.

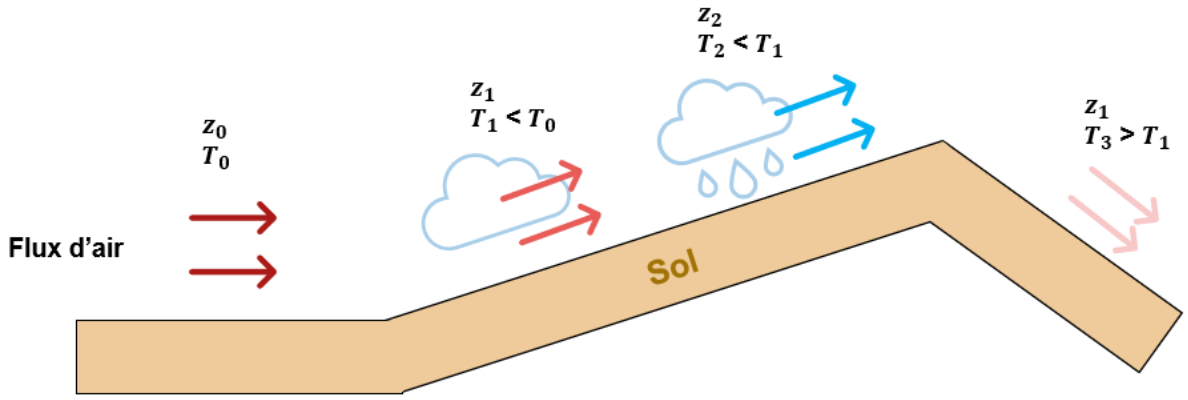


Figure 7 Mécanisme du soulèvement orographique dans la formation d'un nuage. Les variables z et T représentent respectivement l'altitude et la température de la parcelle d'air, ©M. Trevisani

Pour finir il existe un dernier mécanisme principal de soulèvement forcé de la parcelle d'air : le soulèvement frontal. Le soulèvement frontal implique la formation de nuages au niveau de l'interface entre deux masses d'air de températures différentes qu'on appelle un « front ». Lorsqu'une perturbation est en mouvement, l'air du secteur chaud se soulève an dessus de la masse d'air froid antérieur tout en étant rejeté en altitude à la suite de la progression plus rapide de l'air froid postérieur (front froid). Cet air chaud se refroidit ainsi en altitude et donne naissance à des nuages le long des fronts. On retrouve ainsi un comportement « similaire » au soulèvement orographique, avec l'air froid jouant le rôle du relief forçant la convection. La Figure 8 illustre ce processus de formation des nuages.

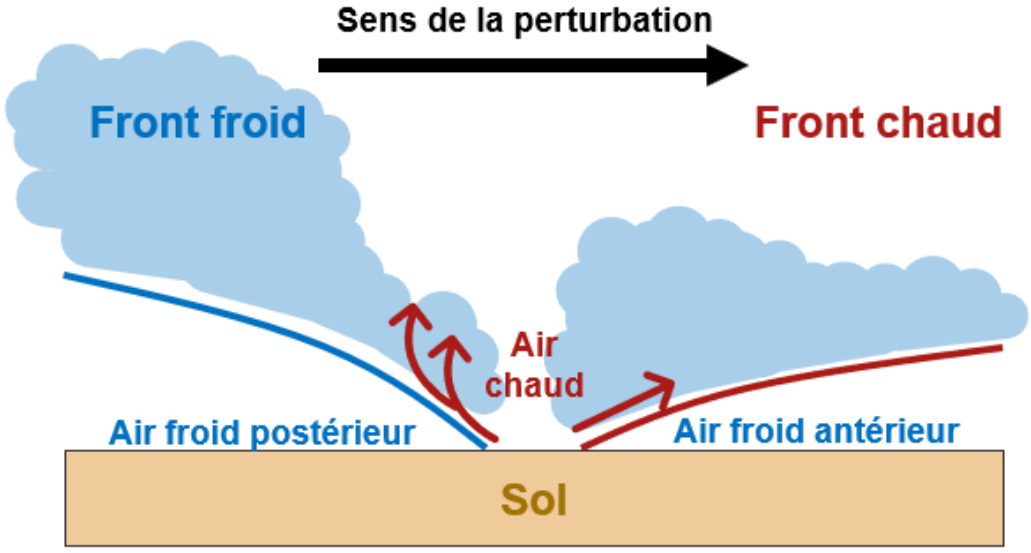


Figure 8 Mécanisme de soulèvement frontal dans la formation d'un nuage, ©M. Trevisani

1.1.3 Evolution d'un nuage en cumulonimbus

Le cumulonimbus, nuage caractéristique des phénomènes orageux, est responsable de l'ensemble des chutes de grêle. Un cumulonimbus se forme lorsqu'un nuage classique (cumulus) se condense dans une atmosphère instable. Dans ce type d'atmosphère, les mouvements verticaux sont intenses et favorisent d'autant plus la condensation de la vapeur d'eau en goutte d'eau en suspension, développant ainsi le nuage en altitude. Lorsque les gouttelettes deviennent suffisamment élevées, elles se solidifient ensuite en particules de glace formant ainsi un cumulonimbus. Le principe de fonctionnement du cumulonimbus est visible sur la Figure 9. Un cumulonimbus est donc un cumulus à

très fort développement vertical. Son développement vertical est limité par la position de la tropopause, couche dont la température cesse de diminuer avec l'altitude contrairement à la troposphère (0 – 12 km). C'est pourquoi il a une forme caractéristique d'enclume, provoquée par son étalement lorsqu'il rencontre la tropopause. Lorsque les courants ascendants sont particulièrement intenses, ils peuvent également percer la tropopause sur une certaine épaisseur et induire la formation d'un sommet pénétrant. Ce phénomène est donc caractéristique des orages les plus violents.

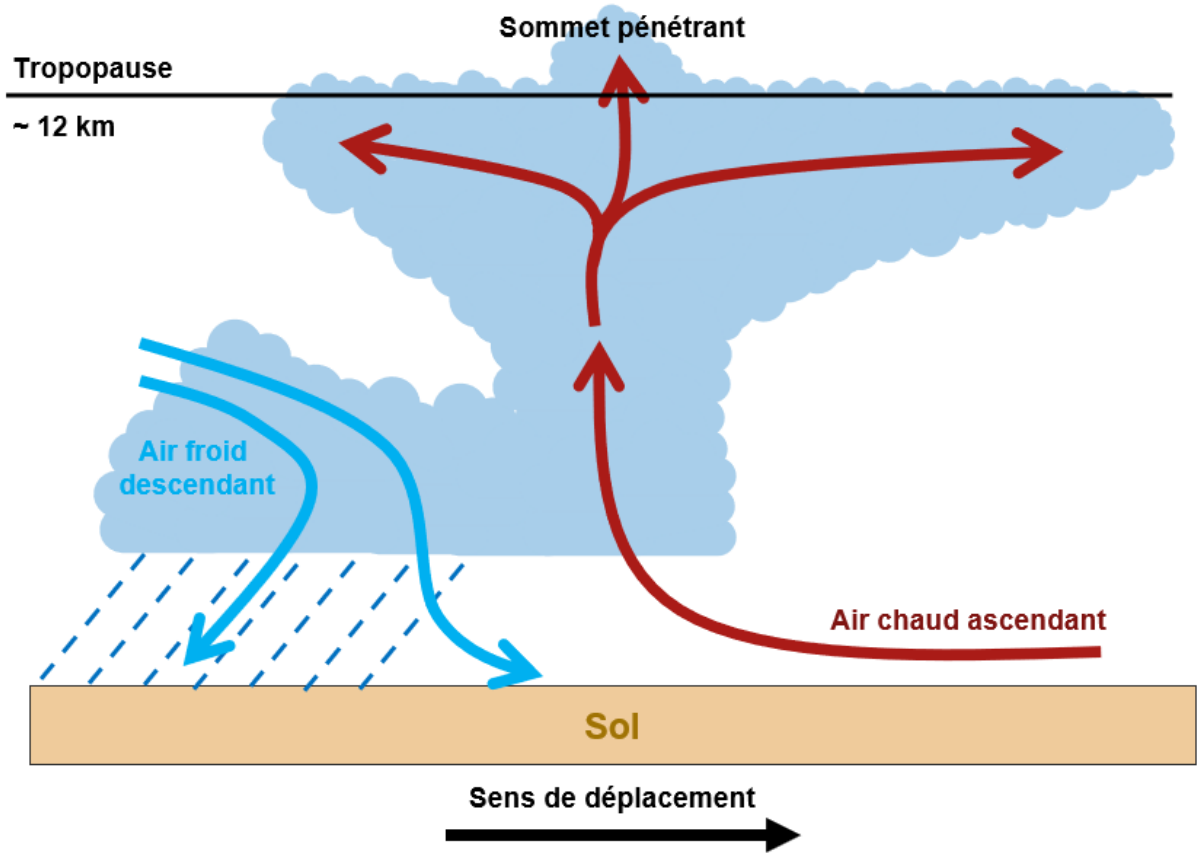


Figure 9 Fonctionnement d'un cumulonimbus, ©M. Trevisani d'après (Fujita, 1965).

Le cumulonimbus domine les autres nuages, avec des dimensions pouvant avoisiner les 15 km de largeur sur un étalement vertical pouvant approcher les 10 km. C'est pourquoi il est facile de le distinguer des autres nuages, en particulier sur une vue aérienne comme sur la Figure 10.



Figure 10 Photographie aérienne d'un cumulonimbus au-dessus de l'Océan Pacifique, ©Santiago Borja Lopez, 2016.

1.1.4 Potentiel orageux d'une cellule convective

Le potentiel orageux d'un orage dépend de trois facteurs : l'humidité disponible, l'énergie potentielle (CAPE) et le cisaillement des vents dans la troposphère (Chernokulsky et al., 2022; Wilhelm et al., 2021). Les orages les plus violents se produisent généralement durant la saison chaude en Europe, soit en entre mai et septembre avec un flux Sud / Sud-Ouest. Ce flux, généralement provoqué par un anticyclone au niveau des Açores, est en effet caractéristique d'une situation orageuse en France en générant de fortes instabilités atmosphériques avec l'apport de masse d'air subtropical chargées en humidité et chaleur (Kunz and Puskeiler, 2010; Piper et al., 2019; Vinet, 2001).

1.2 Microphysique de la formation des grêlons

De nombreuses études ont cherché à comprendre la formation de la grêle sur les dernières décennies, avec la production de plusieurs modèles théoriques (Gaviola and Fuertes, 1947; Heymsfield et al., 1980; Orville, 1977). Malgré les progrès de la recherche, la formation de la grêle n'est pas encore parfaitement comprise, avec des modèles ne pouvant parfois pas expliquer certaines observations ou donnant parfois des résultats inconstants (Kang et al., 2007). La recherche s'accorde cependant pour dire que le grêlon connaît 3 phases distinctes au cours de sa vie : Une phase embryonnaire, une phase de croissance et une phase de chute. La durée de chacune de ces phases est directement reliée à l'intensité des courants ascendants et descendants au sein du cumulonimbus. Des courants ascendants suffisamment forts favorisent ainsi une durée de séjour suffisamment longue du grêlon (sans toutefois l'arracher de la colonne d'ascendance), ce qui lui permet de connaître plusieurs cycles de croissance (Browning, 1963). Lorsque le grêlon est trop lourd pour être porté dans la colonne d'ascendance, il tombe par gravité entraînant une chute de grêle au sol. On peut voir le cycle de formation du grêlon sur la Figure 11.

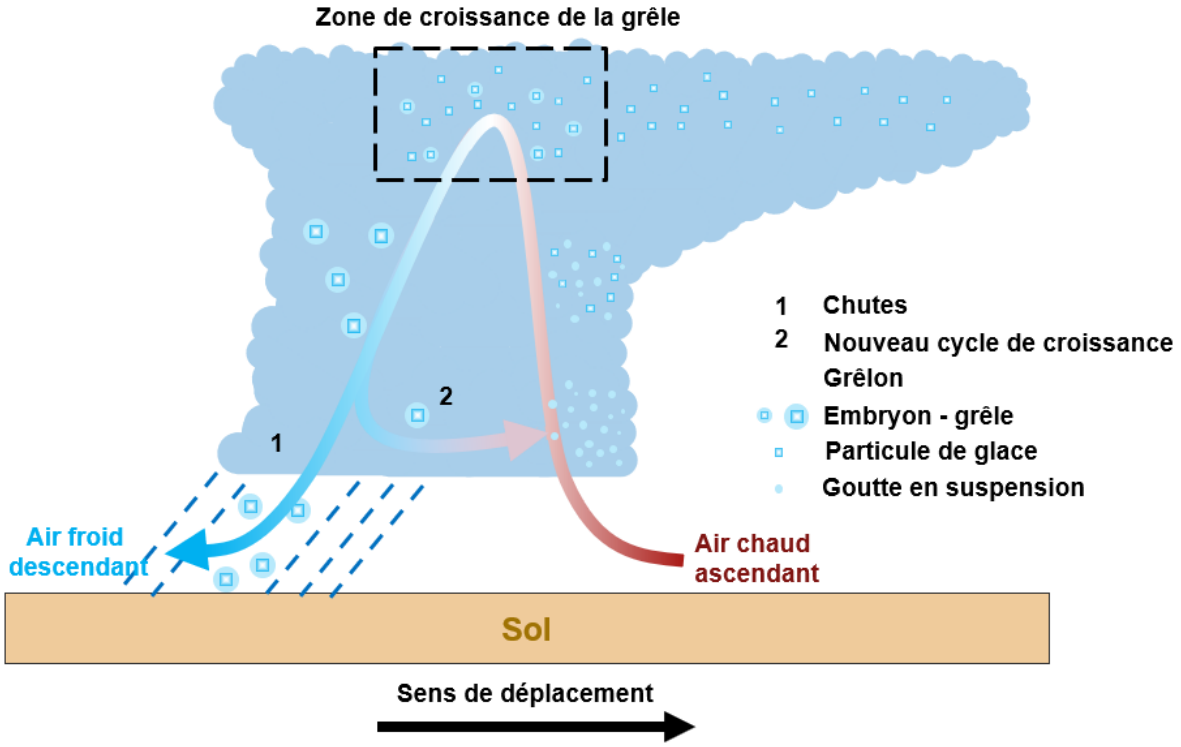


Figure 11 Cycle de formation du grêlon au sein d'un cumulonimbus, ©M. Trevisan d'après (Heymsfield et al., 1980).

1.2.1 Une phase embryonnaire favorisée par les noyaux glaçogènes

En fonction des conditions de température au sein du cumulonimbus, les gouttelettes liquides peuvent être soumises à une grande gamme de température en fonction de son altitude. Lorsque la température de la gouttelette d'eau liquide est inférieure à son point de solidification, elle entre dans un état métastable correspondant à la surfusion. Dans cet état, la moindre perturbation environnante peut déclencher brusquement un passage à l'état solide (Nevzorov, 2006; Schulte and Weigand, 2018).

La formation d'une particule de glace dans un nuage se fait par nucléation. Lorsque la température de l'environnement de la parcelle d'air contenant la gouttelette d'eau liquide est comprise entre -33 °C et -43°C et que le diamètre de la goutte d'eau est de 1-1 000 µm, la gouttelette d'eau surfondue se solidifie spontanément en petit cristal et la nucléation est dite homogène (Tanaka and Kimura, 2019). Lorsque ces conditions ne sont pas réunies et que le cristal de glace se forme à partir d'un noyau glaçogène, la nucléation est dite hétérogène (Zakinyan, 2008).

Les noyaux glaçogènes correspondent à des particules solides non aqueuses pouvant être d'origine naturelle (poussières, suies volcaniques, pollens…) ou anthropique (particules fines issues de la combustion des moteurs thermiques) qu'on retrouve dans l'atmosphère et le cumulonimbus (Michaud et al., 2014; Rosinski and Kerrigan, 1969). Ils facilitent grandement la formation d'un embryon, bien qu'ils ne soient pas obligatoires, en réduisant la barrière énergétique nécessaire à la nucléation, ce qui offre une surface solide sur laquelle les germes de glace peuvent se former. La nucléation hétérogène peut ainsi se faire soit par déposition de vapeur sur le noyau glaçogène, soit par contact avec une gouttelette d'eau surfondue, conduisant à sa solidification. Plus la concentration de noyaux glaçogènes est importante dans le cumulonimbus, plus les particules de glace se formeront préférentiellement sur ces derniers (Zhang et al., 2023).

On appelle ainsi embryon toute particule de glace dans la colonne d'ascendance du cumulonimbus lorsqu'elle est comprise entre à 5mm et 10mm. La taille de l'embryon est donc directement

dépendante de l'état d'avancement de la phase de croissance de la particule de glace (Farnell et al., 2022; Kennedy et al., 2001; Knight and Knight, 1970; Kumjian and Lombardo, 2020). La nature et la forme du noyau glaçogène influencent directement sur la forme de l'embryon créé, avec par exemple une forme conique ou bien sphérique (Knight and Knight, 1970; Knight, 1981).

1.2.2 Phase de croissance et phase de chute

La formation d'une particule de glace dans la colonne d'ascendance marque le début de la phase de croissance du grêlon. Elle peut ainsi croître soit par dépôt successif de vapeur à sa surface, soit en fusionnant avec d'autres particules de glace et embryons avant d'atteindre le stade de grêlon. Les embryons/grêlons peuvent connaître plusieurs cycles de croissance au sein de la colonne d'ascendance en fonction de la force des courants ascendants. Plus le nombre de cycles est important, plus la taille du grêlon sera importante (Allen et al., 2020; Kunz et al., 2020; Pounds et al., 2024).

Le grêlon à une structure en oignon, c'est-à-dire qu'il est constitué d'une superposition de couche. L'analyse des grêlons peut ainsi directement nous renseigner sur l'environnement qu'a connu le grêlon au sein du cumulonimbus et le nombre de cycle qu'il a connu (Knight and Knight, 2005; Michaud et al., 2014; Montagnat et al., 2021; Soderholm and Kumjian, 2023). Lors de la coupe d'un grêlon on peut visualiser les dépôts successifs de vapeur d'eau à sa surface. La transparence des différentes couches renseigne directement la force des courants ascendants. Plus ils sont intenses, plus la quantité d'air piégée dans la couche est importante et donc plus la couche est opaque. Lorsque les courants sont plus faibles ou bien intermittents, la quantité d'air piégée est plus faible et la couche de glace est plus claire, pouvant être même translucide (Gaviola and Fuertes, 1947).

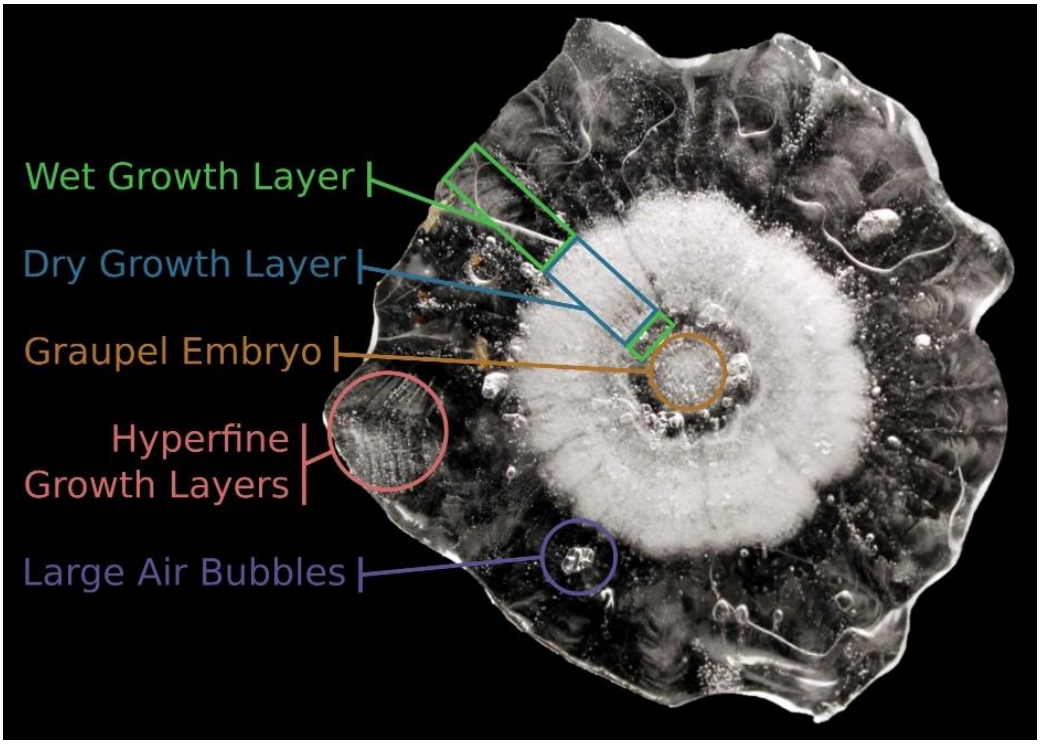


Figure 12 Coupe d'un grêlon. On peut voir sur l'embryon (orange), une couche de croissance opaque correspondant à un régime sec (bleu), une couche translucide correspondant à une phase de croissance humide (vert) ainsi que la présence de bulles d'air (violet). ©Soderholm and Kumjian, 2023.

La surface de l'embryon/grêlon connaît des variations de températures. Elle augmente lorsqu'elle gagne plus de chaleur (solidification de l'eau surfondue en surface et gain de masse associé au dépôt de vapeur d'eau) qu'elle n'en perd (perte de masse par sublimation). En fonction de la température de

surface du grêlon, sa phase de croissance peut ainsi être en régime sec lorsque sa température de surface est inférieure à 0°C ou en régime humide lorsqu'elle est proche ou supérieure à 0°C. En phase de croissance sèche, l'ensemble de l'eau surfondue au contact du grêlon est à l'état solide lors de la collision grêlon – goutte d'eau surfondue. En phase humide, on peut retrouver de l'eau à l'état liquide à la surface du grêlon, permettant le captage de particules de glace (Kumjian and Lombardo, 2020).

Lors d'un cycle de croissance, l'embryon/grêlon peut également fusionner avec une autre embryon/grêlon, c'est ce qu'on appelle l'accrétion. Les grêlons issus de ce phénomène sont particulièrement reconnaissables, avec soit une forme fortement asymétrique ou bien une forme en « grappe de raisin », visible sur la Figure 13.



Figure 13 Photographie de grêlons. A gauche un grêlon en grappe de raisin (©The New York Times), à droite un grêlon de 19 cm fortement asymétrique issu des orages touchant le nord de l'Italie le 24 juillet 2023 (©Marilena Tonin).

Lorsque la force exercée par le poids du grêlon est supérieure à celle exercée par le courant ascendant ou lorsque le grêlon sort de la colonne d'ascendance (courant trop intense par exemple), le grêlon précipite : c'est la formation d'une chute de grêle.

1.3 Facteurs d'intensité des chutes de grêle

Le développement d'un orage convectif est dépendant d'un grand nombre de paramètres atmosphériques. Cette diversité de paramètres induit un grand nombre de combinaisons possibles de l'état de l'atmosphère plus ou moins favorable au développement de cellules orageuses. Ces orages peuvent être regroupés en 3 grandes familles : les orages monocellulaires, multicellulaires et supercellulaires (Castro et al., 1992; Lack and Fox, 2012; Potvin et al., 2022; Weisman and Klemp, 1984). Chaque grande famille d'orage possède une gamme d'intensité possible qui lui est propre, et la nature de l'orage peut également évoluer en fonction des conditions atmosphériques le long de sa trajectoire. Un orage classique ou multicellulaire peut ainsi devenir supercellulaire (Rigo and Pineda, 2016).

1.3.1 Les orages de nature monocellulaire : des orages classiques

Les orages monocellulaires ont en général le plus faible potentiel grêligène des orages. On distingue les orages monocellulaires ordinaires des orages monocellulaires à pulsation. Ces derniers sont plus durables et plus intenses que les monocellulaires ordinaires, avec également un plus grand potentiel grêligène.

1.3.1.1 Orage monocellulaire ordinaire

L'orage monocellulaire ordinaire est un orage constitué d'une seule cellule et possédant une espérance de vie courte, comprise entre 30 et 50 min. Cette faible espérance de vie s'explique par l'inclinaison quasi-nulle de sa colonne d'ascendance, induisant rapidement une auto-asphyxie de la cellule par son propre courant d'air froid descendant (Weisman and Klemp, 1986). Il est souvent faiblement mobile, pouvant même être stationnaire (Li et al., 2009a, 2009b). On le retrouve le plus souvent en été près des reliefs ou en plaine localement après une journée très chaude. Il est également possible de l'observer lors des giboulées de mars, par exemple dans une traîne active (orage de masse d'air froid).

1.3.1.2 Orage monocellulaire à pulsation

L'orage monocellulaire à pulsation est plus durable que l'ordinaire, pouvant même être violent parfois avec de fortes rafales de vent, des lames d'eau importantes et de la grêle importante. Il se forme lorsqu'il y a une forte instabilité en présence de vents faibles dans toute l'épaisseur de la troposphère. Sous ces conditions, il peut se former une unique poussée convective accompagnée de violents courants ascendants alimentant très rapidement l'orage. La zone de formation des précipitations est également plus élevée qu'un orage monocellulaire ordinaire. Il peut donner de violents courants descendants sous forme de downburst lors de sa dissipation (Lack and Fox, 2012). L'orage à pulsation se caractérise visuellement par un bouillonnement convectif très marqué, souvent accompagné d'un sommet pénétrant et parfois d'une enclume à progression rétrograde partielle.

1.3.2 Les orages de nature multicellulaire : des orages plus violents

L'orage multicellulaire est constitué de plusieurs orages monocellulaires organisés. Il est donc généralement plus durable et plus violent qu'un orage monocellulaire isolé et peut durer plusieurs heures (Li et al., 2009a, 2009b). Il se forme en deux étapes. La première phase est celle d'agrégation : des cellules orageuses monocellulaires isolées s'agrègent par convection autour de cellules plus matures situése au centre de l'orage multicellulaire sans avoir de direction privilégiée. Ce phénomène se produit lorsque les vents de cisaillement sont faibles. La seconde phase est celle de propagation : lorsque les vents de cisaillement sont suffisants, l'orage multicellulaire s'organise selon une direction de propagation déterminée à l'aide d'un courant descendant froid suffisamment intense pour soulever la masse d'air chaud stationnée près du sol et alimenter ainsi l'orage (Lin et al., 1998; Weisman and Klemp, 1986). La Figure 14 illustre (en plan) le principe de fonctionnement d'un orage multicellulaire classique.

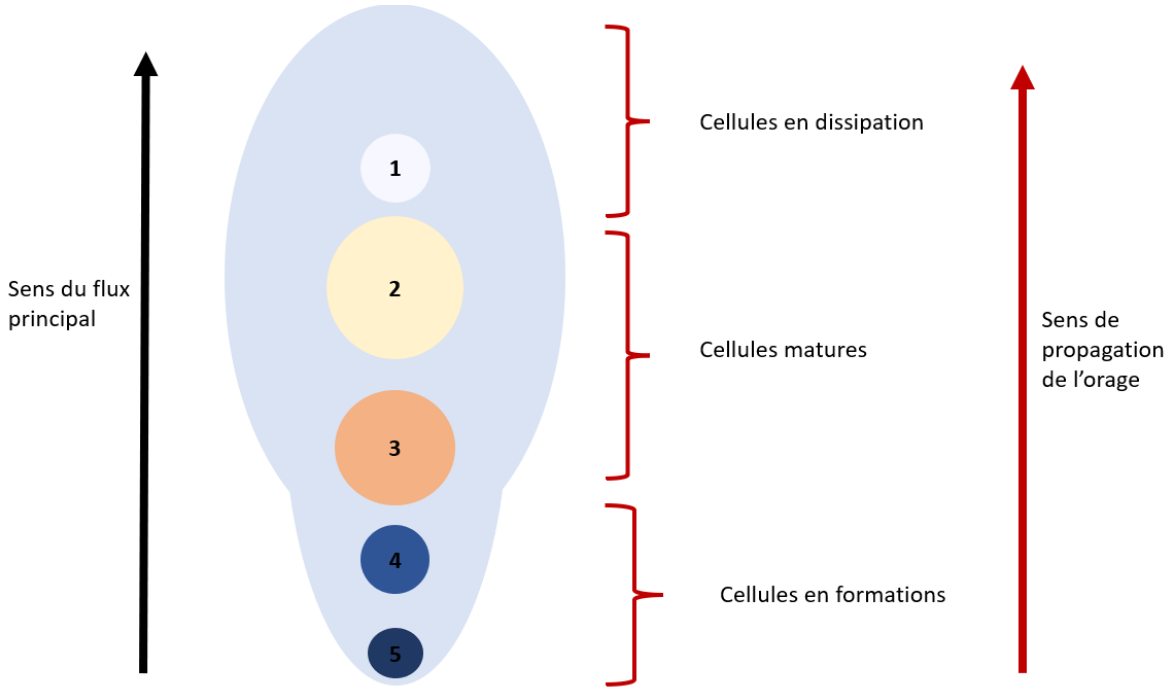


Figure 14 Vue en plan d'un orage multicellulaire classique. Les cellules orageuses sont représentées par un cercle, le numéro indiquant leur ordre d'apparition dans l'orage multicellulaire, ©M. Trevisani.

Le sens de propagation de l'orage multicellulaire dépend de la vitesse de création de nouvelles cellules orageuses. Dans la plupart des cas, la vitesse de maturité des cellules est similaire, voire plus faible, à celle de propagation de l'orage : l'orage multicellulaire est dit à propagation classique. Dans le cas inverse, l'orage multicellulaire est dit à propagation rétrograde. Cette situation se produit lorsque le flux principal est faible et est combiné à un vent de cisaillement important. Lorsque le flux principal est fort et est combiné à un vent de cisaillement important, l'orage multicellulaire peut évoluer en orage multicellulaire à propagation en V. C'est le plus violent des orages multicellulaires, avec un pic d'intensité au niveau de la pointe du V. Lors de ce type d'orages multicellulaires, la pointe du V est constamment alimentée en cellules orageuses matures, entrainant une stationnarité de cette zone (Ribaud, 2015; Saint Fleur, 2021). On peut visualiser ces orages sur des images satellites par analyse de lames d'eau et/ou d'images thermiques comme sur la Figure 15.

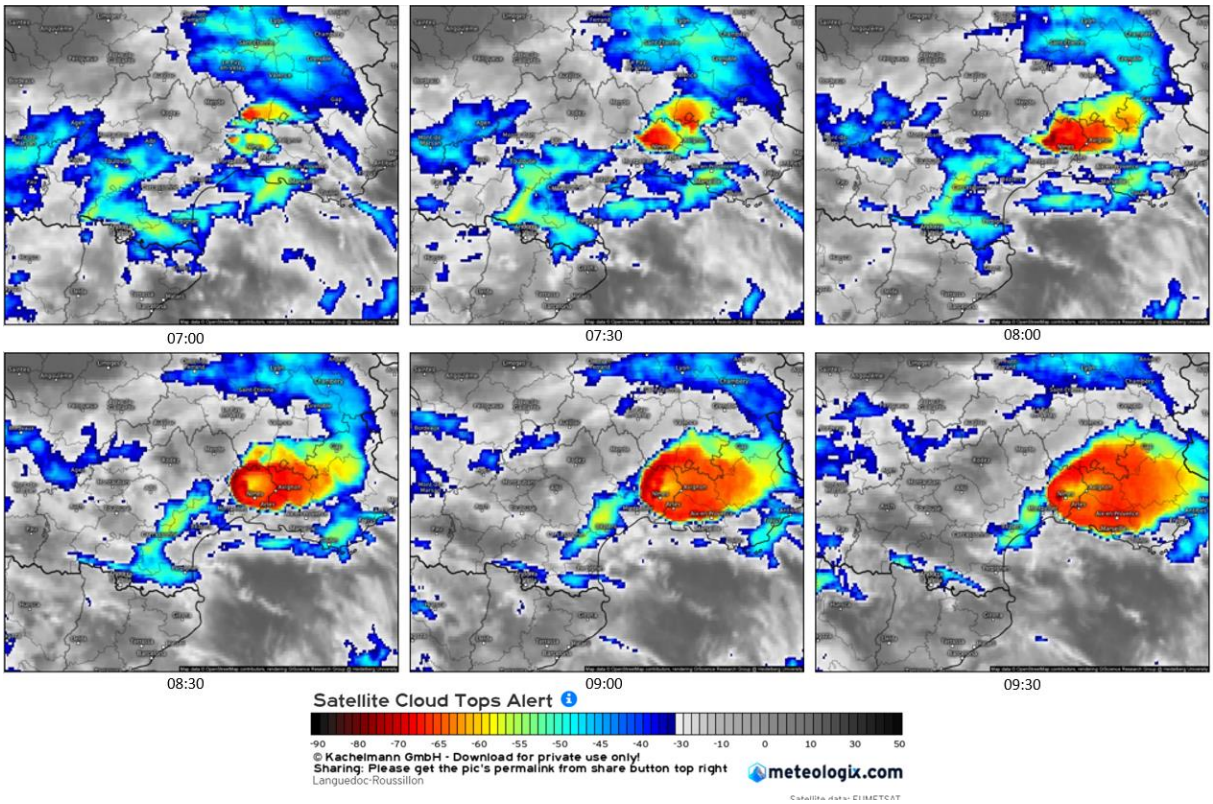


Figure 15 Image thermique satellite de l'orage en V sur le Gard le 11 septembre 2021 entre 7h00 et 9h30, Meteogix. On distingue bien la pointe du V au niveau de Nîmes ainsi que les 2 branches du V.

1.3.3 Les orages de nature supercellulaire : les orages les plus extrêmes

Les orages supercellulaires sont les plus intenses et les plus durables des cumulonimbus (Castro et al., 1992), avec le potentiel grêligène le plus important (Lack and Fox, 2012; Rasmussen and Blanchard, 1998; Shield and Houston, 2022). Tous les plus gros grêlons sont produits par cette catégorie de cellules orageuses, et les grêlons de plus de 5cm ne sont pas rares sous ces orages. Une supercellule évolue le plus souvent de manière isolée car elle a tendance à « phagocyter » les autres cellules orageuses.

Une cellule supercellulaire (SP) est composée d'une seule cellule orageuse (comme les monocellulaires) et d'une colonne d'air chaud ascendant en rotation qu'on appelle mésocyclone. Elle se forme donc lorsque les cisaillements verticaux sont très marqués, avec une basse couche humide surplombée de couches plus sèches (Molina et al., 2021). La rotation du mésocyclone s'effectue dans la majorité des cas dans le sens anti-horaire (cyclonique) mais elle peut être dans le sens horaire (anticyclonique) lorsqu'elle est issue d'une séparation d'une cellule orageuse en deux cellules orageuses distinctes (split) : une cellule moteur droit (cyclonique) et une cellule moteur gauche (anticyclonique) (Weisman and Klemp, 1984).

La longévité d'une SP s'explique par l'inclinaison de la colonne d'ascendance alimentant l'orage, ce qui permet un décalage spatial entre le courant ascendant principal et le courant descendant d'air froid de la SP. Ce décalage permet ainsi à l'air chaud ascendant de ne pas subir de refroidissement mais plutôt un renforcement associé au courant d'air froid descendant en créant un front froid favorisant le soulèvement de l'air près du sol.

Une SP se distingue des autres cellules orageuses par une déviation marquée au flux principal, associée à la rotation de son mésocyclone. Cette déviation est de l'ordre de 25-30° en direction de l'Est en général (rotation horaire), mais elle peut être plus marquée pour les SP les plus virulentes. On observe également une juxtaposition de vents de directions opposées dans la zone d'ascendance de l'orage sur

un radar Doppler ainsi qu'un écho radar en crochet sur le flanc Sud-Est de l'orage, le creux correspondant à la position du mésocyclone de la SP. Pour finir les SP possèdent un sommet fortement pénétrant au niveau du mésocyclone, provoqué par la force de ses courants ascendants (Bluestein et al., 2019; Davies-Jones, 2015; French et al., 2015; Naylor et al., 2012). On peut voir des exemples de quatres cellules à caractère supercellulaire ainsi que leurs caractéristiques sur les échos radars sur la Figure 16.

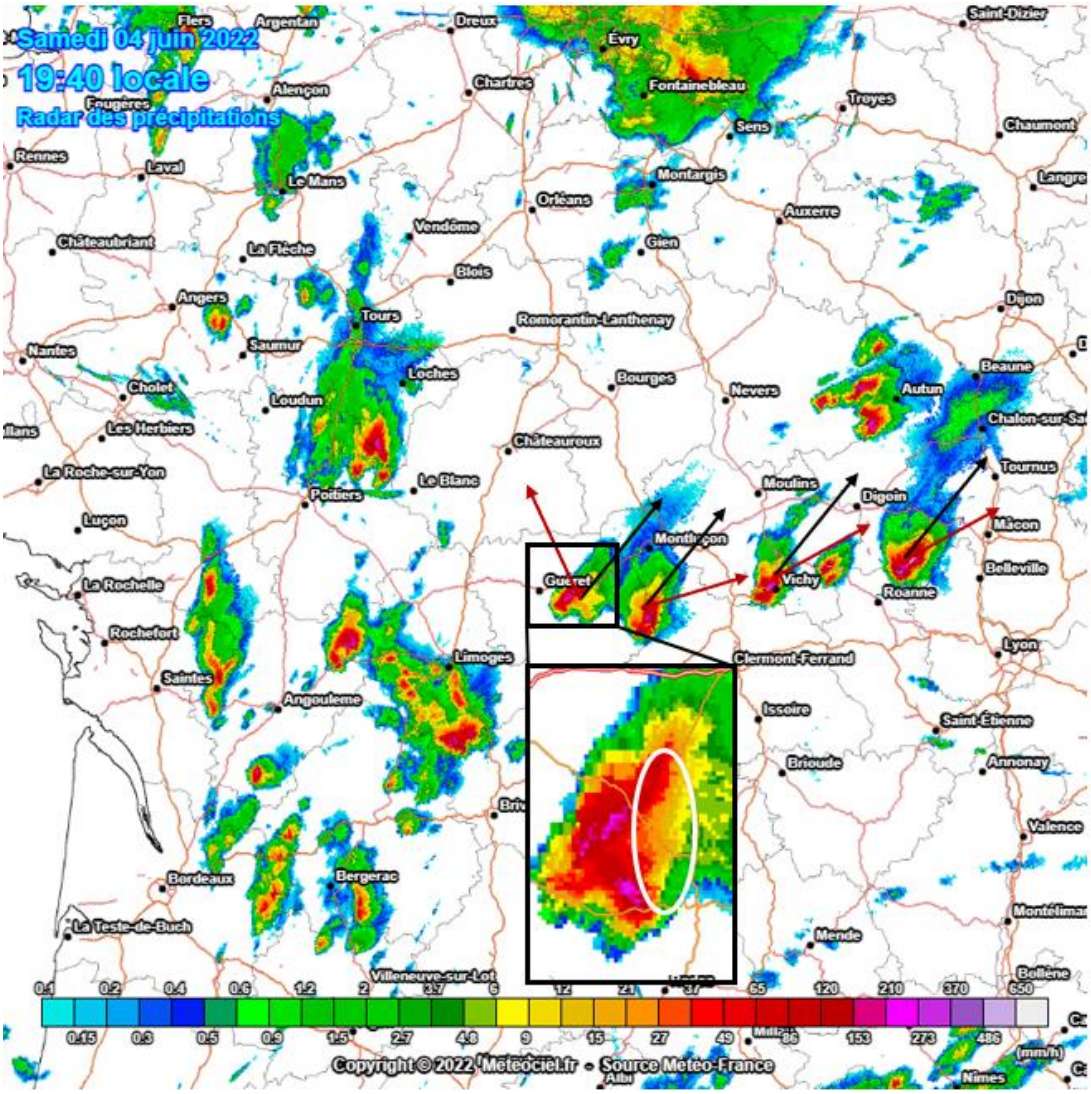


Figure 16 Capture d'écran du radar des précipitations (mm/h) estimées à partir des échos radars le 5 juin 2022 à 19h40 sur Meteociel (radar zoom HD). Les flèches noires indiquent la direction du flux d'altitude et les flèches rouges la direction des cellules orageuses. L'écho en crochet est entourée d'un cercle blanc.

Il existe 4 types de supercellules : les classiques, les hautes précipitations, les basses précipitations et les « mini-cellules » (Beatty et al., 2009). On peut visualiser une représentation schématique des 3 premières catégories de SP sur la Figure 17.

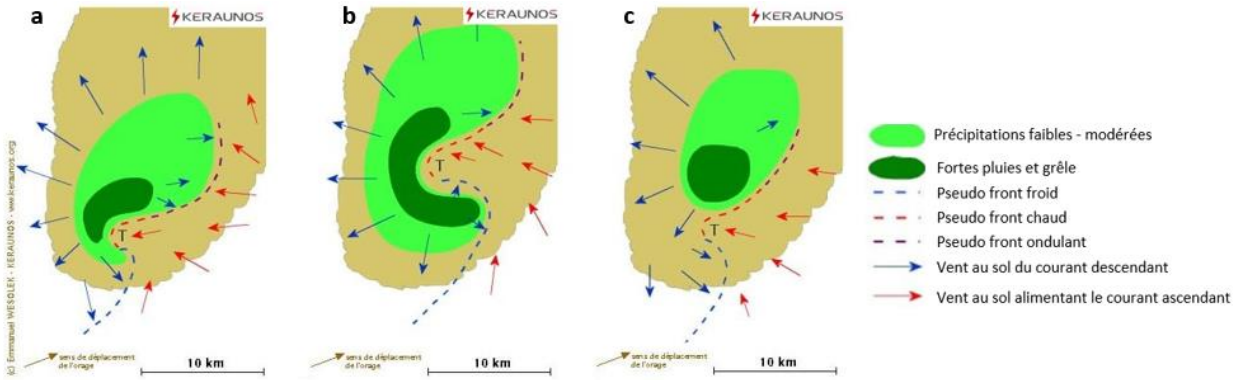


Figure 17 Coupe horizontale d'une SP classique (a), haute précipitation (b) et sèche (c). La position du mésocyclone est représentée par la lettre « T », ©Emmanuel Wesolek, Keraunos.

La nature d'une SP n'est pas définitive et peut évoluer en fonction de l'environnement atmosphérique qu'elle va connaître sur son parcours.

1.3.3.1 SP classique

Une SP classique possède un mésocyclone sur le flanc sud-est de l'orage. La zone de précipitation de la SP est généralement située dans sa portion Nord / Nord-Ouest. Les chutes de grêle les plus intenses sont situées au niveau de la zone de précipitation mais à proximité du mésocyclone. On peut voir la représentation schématique d'une SP classique sur la Figure 17 (a).

1.3.3.2 SP haute précipitation

La SP haute précipitation (SP HP) est souvent considérée comme le type de supercellule la plus dangereuse car elle entraîne de très violentes précipitations sur un vaste territoire. L'écho en crochet d'une SP HP est très marqué et englobe presque l'entièreté du mésocyclone. Ce mésocyclone est davantage positionné sur le flanc Est de la cellule orageuse, avec une zone pouvant donner des chutes de grêle intenses (en nombre et en diamètre) se situant plutôt à proximité directe du mésocyclone, à l'exclusion du secteur Est du mésocyclone. Le flanc Sud-Ouest de la SP HP est très souvent le front le plus actif. L'activité électrique est également la plus intense de toutes les SP. On peut voir la représentation schématique d'une SP HP sur la Figure 17 (b).

Ces caractéristiques sont provoquées par un puissant courant froid descendant autour du mésocyclone se plaçant en circuit fermé avec le courant ascendant. Dans cette configuration, chaque courant renforce l'autre. Ces caractéristiques font de la SP HP la SP la plus durable, capable de traverser de longues distances sans perdre en intensité (Beatty et al., 2008). Elle peut autant produire des gros grêlons que déverser une quantité énorme de grêlons par unité de surface, comme ce fut par exemple le cas le 1er mai 2024 dans le département du Val d'Oise[28].

1.3.3.3 SP basse précipitation.

La SP basse précipitation (SP LP) est une SP se formant et évoluant dans un environnement sec. Son écho radar en crochet n'est que peu, voire non marqué, ce qui la différencie des autres SP et rend difficile sa détection. Elle produit de faibles précipitations et des chutes de grêle très localisées spatialement mais avec potentiellement des grêlons de grande taille – les plus gros de toutes les cellules orageuses. Elle se distingue des autres SP par un mésocyclone positionné sur le flanc Sud de la cellule orageuse, avec une zone grêligène plutôt située sur la partie Nord de cette dernière (Beatty et

[28] Des « grêlons de la taille d'une balle », pluies diluviennes à Roissy… les images impressionnantes des orages en Île-de-France, Le Parisien, 2024

al., 2008), visible sur la Figure 17 (c). L'activité électrique d'une SP LP est également faible et principalement intranuageuse.

1.3.3.4 SP mini

En général, une SP mini possède des caractéristiques similaires aux SP classiques en moins marquées. Elle peut cependant avoir un caractère HP ou LP plus rarement sous certaines conditions. Une SP mini correspond donc une SP de dimension modeste verticalement et horizontalement, possédant un mésocyclone en rotation et une forme de crochet peu marquée sur les échos radars (Eastin and Link, 2009; Knupp et al., 1998; Zheng et al., 2021). Ses dimensions modestes s'expliquent par un environnement possédant une instabilité peu marquée couplée à une tropopause assez basse (Howell and Beaman, 2006).

1.4 Conclusion du chapitre 1

La formation d'une chute de grêle ne se produit qu'avec la présence de vigoureux courants ascendants, des conditions atmosphériques particulières qui ne se rencontrent que dans les nuages à fort développement vertical : c'est pourquoi une chute de grêle ne peut se produire qu'uniquement sous cellule orageuse, même si toutes les cellules orageuses ne produisent pas de chutes de grêle.

Un grêlon connaît ainsi trois phases se produisant au niveau de la colonne d'ascendance de la cellule orageuse : une phase embryonnaire, une phase de croissance, et une phase de chute. Plus les courants ascendants sont puissants, plus le grêlon peut faire des cycles de croissance et grossir (dépôt d'eau surfondue à sa surface ou en fusionnant avec d'autres grêlons par accrétion) avant de précipiter. C'est pourquoi, les plus gros grêlons et la plus forte intensité grêligène se retrouvent sous les orages les plus violents, souvent de nature supercellulaire.

La compréhension des mécanismes physiques régissant l'évolution d'une cellule orageuse est donc une étape primordiale pour caractériser le devenir d'une cellule orageuse et ainsi affiner son potentiel grêligène. Cette étape est cependant complexe à réaliser avec les méthodes actuelles, car elle dépend d'une très grande diversité de paramètres (orographie, instabilité de l'atmosphère, zone de conflits de masse d'air…) nécessitant une connaissance fine et locale de l'environnement dans lequel la cellule orageuse évolue, entraînant de fait des interactions complexes à comprendre et à modéliser.

Ces caractéristiques font de la grêle un aléa local et éphémère. Une chute de grêle est donc par nature un aléa complexe à mesurer et à modéliser.

Chapitre 2 : Un aléa difficile à appréhender

La grêle est un des aléas climatiques le plus difficile à appréhender au regard des difficultés d'observation et de mesure. De nos jours, il existe un unique appareil, le « grêlimètre », permettant de mesurer directement l'intensité d'une chute de grêle.

Il existe cependant d'autres méthodes indirectes permettant d'observer la survenance d'un évènement grêligène et d'en estimer son intensité potentielle, grâce à des « proxy(s) » météorologique(s) d'une chute de grêle. Comme par exemple les échos radars, l'instabilité de la basse atmosphère (CAPE, MUCAPE, LI index…), le cisaillement des vents entre 0 et 6 km, la température au sommet du nuage convectif….

De nombreuses études climatologiques de la grêle se fondent ainsi sur ces nouvelles méthodes afin de contourner les limites associées aux réseaux de mesure traditionnelle de la grêle afin d'estimer les chutes de grêle et de cartographier l'aléa. Ces nouvelles méthodes peuvent même, dans une certaine mesure, être utilisées afin d'anticiper les évènements grêligènes (en particulier les évènements majeurs) bien qu'elles soient généralement très limitées (zone à risque très étendue, alertes trop tardives…).

2.1 Un aléa ponctuel dans le temps et l'espace

Une chute de grêle se déplace avec un cumulonimbus grêligène. Elle est donc très éphémère dans le temps et dans l'espace ; elle dure rarement plus de 10 minutes à un endroit donné (Changnon, 1992; Kopp et al., 2023). Elle se produit au sein d'un « couloir de grêle » rectiligne, généralement situé sous le cœur du cumulonimbus, qui s'étire sur une bande de quelques kilomètres de largeur sur quelques dizaines de kilomètres de longueur. Lors d'orages les plus violents, les couloirs de grêle peuvent dépasser la centaine de kilomètres de long (Kunz and Puskeiler, 2010). On peut visualiser un exemple de couloir de grêle aux USA sur la Figure 18 (environ 10 x 140 km). Les dégâts ont été particulièrement marqués à la suite de cet évènement, en particulier au niveau du bâti et de l'agriculture[29], avec des grêlons avoisinant les dimensions d'une balle de golf (~ 4,5 cm).

[29] *Using satelittes to spot a hail scar, NASA, https://earthobservatory.nasa.gov/images/90592/using-satellites-to-spot-a-hail-scar*

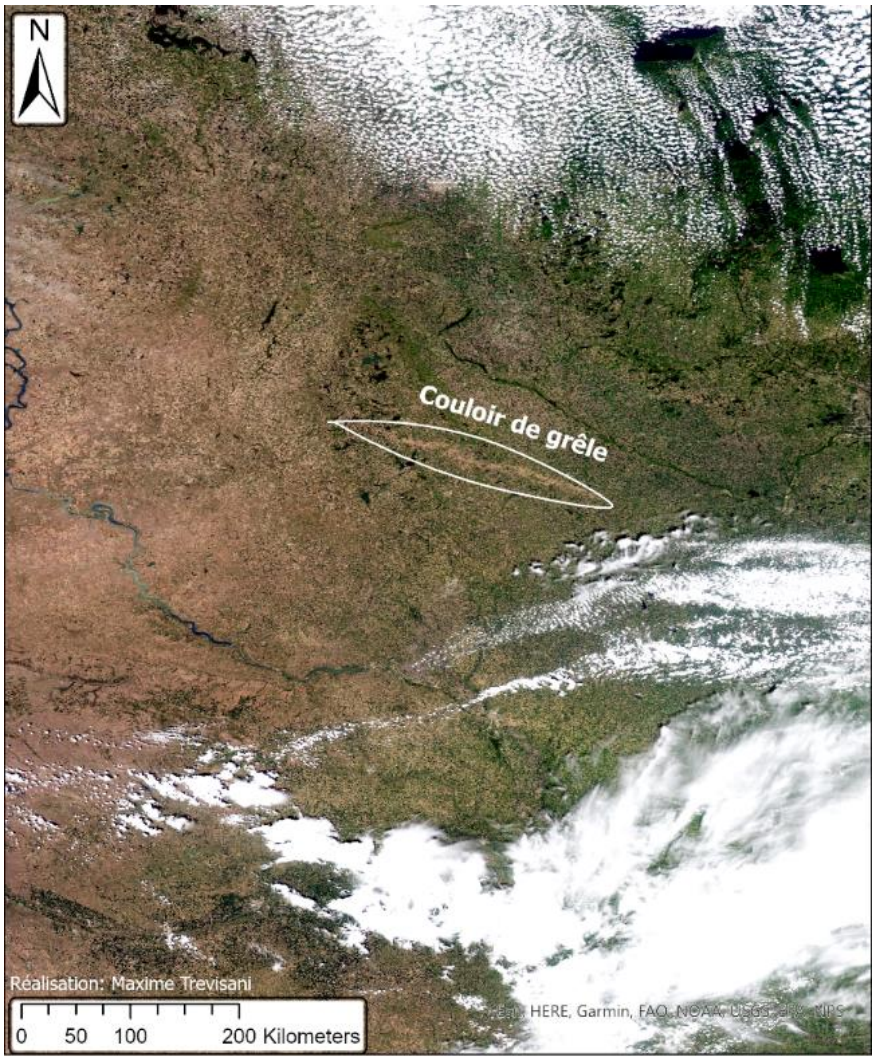


Figure 18 Vue satellite des impacts d'un couloir de grêle le 2 juillet 2017 entre la Dakota du Sud et le Minnesota aux USA, NASA, ©M. Trevisani

L'intensité d'une chute de grêle se mesure par l'activité grêligène d'un cumulonimbus. Elle s'exprime en J / m², et correspond à la somme des énergies cinétiques individuelles de chaque grêlon par unité de surface. L'activité grêligène n'est pas homogène au sein d'un même couloir de grêle. Elle augmente avec le rapprochement à l'axe central du couloir de grêle. L'activité grêligène maximale se retrouve à proximité de l'axe central, au niveau de zones ellipsoïdales allongées dans la direction de la cellule orageuse. Ces zones sont appelées « cœurs de grêle ». On peut voir un exemple de la distribution de l'activité grêligène sur la Figure 19 lors d' une étude de cas de Vinet (Vinet, 1994) du 1er juin 1993 dans le Saumurois en France.

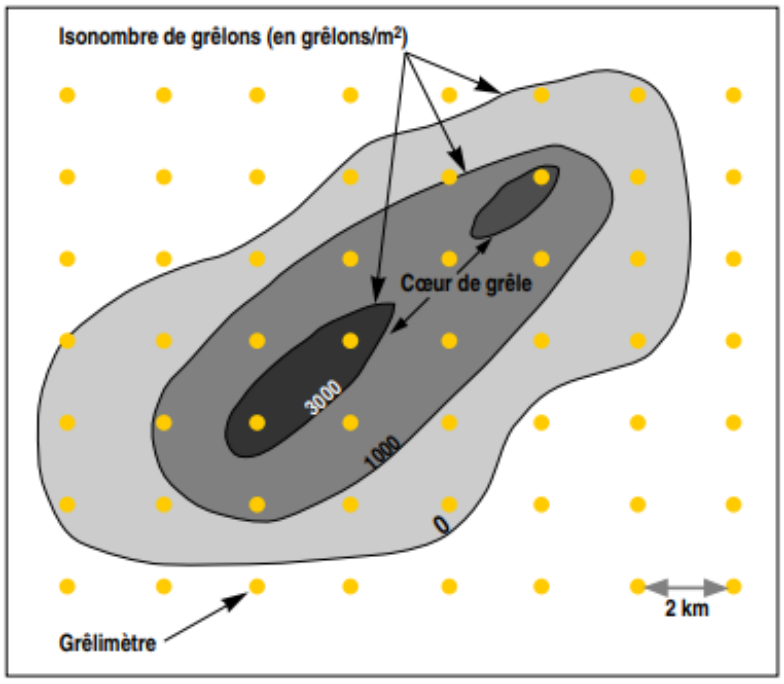


Figure 19 Image tirée des travaux de Vinet mettant en évidence deux cœurs de grêle par un réseau de grêlimètre dans le Saumurois le 1er juin 1993 ©(Vinet, 1994).

2.2 La mesure de la grêle : le grêlimètre

2.2.1 Principe de fonctionnement

La mesure de la grêle n'a jamais été une priorité des réseaux météorologiques officiels français. Les données de Météo-France sont peu utilisables car elles reposent sur des observations visuelles. Historiquement, l'observation des chutes de grêle n'est pas une mission majeure des réseaux météorologiques institutionnels. En effet, les observations sont en général de visu et la qualité des observations humaines s'étiole avec le temps, du fait de la réduction des personnels d'observation et de l'automatisation des mesures. Les stations Météo-France sont de plus en plus automatisées, et l'automatisation n'intègre pas l'observation de la grêle (Givone, 1997; Guillou, 2018; Lambergeon and Leroy, 2006).

Aussi, la mesure de la grêle a connu des avancées majeures dans les années 1970 – 1980 à la suite de tests associés aux méthodes de protection face à la grêle, avec l'installation dans diverses régions du monde de réseaux de grêlimètres pour mesurer l'énergie de la grêle au sol (Palencia et al., 2009).

Le grêlimètre est un appareil de mesure mécanique développé dans les années 1960 (Decker and Calvin, 1961; Schleusener and Jennings, 1960) permettant de mesurer avec précision les chutes de grêle. Il est constitué d'un piquet métallique de 1,50 m de haut supportant une tôle horizontale, sur laquelle est disposée une plaque de polystyrène extrudé de 30 cm x 40 cm peinte en blanc. Après chaque chute de grêle, les plaques sont collectées et les impacts de grêlons sont rendus visibles par un encrage en noir de la plaque par un rouleau d'imprimerie. Ensuite, la plaque de polystyrène est dépouillée et un étalonnage permet d'estimer le diamètre de chaque grêlon à l'origine d'un impact. L'étape de dépouillement se fait selon un processus manuel ou semi-automatique (scannage) utilisant des logiciels de traitement d'image (Dessens et al., 2001; Sánchez et al., 2009). Une étude de 2023 a pour objectif de rendre le processus totalement automatique en Suisse, en introduisant une nouvelle

génération de grêlimètre (Kopp et al., 2023). On peut voir sur la Figure 20 un grêlimètre utilisé par l'ANELFA ainsi que les étapes de de traitement de la plaque de polystyrène.

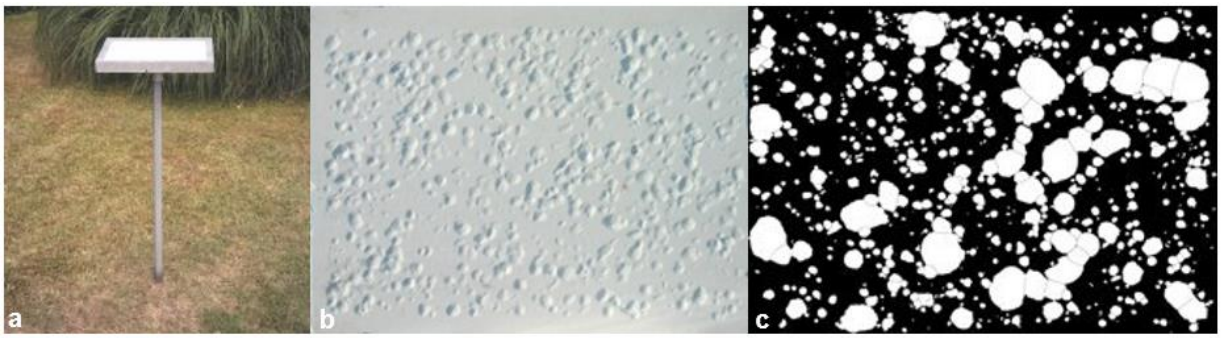


Figure 20 Photo d'un grêlimètre (a), d'une plaque de polystyrène impactée par de la grêle avant encrage (b) et une autre après encrage (c), ©ANELFA.

L'énergie d'une chute de grêle (J / m²) est ainsi estimée à partir du nombre de grêlons de plus de 5 mm sur la plaque et la distribution de leur diamètre. Elle correspond ainsi à la somme des énergies cinétiques individuelles de chaque grêlon de plus de 5 mm de diamètre sur la plaque[30].

A ce jour, le grêlimètre est l'unique appareil de mesure d'une chute de grêle. Les données issues de grêlimètres sont également les plus fiables et les plus précises sur les chutes de grêle.

2.2.2 Une mesure de la grêle depuis 1970 en France

La connaissance de la grêle progresse sous la pression de la demande sociale, avec des études motivées par la lutte active contre la grêle agissant chimiquement sur le nuage d'orage afin d'altérer la formation des grêlons. De nombreux programmes anti-grêle ont vu le jour en Europe à partir des années 1950. Les premiers programmes anti-grêle sont réalisés par la Suisse sur leur territoire, avec les expériences Grossversuch II (1952-1956) et III (1957-1963). Elles ont pour objectif d'étudier la réduction des chutes de grêle en incorporant des ions Iodure d'Argent, à l'aide d'un générateur terrestre de fumée, au sein de nuages potentiellement grêligènes (Schmid, 1967). L'observation, ou la non-observation, des chutes de grêle dans ces expériences est permise grâce à des observateurs volontaires.

L'expérience Grossversuch IV (1977-1983) fait suite aux deux précédentes, et fait office de référence en matière de mesure et d'étude de la grêle. Elle a été réalisée en Suisse, dans la région de Napf (mi-chemin entre Berne et Zürich). Elle est le produit d'une collaboration entre la France, la Suisse et l'Italie sur cette période, et cherche à caractériser l'impact de l'ensemencement des nuages potentiellement grêligènes à partir des fusées anti-grêle soviétiques sur les chutes de grêle. L'observation des chutes de grêle se fait par l'intermédiaire de deux réseaux grêlimétriques temporaires : le réseau du Nord est géré par le groupe de recherche français du Groupement National d'Etudes des Fléaux Atmosphériques (GNEFA) et le réseau du Sud par le groupe de recherche italien de l'Ufficio Centrale di Ecologia Agraria (UCEA). Les grêlimètres sont espacés de 2 km, ils sont donc chacun représentatif d'une surface de 4 km². Ce maillage « d'observateurs » est donc bien plus fin et précis que celui des observateurs volontaires des expériences Grossversuch II et III (Federer et al., 1986).

L'Association Climatologique de Moyenne Garonne (ACMG) a été fondée en 1959 en France. Elle est constituée d'administrateurs du monde rural (principalement du Lot-et-Garonne, Tarn-et-Garonne, Gers et Gironde) et avait pour objectif d'apporter aux agriculteurs une assistance technique sur les problèmes de l'influence du temps en agriculture. Elle possédait en 1996 un réseau constitué de 476 grêlimètres pour l'épauler dans sa lutte active contre les chutes de grêle. L'ACMG arrête en 2003 toute

[30] Le grêlimètre, ANELFA

forme de lutte active contre la grêle à la suite d'un incident en Tarn-et-Garonne, où elle est accusée de « prendre la pluie » de ses voisins, et se focalise sur les solutions à apporter aux agriculteurs, aux gestionnaires des territoires, aux entreprises et aux chercheurs dans le domaine de l'adaptation au changement climatique[31].

Également en France, l'Association Nationale d'Étude et de Lutte contre les Fléaux Atmosphériques (ANELFA), a été créée en 1951 par Henri Dessens à l'initiative d'un groupe d'agriculteurs, d'agronomes, de physiciens et d'élus. Agée de plus de 70 ans, cette association a pour objectif de développer les recherches scientifiques dans le domaine de la physique des nuages et de la modification du temps tout en perfectionnant une méthode de traitement des orages afin de réduire les dégâts causés par la grêle. Pour l'aider dans ses travaux, elle s'appuie elle aussi sur un réseau grêlimétrique dont le premier grêlimètre a été installé en 1988. Ce réseau grêlimétrique s'est constitué au fur et à mesure des années, soit en densifiant les espaces déjà couverts, soit en conquérant de nouveaux espaces. Le réseau a fortement évolué depuis les premières installations, et il est toujours en activité de nos jours. En 2023, il comptait 1 517 grêlimètres répartis sur 24 départements, contre 323 sur 4 départements en 1988.

2.2.3 Un réseau grêlimètre couvrant principalement le Sud-Ouest de la France

Le seul réseau grêlimétrique existant en France hexagonale de nos jours est celui de ANELFA (Sánchez et al., 2009). Pour l'accompagner dans sa lutte active contre la grêle, elle possède un réseau de 1 517 grêlimètres et 1 077 générateurs d'ensemencement des nuages sur la France en 2023, principalement situé dans le Sud-Ouest de la France comme on peut voir sur la Figure 21 où cette région concentre deux tiers du réseau de l'ANELFA.

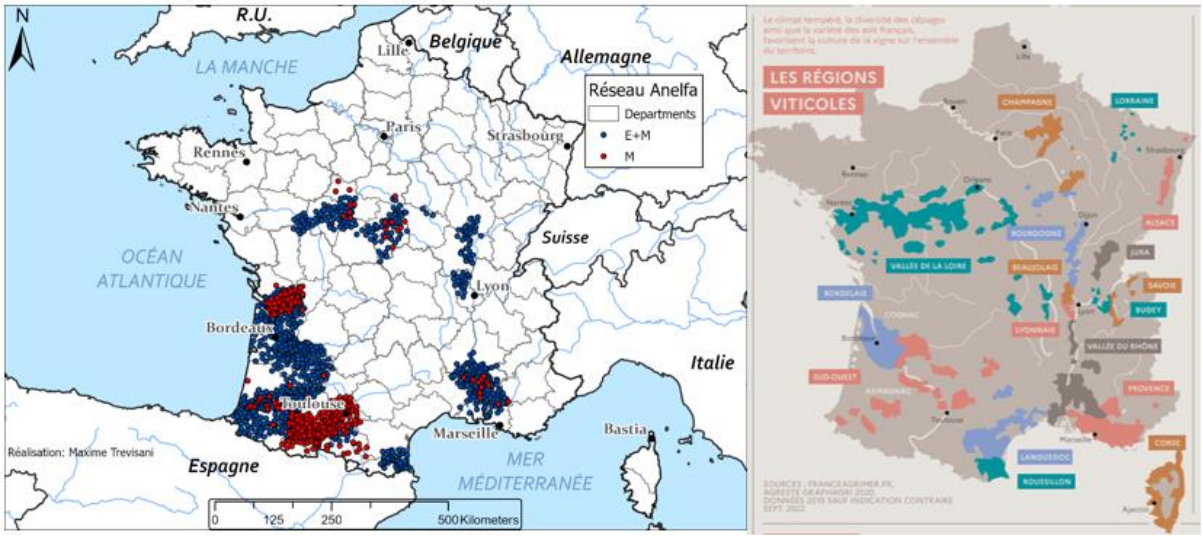


Figure 21 A gauche, cartographie à la maille communale (INSEE) des grêlimètres (M) seuls et des grêlimètres couplés à un système de prévention grêle (E+M) du réseau ANELFA en 2023, ©M. Trevisani, 2023. A droite, cartographie des régions viticoles de France, ©Ministères de l'Agriculture, 2022.

Cette implantation géographique est fortement liée à l'enjeu socio-économique que représente la lutte anti-grêle. L'ANELFA utilise en effet ce réseau comme contrôle de l'efficacité des dispositifs anti-grêle qu'elle développe auprès des agriculteurs du Sud-Ouest de la France (les dispositifs de lutte anti-grêle seront présentés plus en détail dans la sous-partie 0 du chapitre 5). Les grêlimètres sont donc

[31] L'histoire de la lutte anti -grêle Association Climatologique de la Moyenne-Garonne de l'ACMG, ACMG, 2015

implantés dans les régions agricoles où se concentrent les cultures sensibles à la grêle, et délaisse les zones peu cultivées : c'est pourquoi on retrouve une bonne concordance géographique entre la localisation des cultures viticoles et arboricoles et celle des grêlimètres. Ce constat est particulièrement flagrant dans le bordelais, la Vallée de la Loire et sur les Côtes du Rhône où on retrouve une forte densité de grêlimètre. A l'inverse, la forêt des Landes est clairement évitée par le réseau puisqu'elle ne concentre aucun enjeu. Ceci introduit un biais dans la détection du phénomène comme dans la cartographie de l'aléa. L'idéal pour dresser une cartographie fiable de l'aléa grêle à l'échelle de la France serait de disposer de 30 ans de données (ou plus) d'un réseau grélimétrique à maille régulière sur l'ensemble du territoire. Ce Graal des assureurs est illusoire vu les coûts qu'il représenterait.

Pour faire face au caractère très localisé dans l'espace de la grêle, il est également nécessaire d'avoir un maillage fin entre chaque grêlimètre (< 5 km, largeur moyenne d'un couloir de grêle). C'est pourquoi il est difficile d'étudier la grêle sur un grand périmètre (régional ou national) à partir de données grêlimétriques uniquement. Il faut donc rechercher de nouvelles sources de données quantifiant l'occurrence et l'intensité des chutes de grêle. La combinaison de ces sources partielles semi-qualitatives en une vision globale exhaustive permettrait ainsi d'arriver à une vision la plus objective possible de l'aléa grêle sur un territoire non couvert par des grêlimètres.

2.3 Nouvelles méthodes de détection des chutes de grêle

2.3.1 Des témoins oculaires par le biais des réseaux d'observateurs professionnels et amateurs

Le « big data », par l'intermédiaire de la presse et des réseaux météorologiques amateurs, offre des possibilités nouvelles. L'apparition des réseaux sociaux, comme Facebook en 2004 et Twitter en 2006 (X depuis 2023) a permis d'avoir des informations presque en temps réel sur les évènements climatiques à l'aide des postes et/ou Tweets, souvent couplés à des photos ou vidéos. Ils permettent ainsi d'observer l'aléa, voire même de le quantifier dans la majorité des cas (intensité, localisation, date/heure), tout en estimant les dommages qu'il a pu induire. Une étude réalisée en 2011 en Australie (Cheong and Cheong, 2011) analyse par exemple les tweets extraits de Twitter (« X » depuis 2023) lors d'inondations pour identifier les acteurs des communautés en ligne et quantifier leur efficacité dans la communication d'informations. On peut voir un exemple de communications réalisé par la page Facebook Lyon Météo (Figure 22), ainsi que les interactions associées, lors de l'évènement grêle du 30 juin 2022. Cet exemple illustre bien le complément d'informations apporté par la communauté sur l'évènement grêle, avec un renseignement des communes touchées (Sérézin-du-Rhône, St-Jean-de-Touslas) et une estimation possible du diamètre des grêlons par analyse des photographies/vidéos.

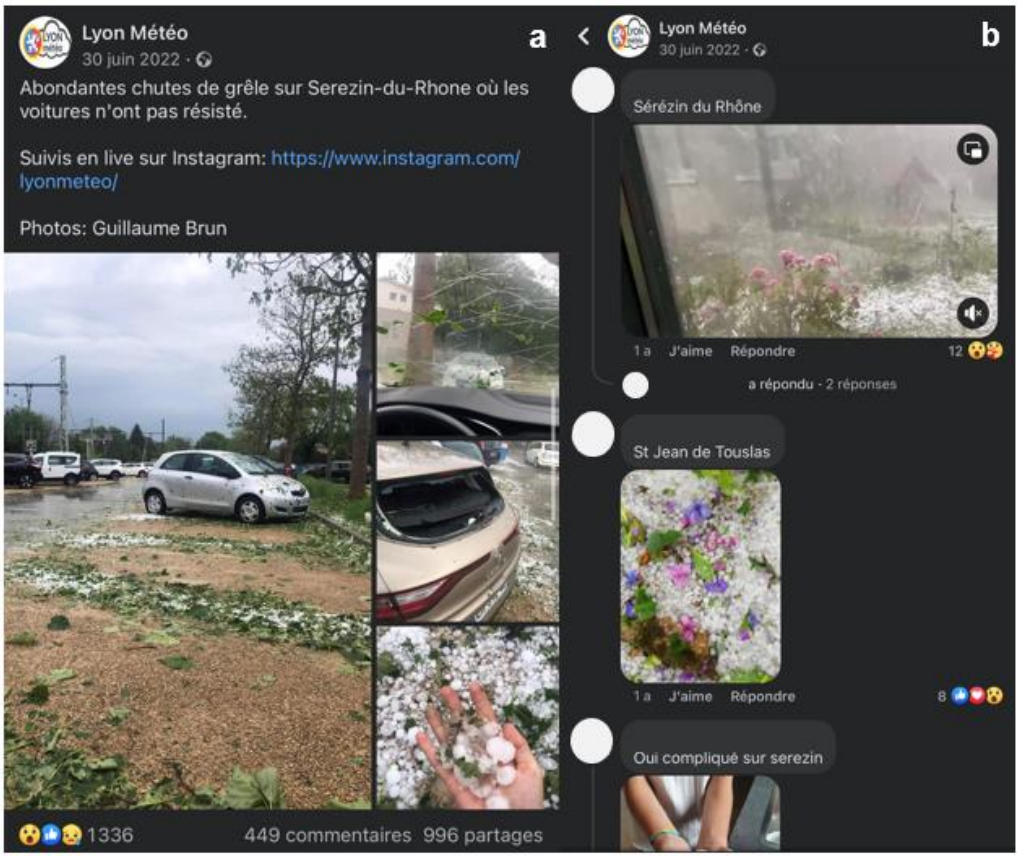


Figure 22 Capture d'écran (téléphone) d'une publication Facebook sur les orages de grêle dans le lyonnais le 30 juin 2022 par Lyon Météo (a) et des réactions de sa communauté (b). Les données ont été anonymisées.

Les réseaux sociaux sont également de plus en plus utilisés dans la gestion de crise, en particulier les crises météorologiques (Jin, 2020; Sadri et al., 2021; Sung and Hwang, 2014). On peut voir un exemple de la communication sur Twitter d'organismes gouvernementaux au regard des inondations majeures ayant concernées le Pas-de-Calais le 14 novembre 2022 sur la Figure 23.

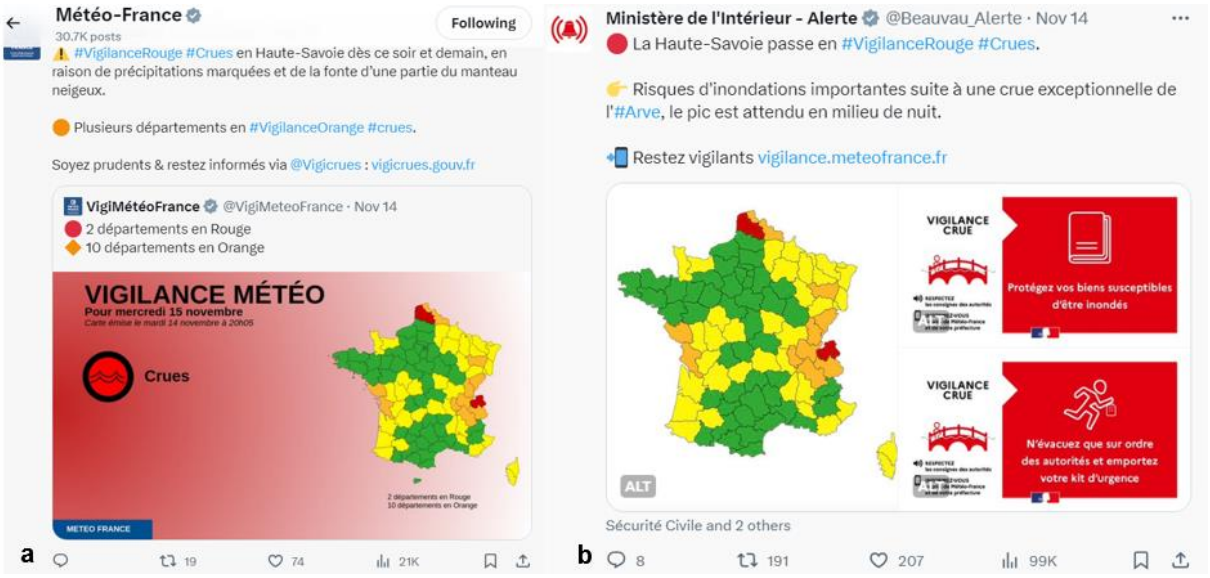


Figure 23 Capture d'écran sur la communication de Météo-France (a) et du ministère de l'Intérieur (b) sur Twitter le 14 novembre 2022 au regard des inondations majeures en cours.

Les réseaux sociaux permettent également de suivre l'activité des réseaux météorologiques professionnels locaux comme Lyon Météo, Météo Franc-comtoise, Météo du Grand-Est… Dans la très grande majorité des cas, ces réseaux sont animés par des chasseurs d'orages qui ont pour objectif de photographier et de documenter un évènement climatique. Ils fédèrent une communauté pouvant dépasser les 100 000 utilisateurs. Le 5 décembre 2023 on recense par exemple sur Facebook 162 000 personnes pour Météo du Grand-Est et 42 000 pour Lyon Météo.

Le caractère local, couplé à une communauté active d'utilisateurs, fait de ces réseaux une solution de choix pour détecter des chutes de grêle sur un territoire étendu, malgré le biais associé à la densité de la population et donc d'observateurs. Des organismes comme Keraunos, un bureau d 'études français spécialisé dans la prévision et la gestion des risques associés aux phénomènes orageux, et l'European Severe Storms Laboratory (Dotzek et al., 2009; Groenemeijer et al., 2017) utilisent ces données pour renseigner des évènements climatiques et alimenter une base de données grêle à la maille communale. On peut visualiser les chutes de grêle présentes dans l'ESWD sur le territoire hexagonal en 2022 sur la Figure 24. (2 461 évènements communes – dates), alimenté par l'European Severe Storm Laboratory.

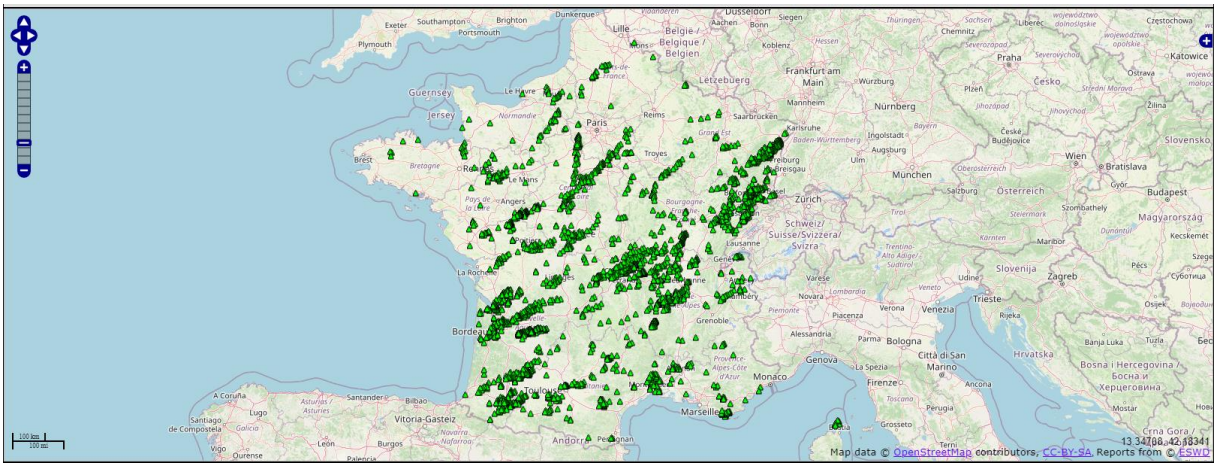


Figure 24 Les chutes de grêle en France en 2022 enregistrées sur l'ESWD.

2.3.2 Des prédicteurs de grêle comme proxy

Il est également possible d'estimer la fréquence des chutes de grêle à partir de data obtenues à l'aide d'instruments de télédétection comme les radars et satellites météorologiques. Cette approche de la quantification de la grêle se fait généralement par le calcul d'un indice de susceptibilité de chutes de grêle mais a l'avantage majeur d'avoir une résolution temporelle fine tout en couvrant une territoire très étendu à maille fine: 1x1km² avec une résolution temporelle de 5 min pour les radars (Tabary, 2007), contre 1x1-5x5 km² pour une résolution temporelle de 15 min (Bedka, 2011; Deneke and Roebeling, 2010; Schmetz et al., 2002) sur le territoire hexagonal. Cet indice a pu être calculé historiquement à partir des échos radars maximums mesurés dépassant un seuil (Atlas and Ludlam, 1961). Mais les études plus récentes s'intéressent plutôt à l'indice mesuré à différentes altitudes, couplé avec des données météorologiques (Blair et al., 2011; Czernecki et al., 2019; Fluck et al., 2021; Kunz and Puskeiler, 2010; Nisi et al., 2016; Skripniková and Řezáčová, 2014; Wapler, 2017). Il est également possible de calculer cet indice de susceptibilité à partir d'un ou plusieurs paramètres météorologiques caractérisant une cellule orageuse, comme la présence d'un sommet pénétrant couplé à la température au sommet du nuage (Bedka, 2011, 2011; Cecil, 2009; A. Merino et al., 2014; Mikuš and Strelec Mahović, 2013; Punge and Kunz, 2016; Setvák et al., 2013, 2003).

Cette approche ne mesure cependant pas avec certitude une chute de grêle et doit donc être calibrée avec des données assurantielles ou avec des observations directes comme celles présentées dans la partie 0 ci-dessus. Il faut également noter que cet indice fait, à notre connaissance, toujours l'hypothèse que les grêlons tombent verticalement. En effet, l'indice est calculé à partir de paramètres mesurés à une altitude supérieure à celle du sol. En particulier, lorsque les échos radars sont utilisés, ce qui peut induire un décalage de plusieurs kilomètres entre les grêlons estimés et mesurés (Yan and Bárdossy, 2019) (Figure 25). Il n'est cependant pas possible à ce jour d'estimer ce décalage potentiel des chutes de grêle, mais ce dernier peut avoisiner les 10 km dans certains cas pour les précipitations (Dai et al., 2015, 2013; Lack and Fox, 2007; Sandford, 2015). La cohérence géographique des averses de grêle est ainsi reconstituée en associant des observations et des chutes de grêle modélisées, c'est-à-dire déduites de paramètres météorologiques favorables ou de détections indirectes (radar) mais non observées.

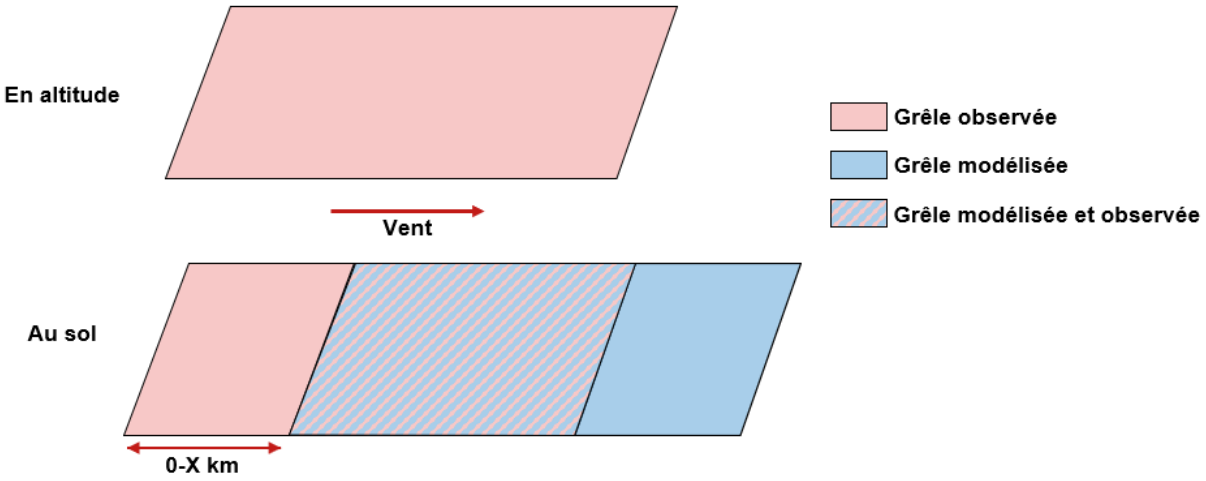


Figure 25 Décalage potentiel entre la chute de grêle modélisée à partir de paramètres mesurés en altitude et la chute de grêle observée au sol, ©M. Trevisani

2.3.3 Détection de la grêle par des radars à polarisation

Un radar météorologique fonctionne en étudiant la rétro dispersion d'une onde électromagnétique dans la basse atmosphère à la suite de précipitations, d'éléments organiques ou inertes (particules, sables, poussières, suie…) dans l'air. Le principe de fonctionnement d'un radar est visible sur la Figure 26.

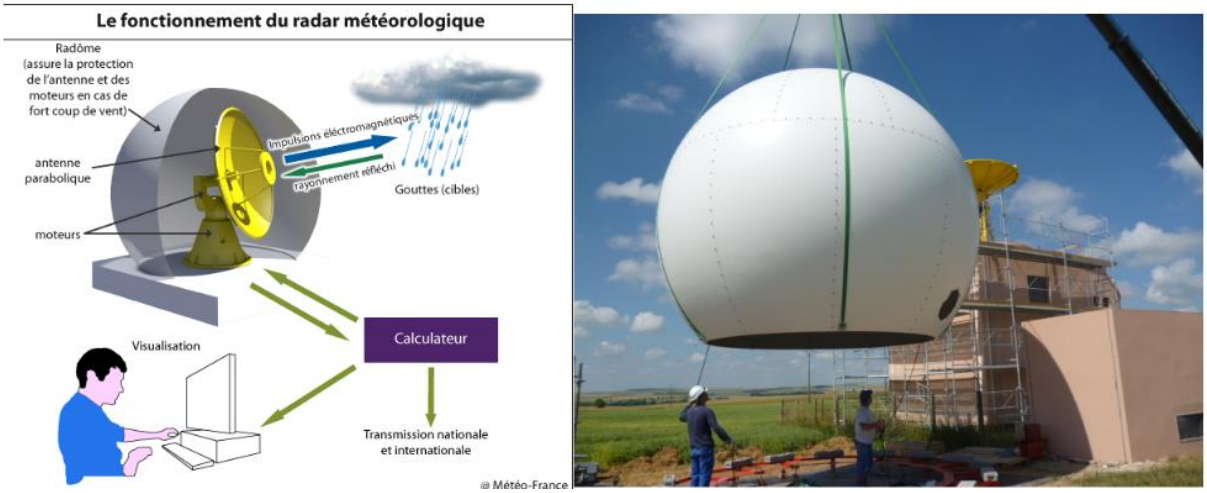


Figure 26 Principe de fonctionnement d'un radar météorologique, ©Météo France.

L'estimation de chutes de grêle à partir d'échos radars uniquement est une chose complexe à réaliser, et la précision de l'estimation dépend de la technologie utilisée par les radars (bande simple, à double polarisation…) (Skripniková and Řezáčová, 2019). Le développement des radars à double polarisation dans les années 2000 en France a permis la mesure de nouveaux paramètres, comme la forme, la taille, ou bien l'état des éléments dans l'air et donc des gouttes d'eau. Ces paramètres permettent d'estimer le type d'hydrométéores détectés (pluie, neige, glace…), améliorant ainsi la précision des estimations (Kaltenboeck and Ryzhkov, 2013; Mirkovic and Zrnic, 2023; Ortega et al., 2016; Ryzhkov et al., 2005; Skripniková and Řezáčová, 2019; Zrnic et al., 2010).

Il existe cependant toujours de nombreux problèmes d'interprétation du signal reçu par le radar, car la composition d'un grêlon influence fortement sa réponse vis-à-vis d'une onde électromagnétique. Un grêlon entièrement constitué de glace offre par exemple une réflectivité radar très faible, alors que lorsqu'il est recouvert d'une pellicule d'eau par fusion, la réflectivité augmente rapidement jusqu'à devenir identique à celle d'une goutte de pluie de même dimension (Atlas et al., 1964; Kumjian, 2013; Mirkovic et al., 2022). Il est ainsi difficile, voire impossible, de distinguer les grêlons de petites tailles des gouttes de pluie (Kumjian, 2013; Thurai et al., 2015). En revanche, un signal radar très fort appelé « bande brillante » peut être la signature d'une zone de gros grêlons surtout si celui-ci est rencontré au voisinage de l'isotherme 0°C.

On retrouve la cartographie du réseau radar de Météo-France sur la Figure 27. On observe une concentration de radars météorologiques plus importante en zone montagneuse qu'en plaine afin de pallier « les zones d'ombre » associées au relief.

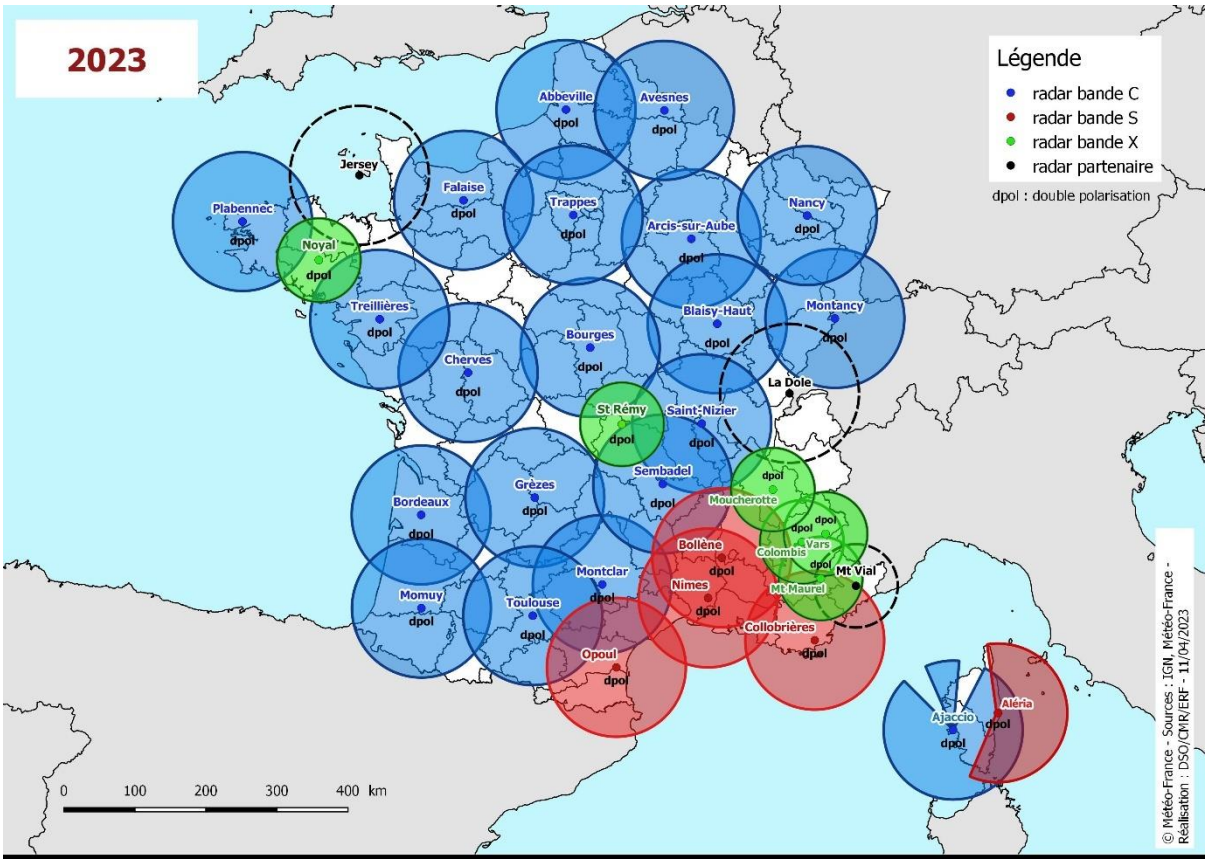


Figure 27 Réseau de radars Météo-France au cours de l'année 2023, ©Météo France. Les cercles autour des radars en bande S (en rouge) et C (en bleu, en noir pour les radars limitrophes) ont un rayon de 100 km. Les cercles autour des radars en bande X (en vert) ont un rayon de 50km. Dpol veut dire double polarisation.

Malgré une bonne couverture du territoire hexagonale par les radars de Météo-France, la faible accessibilité et le coût des données météorologiques de Météo-France réduisent les capacités de la recherche pour une utilisation systématique sur le sujet de la grêle ; c'est pourquoi nous n'avons pas utilisé de données grêle issues de radar météorologique dans notre étude. Cette politique de Météo France entraîne également un regard de la France au regard de la grêle vis-à-vis de nos voisins européens comme l'Allemagne et la Suisse, pays pionniers sur le sujet de la grêle en Europe (cf 2.4.2 de ce chapitre).Pour rattraper le retard français au regard de la grêle en France, Météo-France encadre actuellement une thèse spécifique sur le diagnostic de grêle en temps quasi-réel à partir de données radars

2.4 Limites des cartographies de la grêle en France pour une société d'assurance

2.4.1 Des cartographies de la fréquence des chutes de grêle, sous composante de l'aléa grêle

De nombreuses études s'intéressent à cartographier la grêle dans le monde. Elles passent généralement par l'utilisation de « proxys » météorologiques comme témoins de chutes de grêle. Elles ont l'avantage de pouvoir cartographier un grand territoire (national, européen, mondial) de manière

homogène, avec une résolution pouvant atteindre 9 x 9 km pour les études utilisant les données ERA5 avec réduction d'échelle[32] (Bell et al., 2021; Hersbach et al., 2020).

Les sociétés d'assurance étudient le risque de leur portefeuille et de leurs prospects à travers l'analyse de leur sinistralité historique et de leur connaissance des risques du marché français, en incorporant des données publiques, comme l'Atlas des Zones inondables (AZI), celles des Plans de Prévention des risques inondations (PPRI) pour les inondations, les cartes d'exposition au Retrait-Gonflement des Argiles (RGA) du BRGM[33]… notamment accessibles sur la plateforme internet Georisques[34]. En cherchant à contrôler et à maîtriser le risque de son portefeuille, une société d'assurance a ainsi pour objectif de diversifier au mieux le profil de risque de son portefeuille dans le but d'éviter la création de zones d'accumulation (secteur géographique concentrant un surnombre de risques et/ou d'évènements couverts), limitant ainsi les pertes lors de la survenance d'un évènement. A ce jour, il n'existe pas de travaux, publiques et privés, caractérisant l'aléa grêle avec une précision suffisante pour les sociétés d'assurance.

Une étude de Prein et Holland en 2018 (Prein and Holland, 2018) cartographie la fréquence des chutes de grêle de plus de 2,5 cm dans le monde avec une résolution de 100 x 100 km (Figure 28), à partir d'une combinaison de quatre paramètres environnementaux observés lors de chutes de grêle (instabilité de l'atmosphère, hauteur de l'isotherme 0°C, 0-3 km vent de cisaillement et hélicité relative de l'orage).

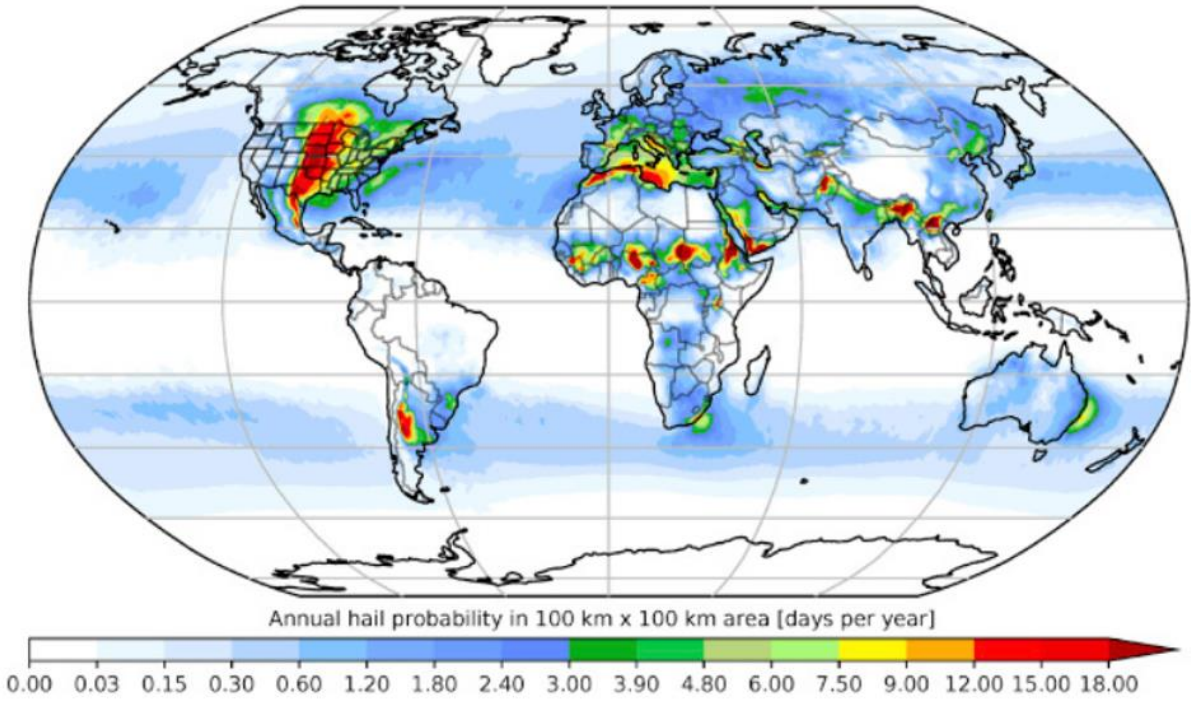


Figure 28 Répartition géographique de la fréquence annuelle des chutes de grêle de plus de 2,5 cm dans le monde (100 x 100 km) selon les travaux de Prein et Holland ©Prein and Holland, 2018.

Ces travaux permettent de mettre en évidence les conditions environnementales favorables à la formation de chutes de grêle des zones tempérées vis-à-vis du reste du monde. Ils mettent également en évidence un territoire français globalement moins touché par des chutes de grêle que le reste de la

[32] Characteristics of ERA5 and innovations for ERA6, Copernicus, European Commission & ECMF, 2022
[33] https://www.brgm.fr/fr
[34] https://www.georisques.gouv.fr/

zone tempérée, avec une diagonale Sud-Ouest / Nord-Est semblant être le secteur géographique le plus touché en France (pic d'activité au niveau des Pyrénées). Cependant, ces travaux n'étudient pas les variations régionales d'intensité moyennes et maximales de la grêle. Couplé à une résolution trop faible pour étude nationale de la grêle en France (~ 950 x 1 000 km), ils ne peuvent donc pas être exploités par une société d'assurance.

Les travaux de Punge et al. en 2017 (Punge et al., 2017) cartographient la fréquence des chutes de grêle en Europe à la résolution 10 x 10 km (Figure 29), à l'aide de la détection de sommet froid pénétrant et des paramètres atmosphériques (CAPE, 0-6 km vents de cisaillement, hauteur de l'isotherme 0°C). Ils mettent en évidence l'influence de l'orographie sur la fréquence des chutes de grêle en Europe, avec une fréquence bien plus importante aux niveaux des reliefs montagneux comme les Alpes, le Massif Central et les Pyrénées.

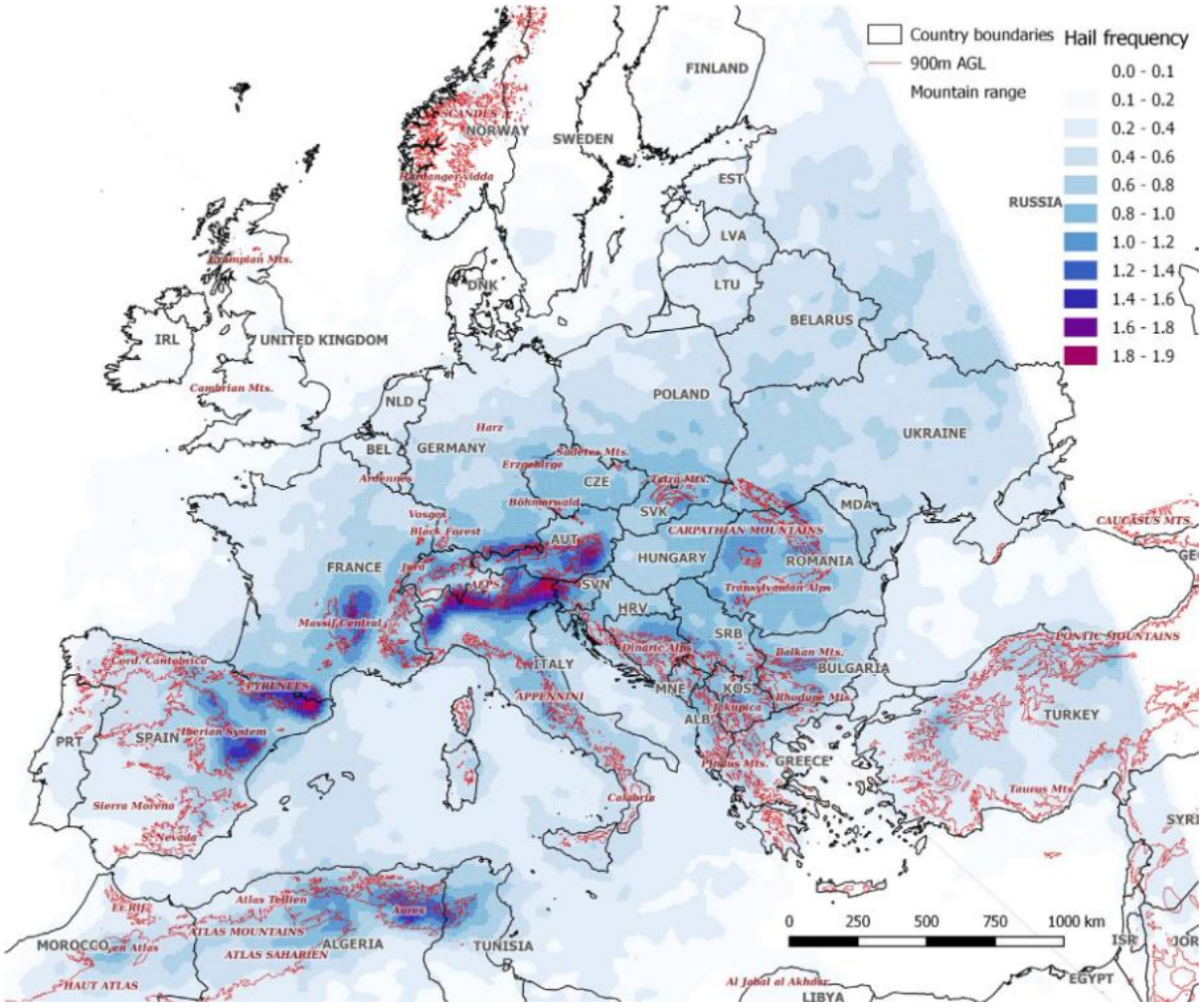


Figure 29 Répartition géographique de la fréquence annuelle des chutes de grêle en Europe (résolution 10 x 10 km) selon les travaux de Punge et al., ©Punge et al., 2017.

En France, on remarque que les chutes de grêle sont principalement situées sur un axe Sud-Ouest / Nord-Est, avec un maximum local au niveau du Massif Central et des Pyrénées méditerranéennes. On retrouve ainsi la tendance géographique globale observée au sein des travaux de Prein et Holland (Prein and Holland, 2018), avec cependant une résolution bien plus fine dans cette étude.

Même si la résolution de l'étude est suffisante pour une analyse nationale et régionale de la grêle en France, la caractérisation uniquement d'une sous-composante de l'aléa grêle (fréquence) limite

l'exploitation opérationnelle de ces résultats au sein d'une société d'assurance. En effet, l'intensité d'une chute de grêle (taille des grêlons, énergie cinétique par unité de surface…) est le principal facteur d'endommagement si on s'intéresse uniquement à l'aléa. Ce point sera plus développé dans la section 4.3.1 du chapitre 4.

D'autres études s'intéressent également à cartographier la fréquence des chutes de grêle en Europe, comme celle de Fluck et al. en 2021 (Figure 30), Rädler et al. en 2018 (Figure 31), celle de Pùčik et al. en 2019 (Figure 32), ou bien plus récemment de Battaglioli et al. et 2023 (Figure 33) (Battaglioli et al., 2023; Fluck et al., 2021; Púčik et al., 2019; Rädler et al., 2018). Ces cartographies s'accordent globalement pour mettre en évidence les mêmes tendances géographiques globales concernant la localisation des chutes de grêle que celles identifiées précédemment. Elles se heurtent cependant aux mêmes problématiques que les autres études, avec soit une résolution trop faible, soit une caractérisation uniquement d'une sous-composante de l'aléa (fréquence), limitant de ce fait leur exploitation par une société d'assurance.

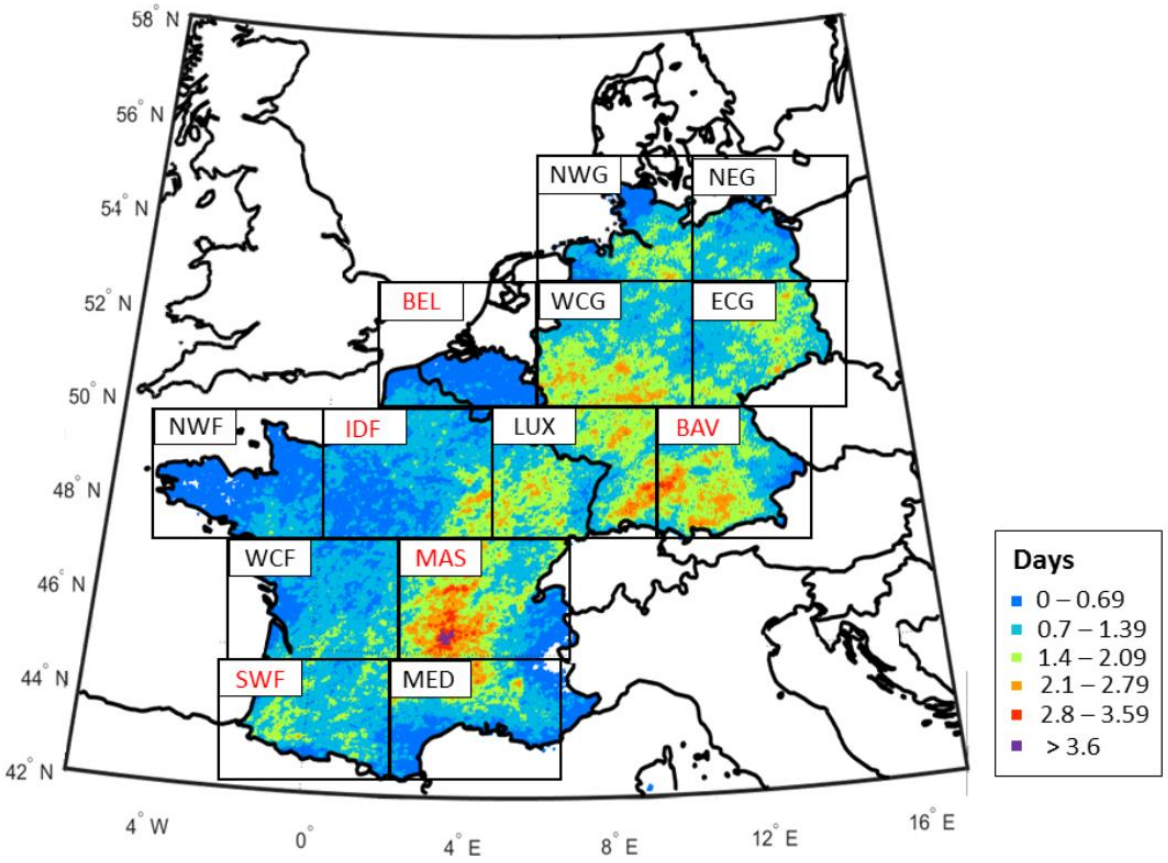


Figure 30 Répartition géographique de la fréquence annuelle des chutes de grêle en France, Allemagne, Belgique et Luxembourg (1 x 1 km) selon les travaux de Fluck et al. Des sous-domaines sont également indiqués, ©Fluck et al., 2021.

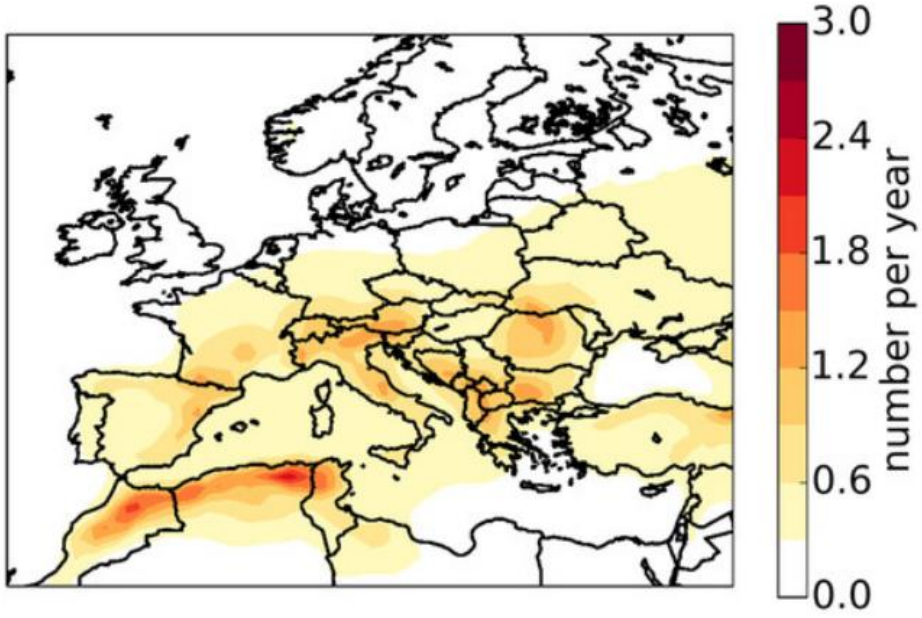


Figure 31 Nombre de périodes de 6h avec grêle d'au moins 2 cm par an sur un maillage 0.75° x 0.75° selon Rädler ©Rädler et al., 2018.

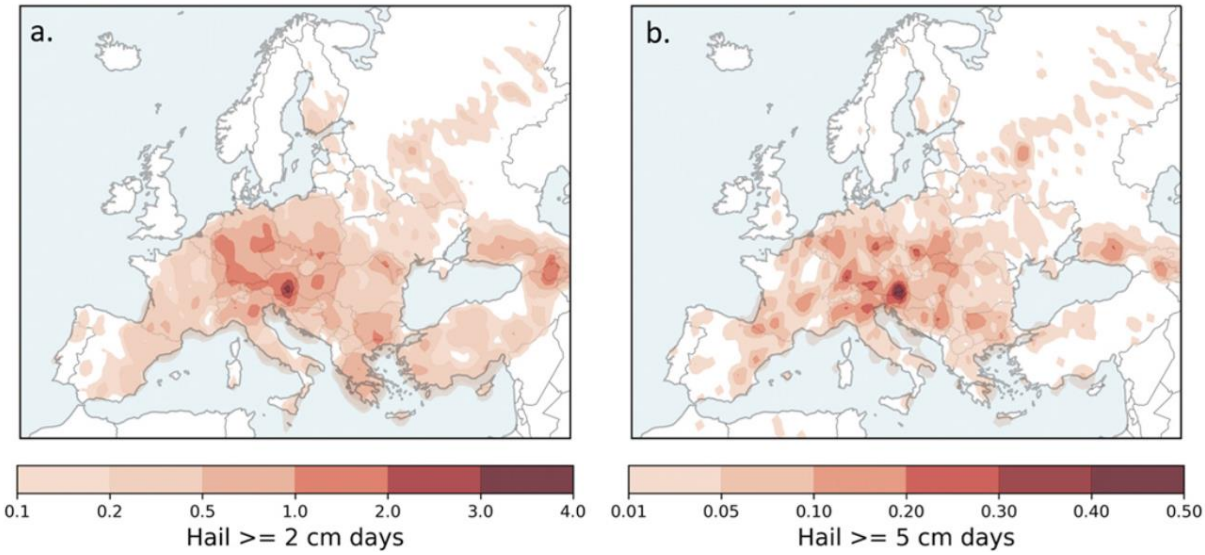


Figure 32 Répartition géographique de la fréquence annuelle moyenne des chutes de grêle d'au moins 2 cm (a) et d'au moins 5 cm (b) sur une grille de 0.5° latitude x 0.5° longitude selon les travaux de Pùčik, ©Púčik et al., 2019.

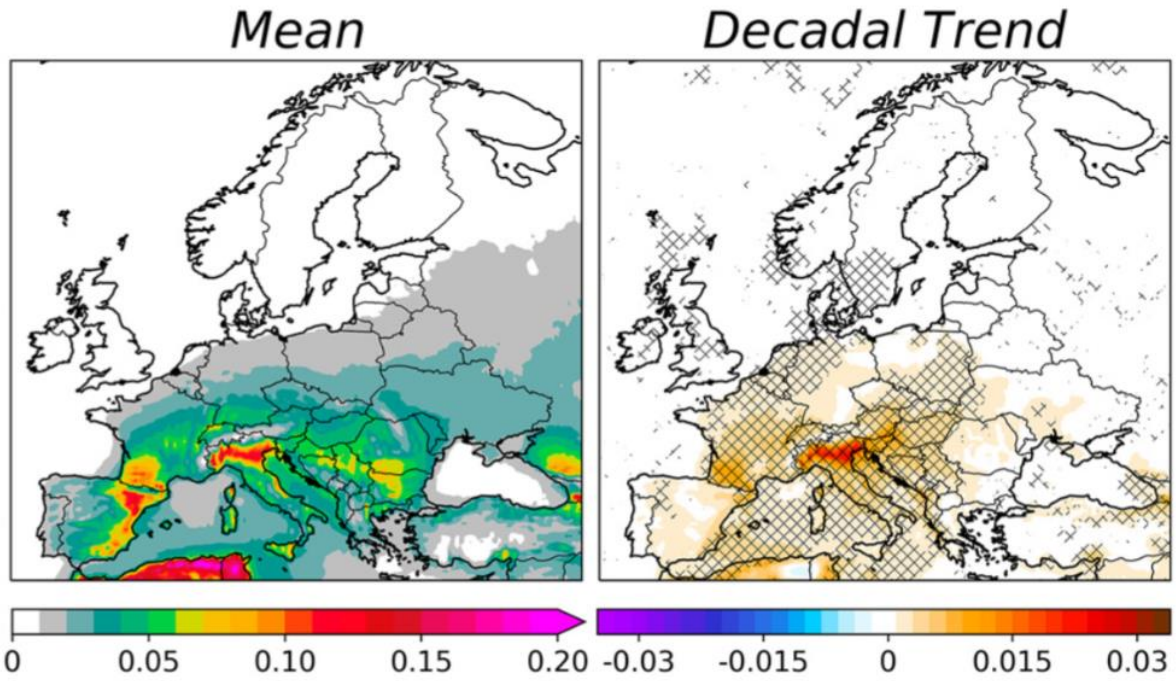


Figure 33 A gauche, nombre d'heures moyen modélisé avec grêle d'au moins 5 cm de diamètres par an sur une grille de 0,25° x 0,25°. A droite, changement sur le nombre d'heures moyen avec grêle d'au moins 5 cm par décennie. Les tendances significatives ont étés hachées (p < 0,05), ©Battaglioli et al., 2023.

2.4.2 Des cartographies de l'aléa grêle limitées à l'échelle de la France hexagonale

Munich Re[35], un des principaux réassureurs mondiaux, a communiqué dans un rapport de 2011 une cartographie de l'aléa grêle à l'échelle du globe[36] (Figure 34) à l'aide d'un indice (1-6), calculée à partir de la fréquence et de l'intensité des orages de grêle (méthode non communiquée).

[35] https://www.munichre.com/en.html
[36] Nathan Wolrd Map of Natural Hazard, Munich Re, 2011

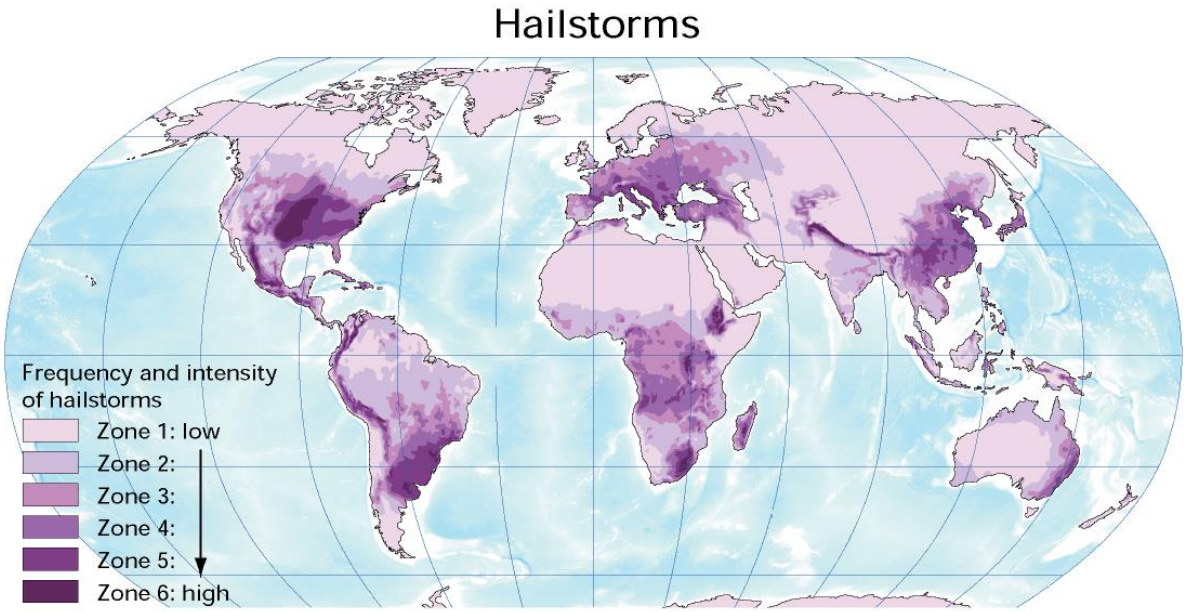


Figure 34 Répartition géographique de la fréquence et de l'intensité des orages de grêle dans le monde, ©Nathan World Map of Natural Hazard, Munich Re, 2011.

Cette cartographie mondiale de la grêle rejoint sur certains points celle présentée sur la Figure 28, en identifiant les zones équatoriales (favorisant le conflit de masse d'air) et les zones tropicales (altitude plus importante) comme secteurs les plus touchés par la grêle. Il existe cependant de fortes disparités régionales concernant les « Hotspot » de la grêle. Au sein de cette étude :

- L'Europe se démarque plus que le Nord de l'Afrique,
- L'Afrique Sub-saharienne se distingue plus que sa délimitation Nord,
- La face Atlantique de l'Amérique du Sud ressort plus que sa section intérieure,
- La Cordillère des Andes apparaît dans cette étude,

Cette cartographie n'est cependant pas publique d'accès dans son détail, et n'est exploitable que par l'intermédiaire d'un contrat de réassurance avec Munich Re.

En France, l'étude de Vinet en 1998 (Vinet, 1998) s'intéresse à l'ensemble de l'aléa grêle (fréquence et intensité) à l'échelle de la France (Figure 35), avec une résolution de 20 x 20 km. Cette étude se base sur l'exploitation du réseau grêlimètrique de l'Anelfa, principalement présent dans le Sud-Ouest de la France, et les données d'assurance vigne de Groupama, leader de l'assurance récolte en France.

Elle met clairement en évidence certaines similitudes avec les autres études sur les tendances géographiques générales de la Grêle en France : diagonale Sud-Ouest / Nord-Est, un maximum local au niveau du Centre et du Centre-Est. Elle se distingue cependant par un décalage d'autres secteurs à haute activité grêligène, avec l'identification du Sud-Ouest intérieur plutôt que les Pyrénées, et l'apparition du Sud des Alpes comme secteur à haute activité grêligène.

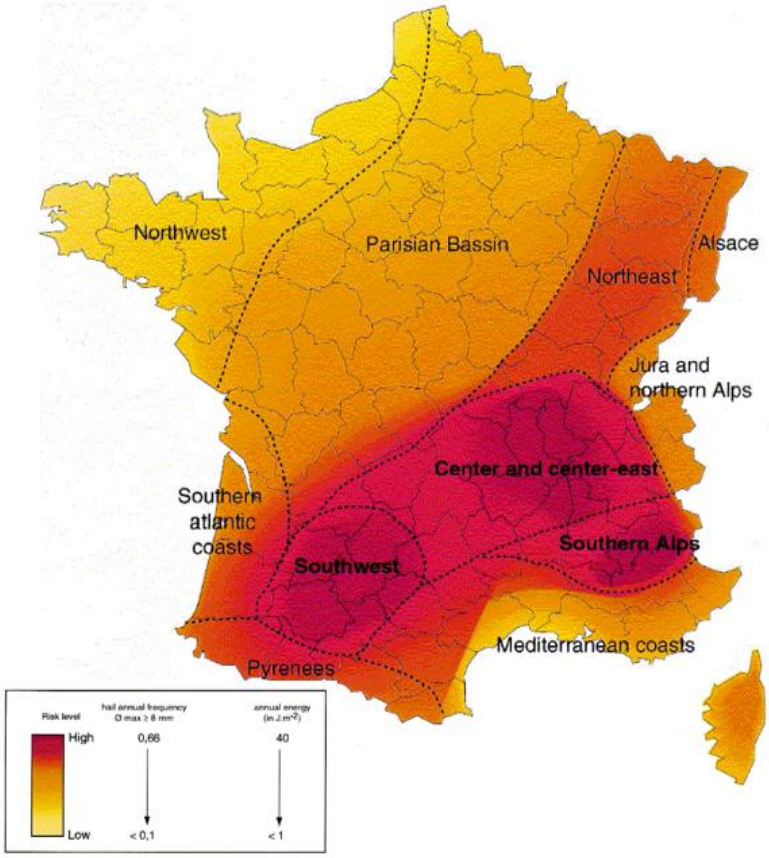


Figure 35 Répartition géographique de l'aléa grêle en France selon les travaux de Vinet, ©Vinet, 1998.

Même si cette étude concerne l'ensemble de l'aléa grêle à l'échelle de la France (fréquence et intensité), son ancienneté (> 25 ans, l'aléa a pu évoluer) ainsi que la résolution bien plus faible que les études plus récentes limitent cependant l'exploitation de cette cartographie dans une problématique assurantielle.

Il existe également plusieurs études régionales en France (Sud-Ouest) s'intéressant à l'analyse fine des chutes de grêle à l'aide des réseaux grêlimétriques (Berthet et al., 2013, 2011; Dessens, 1986; Dessens et al., 2001; Andrés Merino et al., 2014). Bien qu'apportant de précieuses informations sur les caractéristiques de la grêle dans un secteur géographique fortement touché par la grêle, ces études sont insuffisantes pour être exploitées par une société d'assurance avec un portefeuille sur l'ensemble du territoire français, comme peut l'être Generali France. Ces études constituent cependant une base robuste pour qualifier la grêle localement.

2.4.3 Un exemple européen dans l'étude de la grêle : la Suisse

La Suisse est un des pays européen le plus en avance concernant la caractérisation nationale de l'aléa grêle. La cartographie de l'aléa grêle, ainsi que les données climatologiques de la grêle, font suite du projet « National Hail Climatology Switzerland » [37] réalisé par l'organisme météorologique nationale suisse (Meteo-Swiss)[38]. Ce projet étudie les chutes de grêle en Suisse entre 2002 et 2023. Les chutes de grêle ont été estimées à l'aide des 5 radars météorologiques suisse, et a l'avantage d'être en Open Access : les données sont donc facilement utilisables et exploitables, et permettent une analyse fine

[37] National Hail Climatology Switzerland, Meteo-Swiss
[38] https://www.meteosuisse.admin.ch/

des chutes de grêle, avec par exemple des cartographies de la climatologie mensuelle ou annuelle par taille de grêlons, des cartographies de la période de retour des grêlons… servant de base à des études nationales de la grêle en Suisse (Wilhelm et al., 2024). On peut voir un exemple des données exploitables sur la Figure 36. Plusieurs études

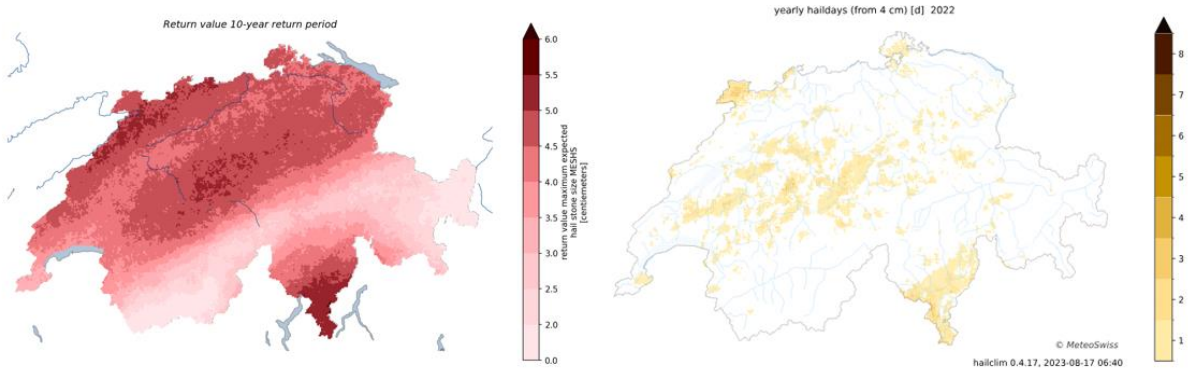


Figure 36 Exemple des données grêle disponibles sur le site Meteo-Suisse. A gauche, diamètre des grêlons associé à une période de retour de 10 ans. A droite, nombre de journée grêle avec grêlon d'au moins 4 cm sur l'année 2022, ©Meteo-Suisse.

2.5 Une anticipation très limitée des évènements grêligènes en France

Il n'existe pas aujourd'hui de prévision efficace des chutes de grêle en France, et ce, quel que soit l'horizon temporel étudié. La grêle est ainsi souvent considérée uniquement comme une sous-composante du risque orageux, et est donc rarement étudiée à part entière. Météo France par exemple émet uniquement des bulletins d'alertes associés aux risques orageux à la maille départementale (Calmet, 2018). On peut voir un exemple de bulletin d'alertes sur la Figure 37.

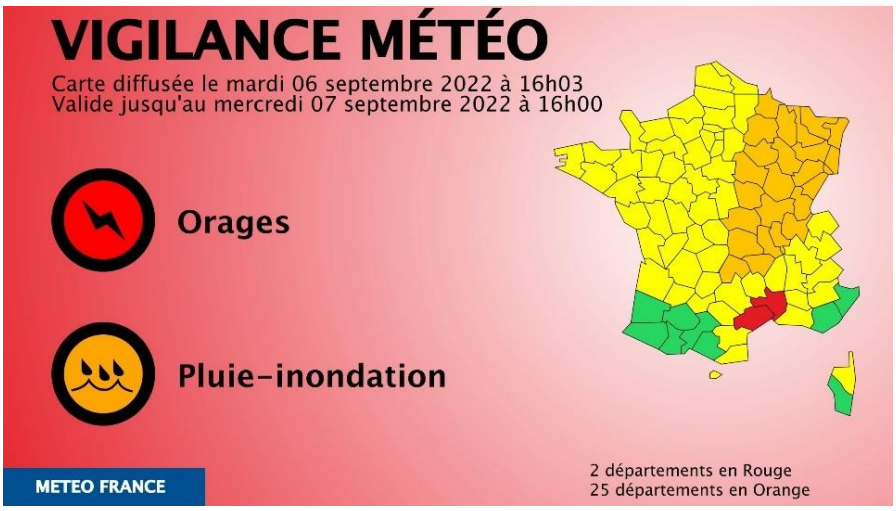


Figure 37 Vigilance météo diffusée le 6 septembre 2022 au regard des prévisions du mercredi 7 septembre 2022, ©Météo France. De nombreuses chutes de grêle de plus de 5 cm ont été recensées dans le Centre-Est de la France

Keraunos, est le seul organisme en France qui émet des cartes de prévision de l'intensité des évènements orageux et grêligènes en France (échelle infra-départementale). La Figure 38 montre un exemple de prévision des orages sur la page d'accueil du site Keraunos le 6 septembre 2022 sur la journée du 7 septembre 2022.

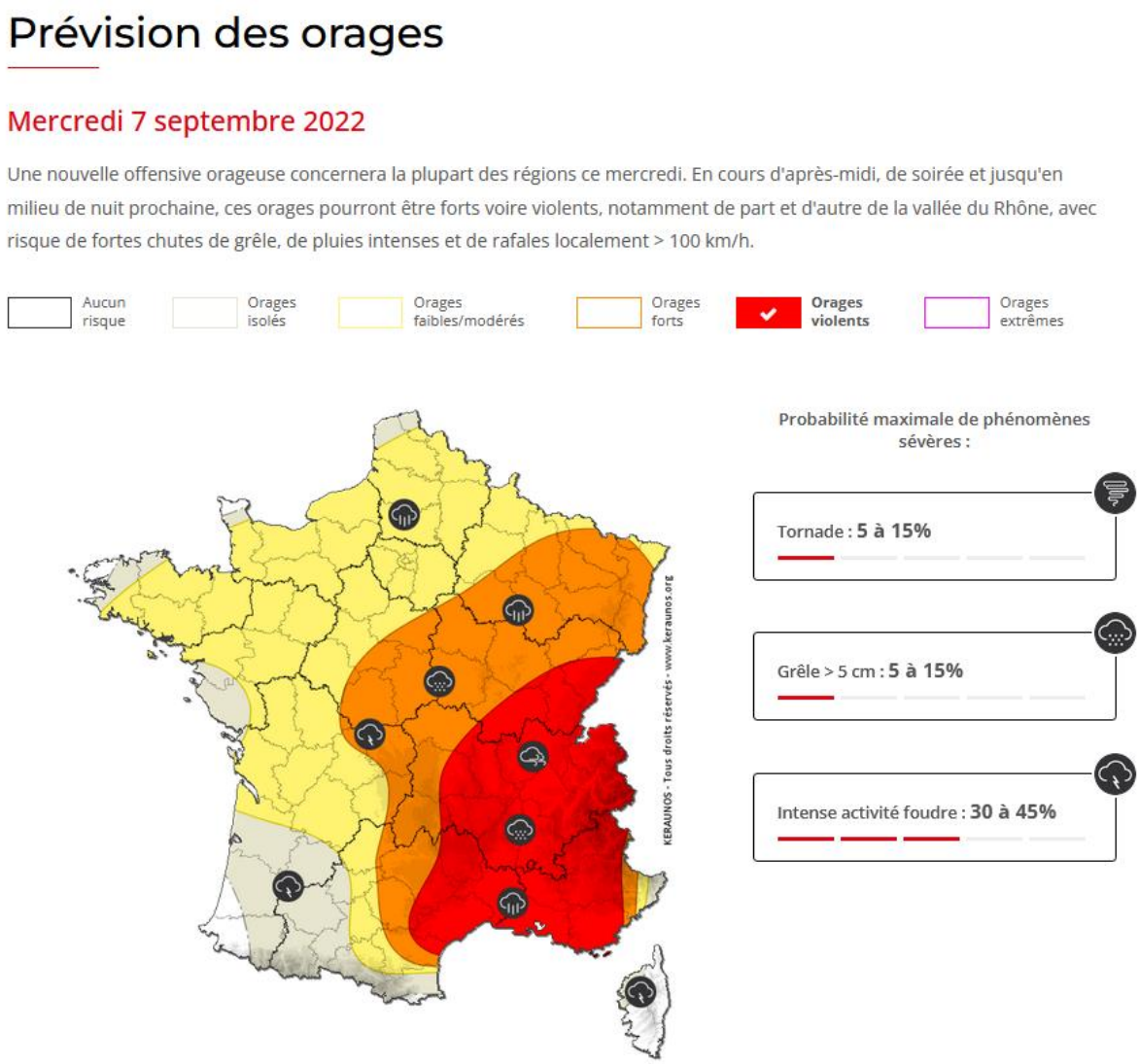


Figure 38 Capture d'écran de la prévision des orages sur la journée du 7 septembre 2022, © Keraunos.

Keraunos émet ainsi quotidiennement ces cartographies à horizon 1 jour sur le site internet. Dans le cadre d'un abonnement payant, comme nous avons pu avoir chez Generali, Keraunos fournit des prévisions de chutes de grêle ainsi que la gamme de diamètre attendu (1-2 cm, 2-4 cm, 4+ cm) à horizon 1, 2 et 3 jours.

Les organismes de lutte anti-grêle incorporent également un dispositif de détection des cellules orageuses potentiellement grêligènes à partir de l'analyse des échos radars, comme le logiciel Skydetect de la société Solerys. Ce dispositif de détection se place dans l'optique d'agir rapidement en amont d'une cellule orageuse afin de réduire, voire de supprimer son potentiel grêligène. Nous reviendrons plus dans le détail sur les méthodes de réduction et de suppression de la grêle dans la sous-partie 5.4 du chapitre 4.

2.6 Conclusion du chapitre 2

La complexité de l'appréhension de la grêle au regard des autres aléas climatiques s'explique principalement par la mesure limitée des chutes de grêle, induite par la caractéristique très locale et éphémère d'une chute de grêle.

La mesure de la grêle n'est véritablement fiable qu'à partir d'un réseau grêlimétrique. Encore faut-il que ce réseau soit homogène sur le territoire. En France, ce réseau couvre partiellement ou totalement une vingtaine de départements français, notamment les départements agricoles, ce qui ne constitue pas un apport intéressant pour le portefeuille de Generali France. Il ne couvre pas en particulier les zones à fort enjeu pour le dommage aux biens (côte d'Azur, région lyonnaise, région parisienne) ; la couverture du réseau grêlimétrique français devrait donc être étendue et densifier sur l'ensemble du territoire. Cette solution n'est cependant pas possible au regard du nombre de grêlimètre qu'il faudrait disposer (et traiter) pour couvrir la mesure de la grêle en France.

L'essor des réseaux sociaux depuis les années 2000 a permis la démultiplication d'observations de chutes de grêle en France et dans le monde. Ces observations se font par l'intermédiaire de professionnels et des particuliers, qui caractérisent les chutes de grêle à l'aide de photographie ou « d'équivalent taille - objet » (i.e. balle de tennis, balle de golf, œuf…), permettant ainsi d'estimer la taille des grêlons. Ces données permettent ainsi de « mesurer » directement les chutes de grêle, à l'aide d'un « réseau social », où chaque adhérent prend le rôle d'un détecteur/grêlimètre.

Le développement des satellites météorologiques a permis une nouvelle mesure de la grêle à l'aide de proxy météorologique (activité électrique, échos radars, MUCAPE, température au sommet du nuage…), mesuré par satellite ou radar, pour estimer une chute de grêle. Cette méthode, souvent couplé avec de l'intelligence artificielle pour pondérer l'influence des paramètres sur la survenance potentielle d'une chute de grêle, a ainsi l'avantage de couvrir homogènement un très grand territoire sans nécessiter un grand nombre d'appareils comme c'est le cas pour les grêlimètres. L'utilisation de proxy de chutes de grêle nécessite cependant une connaissance précise de la formation des chutes de grêle, afin d'avoir une estimation la plus fiable possible. Ces données sont cependant limitées pour estimer l'aléa grêle, puisqu'elles ne permettent seulement de mesurer la fréquence des chutes de grêle actuellement ; l'intensité des chutes de grêle n'est pas représentée dans les modèles actuels.

L'approche privilégiée pour cette thèse intègre des données nouvelles, inutilisées (puisqu'inexistantes) en 1998 par Vinet qui couvrent l'ensemble du territoire hexagonal notamment les données Keraunos. Elles sont essentiellement occurrentielles (observation de grêle ou non) et ajoutent souvent le diamètre maximum observé ce qui donne une approximation de l'intensité de la chute de grêle.

Au regard des conséquences économiques des chutes de grêle sur la société, les pays européens devraient prendre exemple sur la Suisse dans la gestion du risque grêle sur leur territoire ; en rendant l'ensemble de ses données sur les chutes de grêle publiques, la Suisse permet une meilleure appréhension du risque grêle sur son territoire pour l'ensemble des acteurs publiques et privés.

Chapitre 3 : La grêle dans le système assurantiel français

En France, les risques climatiques sont couverts par un contrat d'assurance dommages. Il déclenche une indemnisation auprès des clients lorsque les dommages sont supérieurs à un seuil appelé « franchise » dans le cadre prévu par le contrat d'assurance.

La grêle représente l'une des principales menaces pour les cultures agricoles en France. Chaque année, des milliers d'hectares de terres cultivées sont touchés, entraînant des pertes financières considérables pour les agriculteurs et les assureurs. Dans le système assurantiel français, la couverture des dommages provoqués par la grêle revêt une importance capitale, offrant une protection essentielle aux exploitants agricoles et assurant la stabilité économique des zones rurales. En outre, l'impact de la grêle ne se limite pas seulement aux récoltes agricoles. Les véhicules automobiles et les bâtiments sont également vulnérables à ses effets destructeurs. Ainsi, l'assurance contre la grêle joue un rôle crucial non seulement dans le secteur agricole, mais aussi dans celui de l'assurance automobile et de l'assurance habitation. La gestion efficace de ce risque météorologique complexe nécessite une coordination entre différents acteurs du secteur de l'assurance, ainsi qu'une compréhension approfondie des modèles de risque et des stratégies de couverture.

Les dommages provoqués par une chute de grêle dépendent à la fois de la nature du bien assuré et des facteurs d'intensité d'une chute de grêle. En effet, une chute de grêle avec de nombreux grêlons de petites tailles peut détruire une culture mais ne faire aucun dommage sur automobile. A l'inverse, quelques grêlons de 5 cm par unité de surface suffisent pour endommager lourdement une automobile ou une toiture sans que ce soit le cas pour une culture. Ce point sera développé en détail plus tard lors de la section 5.1 du chapitre 5.

3.1 Des aléas naturels qui inquiètent le marché français, en particulier la grêle

Les dégâts associés aux aléas climatiques coûtent chaque année plusieurs milliards d'euros en France. Les dégâts matériels induis lors de la survenance d'un aléa climatique sont donc difficilement assumables par les individus eux-mêmes. C'est pourquoi la protection par un contrat d'assurance est très développé en France. L'assurance garantie ainsi la résilience des individus et de la société face à des aléas, en particulier climatiques, en contrepartie d'une cotisation et d'une franchise déterminée au préalable. Pour que le dispositif assurantiel ne soit pas mis en péril, il faut donc que le risque soit mutualisé sur un grand territoire, et que les risques intégrés à la mutualité soient homogènes, dispersés et divisés : un seul sinistre ne peut menacer la mutualité.

Les aléas climatiques en France sont couverts par deux régimes distincts (hors récolte). Le régime des Catastrophes Naturelles (CatNat) prend en charge les dommages matériels non assurables comme les inondations (inondations et coulées de boue, remontée de nappe, submersion marine), la sécheresse, les mouvements de terrain, cyclones, ouragans, séismes, avalanches, tsunamis et le volcanisme. L'indemnisation dans le cadre de ce régime intervient uniquement quand un client a été sinistré dans une commune possédant un arrêté catastrophe naturelle de même nature et couvrant la même date que celui induisant le sinistre. Le régime TGN couvre ce qu'on appelle les dommages matériels des aléas tempête, grêle et neige. L'indemnisation dans ce régime se fait directement par les assureurs et ne nécessite pas d'arrêté catastrophe naturelle, et il est librement tarifable, à la différence du régime CatNat ; le régime CatNat possède en effet une surprime obligatoire[39].

[39] https://catastrophes-naturelles.ccr.fr/garantie-cat-nat

3.1.1 Un marché de plus en plus sinistré

Les assureurs sont le premier filet de sécurité pour faire face aux conséquences des aléas climatiques. Ils sont au contact direct de la population, particuliers comme professionnels, et permettent d'absorber les conséquences économiques d'un évènement climatique comme une chute de grêle. Un assureur protège sa solvabilité économique et son résultat opérationnel en partageant le risque de son portefeuille auprès de sociétés de réassurance (assureur des assureurs). Une société d'assurance peut elle-même protéger son résultat opérationnelle et sa solvabilité en faisant appel à un réassureur. Ce dernier prend en charge une partie du risque de la société d'assurance moyennant une partie des primes qu'elle perçoit, mitigeant ainsi les conséquences économiques lors de la survenance d'évènements majeurs ou récurrents. Cette protection se fait ainsi par l'intermédiaire de contrats de réassurances fixant le cadre d'intervention du réassureur auprès de la société d'assurance, à l'aide de contrats « stop loss » (réassurance en excédent de pertes annuelles) ou contrats « quote part » (réassurance proportionnelle) par exemple.

Les aléas climatiques pèsent de plus en plus sur le bilan économique des sociétés d'assurance en France. Elles enregistrent en effet une croissance marquée des pertes associées aux aléas climatiques, se retrouvant à la fois dans le régime TGN et CatNat. On constate ainsi des pertes moyennes annuelles plus importantes de 40% - 3,6 Md€ / an - entre 2011 et 2021 au regard de la période 1990-2009 (hors Lothar et Martin), visible sur la Figure 39. De même, les pertes climatiques moyennes annuelles de la période 1990-2009 sont plus importantes de près de 70% que celles de 1984-1989.

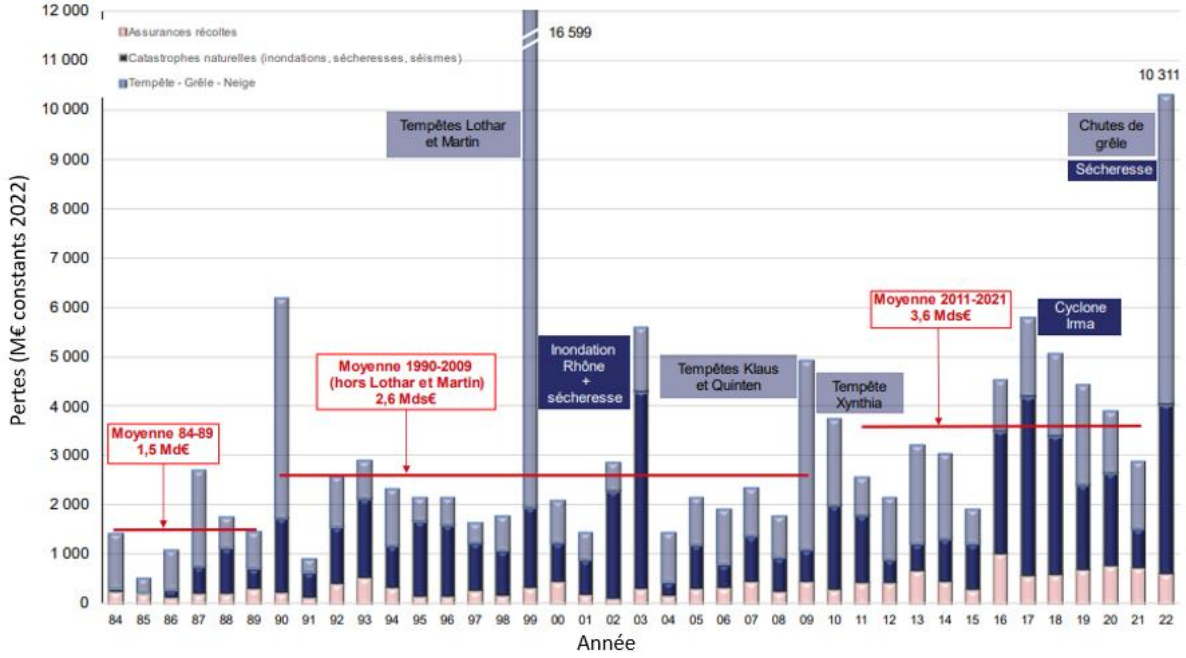


Figure 39 Historique de la charge des sinistres des événements naturels en France selon France Assureur, ©France Assureur.

Cette explosion de la sinistralité climatique n'est pas que française, et elle se retrouve également sur les autres marchés de l'assurance dans le monde [40,41,42], entrainant un durcissement des conditions de réassurances : capacités et couverture en baisse, couplés à une augmentation des cotisations[43].

3.1.2 La montée en puissance de la grêle en France

Cette croissance de la sinistralité climatique s'explique également par une multiplication d'évènements majeur depuis les années 2000 ; 15/24 des évènements climatiques les plus couteux se sont produits après 2009 selon France Assureur (Figure 40). En effet, si on s'intéresse aux 23 évènements climatiques les plus couteux s'étant produits en France (hexagone et Outre-Mer), seulement 7 se sont produits avant 2005, soit 30% des évènements étudiés. Le nombre d'évènements majeurs augmente, en nombre et en coût, depuis les années 2000 quel que soit la nature de l'aléa climatique étudié. La sécheresse, suivie par les chutes de grêle, connaissent la plus forte croissance en nombre et en coût. Les chutes de grêle font leur apparition dans les évènements majeurs du territoire seulement à partir de 2013, avec 3 évènements majeurs : 2013, 2014 et 2022. La récurrence sur la période récente de ces évènements qualifiés « d'exceptionnels » pose la question du devenir de cette qualification à l'avenir. Avec l'influence du réchauffement climatique , une chute de grêle exceptionnelle aujourd'hui sera peut-être la norme demain. Les évènements grêle de l'été 2013 et du 8-10 juin 2014 qui ont coûté chacun 850 M€ (euros courants) se placent en 11ème position des évènements naturels les plus couteux pour les assurances depuis 1990. Les épisodes de grêle de l'été 2022 avec la succession de 3 vagues, chacune exceptionnelle prise individuellement, explosent tous les records et cumulent ensemble 6 Md€ de dommages indemnisés pour atteindre la deuxième position sur les évènements naturels les plus couteux pour les assurances depuis 1990. Pour comparaison, cet évènement grêle représente la moyenne annuelle de l'ensemble de la sinistralité climatique entre 2011 et 2021. L'ensemble des chutes de grêle de 2022 a provoqué des dégâts avoisinant les 6 Md€[44].

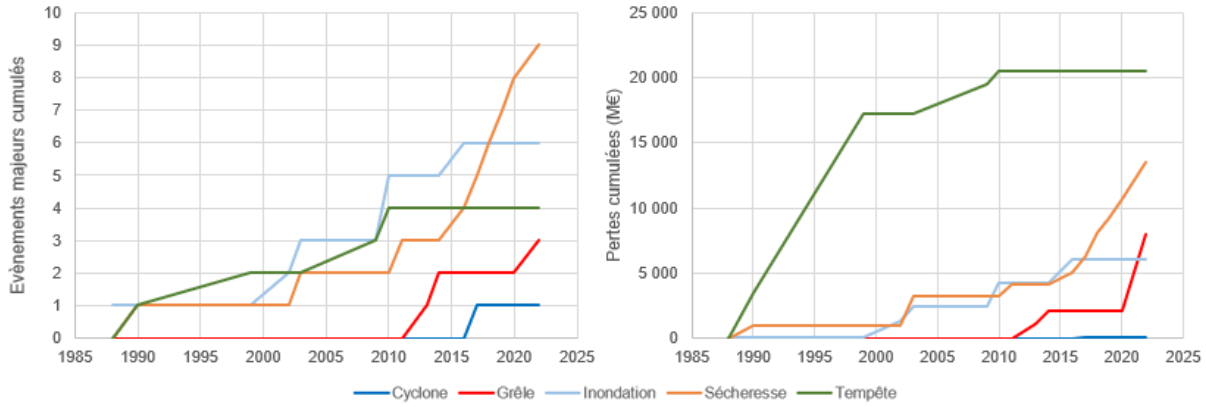


Figure 40 Evolutions des principaux évènements climatiques majeurs entre 1988 et 2022 selon France Assureurs. A gauche le nombre d'évènements cumulés, à droite les pertes cumulées exprimés en euros constants 2022 revalorisés par l'indice FFB à fin 2022, ©M. Trevisani.

[40] Transcending Traditional Primary and Secondary Peril Classification in Reinsurance Catastrophe Risk Management: An Italian case study, Gallagher Re, 2023
[41] Climate change and La Niña driving losses: the natural disaster figures for 2022, Munich Re, 2023
[42] New record of 142 natural catastrophes accumulates to USD 108 billion insured losses in 2023, finds Swiss Re Institute, Swiss Re, 2024
[43] We assume the hard market is going to continue, says Munich Re's Wenning, Reinsurance News, 2024
[44] L'assurance des évènements naturels en 2022, France Assureur, oct 2023

France Assureurs met également en lumière une hausse marquée de la sinistralité grêle sur le dommage aux biens (DAB). Ce phénomène est notamment provoqué par une hausse de la fréquence annuelle de sinistre grêle, c'est-à-dire du taux de contrats impactés, avec une hausse annuelle moyenne de +0,1 point (‰) par an, entraînant de ce fait un sinistre grêle près de 3 fois plus fréquent en moyenne sur la période 2007-2022 que sur celle de 1990-2006 (Figure 41).

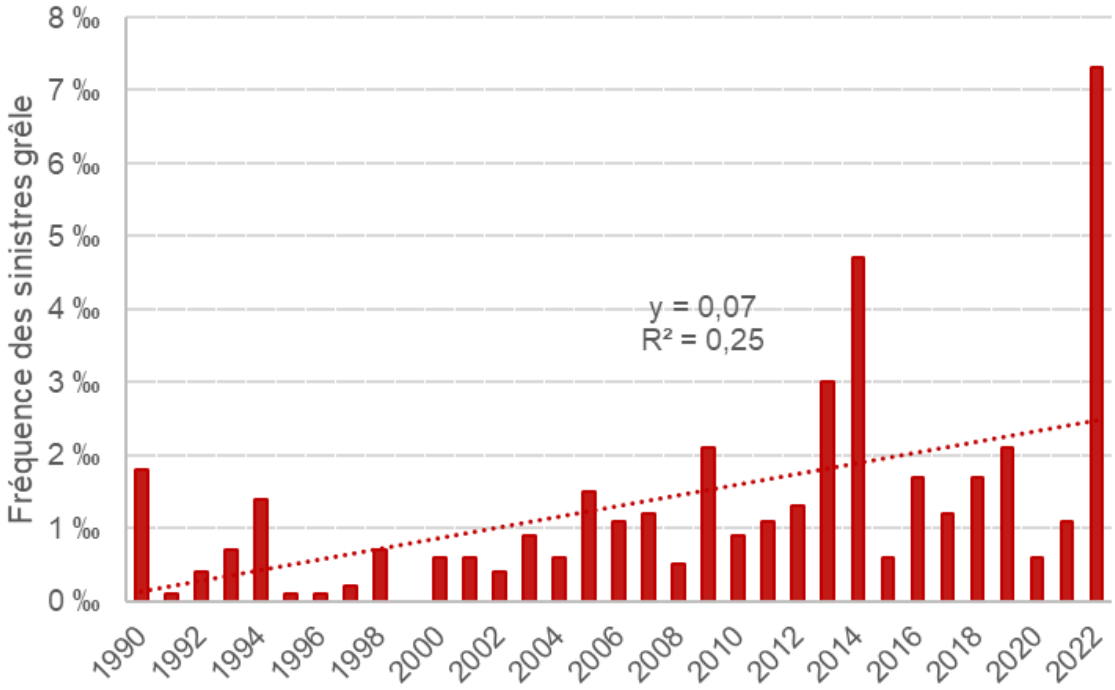


Figure 41 Evolution de la fréquence des sinistres (taux de contrats ayant bénéficiés d'une indemnisation au titre d'un sinistre grêle au sein de la garantie TGN du marché entre 1990 et 2022), source : France assureurs. 1999 non renseignée, ©M. Trevisani.

On remarque bien le caractère exceptionnel de l'année 2022 sur la Figure 41, avec une fréquence de sinistres dépassant les 7‰, contre 4,7‰ pour le précédent record de 2014.

Malgré cette augmentation croissante du nombre de sinistres grêle, il n'existe pas tendance marquée concernant l'évolution du coût d'un sinistre grêle, visible sur la Figure 42. Seulement l'année 2022 se distingue par un sinistre moyen bien plus coûteux que les autres années, avec un sinistre moyen atteignant 8 830€, contre 5 131€ pour le précédent record de 2018 (€ courant 2022). On remarque cependant une légère augmentation du sinistre moyen si on compare la période 1990-2006 avec celle de 2007-2022, avec une hausse de l'ordre de +13%. Cette hausse reste cependant principalement associée à 2022, puisqu'elle avoisine les 4% si on considère uniquement 2007-2021. On peut donc considérer que le coût moyen d'un sinistre grêle reste constant d'une année à l'autre.

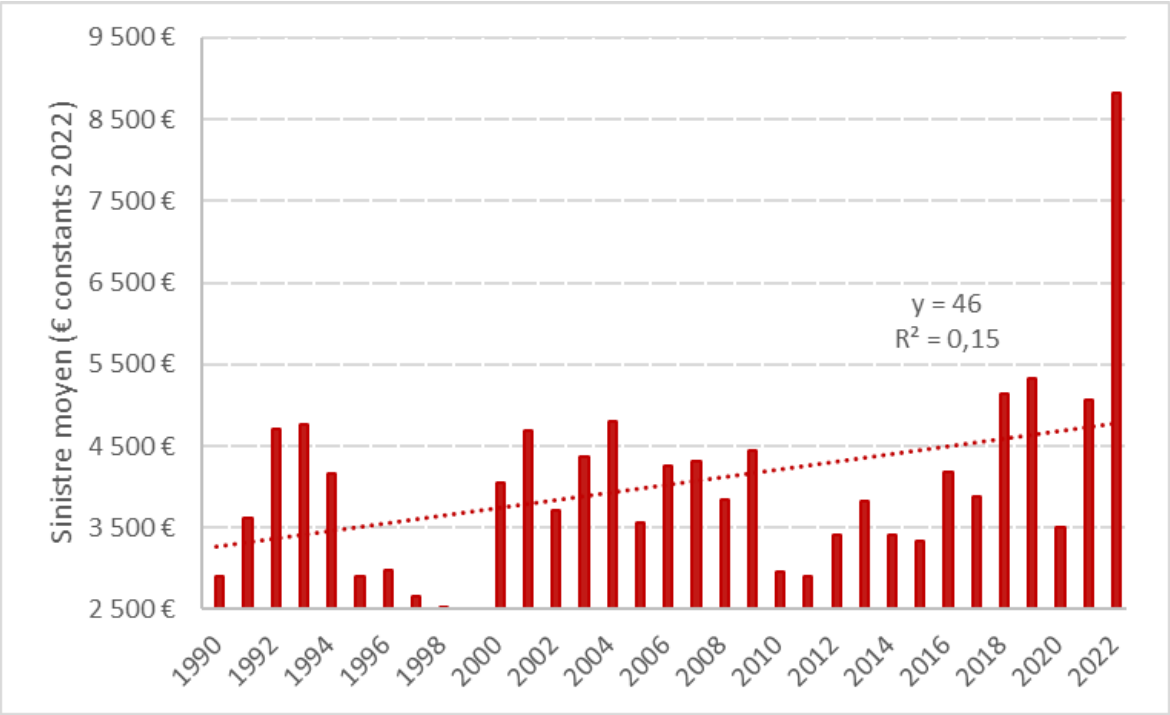


Figure 42 Evolution de la sinistralité grêle moyenne entre 1990 et 2022 de la garantie TGN du marché assurantiel français, exprimée en € constants 2022. La sinistralité moyenne de 1999 n'est pas renseignée, ©M. Trevisani.

Les difficultés autour de la mesure et de la prévision des chutes de grêle (cf chapitre 2) impactent donc directement les assureurs, en limitant leur appréhension du risque et en biaisant leurs analyses, modèles, outils. La succession d'évènements grêle exceptionnelles sur les 10 dernières années mettent également en évidence l'apparition d'un « New Normal » des chutes de grêle, menaçant la viabilité à long terme du système assurantiel français et européen selon Swiss Re[45]. Tamara Soyka, qui dirige le segment des catastrophes naturelles pour le réassureur Swiss Re en Europe, au Moyen-Orient et en Afrique estime que l'évaluation du risque d'assurance et la tarification de la grêle doivent être ajustées pour tenir compte de ce « New Normal ». En effet, un épisode grêligène majeur induisant des dommages de l'ordre de 600-700 M€ (comme la tempête Ela de 2014, évènement grêle le plus coûteux en France avant 2022) était initialement supposé avoir une période de retour comprise en 20 et 50 ans. Or, les épisodes grêligènes de 2022 ont permis d'établir que le risque de grêle en Europe et en France s'étaient notablement modifiés au cours des années. Swiss Re estime ainsi que ces épisodes grêlifères majeurs voient ainsi leur période de retour considérablement réduite inférieure à 10 ans, contre plus de 20 ans auparavant[46].

[45] Severe 2022 hail damage in France sets new benchmarks, underscores shift of risk and calls for pricing adjustments, Swiss Re, Nov 2022

[46] La grêle de 2022 en France marque une nouvelle ère pour le secteur de l'assurance, L'Agefi, nov 2022

3.2 Périmètre assurantiel concerné par la grêle

3.2.1 Le Dommage aux Biens (DAB) et l'automobile couverts par le régime TGN

L'assurance Dommages aux Biens (DAB) est une branche de l'assurance destinée à couvrir les dégâts matériels du parc immobilier des particuliers, professionnels et des collectivités. Nous inclurons ainsi dans notre étude les contrats d'assurance vendus par Generali France en tant que contrat Multirisques Habitations (MRH), Multirisques Commerces (MRC), Risques et Multirisques Industriels (RI et MRI), Multirisques Agricoles (MRA), les collectivités, les Garages et Concessions (G&C). Les contrats d'assurance automobiles concernent une flotte ou un seul véhicule motorisé (moto, voiture individuelle, camion…).

Le DAB et l'automobile sont couverts contre les chutes de grêle dans le cadre du régime TGN qui regroupe les évènements tempête, grêle et neige selon la loi du 25 juin 1990.

Cette garantie TGN est obligatoire en France pour le DAB car celle-ci est inclue dans les contrats d'assurance incendie, contrat obligatoire en France, hors maison individuelle. Cette garantie couvre dont la plupart du parc immobilier français, et protège des dommages matériels issus l'action directe du vent ou du choc d'un corps renversé ou projeté par le vent (toitures endommagées, tuiles arrachées, façades abîmées), le poids de la neige ou de la glace accumulée sur les toitures et les chéneaux, l'humidité due à la pluie, la neige ou la grêle pénétrant à l'intérieur du bâtiment assuré et endommagé par un de ces phénomènes naturels, et le choc de la grêle sur les toitures. Si l'assuré est aussi protégé contre la perte d'exploitation, cette garantie s'étend aux tempêtes, ouragans ou cyclones. Comme l'Etat ne se porte pas garant pour ces périls comme il le fait avec le régime CatNat via la Caisse Centrale de Réassurance, ce risque se doit d'être réassuré sur le marché privé de la réassurance. Lorsque la vitesse du vent excède les 145 km/h en moyenne sur dix minutes ou 215 km/h en rafales, la garantie TGN ne s'applique plus lors d'un sinistre et c'est la régime CatNat qui prend le relai en cas d'une déclaration Cat Nat au journal officiel.

La garantie TGN est inclue dans un contrat d'assurance dommage pour les automobiles. Elle n'est donc pas obligatoire pour les automobiles (garantie responsabilité civile obligatoire uniquement).

3.2.2 Les assurances récoltes

Un contrat d'assurance récolte peut couvrir soit une culture, une parcelle ou bien la totalité de l'exploitation agricole. L'assurance récolte n'est pas obligatoire en France. Elle enregistre un taux de pénétration assez faible, la Caisse Centrale de Réassurance estime à environ 30% les surfaces agricoles assurées en 2019, avec une très grande hétérogénéité géographique entre le Nord et le Sud de la France : la diffusion dans le Nord est plus importante, induit par les grandes cultures étant cultivées principalement dans la moitié Nord[47].

Historiquement on différentiait les cultures assurables des non assurables au regard de certains aléas climatiques. Les cultures assurables étaient couvertes par un contrat d'assurance récolte : le contrat Grêle/Tempête (G/T) et le contrat Multirisque Climatique sur récolte (MRC). Les cultures non assurables étaient couvertes par le gouvernement dans le cadre du régime des calamités agricoles.

Face à la multiplication d'évènements climatiques induisant de lourdes pertes sur le secteur agricole, comme récemment le gel tardif du printemps 2021 (plan de soutien d'1 Md€ annoncé par le

[47] Note de synthèse sur le suivi de l'aide à l'assurance multirisque climatique pour l'exercice 2019 par CCR pour le ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation, CCR, 2019

Gouvernement[48]), le gouvernement a réformé le dispositif d'assurance récolte en France en 2022 en unifiant l'ensemble du dispositif.

3.2.2.1 Les différents contrats d'assurance récolte

Un contrat d'assurance récolte peut porter sur un groupe de culture ou sur l'ensemble de l'exploitation. Un contrat par groupe de culture concerne une partie ou l'ensemble de la surface cultivée au regard d'une nature de récolté (ex : « blé d'hiver »). Dans ce contrat une indemnisation est versée dès que la perte de production constatée à la suite d'un sinistre pour cette nature de récolte est supérieure au seuil de déclenchement. Un contrat à l'exploitation concerne plusieurs natures de récolte sur une partie ou l'ensemble de la surface cultivée. Dans ce contrat, une indemnisation est versée si la totalité des pertes sur les natures de récolte assurées constatées à la suite d'un sinistre est supérieure au seuil de déclenchement. Un contrat à l'exploitation entraîne une mutualisation du risque au sein de l'exploitation entre les différentes natures de récolte assurées ; les gains sur une nature de récolte pouvant compenser les pertes sur une autre nature de récolte. C'est pourquoi, les contrats à l'exploitation sont en général moins onéreux que les contrats par groupe de culture.

Il existe deux types de contrats d'assurance récolte : les contrats d'assurance G/T et les contrats d'assurance rMRC.

3.2.2.1.1 Un contrat d'assurance récolte « historique » et spécifique : les contrats d'assurance G/T

Le contrat d'assurance G/T est un contrat d'assurance ayant plus de 200 ans. L'objet de ce contrat est de garantir une diminution de quantité des récoltes causé par le choc mécanique des grêlons ainsi que par un vent violent. Ce contrat peut également avoir une extension de garantie non obligatoire sur le risque de gel, mais il est principalement souscrit par les agriculteurs pour se prémunir du risque grêle. Cependant, le contrat d'assurance G/T ne fait pas l'objet de subvention de l'Etat comme pour les contrats rMRC. C'est pourquoi, on observe une stagnation, voire décroissance, des contrats G/T sur le marché de l'assurance malgré le faible taux de pénétration de l'assurance récolte sur le territoire français. On peut visualiser l'évolution des cotisations agricoles du marché français sur la Figure 43.

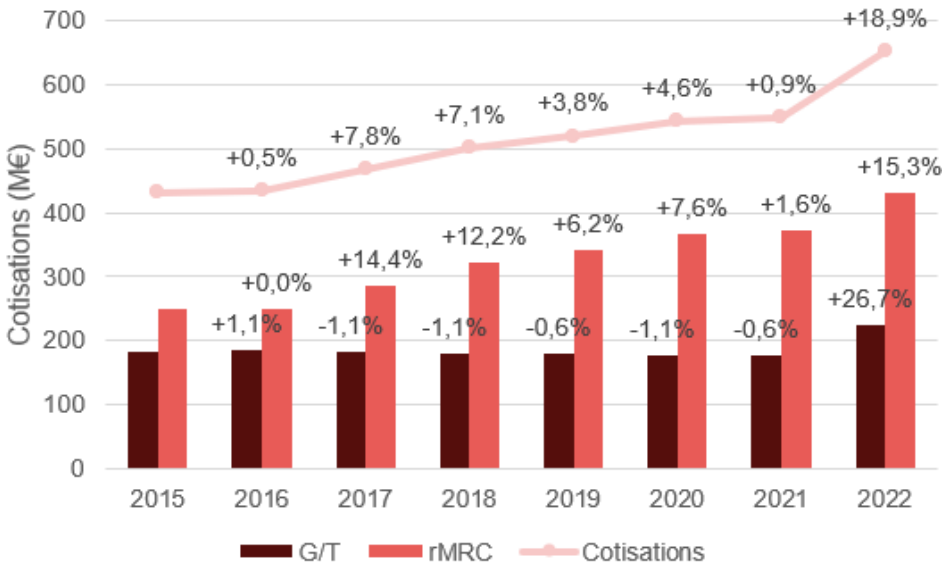


Figure 43 Evolution des cotisations du marché de l'assurance récolte en France entre 2015 et 2022 selon les données de France Assureurs, ©M. Trevisani.

[48] Projet de loi portant réforme des outils de gestion des risques climatiques en agriculture, Senat, janvier 2022

L'ancienneté de ce contrat entraîne cependant un risque globalement bien maitrisé par les assureurs. Ils enregistrent en effet des résultats corrects sur les contrats G/T, visible sur la Figure 43, avec un ratio annuel moyen du S/P égal à 54%.

3.2.2.1.2 Un nouveau contrat d'assurance récolte multirisques poussé par l'Etat : le rMRC

Le contrat d'assurances rMRC couvre l'ensemble des pertes causées par les évènements climatiques éligibles à la subvention des Fonds européen agricole pour le développement rural (FEADER). Il concerne donc la sécheresse, l'excès de température, le coup de chaleur, le coup de soleil, les températures basses, le manque de rayonnement solaire, le coup de froid, le gel, l'excès d'eau, les pluies violentes, les pluies torrentielles, l'humidité excessive, la grêle, le poids de la neige ou du givre, les vents violents, le tourbillon et le vent de sable.

Le contrat d'assurance rMRC a été initialement introduit en 2005 par le Gouvernent pour améliorer la résilience du monde agricole face aux aléas climatiques. C'est pourquoi le gouvernement subventionne ce contrat auprès des agriculteurs. En effet, le contrat d'assurance MRC est l'unique contrat d'assurance récolte subventionné par le gouvernement français par l'intermédiaire du Fond National de Gestion de Risques en Agriculture (FNGRA), avec des subventions pouvant atteindre jusqu'à 65% de la cotisation de l'exploitant.

Il a été adapté en 2016, avec une première modification fixant les caractéristiques du premier niveau du contrat, dit « niveau socle », en indiquant la part de la surface de l'exploitation à assurer, la franchise, le seuil de déclenchement et les références nationales (barème pour plafonner le capital assuré). Celui-ci est subventionné au taux maximum (jusqu'à 65%) et vise à donner les moyens à l'agriculteur de relancer un cycle de production. Une seconde modification précise ensuite les options complémentaires du second niveau, subventionnées à taux moindre (jusqu'à 45%), permettant à l'agriculteur de diminuer la franchise et d'adapter la couverture à ses risques propres (franchise, pertes qualitatives...). Pour finir, une dernière modification renseigne les options complémentaires du troisième niveau, non subventionnées, permettant à l'agriculteur d'adapter davantage encore le contrat souscrit en fonction de ses caractéristiques (franchise, seuil de déclenchement, garanties supplémentaires).

Le faible recul temporel des contrats rMRC, associé à la grande diversité de risques (cultures et aléas climatiques) entraîne des difficultés d'appréhension du risque chez les assureurs. Ce constat est particulièrement visible sur la Figure 45 avec les contrats rMRC qui enregistrent un ratio S/P annuel moyen de 126% entre 2015 et 2021, soit un ratio plus de deux fois supérieur à celui des contrats G/T.

3.2.2.2 Dispositif d'assurance récolte

3.2.2.2.1 Un ancien dispositif d'assurance récolte à bout de souffle

L'ancien dispositif de l'assurance récolte a été créé dans les années 1960. Il faisait la distinction entre les cultures assurables couvertes par les assurances et les non assurables couvertes par le régime des calamités agricoles. Les pertes de récoltes étaient considérées comme assurables lorsqu'elles concernaient les :

- Céréales, oléagineux, protéagineux, plantes industrielles ainsi que leurs semences, et les pertes de récoltes sur vignes.
- Pertes de récolte dues à la grêle et au vent sur toute culture végétale (sauf cultures fourragères).
- Pertes de récoltes sur tabac dues à la grêle, la tempête, le gel, l'inondation, la pluviosité excessive et la sécheresse.

Les pertes de récoltes assurables pouvaient être couvertes par un contrat d'assurance G/T ou bien par un contrat d'assurance MRC protégeant de la grêle, tempête, sécheresse, gel et excès d'eau. Dans tous les autres cas les pertes sur récoltes étaient considérées comme non assurables. Lorsque l'exploitant agricole possédait un contrat d'assurance incendie couvrant les principaux éléments de son exploitation, il était également couvert contre les pertes de récoltes non assurables[49] à l'aide de l'ancien régime des calamités agricoles. Ce dernier s'activait donc uniquement lorsqu'il y avait une reconnaissance de la calamité agricole par un arrêté ministériel. On retrouve le schéma simplifié présentant l'ancien dispositif d'assurance récolte sur la Figure 45.

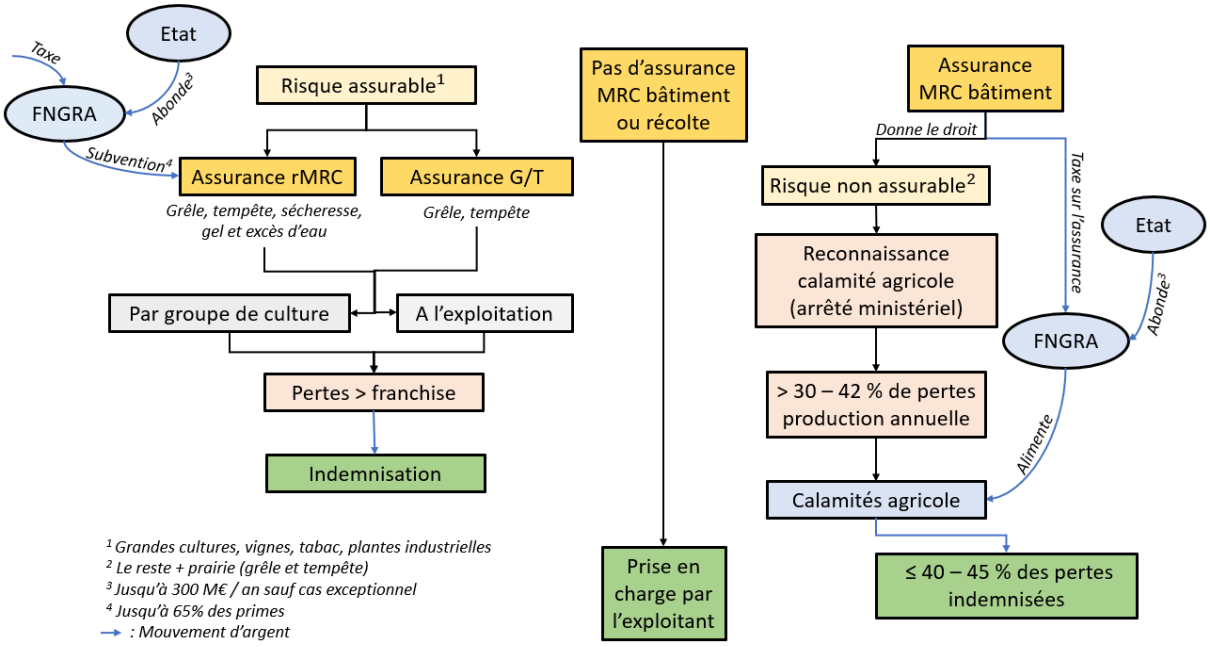


Figure 44 Fonctionnement de l'ancien dispositif de l'assurance récolte (avant 2023), ©M. Trevisani

Dans le code rural et de la pêche maritime, le gouvernement français définissait une calamité agricole comme tout « dommage résultant de risques, autres que ceux considérés comme assurables, d'importance exceptionnelle dus à des variations anormales d'intensité d'un agent naturel climatique, lorsque les moyens techniques de lutte préventive ou curative employés habituellement dans l'agriculture, compte tenu des modes de productions considérés, n'ont pu être utilisés ou se sont révélés insuffisants ou inopérants ». Ce régime était financé par le FNGRA à l'aide d'une taxe sur les contrats d'assurance incendie des exploitations agricoles. Les indemnités versées dans le cadre de ce régime ne pouvaient dépasser 300 M€ par an pour l'ensemble du territoire, sauf lors de situations exceptionnelles où l'Etat abondait le dispositif[50] comme ce fut le cas pour l'épisode de gel de 2021[51].

Cet ancien dispositif d'assurance récolte était cependant jugé à bout de souffle par l'ensemble des acteurs et le Gouvernement lui reconnait même de nombreuses limites lors d'un communiqué du 10 septembre 2021[52], comme la trop faible couverture et sa trop grande complexité. Ainsi, la présidente

[49] S''il n'existe aucun élément d'exploitation assurable contre le risque « incendie », l'agriculteur pourra être indemnisé s'il est garanti contre la grêle ou la mortalité du bétail.
[50] Tout savoir sur le régime des calamités agricoles, ministère de l'Agriculture et de la souveraineté alimentaire, mai 2021
[51] Situation des agriculteurs suite aux fortes gelées d'avril 2021, Sénat, 2021
[52] Réformer l'assurance récolte, un impératif de résilience pour les agriculteurs, ministère de l'Agriculture et de la Souveraineté Alimentaire, 10 sept 2021

de France Assureurs, Florence Lustman, reconnait la filière agricole comme la moins protégée des risques climatiques[53].

3.2.2.2.2 Une réforme attendue des différents acteurs du régime de l'assurance des récoltes applicable dès 2023

La multiplication d'évènements climatiques associés au changement climatique (récurrence des sécheresses, gel tardif, grêle, inondations…) touche de plus en plus les agriculteurs et donc les assureurs, avec parfois des évènements entraînant des pertes importantes (sécheresse de 2015, 2018 et 2019, gel tardif de 2017, 2020, 2021, grêle dans le Centre-Val-de-Loire en 2022[54], inondation de 2016 dans le Bassin parisien et dans le Pas-de-Calais en 2023…). La nature non obligatoire de l'assurance récolte induit également un biais de sélection du risque auprès des assureurs : les agriculteurs qui ont le plus tendances à s'assurer, quand ils peuvent se le permettre, sont également ceux qui sont le plus touchés par les aléas climatiques. L'ensemble de ces phénomènes entraîne donc une pression chez les assureurs qui voient leurs résultats se dégrader à cause de l'assurance récolte. On peut voir le ratio S/P (quotient des indemnités versées par les assureurs sur les primes ou cotisations versées par les agriculteurs aux assureurs, hors réassurance) de l'ensemble du secteur assurantiel entre 2016 et 2021 au regard des assurances récoltes sur la Figure 45.

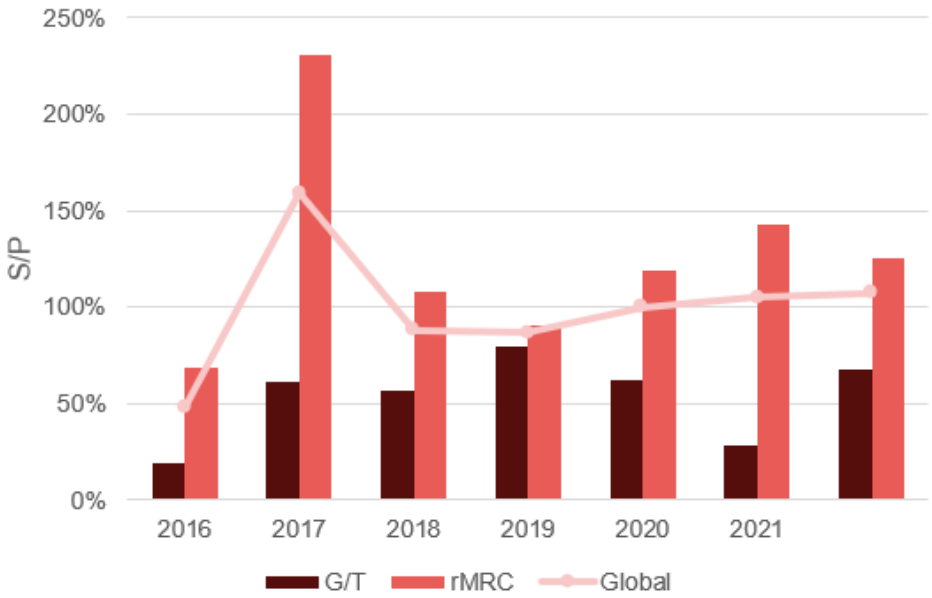


Figure 45 Evolution du ratio S/P de l'ensemble du secteur assurantiel au regard des assurances récoltes entre 2013 et 2021, données France Assureurs, ©M. Trevisani.

Les assureurs ont dû faire évoluer les politiques de souscription sous l'ancien dispositif d'assurance récolte pour pallier la pression des aléas climatiques sur le marché agricole, en introduisant :

- Une hausse des primes, comme ce fut par exemple le cas en 2022 à la suite de l'épisode de gel de 2021. Groupama (60% du marché) et Pacifica (20% des parts du marché) ont ainsi augmenté leurs cotisations de +10-15% pour Groupama (+25% pour la viticulture) et +15-25% pour Pacifica[55]. Generali, 3,6% des parts du marché, enregistre de son côté une augmentation de +17% des cotisations.

[53] Florence Lustman (présidente France Assureur), Le Journal du Dimanche, 2021
[54] Bilan épisode grêle - 19/06/2022, chambre d'agriculture Centre-Val-de-Loire
[55] Pacifica et Groupama annoncent une augmentation de l'assurance récolte de 10 à 25 % en 2022, Reussir, 2021

- Un durcissement des conditions de couvertures assurantielles, avec parfois des résiliations de contrats[56].
- De nouvelles pratiques assurantielles, avec par exemple le développement de l'assurance paramétrique météo chez Axa[57].

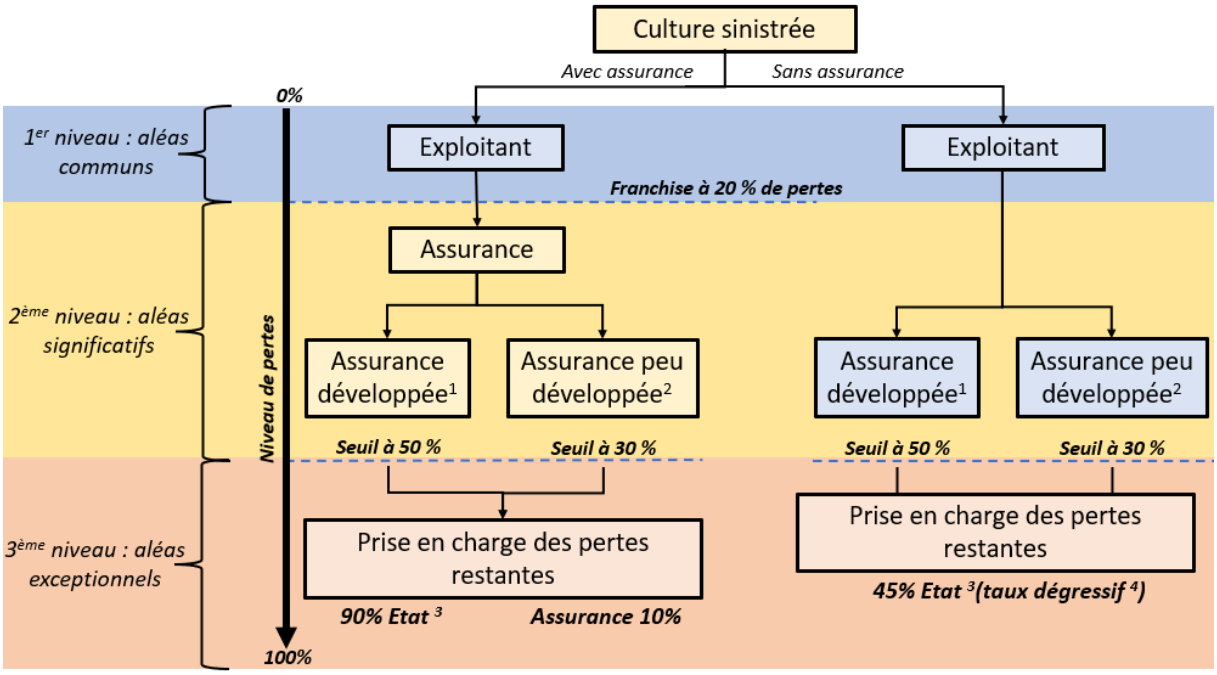
C'est à l'issue des travaux du Varenne de l'eau et du changement climatique que la loi sur la réforme des outils de gestion des risques climatiques en agriculture a été promulguée le 2 mars 2022, créant ainsi le nouveau dispositif d'assurance récolte. Outre la loi du mars 2022, cette réforme s'est matérialisée par deux ordonnances du 29 juillet et du 23 novembre 2022 complétées par des textes d'application, notamment le décret 2022-1716 du 29 décembre 2022 et rend le dispositif applicable dès la campagne 2023. Il repose sur la solidarité nationale et le partage équitable du risque entre l'État, les agriculteurs et les entreprises d'assurance, et propose une subvention renforcée sur un périmètre plus étendu pour l'assurance récolte ; un taux de subvention de 70% des cotisations avec une franchise subventionnable dès 20% en 2023, contre un taux de subvention de 45-65% des cotisations pour une franchise subventionnable de 30-25% selon le niveau de garantie avant 2023.

La réforme présente un nouveau dispositif d'assurance récolte à trois niveaux de couvertures des risques et est un dispositif universel, c'est-à-dire qu'il ne fait plus la distinction entre les risques assurables des non assurables. Le premier niveau concerne les « aléas communs » et est entièrement assumé par les agriculteurs. Ensuite les « aléas significatifs » sont pris en charge par les assurances lors qu'il y a un contrat d'assurance récolte. Pour finir, les « aléas exceptionnels » déclenchent une intervention de l'Etat via la solidarité nationale et concernent les agriculteurs assurés comme les non assurés. Le seuil de déclenchement de la solidarité nationale varie en fonction des cultures ; les cultures avec un faible taux de pénétration d'assurance récolte possède ainsi un seuil de déclenchement plus faible que pour les autres cultures. De ce fait, ce seuil est égal à 30% pour l'arboriculture, les petits fruits, les prairies et les cultures spécialisées (plantes à parfum, aromatiques et médicinales, apiculture, horticulture, héliciculture, pépinières) contre 50% pour les grandes cultures, les cultures industrielles, les légumes et la viticulture. Le plafond de solidarité nationale a également été doublé pour atteindre 600 M€ dès 2025 (560 M€ en 2023), hors situation exceptionnelle[58]. On retrouve le schéma présentant le nouveau dispositif d'assurance récolte sur la Figure 46.

[56] Vers une hausse des prix de l'assurance agricole après une année sinistrée, LesEchos, 2021

[57] Assurance agricole : Bessé et Axa Climate signent un partenariat sur le paramétrique, Argus de l'assurance, 2022

[58] Rapport d'information n°394, Assemblée Nationale, 2 novembre 2022



[1] Grande cultures, vignes, légumes
[2] Arboriculture, prairies, horticulture, plantes à parfum, aromatiques et médicinales
[3] Jusqu'à une limite annuelle de 600 M€ en 2025 (nationale), au-delà le reste à charge se partage entre les différents acteurs
[4] 45 % en 2023, 40 % en 2024 et 35 % en 2025

Figure 46 Nouveau dispositif de l'assurance récolte à 3 niveaux (après 2023). Chaque acteur intervient à partir d'un certain seuil de pertes, ©M. Trevisani.

En cas de survenue d'aléas climatiques non couverts dans le cadre d'un contrat G/T (sécheresse ou excès d'eau par exemple), les cultures concernées pourront obtenir une indemnisation au titre de la solidarité nationale en cas d'aléas exceptionnels. Toutefois, elles ne seront pas indemnisées de la même manière que si elles étaient assurées par un contrat d'assurance multirisque climatique sur récoltes : n'étant pas assurées contre ces types d'aléas, elles seront indemnisées, comme pour les cultures non assurées (à hauteur de 45% en 2023 par l'Etat)[59].

Cette réforme a également objectif de progressivement mettre en place un guichet unique et introduit également un pool de co-réassurance des risques climatiques sur récolte. Le guichet unique a pour objectif de simplifier les démarches des exploitants assurés et pose les compagnies d'assurances comme interlocuteur agréé. Elles versent les indemnités d'assurance récolte ainsi que l'indemnité de solidarité nationale pour le compte de l'État au regard des cultures assurées de 2023. Progressivement, les entreprises d'assurance seront également les interlocuteurs agréés pour les cultures non assurées. Le pool de co-réassurance concerne les entreprises d'assurance commercialisant l'assurance récolte subventionnée. Il a pour objectif de permettre aux entreprises une mise en commun des données agricoles et une mutualisation des risques pour établir une prime d'assurance la plus juste possible tout en maintenant une concurrence sur les tarifs entre entreprises.

3.3 La grêle chez Generali France

En 1832, un an seulement après sa création, Generali s'installe en France. Le premier mandat d'agent français est délivré le 19 avril à des entrepreneurs bordelais pour couvrir les assurances des lignes maritimes. Au fil des années, Generali France se développe par acquisitions successives jusqu'à couvrir

[59] L'assurance multirisque climatique sur récoltes, France Assureurs, 20 juin 2023

l'ensemble du territoire et multiplie ses offres afin de répondre à l'ensemble des risques auxquels peuvent être confrontés les particuliers, les professionnels et les entreprises. En 2007 Generali France fusionne l'ensemble de ses activités en une entité unique, devenant ainsi une des plus grandes sociétés d'assurance en France avec 5,6% des parts du marché en 2022[60].

La France restera longtemps la principale implantation du groupe à l'étranger, mais elle est le troisième marché du groupe de nos jours, juste derrière l'Allemagne et l'Italie, avec 15,5 Md€ de chiffres d'affaires en France en 2023 (assurance vie et assurance non-vie), soit environ 20% du chiffres d'affaires du groupe.

3.3.1 Portefeuille et exposition aux aléas climatiques

Generali France possède au moins un assuré (DAB, auto ou récolte) sur environ 97,5% des communes du territoire hexagonal en 2022, visible sur la Figure 47. Generali France est principalement implantée dans le Sud de la France, à proximité de la côte Méditerranéenne, mais on retrouve également un grand nombre de contrats à proximité des métropoles comme Paris, Marseille, Lyon ou Bordeaux.

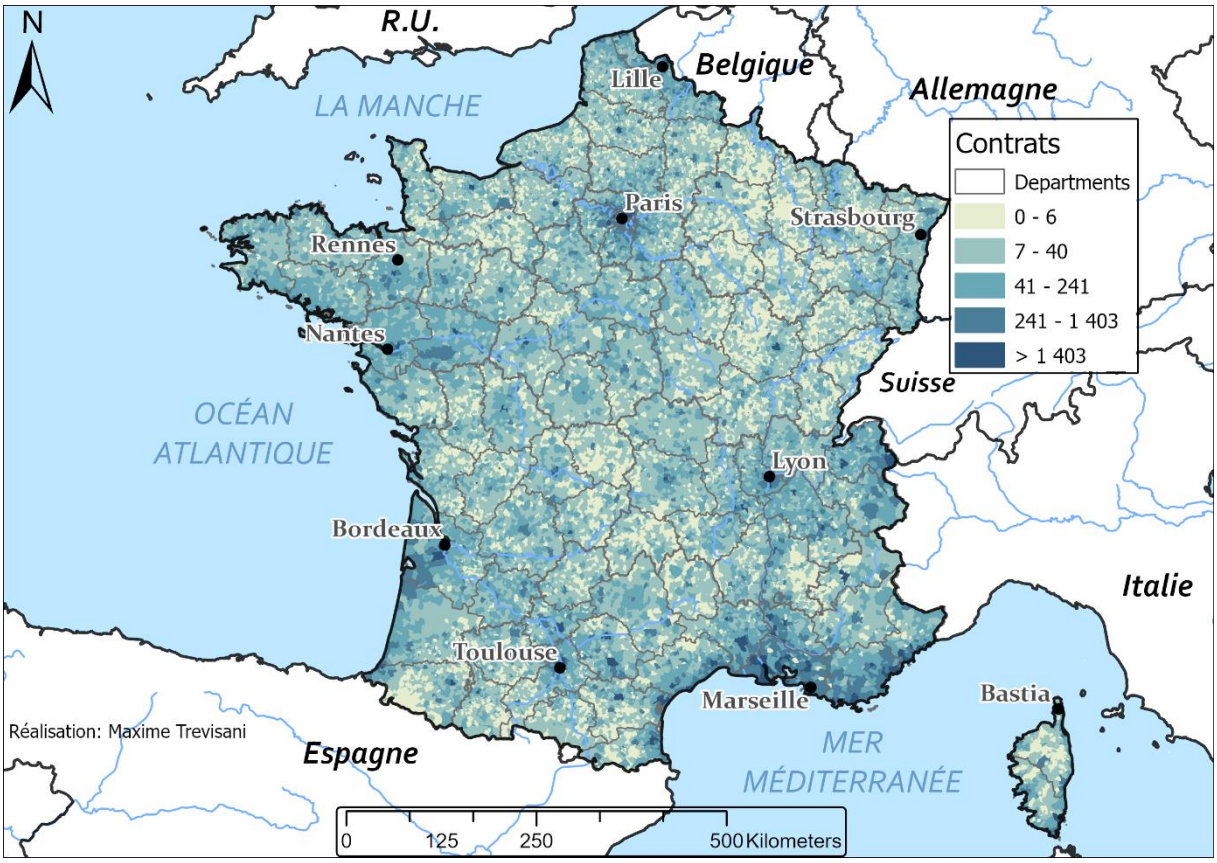


Figure 47 Nombre de contrat (DAB, Auto, récolte) Par commune chez Generali France en 2022, ©M. Trevisani.

La très grande majorité des engagements de Generali France correspondent à ceux du DAB (97% DAB, 3% automobile, < 1% récolte). L'approche de l'exposition par les sommes assurées, plutôt que le nombre de contrat, précise les zones géographiques avec une concentration d'enjeux plus importants que le reste du territoire, et donc potentiellement plus « à risque ». On retrouve sur la Figure 48 les sommes assurées par le portefeuille de Generali France (2022 pour le DAB et l'Auto, moyenne annuelle de la période 2013-2022 pour les récoltes). Au niveau national, Generali France possède en moyenne 8,3 M€ de sommes assurées par commune (médiane à 1,5 M€). On remarque ainsi que la côte

[60] Calculé en fonction du chiffre d'affaires de Generali France et du marché de l'assurance français (FA)

méditerranéenne concentre une part importante des sommes assurées (14%) alors qu'elle ne concerne moins de 3% des communes couvertes par un contrat d'assurance. De même, la Bretagne concentre une bonne partie des enjeux (10%) sur un faible territoire (6%). Logiquement, ces principales métropoles françaises (Paris, Marseille, Lyon) sont des foyers de concentration d'enjeux plus marquée que sur le reste du territoire. La région Île-de-France est la zone géographique avec la plus forte concentration d'enjeux : 2% des communes pour 14% des enjeux.

Entre ces différentes zones à forte concentration d'enjeux, plusieurs poches avec une concentration d'enjeux plus faible que sur le reste du territoire, avec par exemple la zone géographique située entre le Sud de la région lilloise et le Nord de la région lyonnaise (20% des communes pour 7% des sommes assurées) ou bien celle entre Toulouse et les Pyrénées (7% des communes pour 4% des sommes assurées).

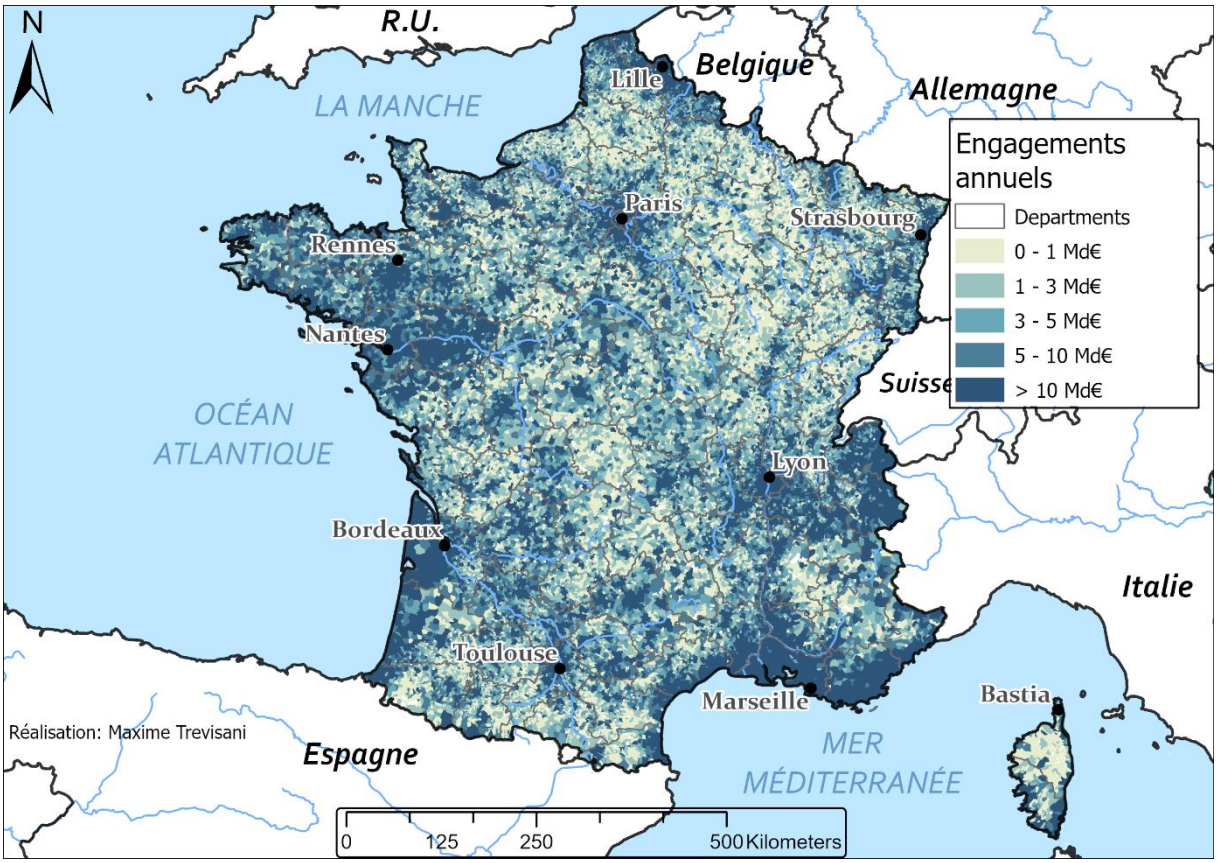


Figure 48 Engagements annuels par commune du portefeuille Generali France (DAB, Auto, récolte). Les engagements DAB et Auto correspondent à ceux de l'année 2022, et les engagements des récoltes correspondent à la moyenne annuelle de la période 2013-2022. Les sommes sont exprimées en € constants 2022, ©M. Trevisani.

La majorité des contrats de Generali France est constituée de contrats Auto et MRH, visible sur le Tableau 3 . Cependant, il existe des enjeux majeurs autour des contrats RI et MRI, bien que ces derniers soient très isolés localement. En effet, les contrats MRI concentrent la majorité des engagements du portefeuille de Generali France en 2022 alors qu'ils ne concernent 2% des bien assurés. On peut faire le même constat, dans une moindre mesure, pour le RI avec 10% des sommes engagés pour à peine 0,4% des biens assurés.

Tableau 3 Mix portefeuille des principaux produits de Generali France en 2022, ©M. Trevisani.

	MRH	RI	MRI	Auto	MRC et G&C	Total
Bien assurés	28%	0,4%	2%	63%	5%	4 M
Sommes assurées	33%	10%	41%	0,01%	7%	407 Md€

3.3.2 Positionnement de la grêle face aux autres aléas climatiques

3.3.2.1 Sinistralité climatique au sein des garanties TGN et CatNat

La sinistralité climatique cumulée représente (TGN + CatNat) environ 1,3 Md€ sur la période 2013-2023 en France hexagonale chez Generali France, soit 120 M€ / an (€ constants 2022). Elle est cependant très variable d'une année à l'autre et peut même quadrupler sur l'année suivante, comme ce fut le cas en 2022 par rapport à 2021, avec respectivement 67 M€ et 283 M€ de pertes climatiques sur ces années (Figure 49). Cette forte variabilité interannuelle implique qu'il n'existe pas de tendance significative sur l'évolution de la sinistralité climatique annuelle de Generali France sur notre périmètre d'étude. Cette différence avec le marché peut potentiellement s'expliquer par le biais associé à l'exposition de Generali France, puisque Generali France ne représente « que » 5% du marché tout en étant principalement implanté le long de la méditerranée. Historiquement, la garantie TGN est la garantie la plus sinistrée chez Generali France, avec 55% des pertes cumulées entre 2013 et 2023 en France hexagonale. Même s'il n'existe pas de de tendance observable sur l'évolution de la sinistralité des garanties TGN et CatNat de Generali France sur notre périmètre d'étude, la part des pertes associées à la garantie TGN au sein de la sinistralité climatique est en augmentation : 53% sur la période 2013-2018, contre 66% sur la période récente de 2019-2023.

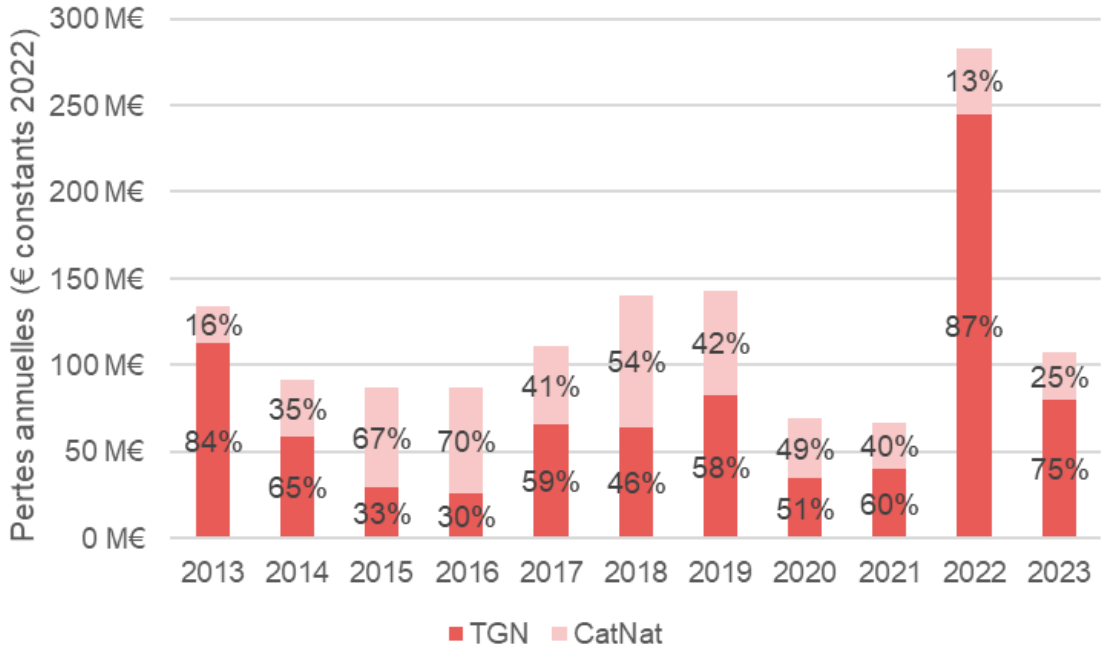


Figure 49 Pertes annuelles de Generali France en France hexagonale pour la garantie TGN et CatNat sur le DAB et l'Auto, ©M. Trevisani.

Les pertes climatiques au sein de la garantie TGN sont principalement associées aux tempêtes (47%) et à la grêle (44%) chez Generali France sur notre périmètre d'étude (Figure 50. La sinistralité associée au poids de la neige est très faible et est principalement dû à l'année 2013 (75%), année marquée par

« une des tempêtes de neige les plus marquantes de l'ère moderne » sur le Nord-Ouest de la France[61]. La différence entre la tempête et la grêle est plus marquée lorsqu'on observe le nombre de sinistres, avec respectivement 59% et 37% du nombre de sinistres, s'expliquant par de sinistres grêle plus couteux en moyenne que les sinistres tempêtes. Concernant les pertes climatiques pour la garantie CatNat, ces dernières sont principalement associées aux inondations (61%) et aux sécheresses (34%), aussi appelées « retrait-gonflement des argiles ». Les cyclones (DOM-TOM), les séismes et le mouvement de terrain ne représentent qu'une infirme portion de la sinistralité CatNat entre 2013 et 2023 chez Generali France.

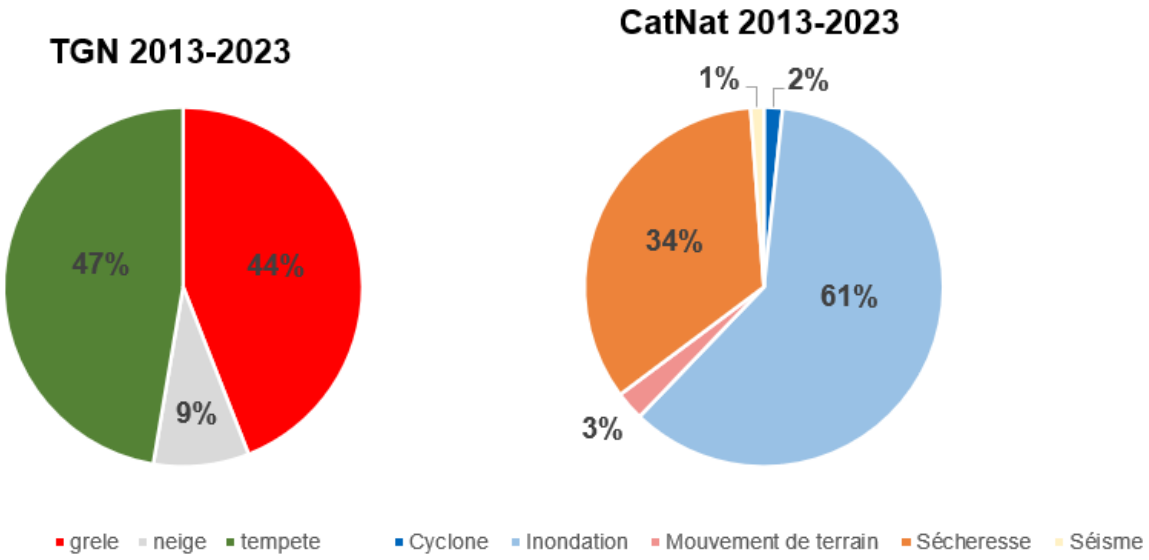


Figure 50 Répartition des pertes par aléa au sein de la garantie TGN (à gauche) et CatNat (à droite) chez Generali France entre 2013-2023, ©M. Trevisani.

3.3.2.2 Positionnement de la grêle face aux principaux périls climatiques

La grêle est donc une des principales composantes de la sinistralité TGN chez Generali France sur notre périmètre d'étude. La grêle est un aléa très variable d'une année à l'autre, pouvant épargner la France une année (2020) et la ravager quelques années après (2022). En moyenne, la grêle représente environ 40% de la sinistralité annuelle de la garantie TGN. La part de la sinistralité annuelle grêle au sein de la garantie TGN semble également augmenter au sein de Generali France sur notre périmètre d'étude, avec une augmentation de deux points chaque année (Figure 51). Cette tendance doit cependant être étudiée sur une plus grande période d'étude avant d'être confirmée au regard de la très forte variabilité interannuelle de la sinistralité grêle et du faible coefficient de corrélation (0,16).

[61] Retour sur la tempête de neige de mars 2013 sur le nord-ouest de la France, Meteo-Paris, 2021

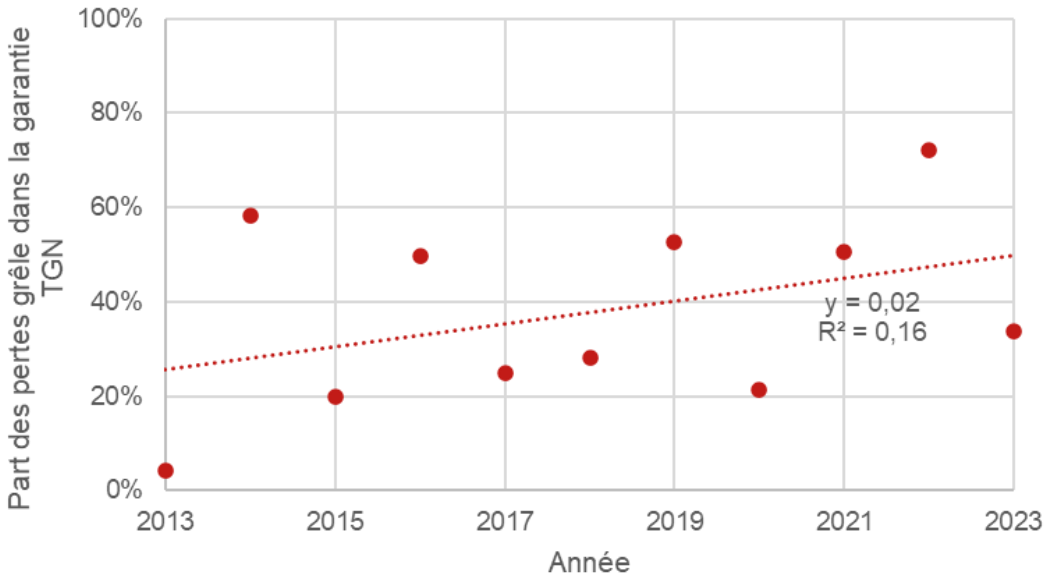


Figure 51 Evolution de la part des pertes associées à la grêle au sein de la garantie TGN chez Generali France entre 2013 et 2023, ©M. Trevisani.

La grêle est un aléa impactant de plus en plus le portefeuille de Generali France entre 2013 et 2022, visible sur la Figure 52 et la Figure 53. La grêle devient même le « premier aléa » au regard de la sinistralité climatique cumulée entre 2013 et 2022, pratiquement ex-aequo avec la tempête, avant de redescendre en deuxième position en 2023.

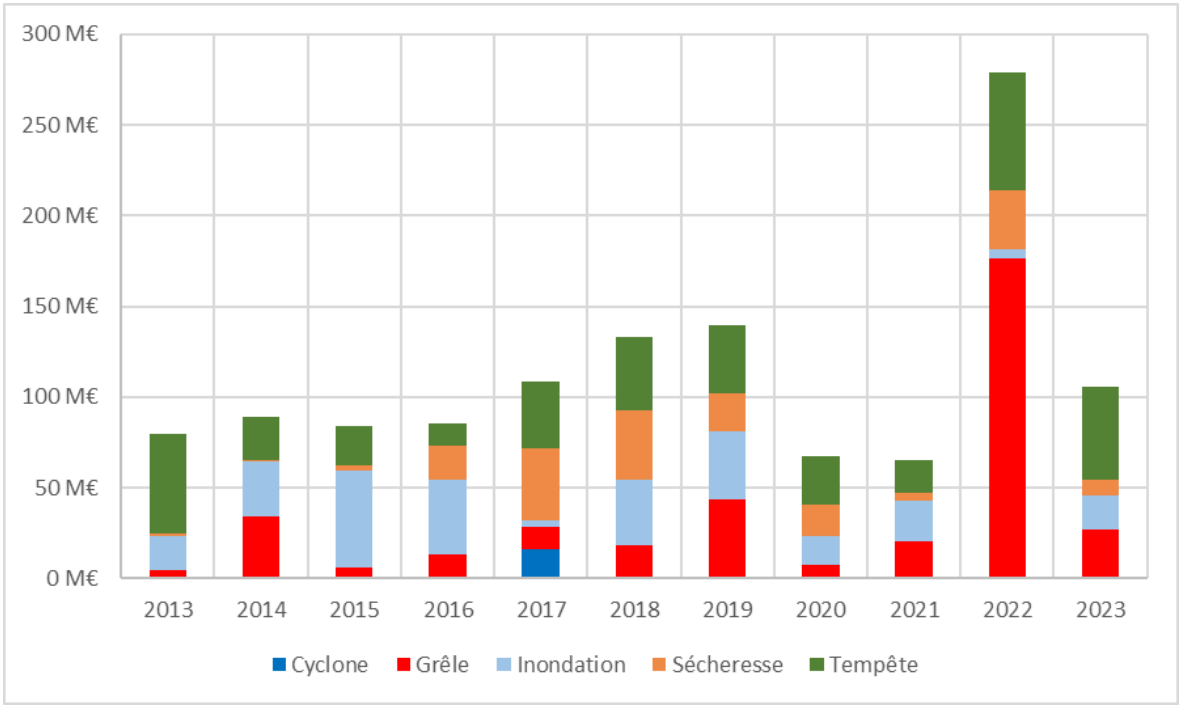


Figure 52 Evolution des pertes associées aux principaux périls climatiques chez Generali France entre 2013 et 2022, ©M. Trevisani.

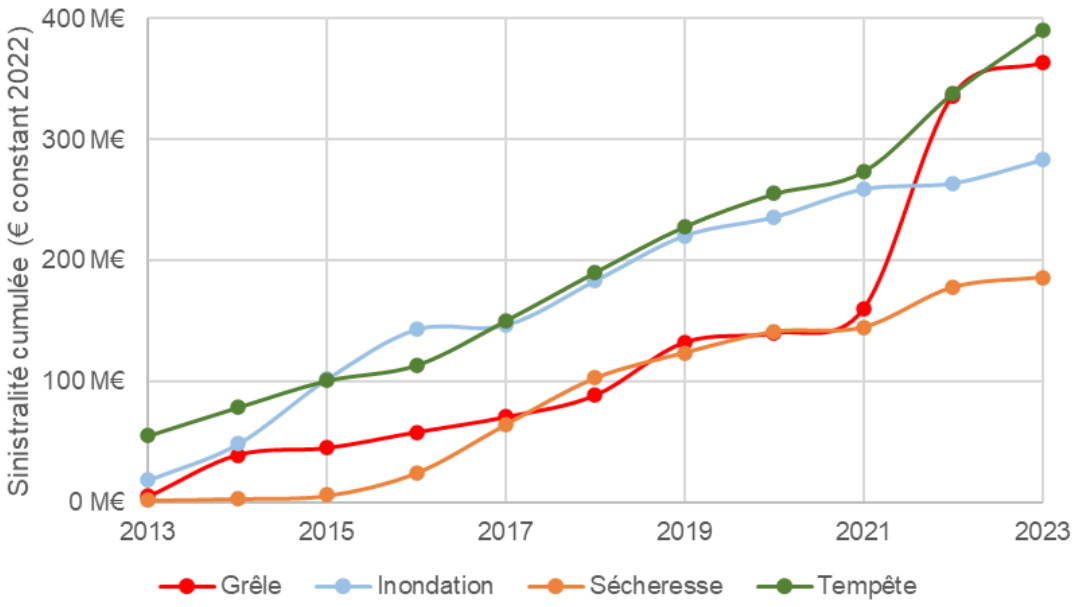


Figure 53 Evolution des pertes cumulées associées aux principaux périls climatiques chez Generali France entre 2013 et 2022, ©M. Trevisani.

Pour Generali France sur notre périmètre d'étude :

- La grêle représente en moyenne 33 M€ de dommages indemnisés par an, avec un minimum de 5 M€ et un maximum de 176 M€ (44 M€ hors 2022). On observe bien ici à la fois la variabilité interannuelle importante de la grêle, ainsi que le caractère exceptionnel de 2022 (quatre fois le précédent record annuel).
- La tempête représente en moyenne 35 M€ par an, avec un minimum de 13 M€ et un maximum de 65 M€.
- L'inondation représente en moyenne 26 M€ par an, avec un minimum de 4 M€ et un maximum de 54 M€.
- La sécheresse représente en moyenne 17 M€ par an, avec un minimum de 1 M€ et un maximum de 40 M€.

Les contrats MRC, RI et MRH sont les contrats enregistrant le plus de pertes associées à des aléas climatiques, comme on peut le voir sur la Figure 54.

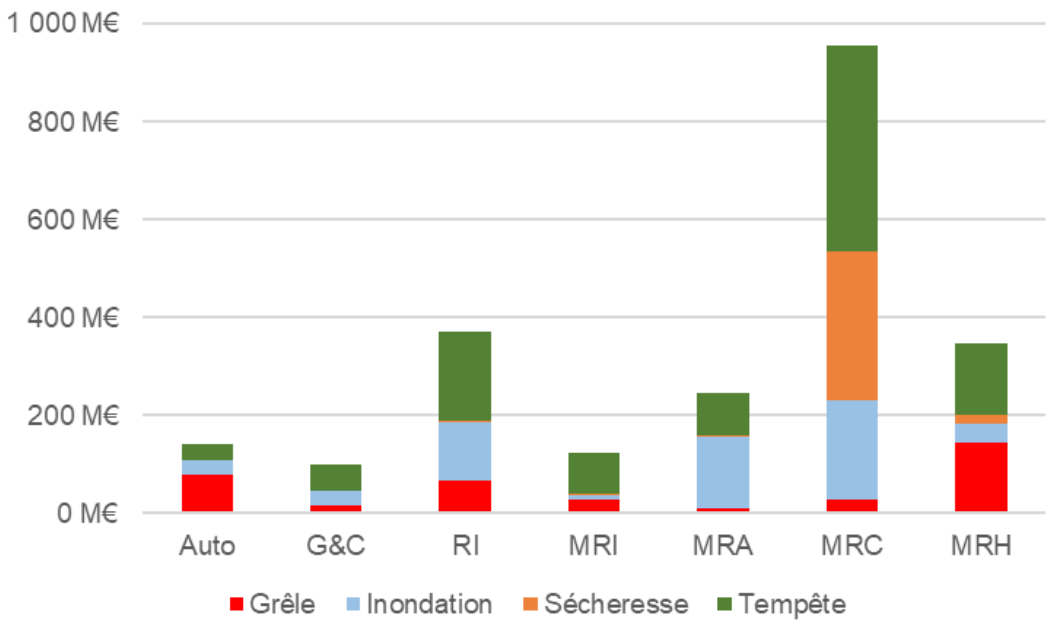


Figure 54 Sinistralité par produit des principaux périls climatiques entre 2013 et 2023 sur le portefeuille Generali France, ©M. Trevisani.

Les contrats MRC, bien que représentant moins de 5% des contrats assurés (< 7% des sommes engagées) sont les contrats les plus sinistrés par les aléas climatiques ; près de deux fois plus que le RI qui est en deuxième position. On peut faire également le même constat pour les contrats RI et MRI ; ces contrats concentrent des sommes assurées très importantes sur un petit nombre de contrats (cf Figure 55) alors qu'ils concentrent respectivement 35% et 22% des pertes climatiques. La Figure 55 illustre la problématique autour des contrats RI (3ème position des pertes 2013-2022) : 1% des sinistres représentes un cinquième des pertes cumulées de la période. Il existe donc un réel enjeu autour de la caractérisation la plus précise du risque pour ce produit assurantiel.

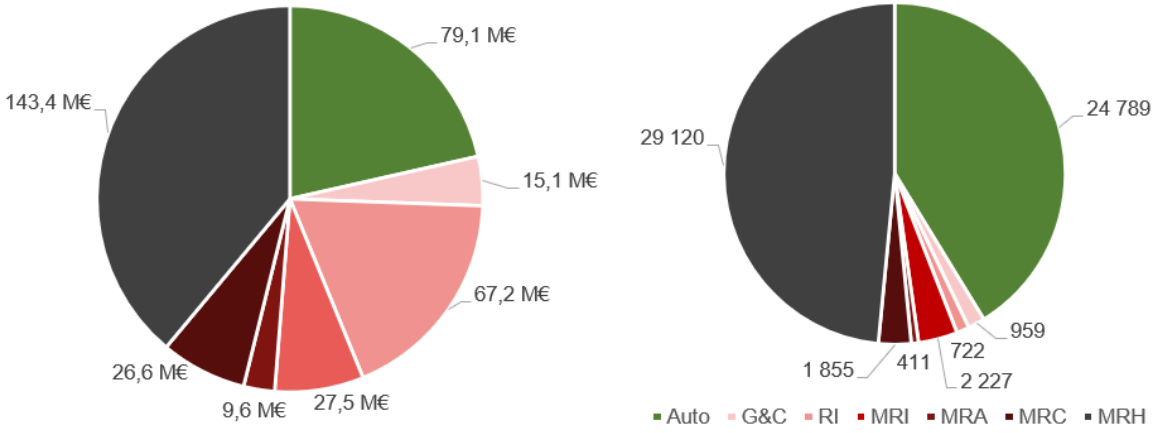


Figure 55 Sinistralité grêle cumulée par produit entre 2013 et 2022 sur le portefeuille de Generali France. A gauche on retrouve les pertes (€ constants 2022), à droite le nombre de sinistre.

Si on s'intéresse plus particulièrement à la grêle, ce sont plutôt les contrats MRH qui sont le plus sinistrés (en pertes), suivi par les contrats auto (Figure 56).

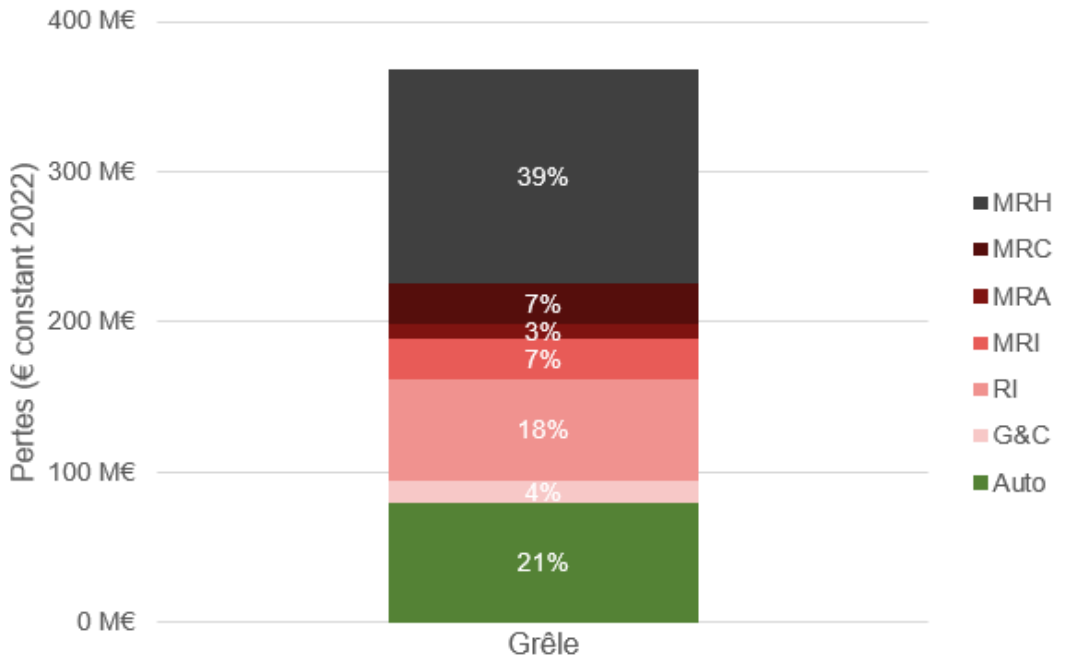


Figure 56 Zoom sur la sinistralité grêle cumulée par produit entre 2013 et 2023 sur le portefeuille Generali France, ©M. Trevisani.

Pour résumer en quelques éléments clés, la grêle entre 2013 et 2022 chez Generali sur les produits d'assurance DAB, Auto et agricole, c'est :

- 55 057 sinistres
- 380 M€ (€ constants 2022) d'indemnisations versées auprès de ses assurées en conséquence aux chutes de grêle,
- 199 « sinistres graves » (i.e. sinistres de plus de 150 000 € courants)
- Les sinistres graves représentent une part infime du nombre de sinistres (3,6‰), alors qu'ils pèsent pour près d'un quart des pertes de cette période. Ce constat mais clairement en évidence la problématique autour du risque « extrême » de certains biens assurés pouvant faire exploser la sinistralité lors d'évènement grave, en particulier les sinistres sur les biens industriels présentant une toiture en fibrociment et donc amianté (cf partie 0, chapitre 5).

3.4 La grêle en 2022 : une année exceptionnelle en France

L'année 2022 a été l'année de tous les records en France pour la sinistralité climatique assurancielle. Ce constat s'établit autant au regard nombre de records climatiques (vague de chaleur la plus précoce, moins de juin le plus chaud, mois de juillet le plus sec…) que de la sinistralité climatique exceptionnelle (10 Md€) qui se positionne juste derrière l'annus horribilis 1999, enregistrant les tempêtes Lothar et Martin. L'activité orageuse a également été exceptionnelle en France, avec un mois de juin se positionnant comme le plus foudroyé depuis le début des observations en 1989 : 206 000 éclairs nuage – sol contre 172 000 en juin 1993, soit 20% d'éclairs en plus que lors du précédent record[62]. Ces éclairs sont principalement situés sur un axe s'étalant des Pyrénées – Atlantiques et de la Gironde jusqu'en Suisse, (Figure 57.)

[62] *Juin 2022 : le mois de juin le plus foudroyé depuis 1989, MeteoConsul, 2022*

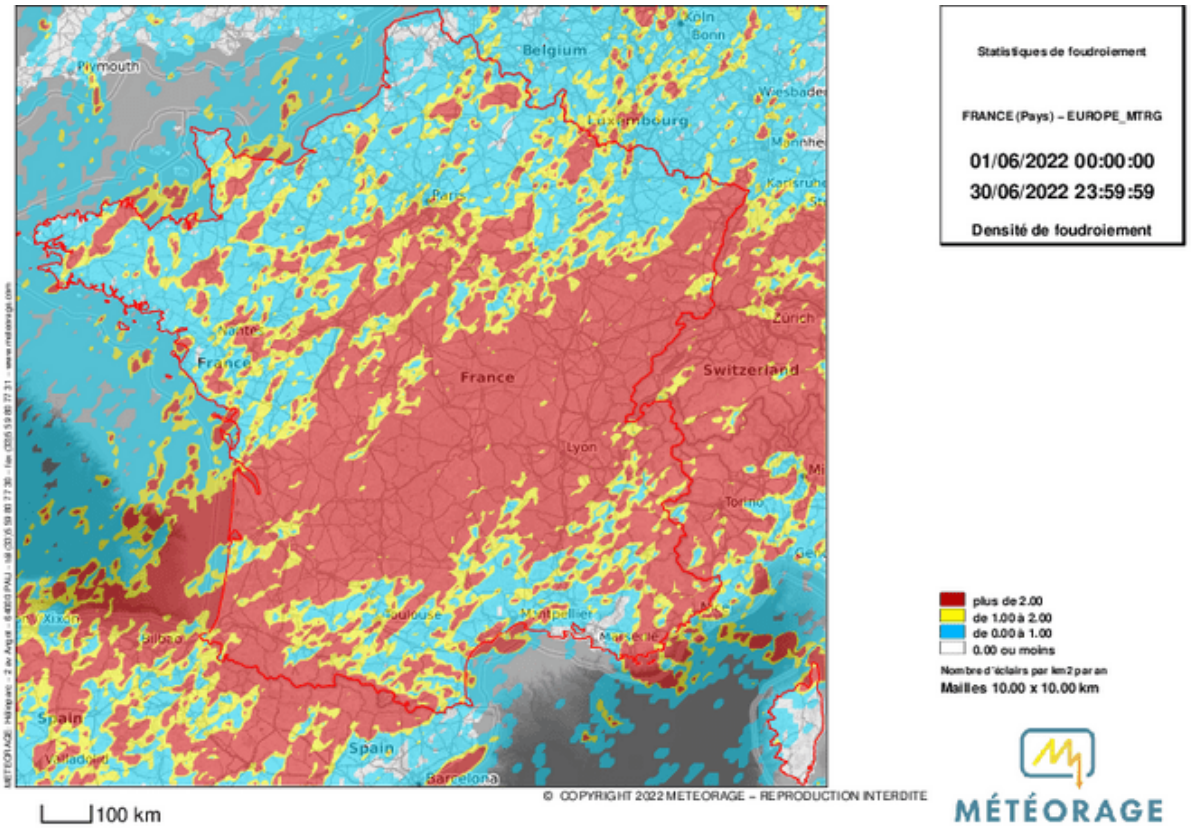


Figure 57 Statistique de foudroiement sur juin 2022, ©Météorage.

Les orages grêligènes ont été particulièrement intenses dès le début de cette saison. Trois vagues grêligènes se sont succédées, chacune d'une intensité et d'une ampleur géographique rarement vues en France. La première s'est produite entre le 18 et 23 mai, le seconde du 2 au 5 juin, la troisième était plus diluée dans le temps et a concerné la période du 18 juin au 4 juillet. Au cours de ces vagues, des grêlons ont pu atteindre des diamètres exceptionnels, égalant même celui du dernier record absolu en France (12cm) dans le secteur de Poitiers et Chauvigny le 22 mai 2022.

3.4.1 Une succession de 3 vagues grêligènes exceptionnelles

3.4.1.1 1ère vague : des grêlons records

La première vague s'est déroulée du 18 au 23 mai. Elle fait suite à une vague de chaleur particulièrement précoce, intense (7ème rang sur 49 en termes d'intensité globale en France) et durable (10 jours), provoquée par un dôme de chaleur[63] s'étalant de la péninsule Ibérique à l'Europe centrale. Ces anomalies positives marquées de température au niveau du Centre-Ouest ont entraîné une instabilité importante de l'atmosphère, provoquant des orages particulièrement sévères dès le 19 mai avec l'arrivée d'un air froid océanique.

[63] Phénomène météorologique provoqué par une masse d'air chaud emprisonnée par des pressions atmosphériques qui l'empêchent de se diluer. Ce système de haute pression durable produit donc un "dôme" durant les saisons chaudes avec comme conséquence l'apparition de chaleurs caniculaires ; cette stagnation entrainant une descente d'air qui va réchauffer l'atmosphère sous l'effet de la compression (effet couvercle). Cette zone fermée va ainsi se distinguer par des températures locales plus chaudes que les régions environnantes.

Nous avons recensé 2 323 communes touchées par une chute de grêle (données Keraunos, ESWD et Generali France). 7% de ces communes ont même connu plus d'une chute de grêle sur cette période. Les plus gros grêlons recensés durant cette vague sont visibles sur la Figure 58.

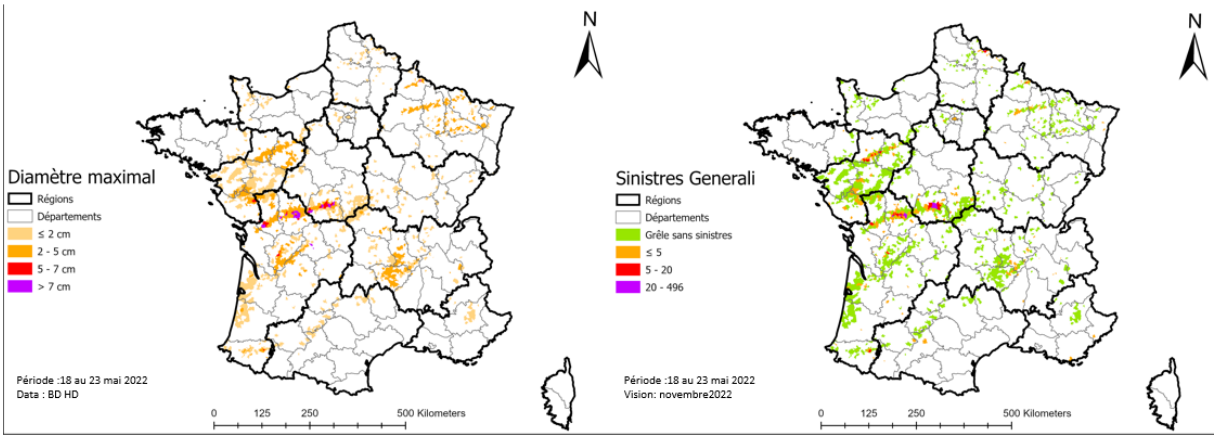


Figure 58 Les chutes e grêle du 18 et le 23 mai 2022. A gauche le diamètre maximal des grêlons recensés par commune (données Keraunos, ESWD et Generali France), à droite la sinistralité grêle enregistrée par Generali France (DAB + auto) à l'échelle de la commune (vision novembre 2022), ©M. Trevisani.

Le pic d'intensité de cette première vague a été atteint le 22 mai 2022 à la suite d'une SP (cf 0) exceptionnelle par son intensité, sa durabilité (plusieurs heures) et stabilité. Cette SP a en effet évolué entre la Charente-Maritime et l'Indre en produisant des grêlons « géants » de 12cm, soit l'équivalent du record national (atteint dans le Nord en 2009 et dans le Loiron en 2014). Elle possède ainsi des caractéristiques extrêmes qu'on retrouve plus habituellement au niveau de la « Hail Valley » aux Etats-Unis, avec une nature supercellulaire très marquée sur les échos radars (hook écho, déviation importante au flux principal) et les images thermiques (sommet froid pénétrant), comme on peut le voir sur la Figure 59 aux alentours de 21h30.

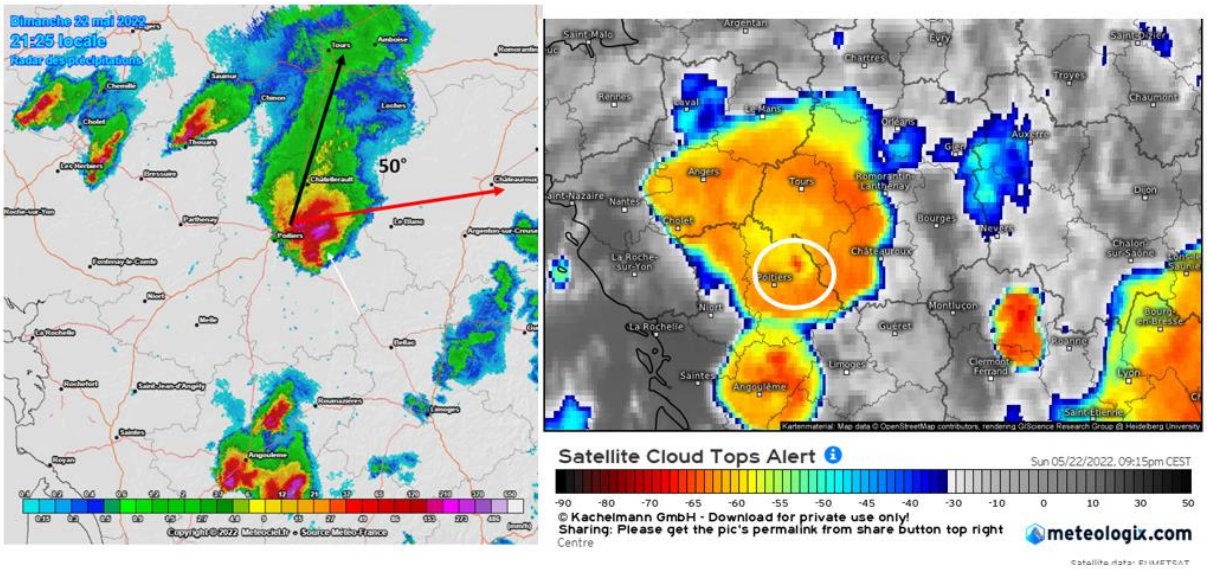


Figure 59 A gauche, échos radars de la SP exceptionnelle évoluant aux alentours de Poitier à 21h25. La position du hook écho est indiqué par la flèche blanche, la direction du flux principal est montrée par la flèche noir et celle de la SP par la flèche rouge, ©Meteociel. A droite, température au sommet du nuage aux alentours de Poitier à 21h15. La position du sommet pénétrant de la SP exceptionnelle est indiquée par le cercle blanc.

Les principaux dégâts se concentrent sur un axe s'étalant de la Gironde à la Saône-et-Loire à la suite du passage de la SP exceptionnelle et certaines communes comme celles de Châteauroux, Le Blanc, Le

Poissonnet… enregistrent de lourds dégâts. Dans le quartier de Grands-Champs à Châteauroux, les $^{3}/_{4}$ des maisons et les $^{4}/_{5}$ des véhicules sont touchés par la grêle (toitures percées, carrosseries enfoncées, pares-brises explosés…). C'est au cours de cette vague que Generali France enregistre le sinistre grêle le plus couteux de son histoire au niveau d'un bâtiment industriel amianté à Châteauroux (7,5 M€). Ce sinistre exceptionnel est également le 3ème sinistre le plus couteux de Generali France tout aléas climatiques confondus, se plaçant juste derrière un sinistre tempête (10 M€) et inondation (8M€) de novembre 2023

On peut voir des exemples de dommages que nous avons pu observer dans le cadre d'une mission terrain à Châteauroux le 2 juin 2022 sur la Figure 60.



Figure 60 Dommages sur véhicules, sur bâtiments, végétations, associés aux chutes de grêle du 2 juin 2022 à Châteauroux, ©M. Trevisani.

3.4.1.2 2ème vague : une sévérité orageuse marquée sur l'ensemble du territoire

Cette deuxième vague s'étend du 2 au 5 juin 2022 et enregistre un pic d'intensité le 4 juin 2022. Elle se produit à la suite d'un vaste thalweg[64] sur le proche Atlantique pivotant vers la France, en phase avec la remonté d'une anomalie de tropopause[65] en provenance de l'Espagne sur l'Ouest de la France.

Même si elle a également concerné le Sud-Ouest et le Nord-Ouest de la France, le Centre a été le secteur le plus touché par cette deuxième vague, en particulier aux alentours de Vichy le 4 juin 2022 où de nombreuses SP virulentes ont coexisté dans ce secteur. Au cours des orages du 4 juin 2022 un mort (noyade) a également été recensé à Rouen.

Parmi les 5 596 communes touchées par la grêle au cours de cette vague (données Keraunos, ESWD et Generali France), 10% ont connu plus d'une chute de grêle. Cette vague concerne également un territoire deux fois plus étendu que la première vague. Un grand nombre de communes ont également

[64] Zone de creux dépressionnaire bordé par de plus hautes pressions dans un champ de pression horizontal
[65] Intrusion d'air stratosphérique dans la troposphère

été touchées par des grêlons supérieurs à 5 cm au niveau du Massif Central (Figure 61). On retrouve également le Centre/Centre-Est comme le secteur le plus touché par Generali France, ce qui coïncide avec les plus forts diamètres sur cette période. Les chutes de grêle restent cependant plus faibles que lors de la première vague, avec des grêlons ne dépassant pas 7 cm à l'exception d'une commune (9 cm).

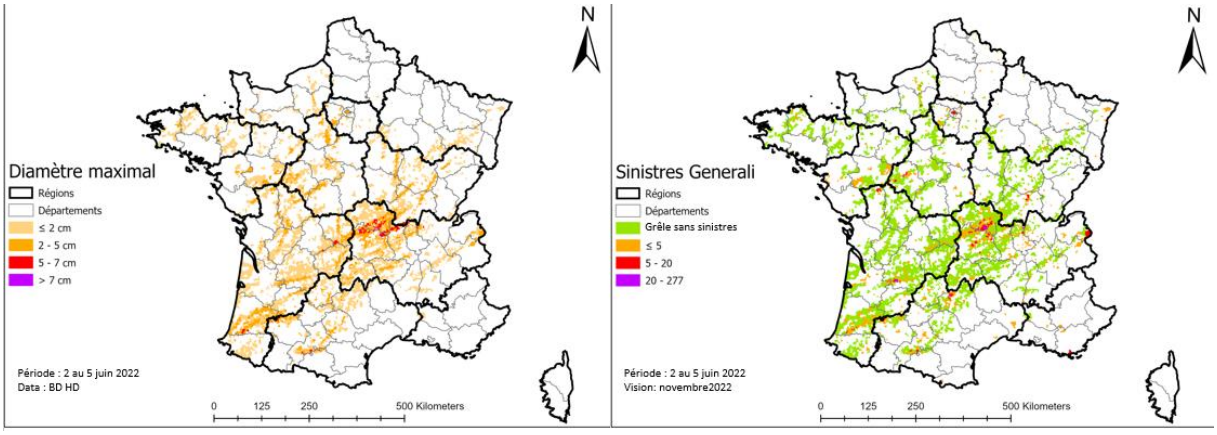


Figure 61 Répartition géographique de la situation entre le 2 et le 5 juin 2022. A gauche le diamètre maximal des grêlons recensés par commune (données Keraunos, ESWD et Generali France), à *droite la sinistralité grêle enregistrée par Generali France (DAB + auto) à l'échelle de la commune (vision novembre 2022), ©M. Trevisani.*

La présence de nombreuses SP coexistant au niveau du Centre explique la dynamique des chutes de grêle au cours de cette deuxième vague. En effet, une SP est caractérisée par une convection très marquée et favorise donc l'apparition de gros grêlons pouvant dépasser 5 cm. La présence de nombreuses SP sur un périmètre géographique restreint induit donc une « concurrence » de ces SP, limitant de ce fait leur convection et la potentielle taille des grêlons.

3.4.1.3 3ème vague : une situation hybride de la 1ère et 3ème vague

Cette dernière vague s'étale du 18 juin au 4 juillet, avec un pic d'activité principal du 18-23 juin et un secondaire le 26-27 juin. Elle fait suite à la goutte froide[66] responsable de l'épisode caniculaire exceptionnel de la mi-juin, restée bloquée plusieurs jours au niveau du Golfe de Gascogne.

9 870 chutes de grêle ont été recensées au cours de cette troisième vague Figure 62. Parmi les communes touchées (7 839) par la grêle au cours de cette vague, on enregistre 3% des communes étant touchées par des grêlons de plus de 5 cm et 20% des communes touchées par plus d'une chute de grêle sur cette période. Cette vague recense également un grêlon égal au record français (12 cm) le 20 juin à Vic-en-Bigorre (Sud-Ouest).

[66] Anomalie thermique situé en altitude (plus de 5 000m) et s'étant complètement détachée de la circulation du Jet Stream

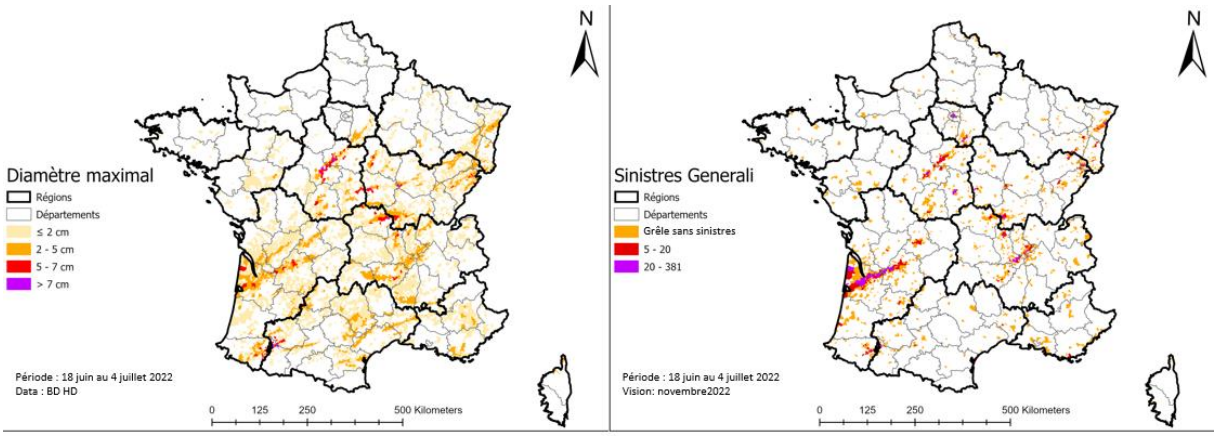


Figure 62 Répartition géographique de la situation entre le 18 juin et le 4 juillet 2022. A gauche le diamètre maximal des grêlons recensés par commune (données Keraunos, ESWD et Generali France), à droite la sinistralité grêle enregistrée par Generali France (DAB + auto) à l'échelle de la commune (vision novembre 2022), ©M. Trevisani.

Les orages été très virulents une fois de plus au cours de cette vague, avec certains orages étant même de nature supercellulaire. Le Centre/Centre-Est a encore une fois été fortement impacté par les chutes de grêle, ainsi que le Sud-Ouest à proximité de Bordeaux, fortement sinistré chez Generali France (Figure 62). L'intensité des chutes de grêle ainsi que l'ampleur du territoire impacté par ces dernières font de cette troisième vague un compromis entre la première et la troisième.

3.4.2 Des difficultés à prendre en charge une sinistralité exceptionnelle

Une aussi forte sévérité des épisodes grêligènes en France métropolitaine est une première, et rappelle la tempête Ela de 2014 (cf 0). Les habitations et les automobiles ont été les secteurs les plus touchés par la grêle en 2022 et ils recensent chacun environ 40% des dommages recensés à chaque vague.

Selon les données communiquées par France Assureurs, la 3ème vague enregistre les dommages les plus importants et elle représente environ 60% des dommages cumulés des 3 vagues. Cela s'explique plus par la longueur de sa période d'étude – 16 jours contre 3-5 jours pour les autres vagues – que par la sévérité et l'étendue des chutes de grêle. La seconde vague se positionne comme celle induisant le plus de dommages sur l'intervalle de temps le plus court, avec 29% des dommages cumulés des 3 vagues sur une période de 3 jours.

Prendre en charge une sinistralité exceptionnelle, en nombre et en coût, est en défi pour les différents acteurs de la reconstruction, en particulier les artisans. Les dégâts sur les toitures sont ainsi encore visibles à Châteauroux plus d'un an après les chutes de grêle du 22 mai, certains travaux n'ayant toujours pas commencé voir même prévu courant 2024. Ils s'expliquent par la pénurie de tuiles et d'artisans couvreurs qualifiés à la suite des chutes de grêle exceptionnelles en 2022[67] et peuvent être empirés par la présence d'amiante dans la toiture (fibrociment).

Le secteur automobile n'est également pas encore totalement remis en état en enregistre des véhicules en attente de débosselage un an après ces évènements[68].

[67] Un an après l'épisode de grêle à Châteauroux, certains attendent toujours la réparation de leur logement, France Bleu, mai 2023

[68] Orage du 22 mai 2022 dans l'Indre : Un an après la grêle, le carrossier est toujours bosselé, La Nouvelle République, mai 2023

3.4.3 Dans la continuité de 2022 : 2023, une année grêligène record en Italie

Après les épisodes exceptionnels de grêle en France en 2022, l'année 2023 fait suite comme une année encore plus exceptionnelle au regard de la grêle mais impactant cette fois un territoire voisin de la France : l'Italie. L'ESSL caractérise même cette année 2023 comme la troisième année grêligène record consécutive en Europe, autant au regard de la fréquence que de l'intensité exceptionnelle des chutes de grêle[69]. En effet, les chutes de grêle extrêmes ont été plus fréquentes et plus marquées, notamment dans le Nord de l'Italie où le record européen du plus gros grêlon a été battu à deux reprises à seulement quelques jours et kilomètres d'intervalle, 16 cm le 19 juillet et 19 cm le 24 juillet (record mondial 20,3 cm en Dakota du Sud le 23 juillet 2010)[70], induisant plusieurs milliards d'euros de dommages[71].

3.5 Conclusion chapitre 3

La place de la grêle dans le domaine de l'assurance est devenue de plus en plus préoccupante, témoignant de son impact croissant sur une variété de produits d'assurance comme l'assurance Dommages aux Biens (DAB), l'assurance récolte et l'assurance automobile. Avec une sinistralité liée à la grêle en augmentation sur ces trois produits, les assureurs sont confrontés à des défis majeurs en matière de tarification des risques, de provisionnement des sinistres et de gestion de la volatilité des réclamations. Les années 2022 et 2023 ont été marquées par des événements de grêle exceptionnellement sévères, respectivement en France et en Italie, mettant en évidence l'évolution complexe du risque grêle dans un contexte de changement climatique et de vulnérabilité croissante des biens, des cultures et des véhicules face à ce phénomène météorologique extrême. Cette récurrence d'années « exceptionnelles » pose ainsi la question de la pertinence du qualificatif « année exceptionnelle » : une année qui était exceptionnelle hier sera peut-être la norme demain.

Ces événements ont mis en lumière l'importance cruciale d'une gestion efficace des risques, d'une sensibilisation accrue aux dangers de la grêle et d'une adaptation des produits d'assurance pour répondre aux besoins changeants des assurés. Face à ces défis, il est impératif que les assureurs continuent d'innover et de collaborer avec les autorités réglementaires, les scientifiques et les agriculteurs pour renforcer la résilience des communautés face aux risques liés à la grêle. Cette résilience passe par la compréhension et la quantification de l'exposition du portefeuille d'assurés des sociétés d'assurance à travers l'analyse historique de leur sinistralité, mais également à travers l'analyse fine des chutes de grêle et de la vulnérabilité des territoires. Ces étapes sont en effet indispensables pour appréhender le risque grêle dans son ensemble, ainsi que son évolution dans le temps à la suite de mutations socio-économiques et de l'impact du réchauffement climatique. C'est pourquoi investir dans la prévention des dommages grêle est indispensable : mitiger les dégâts d'une chute de grêle permet de garantir une disponibilité suffisante de produits d'assurance abordables et adaptés aux besoins de la société.

[69] Hailstorms of 2023, ESSL, 23 jan 2024
[70] Hail record broken again – 19cm hailstone confirmed in Italy, ESSL, 25 jul 2023l
[71] Natural Catastrophe and Climate Report 2023, Gallagher Re

Conclusion de la partie 1

Les chutes de grêle sont exclusivement associées aux phénomènes orageux. Les grêlons se forment et évoluent au niveau de la colonne d'ascendance du nuage d'orage, le cumulonimbus. Ils connaissent ainsi trois phases : une phase embryonnaire, une phase de croissance, et une phase de chute. La taille que peut atteindre les grêlons est déterminée par la puissance des courants ascendants de la cellule orageuse : plus ces derniers sont marqués, plus les grêlons peuvent faire des cycles de croissance, et donc grossir, avant de précipiter. C'est pourquoi les grêlons les plus importants se retrouvent lors des orages les plus violents, souvent de nature supercellulaire. La compréhension des mécanismes physiques régissant l'évolution d'un nuage d'orage est donc une étape vitale pour anticiper et modéliser les chutes de grêle.

Les chutes de grêle sont en effet complexes à mesurer vis-à-vis des autres aléas climatiques. Le caractère orageux associé à une chute de grêle donne à ces dernières des caractéristiques très localisées et éphémères sur le territoire. La mesure directe de la grêle, uniquement possible à l'aide de grêlimètres, est donc difficile à mettre en place sur l'ensemble du territoire puisqu'il nécessiterait la présence d'un nombre démesuré de grêlimètres, démultipliant de ce fait le besoin « humain » pour exploiter ce réseau (i.e. collecte et traitement des plaques). Il est donc difficile d'exploiter ces données dans le but d'estimer le risque grêle sur l'ensemble de la France. Le développement des réseaux sociaux à cependant permis la densification d'observateurs potentiels de chutes de grêle, avec même parfois des indications sur la taille des grêlons, estimée à l'aide de photographies ou d'équivalant taille – objet. L'utilisation de ces données permet ainsi de palier aux limites associées au réseau traditionnel de grêlimètres en France même si les données sont moins précises. Le développement des satellites météorologiques a également permis de mesurer indirectement une chute de grêle à l'aide de proxy météorologique. Cette méthode à l'avantage de couvrir de manière homogène un grand territoire, mais ne permet pas de mesurer l'intensité d'une chute de grêle.

C'est pour toutes ces raisons qu'il n'existe pas de cartographies précises de la grêle en France : les cartographies sont soit anciennes et donc difficilement exploitables de nos jours, soit elles n'étudient qu'un aspect de la grêle en France (fréquence, aléa mais territoire très restreint…). Ce n'est donc que par le croisement et la multiplicité des sources qu'il est possible d'estimer l'aléa et le risque grêle en France.

Malgré ce relatif abandon concernant l'étude de la grêle en France, les conséquences économiques associées aux chutes de grêle en France sont en hausses, en impactant parfois lourdement la société et les compagnies d'assurances, comme ce fut par exemple le cas en 2014 et 2022. Avec une sinistralité grêle en augmentation sur l'ensemble des biens assurés (bâtis, automobiles et récoltes), provoquée à la fois par une multiplication d'évènements grêle et par des événements de grêle de plus en plus coûteux, il est essentiel que les assureurs continuent d'innover et de collaborer avec des partenaires publics comme privés, afin de mieux maîtriser le risque grêle et ainsi renforcer la résilience des communautés et des sociétés d'assurance. Cette maîtrise passe par la compréhension et la quantification de l'exposition du portefeuille d'assurées des sociétés d'assurance à travers l'analyse historique de leur sinistralité, mais également à travers l'analyse fine des chutes de grêle et de la vulnérabilité des territoires, par le développement des stratégies de protections face aux chutes de grêle, et par la mise en place d'outils d'estimation de la sinistralité grêle. Ces étapes sont en effet

indispensables pour appréhender le risque grêle dans son ensemble, ainsi que son évolution dans le temps à la suite de mutations socio-économiques et de l'impact du réchauffement climatique.

Partie 2
Besoins opérationnels de Generali France pour appréhender le risque grêle en France

La cartographie de la grêle en France constitue un enjeu majeur pour la gestion des risques climatiques, notamment dans le secteur de l'assurance. Malgré son importance cruciale, les avancées dans ce domaine ont été relativement limitées au cours des dernières décennies, avec les derniers travaux significatifs remontant à l'année 1998. Ainsi, il est impératif de combler ce vide et mettre à jour les connaissances sur la grêle en France, dans le but de mieux appréhender la distribution spatiale et temporelle de la grêle sur le territoire français. La partie 2 se concentre sur les différentes facettes de l'appréhension du risque grêle, de sa climatologie en France au dimensionnement de l'impact de chutes de grêle sur le portefeuille assurantiel.

Le chapitre 4 est dédié au développement d'une base de données exhaustive sur la grêle en France, alimentée majoritairement par des observations directes de chutes de grêle associées à des témoins oculaires ou bien la sinistralité grêle de Generali France, tout en incorporant également une faible part de chutes de grêle modélisées. Cette nouvelle base de données permet ainsi la constitution d'une climatologie de la grêle en France sur les dix dernières années (2013-2022), fournissant ainsi une vision actualisée et détaillée des caractéristiques de la grêle sur le territoire français.

Le chapitre 5 aborde un aspect crucial de la gestion des risques de grêle pour Generali France, à savoir l'élaboration d'un modèle visant à quantifier la sinistralité rapidement après un événement grêle. Il a pour objectif d'améliorer l'expérience client en fournissant des réponses stratégiques rapides et précises de Generali France, permettant ainsi une réduction de ses coûts de gestion des sinistres et et une amélioration de ses résultats opérationnels. Nous développerons également dans ce chapitre la vulnérabilité des biens assurés, ainsi que les stratégies d'adaptations mitigeant les conséquences économiques d'une chute de grêle.

Pour finir, le chapitre 6 se concentre sur la réalisation de cartographies spécifiques de la grêle en France. Nous produirons tout d'abord une cartographie de l'aléa grêle, en mettant en perspective les résultats obtenus avec les données existantes en Europe. Cette cartographie permettra d'identifier les zones les plus exposées aux risques de grêle sur le territoire français. Ensuite, nous réaliserons une cartographie du risque grêle, en tenant compte des enjeux spécifiques liés au portefeuille de Generali France. Nous clôturerons ce chapitre et cette dernière partie abordant les potentielles évolutions de l'aléa grêle en France au regard de l'influence du changement climatique.

Cette deuxième partie s'inscrit donc dans une démarche multidisciplinaire visant à améliorer la compréhension et la gestion des risques de grêle en France. En combinant des approches méthodologiques innovantes avec des données actualisées, elle espère fournir des outils précieux de gestion des risques climatiques, dans e but de renforcer la résilience des populations et des entreprises face à ce phénomène météorologique peu étudié en France.

Chapitre 4 : Une nouvelle base de données pour caractériser la grêle en France hexagonale : la BD HD

Le chapitre précédent a tracé un panorama détaillé des méthodes et des résultats des cartographies existantes de la grêle à l'échelle mondiale et européenne. Il a mis en lumière la diversité des approches adoptées pour caractériser ce phénomène météorologique complexe souvent dévastateur. Cependant, en dépit des avancées significatives réalisées dans ce domaine, une lacune persiste quant à la connaissance précise de la grêle en France hexagonale.

Dans ce chapitre, nous nous pencherons sur les bases de données recensant les chutes de grêle existantes en France, offrant un éclairage crucial sur ce phénomène climatique. Elles se distinguent par leur nature, et présentent des atouts et des limitations propres à chacune. Tout d'abord, nous explorerons les données associées à des mesures, caractérisées par leur précision remarquable et leur profondeur historique significative en France. Ces données fournissent une compréhension détaillée des caractéristiques de la grêle, mais leur utilisation est entravée par une forte hétérogénéité territoriale des réseaux de mesure.

Ensuite, nous nous tournerons vers les données d'observations, moins précises que les données issues de mesures mais offrant une couverture spatiale bien plus importante. Ces données, bien que limitées à la seule taille des grêlons, présentent l'avantage d'une homogénéité territoriale accrue mais restent fortement dépendantes de la densité urbaine.

Enfin, nous examinerons les données modélisées à partir de d'indicateurs de grêle (i.e. proxy météorologique) couvrant l'ensemble du territoire de manière homogène, mais se limitant uniquement à renseigner l'occurrence des chutes de grêle, sans fournir de détails sur les autres paramètres d'une chute de grêle.

Au-delà de la présentation de ces différentes bases de données, nous nous intéresserons également aux caractéristiques des chutes de grêle en France à travers une étude de la géographie et de la saisonnalité des chutes de grêle. Nous aborderons par la suite également dans cette partie la méthode que nous avons choisi pour classifier les chutes de grêle en France. En combinant ces éléments, nous jetterons les bases d'une compréhension plus approfondie de la grêle en France hexagonale.

4.1 Sources retenues dans la constitution de la BD HD

L'objectif initial de notre étude était de recueillir des données homogènes à l'échelle nationale pour quantifier le risque de grêle, mais une telle homogénéité n'existe pas sur le territoire français. La première étape pour étudier les caractéristiques de la grêle en France a donc été de de constituer une base de données recensant les chutes de grêle la plus exhaustive et la plus précise possible.

Les données issues des réseaux de grêlimètres sont considérées comme le moyen le plus fiable de caractériser une chute de grêle en calculant l'énergie des chutes de grêle à travers la combinaison du diamètre moyen et le nombre de grêlons par mètre carré (Kopp et al., 2023; Palencia et al., 2009; Sánchez et al., 2009). Cependant, ces données sont issues du réseau de l'Anelfa en France qui ne couvre principalement que le Sud-Ouest de la France, avec seulement un quart des départements de l'hexagone avec au moins un grêlimètre en 2023 (avec une couverture est très hétérogène d'un

département à l'autre)[72]. Afin d'éviter un biais géographique très marqué dans notre étude, comme une sur-représentation des chutes de grêle, nous avons fait le choix de ne pas utiliser ces données.

Les données collectées manuellement par Météo France ne sont pas jugées fiables en termes d'estimation de l'énergie des chutes de grêle (Vinet, 2001). Les seules données disponibles à l'échelle nationale fournissant des informations sur le diamètre des grêlons sont celles fournies par l'association Keraunos, qui surveille les orages et les phénomènes associés en France depuis 20 ans, et l'European Sever Storm Laboratory[73].

Nous avons également fait le choix de ne pas utiliser les données d'observation « brutes » associées au « Big data », comme celles associées à la presse, aux réseaux sociaux et aux forums météorologiques (infoclimat…). Cette approche a en effet été abandonnée au regard de la complexité et du caractère très chronophage concernant l'exploitation de ces données : le traitement manuel est lourd (plusieurs heures par jour lors d'évènements importants), le traitement informatique, bien que performant, entraîne une surcouche d'incertitudes sur les données (80% de précision globale sur la correcte estimation du lieu, de la date et de la taille des grêlons) alors que ces données n'apportent qu'une faible valeur ajoutée à notre étude (moins de 300 communes touchées par des évènements grêle en 2021). C'est pourquoi ces données ont plutôt été exploitées par l'intermédiaire de l'European Severe Weather Database (ESWD), entretenues par l'ESSL, qui effectue le traitement et les vérifications manuelles de son côté. Nous avons également utilisé la sinistralité grêle de Generali France en tant que « marqueur de l'aléa », ainsi que la base de données de Keraunos.

4.1.1 Keraunos

Keraunos est un bureau d 'études français spécialisé dans la prévision et la gestion des risques associés aux phénomènes orageux. Un des services fournis par Keraunos comprend l'accès à une base de données à la maille communale regroupant les évènements grêligènes survenant en France hexagonal. Cette base de données est alimentée à l'aide de trois sources distinctes :

- Un réseau d'observateurs confirmés avec lequel Keraunos a l'habitude de travailler (chasseurs d'orages…) comprenant 200 personnes, soit une moyenne de deux personnes par département. Ce réseau peut être considéré comme « souple » car constitué d'observateurs dont la position est fortement dépendante de celle des aléas climatiques prédits et observés. Ils ont pour objectifs de constater les aléas climatiques tout en relevant des dégâts matériels, ou bien des témoignages.
- Un réseau d'observateur secondaire grâce à des témoignages sur les réseaux sociaux. Les seuls témoignages retenus par Keraunos sont ceux avec au moins une photo prouvant la chute de grêle. Ce réseau est « rigide », contrairement au premier, car constitué d'observateurs dont la position est indépendante de celle des aléas climatiques prédits. Ce réseau est cependant bien plus étoffé que le premier avec plusieurs milliers de personnes recensées.
- Pour finir de nouvelles chutes de grêle sont déduites à l'aide d'un modèle grêle (Figure 63). Ce dernier estime les chutes de grêle potentielles en croisant les observations des deux réseaux d'observations avec des paramètres météorologiques (MUCAPE, LI, échos radars, SRH 0-3 km …) à partir des modèles GFS et WRF.

[72] https://www.anelfa.asso.fr/Carte-des-grelimetres.html
[73] https://www.essl.org/cms/

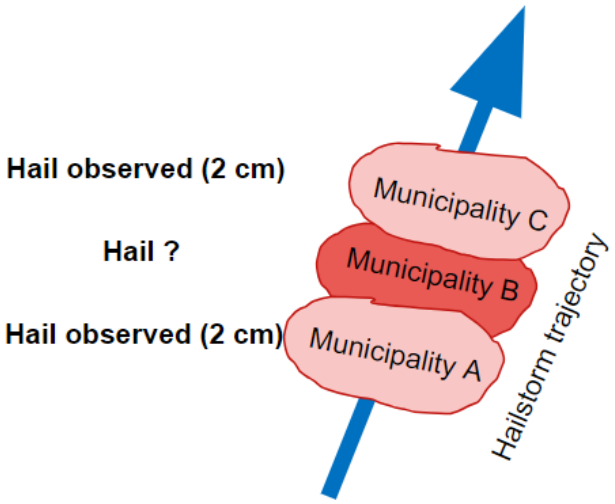


Figure 63 Modèle de grêle Keraunos. Les chutes de grêle sont déduites d'après les observations et les paramètres météorologiques environnants. Dans cet exemple, si des grêlons de 2 cm sont observés dans les municipalités A et C, et que la municipalité B se trouve sur le chemin de l'orage de grêle avec des conditions atmosphériques favorables à la grêle, une chute de grêle de 2 cm (selon les conditions atmosphériques environnantes) est déduite sur la municipalité B, ©M. Trevisani.

Nous n'avons pas accès dans notre étude à la distinction entre une chute de grêle modélisée et observée. Cependant nous pouvons dire que la proportion de chutes de grêle observées – estimées dépend de la sévérité de l'évènement grêle sur l'ensemble de la France ; lors d'épisodes sévères, on peut avoir une proportion de 80% de chutes de grêle observées contre à peine 20% lors des journées les plus bénignes, et inversement. Ainsi, même s'il est difficile de quantifier avec précision le nombre d'évènements grêle observés, on peut dire que la base de données Keraunos est principalement constituée d'observations ; les épisodes sévères sont par nature bien plus représentés en volume dans la base que les épisodes bénins.

Dans le cadre de notre abonnement à Keraunos, nous avons pu accéder aux données sur la grêle de 2013 à 2022, ce qui représente un total de 91 891 ensembles de données sur les chutes de grêle au niveau communal (Tableau 4). Tout événement de grêle survenant à une date donnée est ensuite appelé un "Jour de Grêle" (HD) au niveau national et "HDm" au niveau communal. Ainsi, l'unité statistique de cette étude est la GRÊLE / JOUR / COMMUNE, c'est-à-dire la grêle signalée tombée sur une commune. Par exemple, si une chute de grêle touche trois communes différentes en une journée (même date), il y aura trois unités statistiques différentes (HDm) dans la base de données.

Tableau 4 Caractérisation des HDm renseignés au sein des données Keraunos, ESWD et Generali France. Les diamètres de moins de 2 cm chez Keraunos représentent la majorité des données (62%). Les données de Generali France étant originaire de la sinistralité, le diamètre des grêlons n'est pas renseigné, ©M. Trevisani.

	≥ 2 cm	≥ 5 cm	≥ 7 cm	≥ 10 cm	Total
Keraunos	27 978 (30%)	683 (7%)	133 (0,1%)	17 (0,02%)	91 891
ESWD	656 (78%)	111 (13%)	20 (2%)	2 (0,2%)	1 585
Generali France	-	-	-	-	21 116

Keraunos a amélioré sa détection des chutes de grêle inférieure à 1 cm en 2018. Le nombre d'HDm inférieur à 1 cm augmente ainsi considérablement après 2018, limitant de ce fait l'analyse globale des données.

4.1.2 ESWD

La European Severe Weather Database (ESWD) (Dotzek et al., 2009; Hulton and Schultz, 2024) est une base de donnée produite et entretenue par l'European Severe Storms Laboratory (ESSL) à partir d'observations directes d'évènements climatiques sur le territoire européen à la maille communale. Chaque évènement grêle dans cette base correspond à une chute de grêle unique sur une commune à une date et heure distincte. Ils sont renseignés sous la condition d'avoir induit des grêlons d'au moins 2 cm de diamètre ou d'avoir formé une couche d'accumulation de minimum 2 cm. Cette base renseigne ainsi la taille maximale des grêlons, la localisation (commune), la date et l'heure, les dommages observés, et également la fiabilité de l'évènement en fonction de sa documentation : QC0 lorsque si la plausibilité n'a pas été vérifiée, QC0+ lors que la plausibilité a été vérifiée, QC1 lorsque l'évènement a été vérifié par une source fiable et QC2 lorsque l'évènement est cité dans un article scientifique. Afin de rejoindre la définition d'HDm présentée dans la partie 0, nous avons concaténé les évènements journaliers « identiques » (même localisation, même date mais heure différente) en un unique évènement regroupant les différentes informations tout en lui attribuant le plus grand diamètre possible.

Par la suite, nous avons utilisé l'ensemble des HDm vérifiés sur la période 2013-2022 (niveau de fiabilité QC0+ à QC2), soit un total de 1 585 évènements communaux distincts pour 53% de diamètre maximal renseigné. On peut visualiser la distribution des diamètres maximaux sur le Tableau 4.

L'avènement d'internet et des médias sociaux ainsi que l'attention grandissante de la population au regard des extrêmes climatiques ont permis d'avoir un nombre grandissant d'évènements climatiques catalogués dans l'ESWD au fil des années, en particulier à partir de 2010. Ce phénomène implique une temporalité hétérogène sur le captage des HDm. De même, on retrouve cette hétérogénéité sur la localisation des évènements puisqu'elle est très dépendante de la densité d'observateurs potentiels ; la probabilité qu'un évènement soit capté au niveau d'un centre urbain avec une forte densité de population est plus importante qu'au niveau d'une zone rurale ou forestière. Ce constat est particulièrement visible sur la Figure 64 où les environs des villes de Paris, Lyon, Marseille et Bordeaux ressortent sur les HDm observés par ESWD.

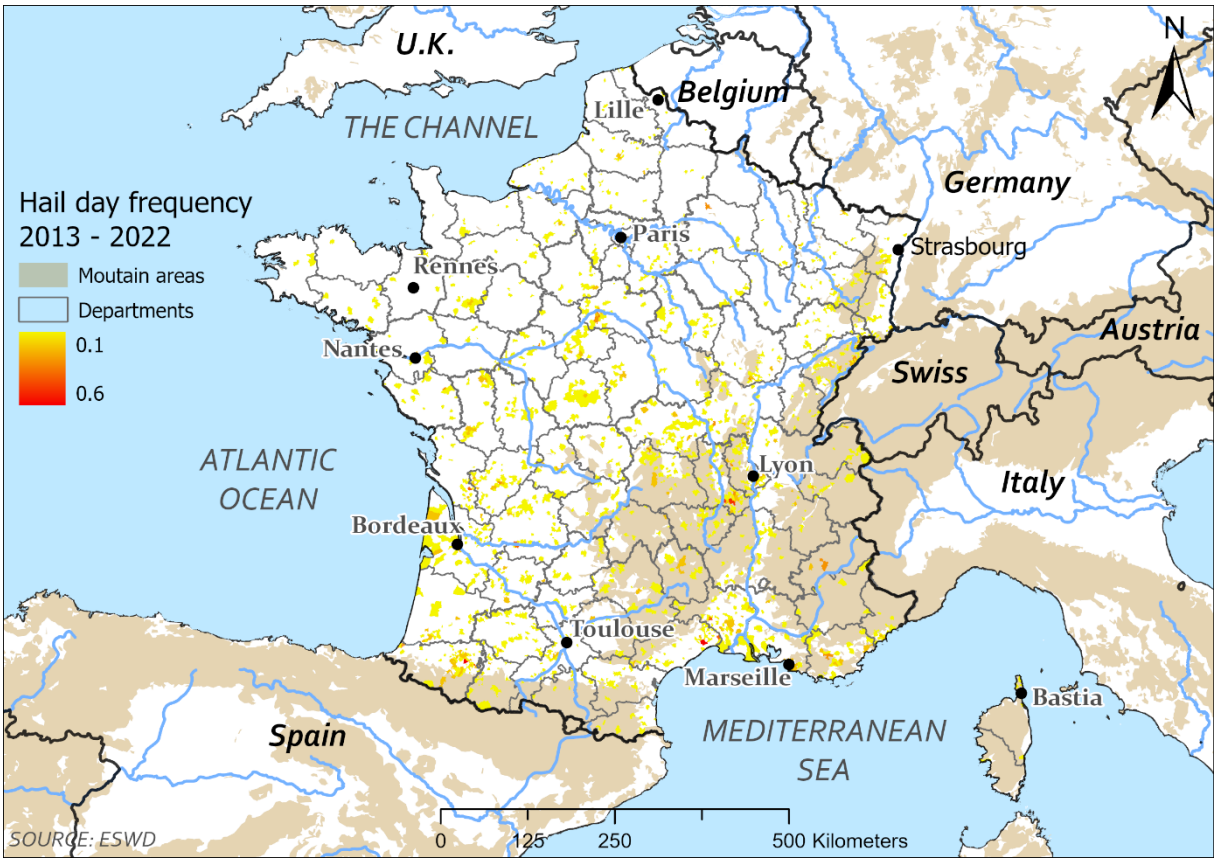


Figure 64 Répartition géographique des HDm en France hexagonale entre 2013 et 2022 à partir des données ESWD, ©M. Trevisani.

4.1.3 Generali France

La sinistralité grêle de Generali France (dommages au bien, véhicule, agricole) a été utilisée pour la période 2013-2022 uniquement en tant que marqueur de l'aléa grêle afin d'indiquer dans une commune donnée uniquement l'occurrence de grêle sans toutefois renseigner le diamètre des grêlons. Les années antérieures à 2013 n'ont pas été utilisées au regard de leur faible représentativité puisqu'on constate une nette cassure du nombre annuel de sinistres climatiques avant et après 2014 (Figure 65), avec 10 fois plus de sinistres sur la période 2014-2019 au regard de 2008-2013. L'année 2013 a quand même été utilisée afin de compléter les données Keraunos de cette année. La cassure de la sinistralité grêle observée en 2014 s'explique par une évolution de la nature du sinistre renseignée dans notre base pouvant regrouper la grêle (orage par exemple). L'utilisation d'un nouvel outil de gestion de sinistre en interne aux alentours de 2014, ainsi que l'amélioration de la collecte des données peuvent également expliquer cette cassure.

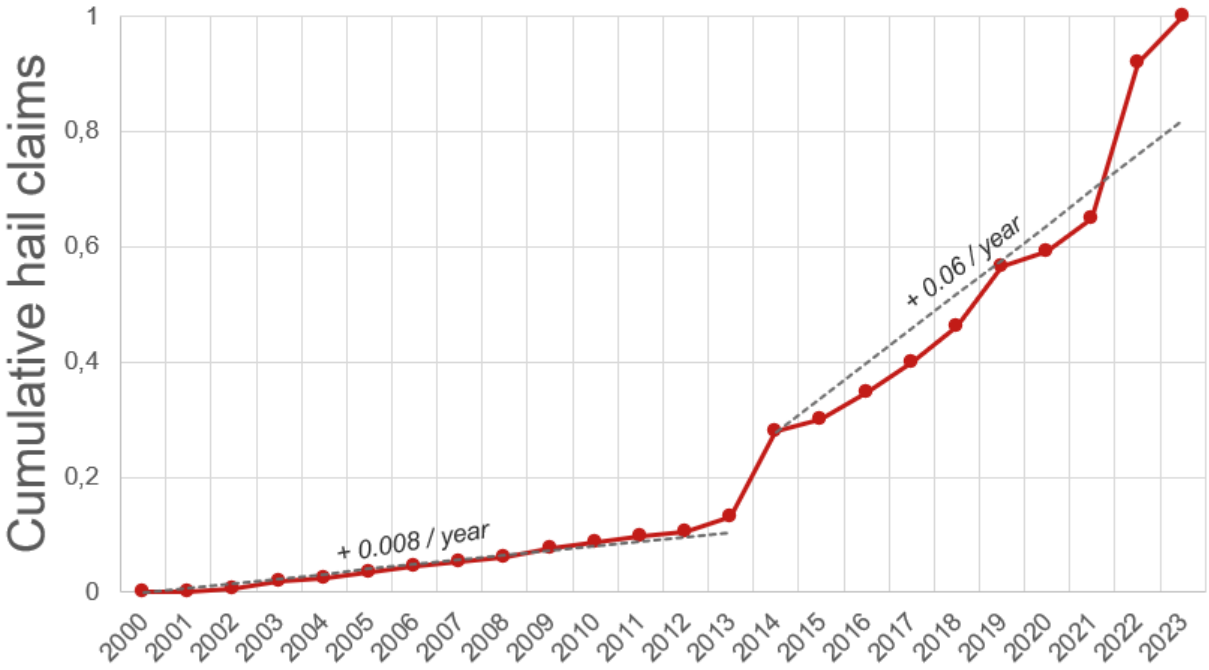


Figure 65 Nombre de sinistres grêle en France cumulé entre 2000 et 2023. Le total du nombre de sinistre a été normalisé à 1, ©M. Trevisani.

Generali France possède des contrats d'assurance sur 98% des communes de l'hexagone, ce qui permet de capter des chutes de grêle induisant des dommages sur quasiment l'ensemble de la zone d'étude. Parmi ces communes couvertes par au moins un contrat d'assurance de Generali, un tiers ont connu au moins un sinistre grêle entre 2013 et 2022 pour un total de 21 116 HDm, visible sur le Tableau 4.

4.2 Constitution de la base de données grêle (BD HD)

Les trois bases de données couvrent la période commune 2013-2022 et renseignent sur les observations des chutes de grêle à la maille communale (code INSEE) : localisation, date, taille maximale de grêlons. La base de données finales (BD HD) utilise la même définition d'un évènement grêle (HDm) que celle présentée dans la section 4.1 de ce chapitre ; un évènement grêle correspond ainsi à un couple date-commune unique. Au global on retrouve 107 019 HDm distincts, en grande partie associés aux données Keraunos, comme on peut le voir sur la Figure 66.

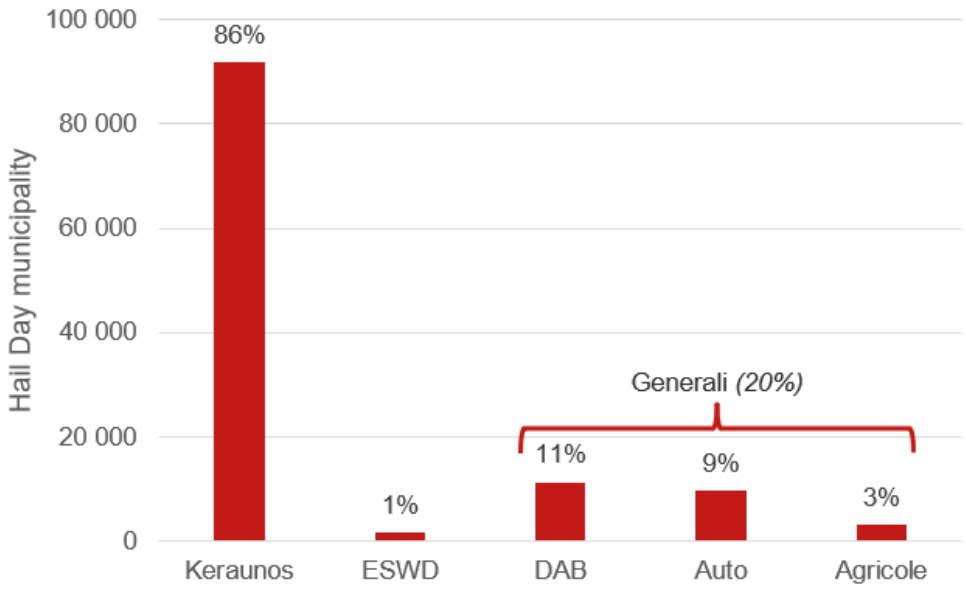


Figure 66 Répartition des HDm entre 2013 et 2022 pour chaque base de données : Keraunos, ESWD, Generali France (DAB, Auto, Agricole). Dans ce graphique, un HDm peut être présent dans plusieurs bases de données, mais apparaît seulement une fois dans la BD HD finale, BD HD, ©M. Trevisani.

Le croisement des données en une base unique permet de maximiser l'exhaustivité des chutes de grêle recensées par communes sur le territoire. Ce constat est visible sur le Tableau 5 qui présente le taux de recouvrement des HDm entre chaque base.

Tableau 5 Taux de recouvrement des HD communaux pour chaque source entre 2013-2022. Sens de lecture : 1% des évènements de Keraunos sont présents dans ESWD, BD HD, ©M. Trevisani.

	ESWD	Keraunos	ESWD-Keraunos	Generali
ESWD	100%	57%	-	40%
Keraunos	1%	100%	-	5%
ESWD-Keraunos	-	-	100%	6%
Generali	2%	22%	23%	100%
Évènements	1 585	91 891	92 794	21 116

Le diamètre maximum du grêlon au sein d'un HDm, D_{max}, est renseigné dans 88% des évènements et représente le plus grand diamètre dans le cas où le grêlon est irrégulier. Pour les municipalités pour lesquelles aucune valeur de D_{max}n'était disponible, la valeur de D_{max}des municipalités voisines touchées lors du même épisode de grêle a été utilisée. Initialement, seules les municipalités directement en contact avec celle étudiée étaient prises en compte pour remplir la valeur de D_{max} (voisins du 1er ordre). Si aucun diamètre maximal n'est renseigné dans ces communes, on passe ensuite aux voisins de 2ème ordre (voisins des voisins). Ce processus a été répété jusqu'au 5ème ordre. S'il ne suffit toujours pas, on attribue à la commune étudiée le D_{max} moyen de la journée grêle à l'échelle de la France. Avec cette méthode il est possible de gagner 3 points et atteindre les 91% sur la complétude du diamètre maximal. On peut visualiser la représentation de chaque ordre de voisinage dans la caractérisation du diamètre maximal sur la Figure 67. La plupart des estimations du D_{max} utilisent donc les voisins de premier ordre.

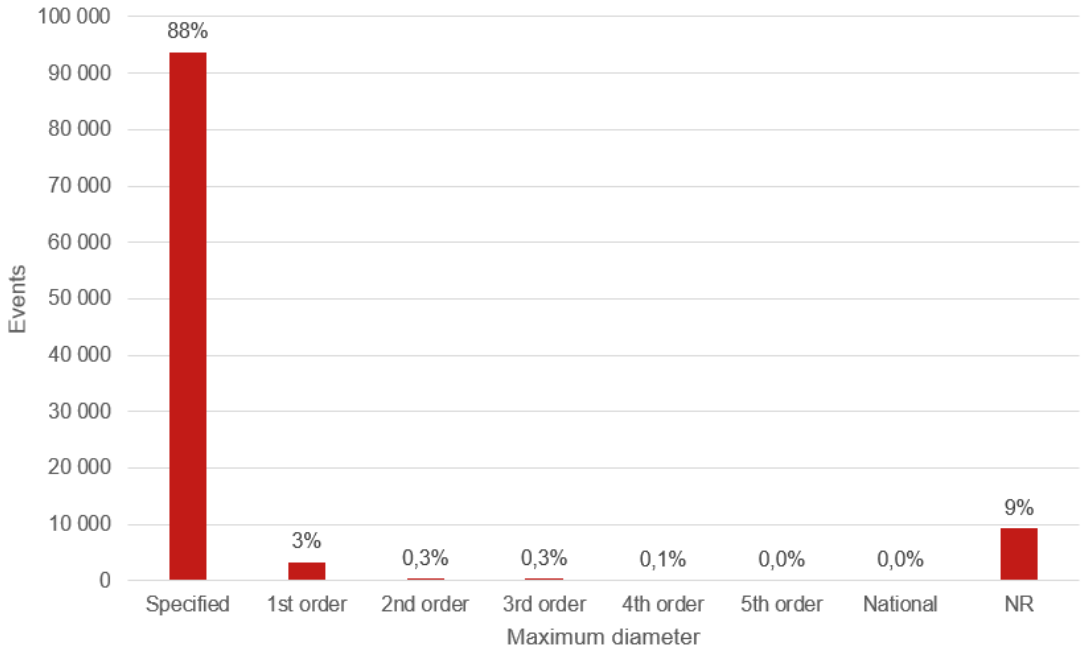


Figure 67 Caractérisation des diamètres renseignés, réhaussés et non renseignés (NR) dans la BD HD, ©M. Trevisani.

4.3 Caractéristiques des chutes de grêle en France

Le cycle annuel de la grêle a été peu étudié dans toute la France (Berthet et al., 2011; Púčik et al., 2019). La littérature se concentre presque exclusivement sur la grêle dommageable associée aux orages convectifs, qui se produisent principalement entre mai et septembre en Europe occidentale (Berthet et al., 2011; Nisi et al., 2016; Punge et al., 2017; Punge and Kunz, 2016; Sanchez et al., 2017).

Une journée peut être affectée par la grêle à différentes échelles. Par la suite, toute journée de grêle au niveau communal est désignée comme un HDm. Notre entière analyse repose sur une analyse de la BD HD.

4.3.1 Les différentes catégories de chutes de grêle

Les chutes de grêle peuvent être catégorisées en fonction de la taille maximale des grêlons et des dommages qu'ils peuvent provoquer. Il existe deux principales échelles en Europe. La Tornado and Storm Research Organisation (TORRO) Hailstorm Intensity Scale réalisé par Webb en 1986 en Angleterre (Webb et al., 2001) catégorise en 10 niveaux la taille des grêlons (Figure 68). La taille des grêlons est également ramenée au regard d'objets courants (pois, œuf, orange…), souvent utilisés dans les rapports grêle pour décrire les grêlons. On retrouve également une gamme d'intensité des chutes de grêle estimée à partir de la taille des grêlons.

Size code	Diameter (mm)	Description	Intensity range
1	5–10	Pea	0–2
2	11–15	Mothball, bean, hazelnut	0–3
3	16–20	Marble, cherry, small grape	1–4
4	21–30	Large marble, large grape, walnut	2–5
5	31–45	Chestnut, pigeon's egg, golf-ball, table-tennis ball, squash ball	3–6
6	46–60	Hen's egg, small peach, small apple, billiard ball	4–7
7	61–80	Large peach, large apple, goose egg, small/medium orange, tennis ball, cricket ball, baseball	5–8
8	81–100	Large orange, grapefruit, softball	6–9
9	101–125	Melon	7–10
10	over 125	Coconut, etc.	8–10

Figure 68 Taille des grêlons dans la TORRO Hailstorm Intensity Scale, ©Webb et al., 2001.

Cette échelle présente une deuxième partie précisant la gamme d'intensité des chutes de grêle en fonction de la taille des grêlons. Une deuxième partie de la TORRO Hailstorm Intensity Scale fait également le lien entre la gamme d'intensité des chutes de grêle (Figure 68) et les dommages quelles peuvent provoquer (Figure 69). Cette estimation des dommages associées aux chutes de grêle a été calibrée sur les bâtiments britanniques. Les chutes de grêle sont ainsi classifiées en 11 niveaux (H0-H10) en fonction des dommages constatés.

H	Typical damage	Size code
0	True hail of pea size, but no damage.	1
1	Leaves holed, flower petals cut.	1–3
2	Leaves stripped from trees and plants; vegetables, fruit, and crops bruised and scarred; vegetable leaves shredded.	1–4
3	A few panes in glasshouses, cloches, and/or skylight windows broken; wood (fences) scored; slight chipping of paintwork on window ledges and vehicles; caravan bodywork dented; perspex roofing holed; canvas (e.g. tents) torn; stems of crops severed and seeds threshed; fruit sliced/split.	2–5
4	Some vertical house windows and/or vehicle windscreens broken/cracked; glasshouses extensively damaged; some felt or asbestos cement roofs pierced; paint scraped off walls and vehicles; some thin car bodywork visibly dented; small branches broken from trees; unprotected birds and poultry killed; firm ground pitted.	3–6
5	Some slate roofs and pottery-type tiles broken; many windows smashed; plate glass roofs and reinforced glass windows broken; bodywork of most exposed cars visibly pitted; bodywork of light aircraft pitted; risk of serious or fatal injuries to small animals; strips of bark torn from trees; woodwork pitted and splintered; large branches cut from trees.	4–7
6	Many roof slates and tiles (except concrete) broken; shingle and thatch roofs breached; corrugated iron and some sheet metal roofs scored, and a few holed; brick walls slightly pitted; wooden window frames broken away.	5–8
7	Slated, shingle, and many tiled roofs shattered, exposing rafters; metal roofing punctured; brick and stone walls visibly pitted; bodywork of cars and light aircraft seriously/irreparably damaged.	6–9
8	Concrete roof tiles cracked; sheet metal, shingle, and most tiled roofs destroyed. Pavements pitted; bodywork of commercial aircraft severely damaged; small tree trunks split apart; risk of serious injury to persons caught in the open.	7–10
9	Concrete walls pitted; concrete roof tiles widely broken; walls of wooden houses completely holed; large tree trunks cut down; risk of fatal injury to persons caught in the open.	8–10
10	Wooden houses destroyed; brick-built houses very severely damaged; risk of fatal injury to unprotected persons.	9–10

Figure 69 La TORRO Hailstorm Intensity Scale (H0 to H10), ©Webb et al., 2001.

En croisant les deux parties de la TORRO Hailstorm Intensity Scale, on remarque que les chutes de grêle avec grêlons inférieurs à 1,5 cm peuvent ainsi induire aucuns dommages. Inversement, on constate que les dégâts les plus lourds sont atteints lorsque le diamètre des grêlons excède 10 cm.

Il existe une deuxième classification des chutes de grêle réalisée par l'Anelfa en France en 2007 (Dessens et al., 2007), construite à partir des mesures des grêlimètres de l'Anelfa. Elle classifie en 6 niveaux (A0-A5) les chutes de grêle en fonction du plus grand diamètre de grêlons associé à la chute de grêle, et ne différencie pas les chutes de grêle avec grêlons de plus de 5 cm (Figure 70). Le niveau est potentiellement suivi d'un « - » ou d'un « + » en fonction de la densité de grêlons par unité de surface. Elle associe également à cette échelle une équivalence avec un objet du quotidien du plus gros grêlons (pois, œuf, orange, balle de tennis…) et une gamme d'énergie associée à la chute de grêle. Une estimation des dommages associés à chaque niveau d'intensité des chutes de grêle est également présente dans cette échelle. Cette estimation se base à la fois sur le diamètre maximal des grêlons, mais également sur la moyenne de la gamme d'énergie associée à la chute de grêle.

Class	Maximum hailstone diameter (cm)	Largest hailstone equivalence	Energy range ($J\ m^{-2}$)	Typical damage
A0	<1	Pea	0–30	Road accidents, tree flowers cut
A1	1–1.9	Grape, marble, cherry	30–100	Damage to vineyards, orchards, tobacco
A2	2–2.9	Pigeon's egg,	100–400	Serious damage to cereals, vegetable, trees
A3	3–3.9	Walnut, ping-pong ball	400–800	Complete damage to all crops, windows cut, cars damaged
A4	4–4.9	Hen's egg, golf ball	>800	Winter landscape, animals killed, people injured, grounded aircraft damaged
A5	≥5	Orange, peach, apple, tennis ball		Extreme dangerous event, unprotected persons killed

Figure 70 Classification des chutes de grêle selon l'Anelfa. Le niveau est potentiellement suivi d'un « - » ou d'un « + » en fonction de la densité de grêlons par unité de surface, ©Dessens et al., 2007.

On retrouve dans le Tableau 6 une comparaison entre les différents niveaux de l'échelle de l'Anelfa et de TORRO réalisée à partir de la taille des grêlons.

Tableau 6 Equivalence des niveaux de grêle entre l'échelle développé par l'Anelfa et par TORRO. L'équivalence à été déterminée à partir de la taille maximale (Anelfa) et de la gamme de taille (TORRO) des grêlons, ©M. Trevisani.

Anelfa	A0	A1	A2	A3	A4	A5
TORRO	H0-H2	H1-H4	H2-H5	H3-H6	H3-H7	H4-H10

La classification des chutes de grêle par la taille des grêlons est cependant loin d'être suffisante pour en mesurer avec précision son intensité et les dommages associés. En effet, les dégâts dépendent de l'énergie associée à la chute de grêle. Il est donc nécessaire d'associer d'autres paramètres au diamètre des grêlons, comme la densité de grêlon par unité de surface, la vitesse du vent ainsi que sa direction.

Les dommages causés par la grêle ne sont pas directement liés à la taille du grêlon, mais à l'énergie du grêlon (Hohl et al., 2002a; Schuster et al., 2006), qui dépend des paramètres du grêlon (taille, densité, masse) (Heymsfield et al., 2014) et des paramètres externes (vitesse et direction du vent) (Dieling et al., 2020). Pour Generali, l'objectif était de déterminer l'intensité des chutes de grêle sur les produits assurantiels « Dommages aux Biens » et « automobiles », car l'assurance récolte ne représente à peine 1 % de la somme totale assurée du portefeuille en 2022. Par conséquent, le but de cette étude était de déterminer un seuil déclencheur auquel l'assureur devrait intervenir en cas de chutes de grêle. Pour ces deux produits (Dommages aux Biens et automobiles), c'est le seuil de déclenchement de dommages qui est d'intérêt. Selon la littérature, le diamètre minimum des grêlons causant des dommages sur ces produits est de 2 cm. Si des grêlons d'au moins 2 cm de diamètre tombent, la

carrosserie, un pare-brise ou le toit d'une habitation peuvent être endommagés, ce qui déclenchera une intervention d'un artisan et un remboursement. Le coût de l'intervention variant en fonction des dommages (débosselage de voiture, remplacement d'une gouttière en PVC, remplacement des panneaux solaires, remplacement des volets roulants en PVC…).

Le diamètre maximal du grêlon (D_{max}) a été utilisé dans cette étude comme proxy de l'intensité de la chute de grêle au niveau communal (Figure 6). Ainsi, les HDm avec un diamètre maximal de moins de 2 cm sont considérés comme de "faible gravité". Ce diamètre correspond également au minimum légal requis pour obtenir la certification IEC 61215 des panneaux solaires (2,5 cm) et correspond au seuil pour être signalé dans la base de données ESWD (2 cm). Il est cependant important de noter que ces HDm peuvent encore causer de légers dommages aux cultures en fonction du type de cultures et de leur degré de maturité. Les dommages associés aux cultures dépendent de l'énergie globale de la chute de grêle et non du diamètre des grêlons. Les HDm avec un diamètre maximal compris entre 2 et 5 cm sont classés comme étant de "moyenne gravité" et peuvent causer des dommages significatifs aux cultures, aux bâtiments (comme l'arrachement des tuiles/ardoises du toit, dommages conséquents sur les panneaux solaires), et aux véhicules (divers degrés d'impact sur la carrosserie et des fissures au niveau des parties vitrées du véhicule). Lorsque les plus gros grêlons dépassent 5 cm de diamètre, les HDm sont classifiés comme "sévères". Les dommages sont lourds, avec toitures perforées, des impacts très marqués sur la carrosserie des véhicules, des parties vitrées brisées, et pouvant même entraîner des blessures potentiellement mortelles pour les humains et les animaux.

4.3.2 Saisonnalité des chutes de grêle

La saisonnalité de la grêle a été peu étudiée en France hexagonal (Berthet et al., 2011; Púčik et al., 2019). La littérature se concentre presque exclusivement sur des évènements grêle provoqués par les orages convectifs se produisant principalement entre mai et septembre en Europe de l'Ouest (Berthet et al., 2011; Nisi et al., 2016; Punge et al., 2017; Punge and Kunz, 2016; Sanchez et al., 2017). Une journée peut être affectée par la grêle à différentes échelles. Par la suite, un jour de grêle à l'échelle de la commune est appelé HDm. Un HD national est donc défini comme un jour où au moins une commune est touchée par la grêle.

L'utilisation des données de Generali France dans la BD HD permet une meilleure couverture des HD nationaux, comme le montre le Tableau 7, avec une moyenne de 206 HD nationaux par an contre 89 pour Keraunos. Cette meilleure couverture n'est pas provoquée par des bais induits par les données de Generali France, comme par exemple une erreur sur la date de sinistre grêle ou bien une erreur sur la nature du sinistre. En effet, si on agrège les évènements grêle à l'échelle de la commune sur une période glissante de 10 jours, le nombre de HD nationaux de Generali France passe de 207 à 200, soit une baisse d'environ 3%. En supposant que la nature du sinistre soit correctement enregistrée par Generali France, nous pouvons donc conclure qu'il y a en moyenne 200 événements de grêle par an en France.

Tableau 7 Nombre d'HD nationaux par an associé à chaque source de données, BD HD, ©M. Trevisani.

	Keraunos	ESWD	Generali	Total
HD nationaux / an	89	30	206	207
HD nationaux / an *	89	30	199	200

**Le nombre de HD national a été calculé sous l'hypothèse que plusieurs HD se produisant sur une période glissante de 10 jours sur la même commune correspondent à un unique HD. La date finale du HD correspond à celle étant le plus affectée par la grêle (plus gros grêlons, plus grand nombre de sinistres…).*

Le nombre annuel d'HD nationaux est stable d'une année à l'autre, autant au regard de l'ensemble des HD nationaux que sur ceux avec grêlons de plus de 2 cm (Figure 71). Il ne semble également y avoir

aucune relation entre le nombre global de HD nationaux d'une année et le nombre de HD nationaux avec grêle d'au moins 2 cm. De ce fait, une année avec un nombre anormalement haut d'HD nationaux peut également avoir un nombre anormalement bas d'HD nationaux avec grêle d'au moins 2 cm.

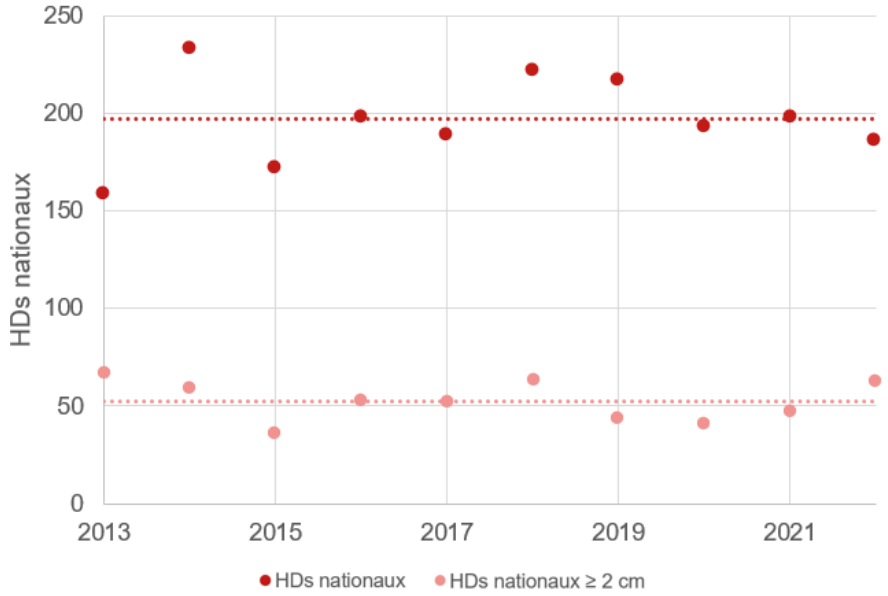


Figure 71 Variation du nombre d'HD nationaux et d'HD nationaux avec grêle d'au moins 2 cm entre 2013 et 2022. La moyenne est indiquée en ligne pointillée. Le nombre de HD nationaux a été calculé sur une période glissante de 10 jours, BD HD, ©M. Trevisani.

Les HDm avec grêlons inférieurs à 2 cm ont été exclus de l'analyse de la saisonnalité des chutes de grêle afin d'éviter un biais d'analyse associé aux données Keraunos à partir de 2018 (cf partie 0). La saisonnalité des chutes de grêle d'au moins 2 cm est similaire d'une année à l'autre, comme on peut le voir sur la Figure 72. Chaque année se retrouve ainsi coupée en deux : une première période vierge de tout HDm avec grêlons d'au moins 2 cm, et une deuxième période concentrant la quasi-totalité de ces chutes de grêle.

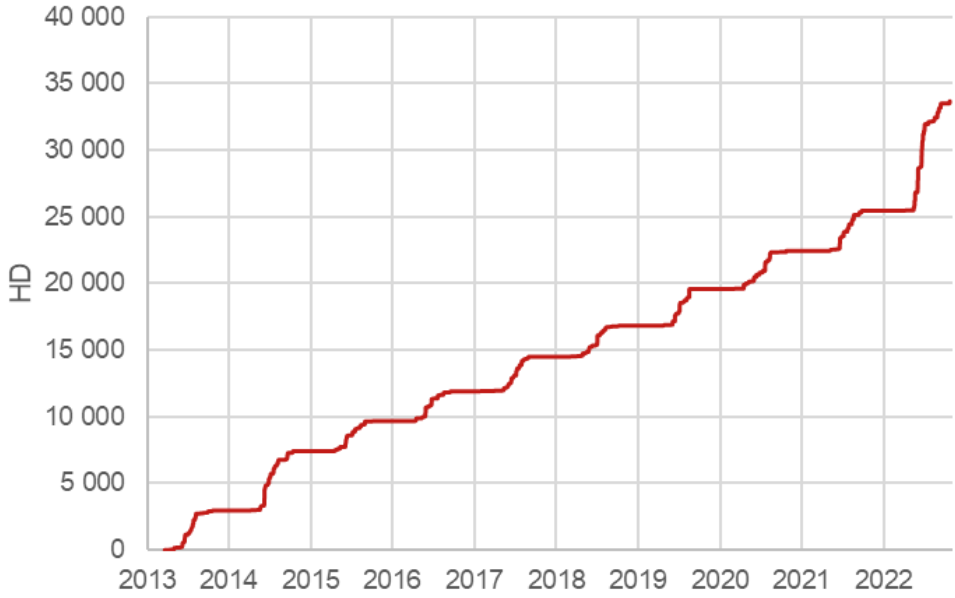


Figure 72 Cumul du nombre de HD entre 2013 et 2022 en France avec grêlons d'au moins 2 cm, BD HD, ©M. Trevisani.

En moyenne, il se produit 3 368 HDm par an avec grêlons d'au moins 2 cm sur le territoire hexagonal. Le nombre d'HDm avec grêlons d'au moins 2 cm est cependant très variable d'une année à l'autre, avec des années fortement grêligènes (2014, 2022…) et d'autres très faiblement grêligènes (2015, 2016, 2018…) déviant largement de la moyenne, mettant en évidence la très forte variabilité temporelle de la grêle. L'année 2022 (année record) enregistre ainsi près de +60% HDm d'au moins 2 cm (+24% pour l'année 2014) que la moyenne sur la période 2013-2022, contre -50% pour une année faiblement grêligène comme 2015 ou 2016.

On s'intéresse maintenant à la totalité des chutes de grêle afin d'étudier les variations interannuelles de la grêle en France. Même si les chutes de grêle peuvent se produire tout au long de l'année en France, la saisonnalité de la grêle est coupée en deux périodes, visible sur la Figure 73:

- Une première période à haute activité grêligène située entre mai et septembre. Cette période concentre 85% des HDm nationaux, ainsi que 92% des HDm (95% des chutes de grêle d'au moins 2 cm). La période étendue avril-octobre permet de passer à 98% des HDm (99% des chutes de grêle d'au moins 2 cm). L'activité grêligène est maximale entre juin et août et baisse avec l'éloignement de cette période.
- Une deuxième période à très faible activité grêligène entre octobre et avril. L'activité décroit avec l'éloignement aux bornes de la période (octobre et avril).

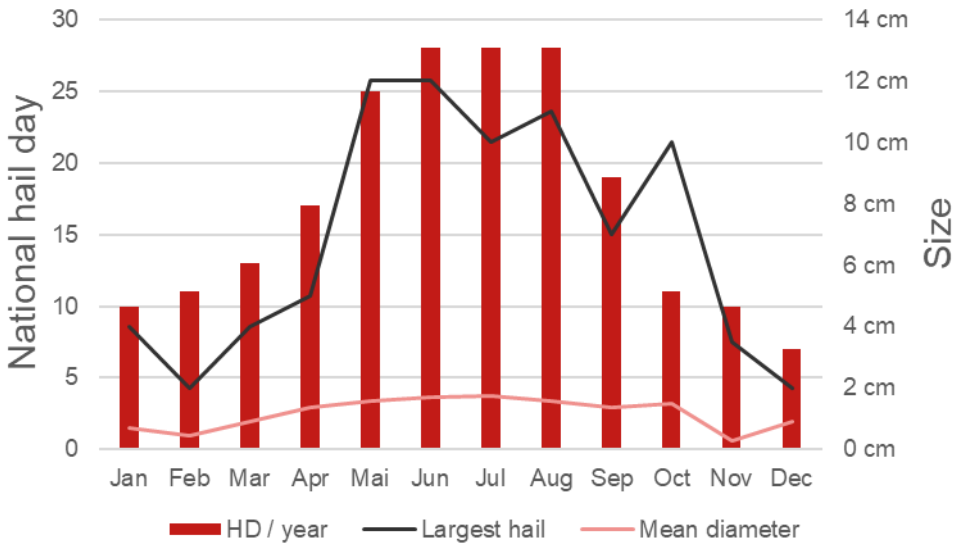


Figure 73 Distribution mensuelle de la fréquence des chutes de grêle et du diamètre maximal des grêlons, BD HD, ©M. Trevisani.

On retrouve les différentes caractéristiques moyennes des chutes de grêle en période haute et en période basse sur le Tableau 8. On constate ainsi que :

- Les HD nationaux sont deux fois plus fréquents en période haute que basse. De même, les HD avec grêle d'au moins 2 cm sont 9 fois plus fréquents en période haute.
- Les HD nationaux impactent presque 8 fois plus de communes en période haute que basse.
- Un HDm a un D_{max} deux fois plus important en moyenne sur la période haute. Les plus gros grêlons jamais recensés en France (12 cm) sont également tous tombés durant la période haute.

La saisonnalité des chutes de grêle est donc étroitement corrélée avec celle des orages convectifs.

Tableau 8 Caractéristiques moyennes de l'ensemble des chutes de grêle sur la période mai-septembre au regard d'octobre-avril, BD HD, ©M. Trevisani.

	Fréquence HD	Fréquence HD ≥ 2 cm	Communes touchées par HD	D_{max} moyen	D_{max}
Mai - Sept	24 / mois	9 / mois	81	1.6 cm	12
Oct - Avr	11 / mois	1 / mois	12	0.9 cm	10

Les modifications spatio-temporelles de la géographie des points chauds de l'activité grêligène en France hexagonale ont été étudiées sur la période avril-septembre. Avril, mois avec la plus haute activité grêligène sur la période basse, a été ajouté à la période d'étude afin de correspondre à la moitié de l'année. Cette période concentre ainsi 96% des HDm et 70% des HD nationaux. La Figure 74 montre que la couverture géographique des chutes de grêle est maximale en juin et recouvre presque l'ensemble du territoire hexagonal. On constate également que la couverture géographique des chutes de grêle baisse avec l'éloignement à juin.

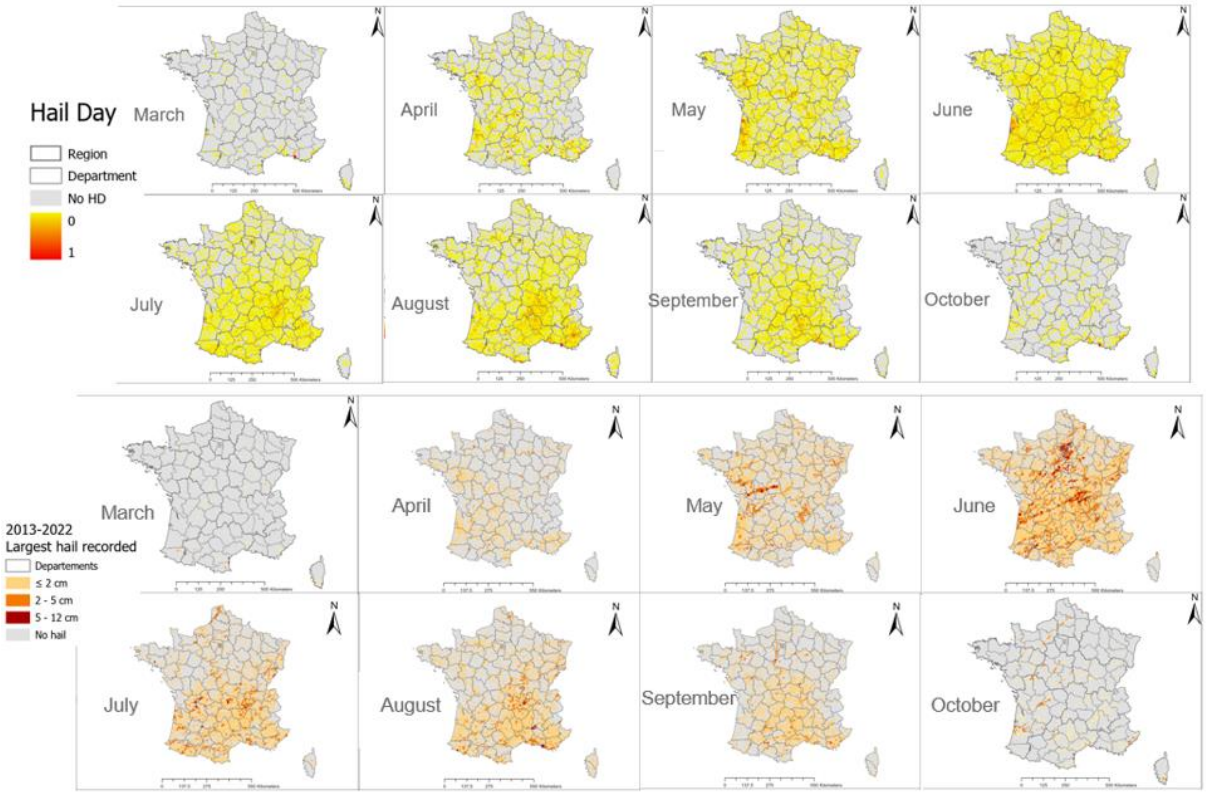


Figure 74 Variations spatio-temporelles à l'échelle de la commune de la fréquence des chutes de grêle (haut) et du diamètre maximal des grêlons (bas) sur la période mars-octobre (2013-2022). La fréquence des chutes de grêle a été normalisée au regard du maximum mensuel, BD HD, ©M. Trevisani.

Juin est ainsi clairement identifié comme le mois charnière de la grêle en France. C'est le mois où le risque grêle est le plus marqué car les chutes de grêle concernent l'ensemble du territoire et c'est le mois où l'intensité des chutes de grêle est la plus prononcée. Il existe également un changement de dynamique des chutes de grêle avant et après juin. Avant juin, les chutes de grêle affectent principalement la France selon un axe Sud-Est / Nord-Ouest, alors qu'après juin elles concernent plutôt un axe Sud-Ouest / Nord-Est. De ce fait, on peut faire l'hypothèse que les chutes de grêle semblent principalement associées à un régime plutôt de type océanique avant juin, avant d'être sous une influence grandissante du régime méditerranéen après juin. Notre étude montre également une nette distinction entre une moitié Sud particulièrement touchée et une moitié Nord plutôt épargnée par la grêle. Cette découverte est cohérente avec d'autres études menées dans toute la région

méditerranéenne et en Europe (Enno et al., 2020; Feudale and Manzato, 2014; Kotroni and Lagouvardos, 2016; Manzato et al., 2022; Taszarek et al., 2019).

Le Massif Central (en particulier sa partie Sud-Est), le Sud-Ouest de la France et la partie méditerranéenne de la Provence-Alpes-Côte d'Azur sont les secteurs les plus touchés par la grêle sur l'ensemble des mois étudiés, en fréquence et en intensité. On peut donc émettre l'hypothèse qu'une fréquence élevée de grêle entraîne une plus grande probabilité de grêlons de taille plus importante. Cette hypothèse semble se confirmer au regard de la relation entre la fréquence annuelle et le plus gros grêlon enregistré au niveau de la commune (Figure 75) et par l'analyse la fréquence et l'intensité maximale de la grêle pour l'ensemble de la France et pour chaque mois (relation linéaire forcée en 0 avec $R^2 > 0.6$ et un coefficient de Pearson moyen de 0.3).

Dmax \ Annual frequency	0-0.2	0.2-0.5	0.5+
0-2	5 003	5 447	353
2-5	2 204	9 783	4 912
5+	67	526	445

Figure 75 Relation entre la fréquence des chutes de grêle et le plus gros grêlon recensé à l'échelle de la commune entre 2013 et 2022. La couleur de la carte de densité est exprimée au regard du maximum de population (9 783), BD HD, ©M. Trevisani.

4.4 Distribution de la taille des grêlons

4.4.1 Répartition géographiques des plus gros grêlons

Dans notre classification (cf. 0), 31% des HDm en France ont été classés comme étant de "moyenne gravité", tandis que les chutes de grêle "sévères" représentaient à peine 1% du total ; environ deux tiers HDm avaient un diamètre inférieur à 2 cm, comme le montre la Figure 76.

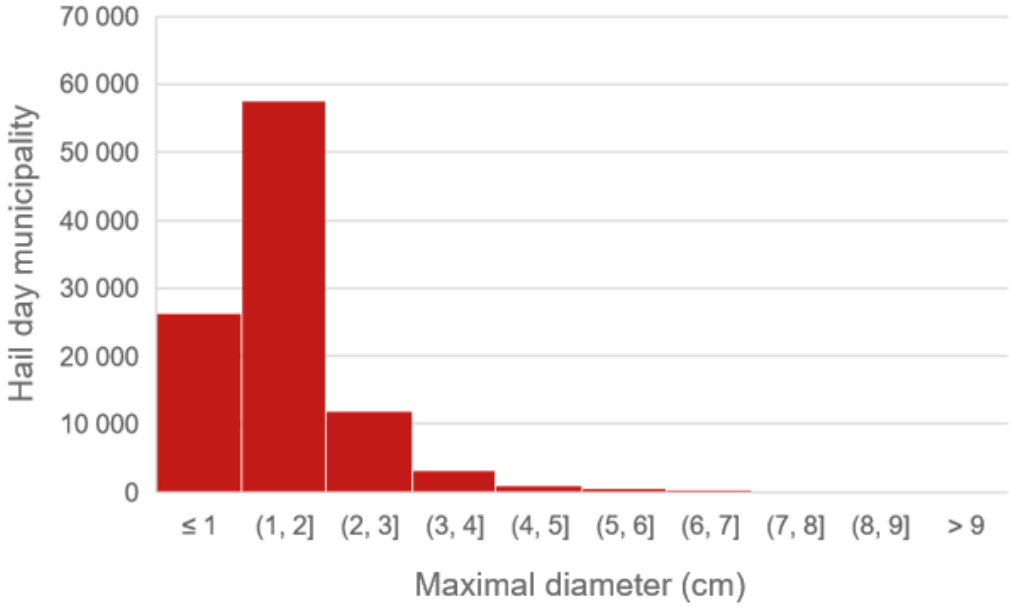


Figure 76 Distribution du D_{max} parmi tous les HDm recensés entre 2013 et 2022, BD HD, ©M. Trevisani.

On peut constater que la moitié sud de la France a en moyenne des grêlons plus gros que la moitié nord. Les plus gros grêlons sont principalement situés dans deux bandes distinctes, visible sur la Figure

77 : la première concerne l'axe Bordeaux-Suisse et la deuxième l'axe Bordeaux-Paris. On remarque que la région Île-de-France ressort sur cette cartographie, alors qu'elle n'apparait sur aucune des autres cartographies existantes de l'aléa grêle (cf chapitre 4). Cette mise en évidence de cette région est presque exclusivement liée à la tempête de grêle Ela de 2014 (6 au 10 juin 2014), induisant des grêlons de plus de 5 cm) et des dommages conséquents sur ce secteur géographique[74]. En dehors de cet évènement majeur sur cette région, les plus gros grêlons de ce secteur géographique ne dépassent pas 3-4 cm.

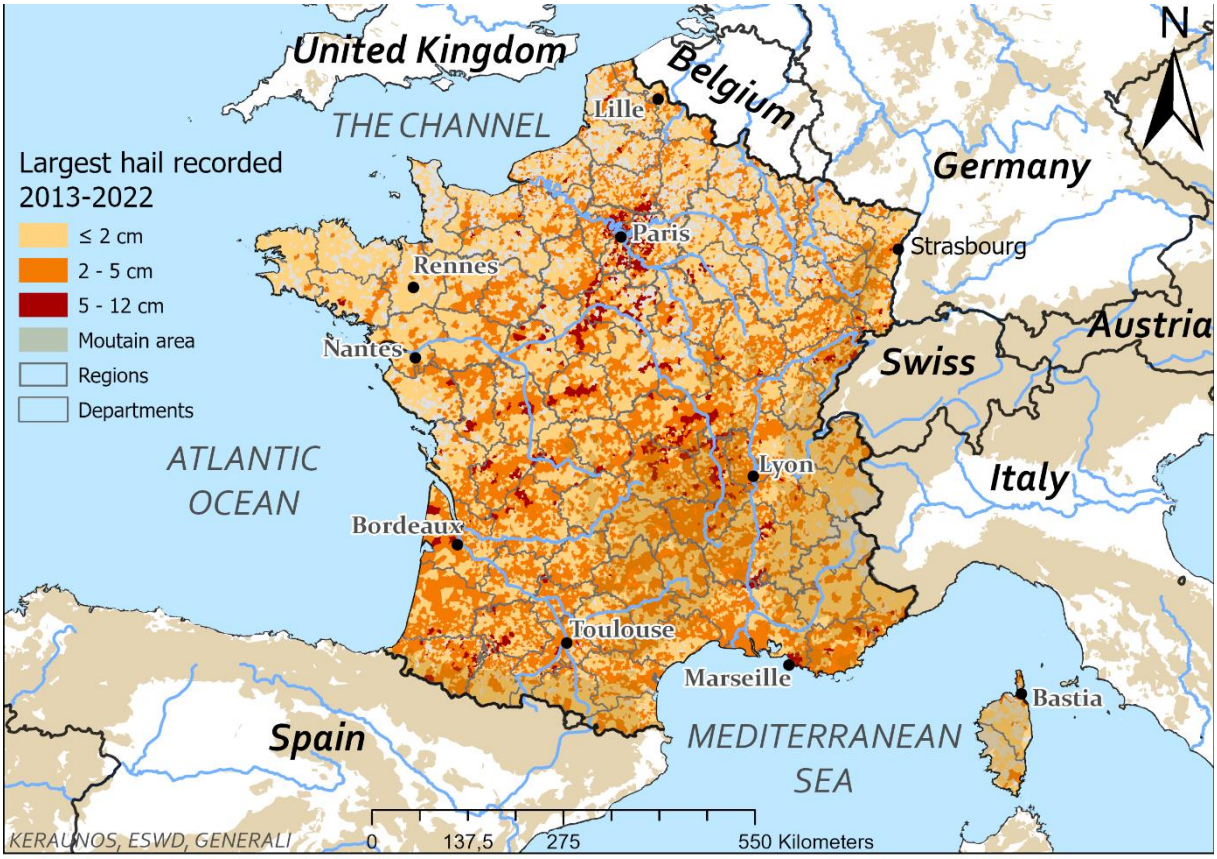


Figure 77 Plus gros grêlon recensé à la maille communale entre 2013 et 2022, BD HD, ©M. Trevisani.

4.4.2 Variation annuelle de l'intensité grêligène

Il n'y a pas de tendance linéaire significative dans l'évolution annuelle du plus gros grêlon annuel en France sur la période 2013-2022 (Figure 78). Il est cependant difficile de tirer une conclusion définitive car la période d'analyse est assez courte pour observer une tendance climatologique, surtout lorsqu'elle inclut un événement majeur (tempête Ela en 2014, grêle exceptionnelle de 2022). Néanmoins, si l'on considère la période limitée de 2016 à 2022, on peut supposer que le plus gros grêlon, au niveau national, semble augmenter de +0,8 cm chaque année ($R^2 = 0,76$). Il n'est pas possible à ce stade d'expliquer cette tendance (si elle existe) par des extrêmes grêligènes plus fréquents, plus importants, ou par un changement de la distribution de la taille des grêlons.

[74] Tempête de grêle Ela du 6 au 10 juin 2014, MRN, 2017

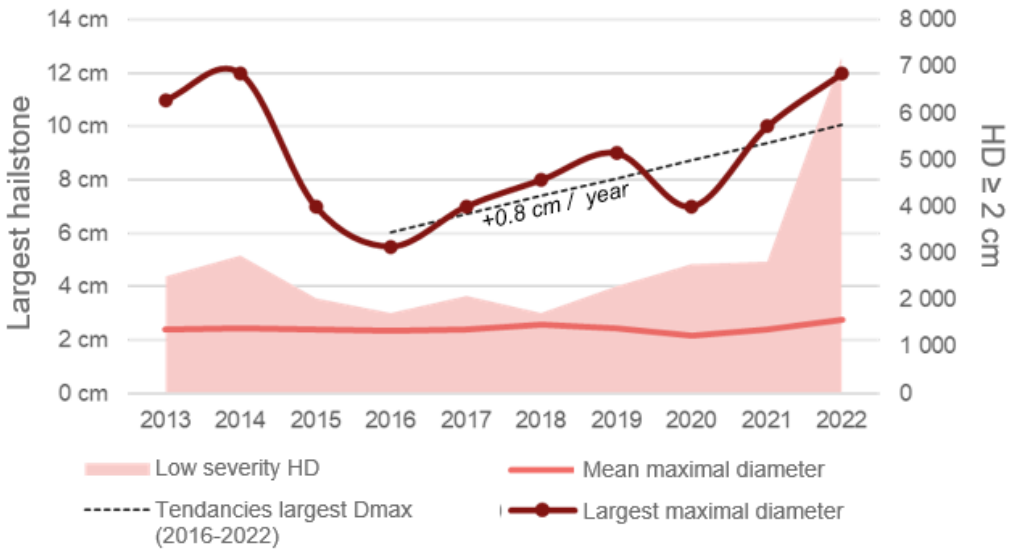


Figure 78 Distribution annuelle de la moyenne du diamètre maximal des grêlons (HD ≥ 2 cm), du plus gros grêlon et du nombre de jour de grêle avec grêlons d'au moins 2 cm de diamètre, BD HD, ©M. Trevisani.

Cependant, on observe une tendance qui semble se dessiner, assez fiable statistiquement (R^2= 0,4), concernant l'évolution du plus gros grêlon par HD national sur notre période d'étude, avec une augmentation moyenne de + 0,1 cm / an du plus gros grêlon par HD national (Figure 79).

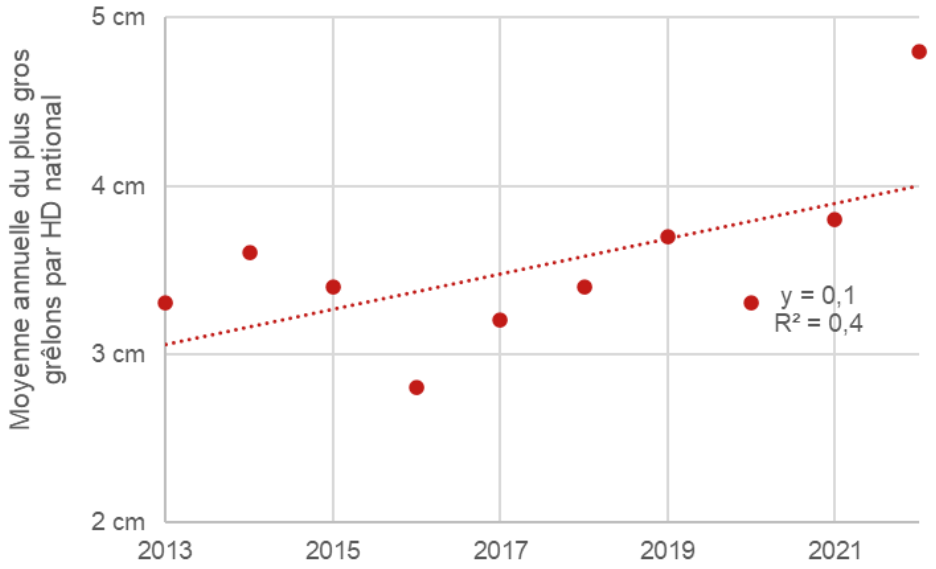


Figure 79 Variation de la moyenne annuelle du plus gros grêlon par HD national entre 2013 et 2022, BD HD, ©M. Trevisani.

4.4.3 Evolution mensuelle de l'intensité grêligène

On n'observe également aucune tendance significative concernant l'évolution des plus gros grêlons mensuels d'une année à l'autre (Figure 80). Cependant, on constate que les plus gros grêlons tombent généralement toujours durant les mois de juin, juillet et août, bien que les plus gros grêlons jamais enregistrés en France (12cm) soient tombés en mai et juin au cours des années 2014 et 2022. Ces résultats sont en accord également avec des études récentes menées autour du bassin méditerranéen (Laviola et al., 2022; Levizzani, 2023).

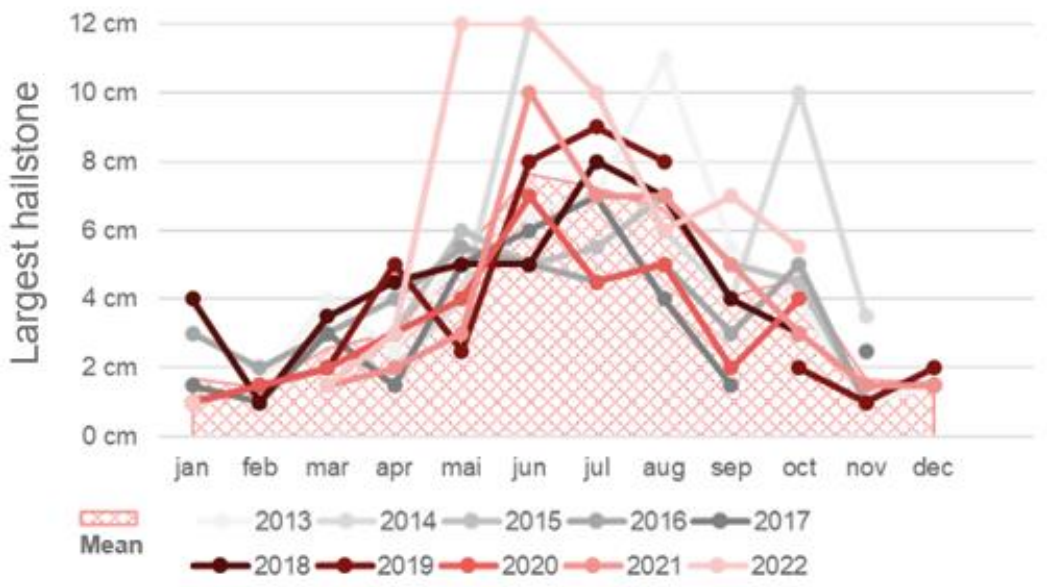


Figure 80 Variation temporelle du plus gros grêlon recensé en France chaque mois, BD HD, ©M. Trevisani.

4.5 Distribution de la fréquence des chutes de grêle

4.5.1 Chutes de grêle de moyenne gravité

On constate une augmentation du nombre de HDm avec grêlons de plus de 2 cm sur notre période d'étude, avec une explosion lors de l'année 2022. Cette tendance est encore plus robuste statistiquement sur la période récente de 2018-2022, avec une moyenne de +230 HDm / an (R^2 0,69) visible sur la Figure 81.

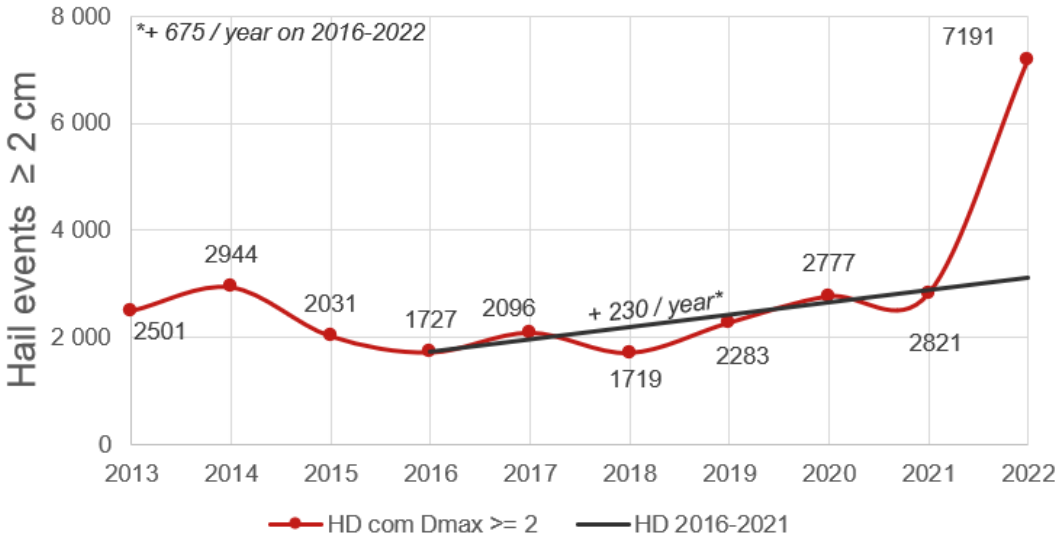


Figure 81 Variation annuelle du nombre d'HDm de moyenne gravité (≥ 2 cm), BD HD, ©M. Trevisani.

Cette augmentation s'explique principalement par des HDm de moyenne gravité touchant de plus en plus de communes distinctes, plutôt qu'une augmentation de la fréquence de cette catégorie d'HDm dans des communes déjà impactées initialement. En effet, sur la période 2016-2022, on enregistre +566 municipalités distinctes affectées par an (+230 sur la période 2016-2021), visible sur la Figure 82.

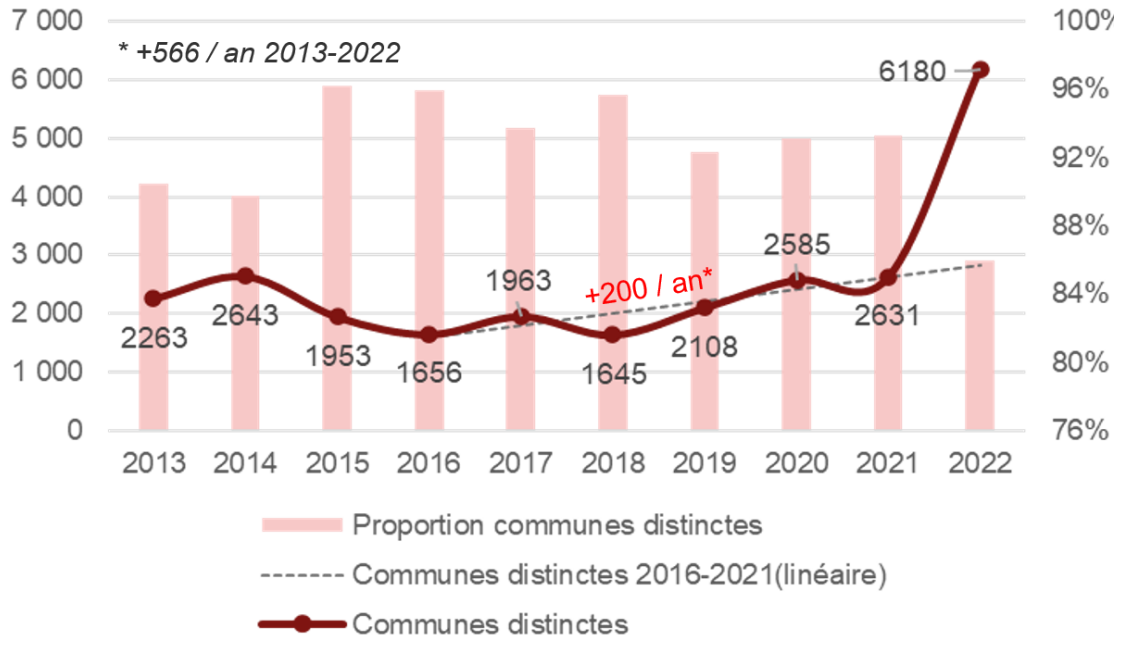


Figure 82 Evolution du nombre de communes distinctes touchées par une chute de grêle avec grêlons de plus de 2 cm, BD HD, ©M. Trevisani.

Ce constat est également clairement visible sur la Figure 83 illustrant l'évolution du nombre de HDm par commune avec grêlons de plus de 2 cm par commune sur les périodes 2013-2017 et 2018-2022. Dans le cas où il y aurait eu le même nombre d'HDm par commune sur les deux périodes, la figure mettrait en évidence une diagonale ([0;0] vers [9;9]). Or, ce n'est clairement pas le cas. On constate plutôt une diagonale écrasée sur la période récente de 2018-2022 ([0;0] vers [4;11]), signifiant que la plupart des communes faiblement touchées par des chutes de grêle de plus de 2 cm sur la période 2013-2017 ont ainsi été bien plus touchées sur la période 2018-2022.

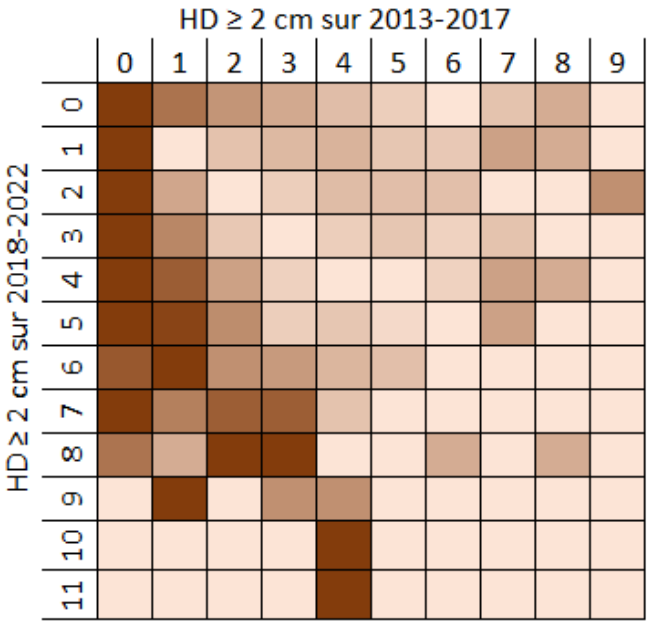


Figure 83 Carte de densité sur le nombre de HD sur la période 2013-2017 au regard de 2018-2022. La couleur est exprimée en fonction de la plus grande population du couple ligne-colonne, BD HD.

La plupart des HDm de moyenne gravité surviennent entre mai et août (90% en moyenne), et il n'y a pas de tendance claire concernant une augmentation de la fréquence des HDm de moyenne gravité

sur cette période de haute activité ; cette augmentation est donc une tendance générale plus qu'une tendance observée sur une période temporelle restreinte (Figure 84).

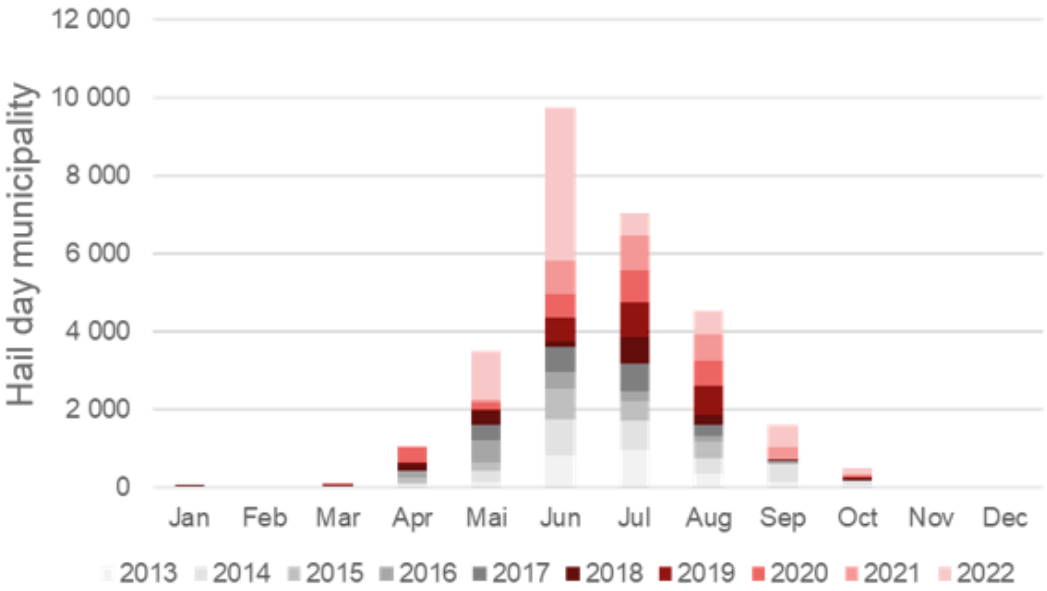


Figure 84 Distribution mensuelle du nombre de HDm avec grêlons de plus de 2 cm, BD HD, ©M. Trevisani.

Les dates distinctes avec grêle de plus 2 cm à l'échelle du département se produisent principalement sur la diagonale reliant le Sud-Ouest au Nord-Est de la France (Figure 85). La partie orientale et méridionale du Massif Central concentre la plus grande fréquence de ces événements à l'échelle du département en France, avec même certains départements pouvant enregistrer jusqu'à 10 dates distinctes par an avec grêle de plus de 2 cm.

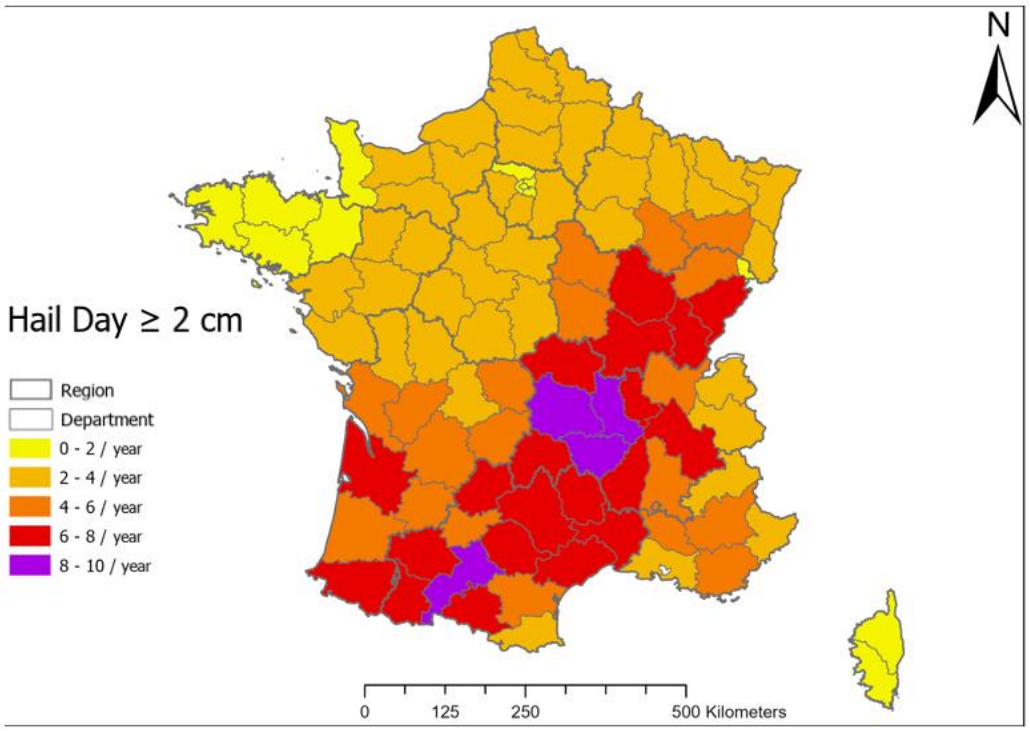


Figure 85 Répartition géographique de la fréquence des chutes de grêle de moyenne gravité à l'échelle de la commune entre 2013 et 2022, BD HD, ©M. Trevisani.

4.5.2 Chutes de grêle sévères

On observe une augmentation de +32 % des chutes de grêle sévère (grêlons de plus de 5 cm) sur la période 2018-2021 par rapport à celle de 2013-2022 (+190 % si l'on considère 2018-2022), visible sur la Figure 86. La nature exceptionnelle de l'année 2022 est également particulièrement mise en évidence sur cette figure, avec 2022 qui enregistre presque autant d'HDm sévère que sur la période 2013-2021.

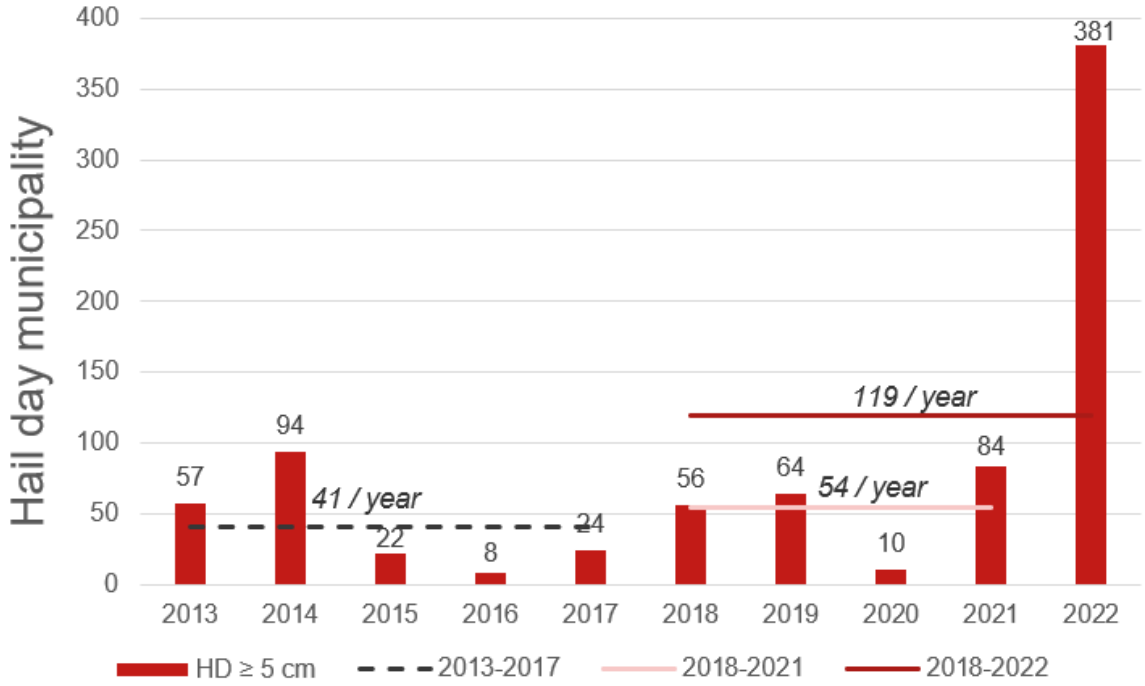


Figure 86 Evolution annuelle du nombre de HD sévères entre 2013 et 2022, BD HD, ©M. Trevisani.

Cette augmentation peut s'expliquer par un doublement de la proportion HDm sévère vis-à-vis des HDm de plus de 2 cm, avec une moyenne annuelle de 1,6 % sur la période 2013-2017 contre 2,9 % sur la période récente de 2018-2022 (2,4 % si l'on exclut 2022), visible sur Figure 87.

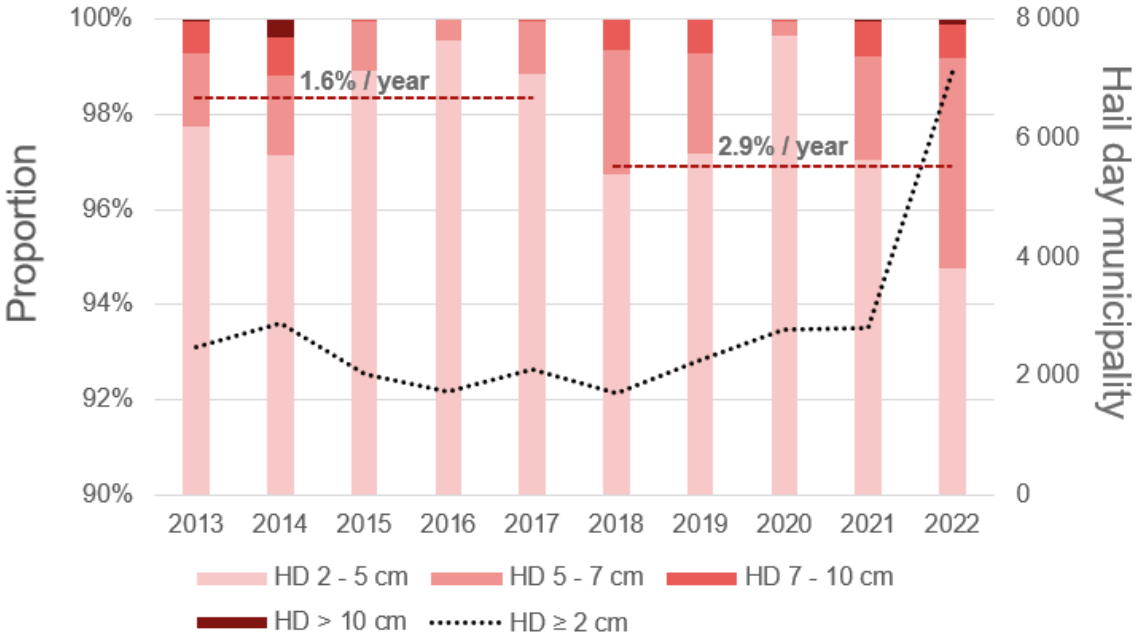


Figure 87 Répartition annuelle du diamètre maximal des HDm parmi les évènements de plus de 2 cm à l'échelle de la commune. Le pourcentage correspond à la proportion de HDm sévères (≥ 5 cm) parmi les HDm d'au moins 2 cm, BD HD, ©M. Trevisani.

Ces chutes de grêle sont également situées dans les mêmes zones géographiques que celles de moyenne gravité (Figure 88). Une fois de plus, le Centre-Est de la France se distingue des autres secteurs géographiques, avec une fréquence annuelle moyenne comprise entre 0,7 et 0,9 dates distinctes (niveau départemental) avec grêlons de plus de 5 cm pour les départements de la Loire, du Rhône, de Saône-et-Loire et du Doubs.

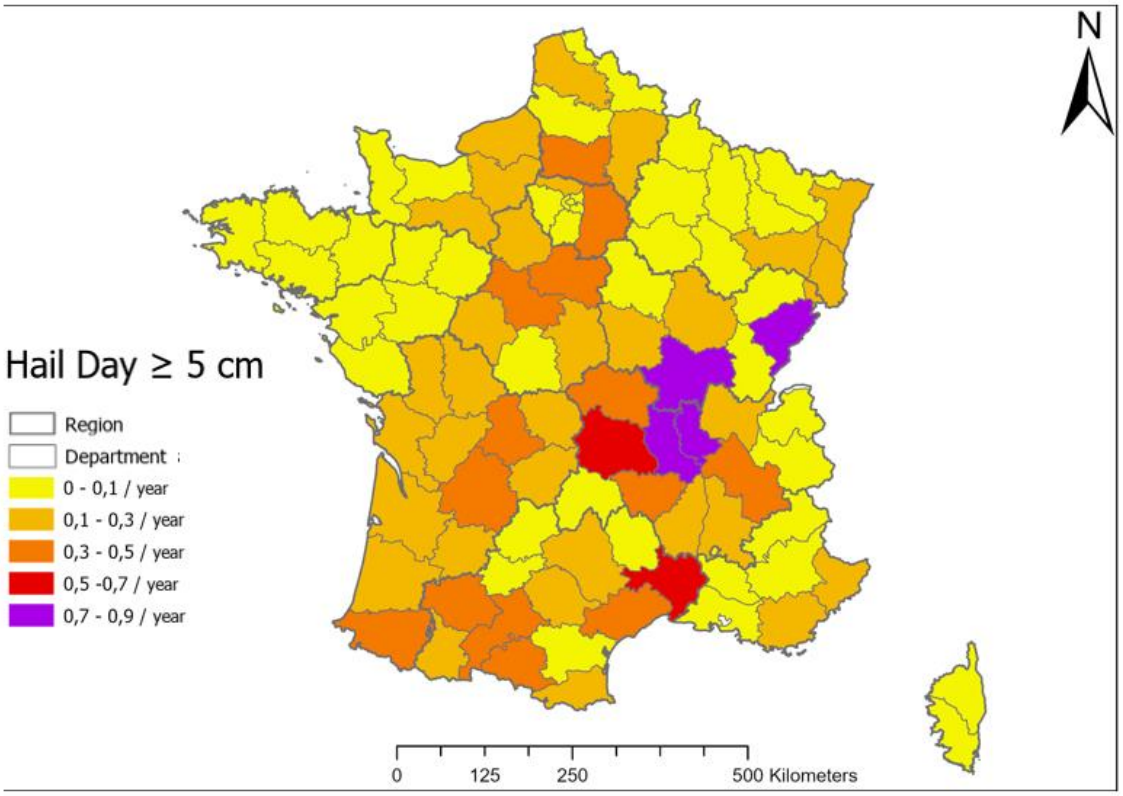


Figure 88 Fréquence annuelle à l'échelle du département des chutes de grêle avec grêlons de plus de 5 cm, BD HD, ©M. Trevisani.

4.6 Conclusion du chapitre 4

Une base de données grêle a été constituée à partir de données assurantielles (Generali France) et événementielles (ESWD et Keraunos) entre 2013 et 2022, sous l'hypothèse que le croisement et la multiplicité des sources permet d'avoir la plus grande exhaustivité possible des chutes de grêle tout en limitant les biais associés à chaque source.

On constate ainsi une augmentation notable de la fréquence des chutes de grêle à l'échelle communale. Cette augmentation est particulièrement marquée concernant les chutes de grêle sévères à l'échelle de la commune (> 5 cm), notamment au cours de la période récente. On observe également une augmentation de la proportion de chutes de grêle sévères par rapport à l'ensemble des chutes de grêle avec grêlons d'au moins 2 cm, soulignant ainsi le changement de dynamique des chutes de grêle avec une augmentation plus marquée de la fréquence des chutes de grêle les plus intenses.

Juin est le mois charnière de la grêle en France. C'est en effet au cours de ce mois où le risque de chutes de grêle est le plus marqué en France (fréquence et intensité), avec des chutes de grêle pouvant impacter l'ensemble du territoire. On constate également un changement de dynamique des chutes de grêle avant et après juin. Avant juin, les chutes de grêle semblent principalement soumises à un régime de type océanique et concernent plutôt un axe Pyrénées – Vosges, alors qu'elles semblent plutôt soumises à un régime méditerranéen après juin, impactant plutôt le Sud-Est et le Centre de la France.

Le Centre-Est de la France se démarque comme principale région grêlifère de France, autant au regard de la fréquence des chutes de grêle que de l'intensité de ces dernières. C'est également sur cette région qu'on constate la plus haute fréquence des chutes de grêle, et ce quel que soit l'intensité de

ces dernières. Ce constat met ainsi en évidence l'importance de la surveillance des évènements grêligènes, ainsi que de la préparation de la population dans ces zones potentiellement très vulnérables.

Cette étude climatique des chutes de grêle sur la période restreinte de 2013-2022 donne ainsi des premiers éléments de réponses précieux pour les assureurs et les décideurs politiques, dans le but de gérer au mieux les impacts de la grêle sur la population et les infrastructures françaises. L'analyse des tendances temporelles, des patterns géographiques, ainsi que de la distribution des chutes de grêle constitue la base dans notre objectif de caractériser l'aléa et du risque grêle sur notre territoire.

Chapitre 5 : Estimation de l'endommagement sur le portefeuille Generali lors d'un évènement grêle intense

Les événements de grêle constituent l'une des principales sources de pertes pour les assureurs, engendrant souvent des dommages conséquents sur les biens assurés tel que les bâtiments, les automobiles et les cultures. La capacité à évaluer rapidement et avec précision le volume de sinistralité ainsi que l'impact financier d'un événement de grêle est essentiel pour avoir une gestion efficace des sinistres pour un assureur, et ainsi limiter les frais de gestion de sinistres tout en améliorant l'expérience client.

Dans ce chapitre 6, nous nous consacrerons au dimensionnement rapide d'un événement grêligène et son impact sur le portefeuille de Generali France. En utilisant des données issues des rapports journaliers de Keraunos, nous avons pour objectif d'estimer le nombre de sinistres post-événement à J+1.

Pour atteindre cet objectif, nous commencerons par analyser la vulnérabilité des cultures, des bâtiments et des automobiles face aux chutes de grêle. Cette analyse nous permettra de comprendre les différents niveaux de risque associés à chaque type de bien assuré. Ensuite, nous expliquerons pourquoi nous avons fait le choix de nous focaliser sur le produit DAB, et développerons le modèle d'estimation du volume de sinistre DAB à partir de la taille maximale des grêlons observés dans les rapports journalier Keraunos. Pour finir, nous appliquerons ce modèle sur différentes journée afin de caractériser les performances et la précision du modèle.

5.1 Analyse de la vulnérabilité des biens exposés à la grêle

5.1.1 La vulnérabilité des cultures

La résistance des cultures aux grêlons dépend de leur avancement physiologique (Sánchez et al., 1996), la vulnérabilité d'une culture face aux chutes de grêle n'est donc pas constante dans le temps ; plus une culture est proche de sa maturité, plus elle est sensible aux chutes de grêle. De plus, cette vulnérabilité est de plus également dépendante de la nature de la culture considérée ; les vignes et l'arboriculture sont ainsi particulièrement plus sensible aux chutes de grêle, au regard de la fragilité des fruits, que les grandes cultures comme le blé, l'orge, le colza (Latrach, 2013).

L'endommagement des cultures lors d'une chute de grêle est dépendante de l'énergie cinétique totale par unité de surface (J/m²), plutôt qu'être uniquement dépendante de l'énergie cinétique individuelle d'un grêlon (J), fonction du diamètre du grêlon et de la vitesse du vent environnant (Morgan and Towery, 1976).

Les chutes de grêle peuvent produire deux types de dommages aux cultures[75] :

- Des dommages primaires, comprenant une défoliation importante, le déchirement des feuilles, la rupture des branches et des tiges tendres, le renversement des plantes, le décollement de l'écorce, des lésions sur les tiges, des fissures sur les fruits, une forte chute de fleurs et de fruits.
- Des dommages secondaires, incluant le dépérissement ou le flétrissement des parties endommagées de la plante, la perte de hauteur de la plante, des taches, des ecchymoses, une

[75] Hailstorms : Cause, damage and post hail management in agriculture, National Institute of Abiotic Stress Management, 2014

décoloration des parties endommagées telles que les feuilles et les fruits affectant leur qualité, la pourriture des fruits endommagés et/ou des tiges et branches tendres en raison d'infections fongiques et bactériennes.

On peut voir plusieurs exemples d'endommagements associés aux chutes de grêle sur la Figure 89.



Figure 89 Exemple de dommages associés aux chutes de grêle sur les grandes cultures (2 photos du haut), sur le maraichage (2 photos du milieu) et sur l'arboriculture (4 photos du bas), ©National Institute of Abiotic Stress Management, 2014.

5.1.2 La vulnérabilité des bâtiments

En France, les éléments les plus vulnérables d'un bâtiment sont sa charpente/couverture, la menuiserie (comme les parties vitrées), et l'embellissement et les finitions du bâtiment. La Mission Risque Naturel (MRN) y consacre également sa lettre d'information n°34[76] et identifie les principaux composants d'une maison individuelle impactés lors d'une chute de grêle (Figure 90), en croisant les rapports d'expertise post sinistre avec leur base de données évènementielles de chutes de grêle.

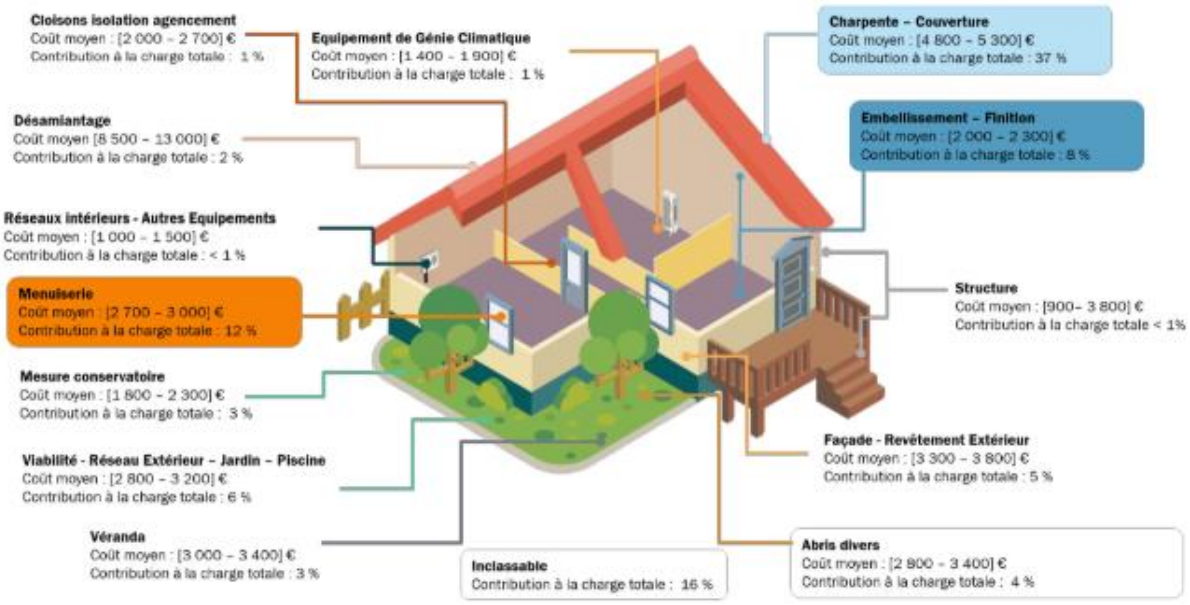


Figure 90 Composants d'une maison individuelle les plus impactés lors d'une chute de grêle, ©Lettre d'information n°34, MRN, 2020

La vulnérabilité d'un bâtiment aux chutes de grêle dépend également du type de matériaux utilisés lors de la construction du bâtiment. Cela est particulièrement vrai concernant les matériaux utilisés dans la réalisation de la toiture. En Suisse, un répertoire de protection contre la grêle[77] fournit des informations concernant la résistance aux chutes de grêle de matériaux de construction. La résistance de ces matériaux inscrits dans ce répertoire est déterminée lors d'essais réalisés en laboratoires dans des conditions spécifiques par des instituts d'essais reconnus.

En analysant ce répertoire avec d'autres études (Brown et al., 2015; Czajkowski and Simmons, 2014; Flüeler et al., 2008; Lucy and Petty, 2021; Petty, 2021; Porter, 2022), il est donc possible d'estimer la résistance générale de certains matériaux de construction, même si cette résistance est directement dépendante de l'épaisseur des matériaux utilisés ; une ardoise de 3 mm sera plus vulnérable qu'une ardoise de 7 mm par exemple.

Concernant les toitures, on recense :

- L'utilisation de tuiles en terre cuite. Les tuiles en terre cuite sont populaires pour leur esthétique et leur durabilité, mais elles sont sensibles aux dommages causés par la grêle en raison de leur nature fragile, elles peuvent en se fissurer ou se casser sous l'impact des grêlons. Les grêlons de taille moyenne à grande peuvent causer des dommages significatifs à ce type de toiture dès 3 cm en fonction des caractéristiques de la tuile.

[76] Lettre d'information n°34, MRN, 2020
[77] https://www.repertoiregrele.ch/maitres-d-ouvrages-architectes.html

- L'utilisation d'ardoises. Les ardoises sont connues pour leur durabilité et leur bonne résistance aux chocs mécaniques associée à une chute de grêle. Elles peuvent cependant se briser ou se fissurer, comme les tuiles en terre cuite, lorsque les grêlons dépassent 4 cm.
- L'utilisation de métal comme recouvrement entraîne une toiture durable, facile à entretenir et offre une bonne protection contre les intempéries, en particulier la grêle. La toiture peut cependant subir des dommages esthétiques en cas de grêle (bosses / déformation), et peut même être perforée lors d'une chute de grêle particulièrement sévère.
- L'utilisation de bardeaux d'asphalte. Les bardeaux d'asphalte sont couramment utilisés pour leur coût abordable et leur installation facile, et sont particulièrement résistants aux chutes de grêle autant sur l'aspect que sur la fonctionnalité, même lorsque les grêlons atteignent 5 cm de diamètre.
- L'utilisation de fibrociment permet d'avoir une toiture assez résistante aux chutes de grêle, grâce à sa composition à base de ciment renforcé de fibres. En fonction de l'épaisseur et du montage de la toiture, celle-ci peut enregistrer des dommages dès lors que les grêlons dépassent les 3 cm de diamètre, avec par exemple des fissures, des bris ou des déformations sous l'impact. Cependant, cette toiture possède généralement la présence d'amiante. De ce fait, une dégradation de la toiture peut entraîner une libération d'amiante au sein du bâtiment, entraînant ainsi une problématique sanitaire conséquente. De plus, la présence d'amiante sur un lieu sinistré entraîne des contraintes réglementaires lors de travaux et l'obligation de réaliser un processus de désamiantage[78]. Tous ces éléments entraînent ainsi un surcoût de la charge sinistre. Les sinistres grêle les plus couteux de Generali France (plusieurs millions d'euros), concernent tous une entreprise avec une toiture en fibrociment.
- L'utilisation de bitume sur les toitures plates concerne principalement les locaux industriels et commerciaux, ainsi que les maisons modernes. C'est la toiture la plus résistante aux chutes de grêle, et ne recense aucun dommage subis même lorsque les grêlons atteignent 6,4 cm de diamètre (Greenfeld, 1969).

Concernant les types de façades, on recense :

- Celles en bois testées dans cette base de données (raboté en bois naturel d'acacia) peuvent ainsi observer des dommages lorsque les grêlons sont de plus de 3 cm.
- Celles en pierres naturelles sont particulièrement résistantes aux chutes de grêle.
- Celles en bêton sont également très résistantes aux chutes de grêle, et résistent à des grêlons allant jusqu'à 5 cm (pas de test réalisé sur des grêlons supérieurs).

Il est également important de noter que l'état de la toiture et de la façade conditionne l'évolution de la vulnérabilité des éléments. Une toiture ou une façade mal entretenue (présence de mousse…) entraîne ainsi une augmentation de la vulnérabilité de ces éléments. On peut voir plusieurs exemples de dégâts sur bâtiments sur la Figure 91. Pour finir, la conception structurelle, comme les toits inclinés, peut permettre de réduire les dommages d'une chute de grêle, en permettant à la grêle de rebondir plutôt que de percer.

[78] Lutte contre l'amiante, écologie.gouv, 2021



Chute de grêle sur toit en tuiles ©Roy Whitaker



Chute de grêle sur toit en ardoise ©France Télévisions



Chute de grêle sur toit en fibrociment ©Réussir.fr



Chute de grêle sur une façade ©infodiag.fr

Figure 91 Exemples de dommages lors d'un épisode grêle endommageant des bâtiment

Il existe également de nouveaux éléments structurels au sein des bâtiments qui augmentent la vulnérabilité générale de ces derniers aux chutes de grêle. Ces nouveaux enjeux ont notamment fait leur apparition dans le cadre de la lutte contre le réchauffement climatique (amélioration de la consommation et de l'isolation des bâtiments). On recense ainsi :

- L'apparition de volets en PVC (roulants ou non), dont l'aspect esthétique ne résiste pas à des grêlons de plus de 2 cm de diamètre même s'ils continuent d'être fonctionnel. Ainsi, il est plus intéressant lors d'une chute de grêle de laisser ses volets en PVC ouverts car une vitre possède une résistance supérieure à ces derniers ; une vitre peut ainsi résiste à des grêlons de 3 cm, certaines vitres résistants même à des grêlons de 5 cm (verre plat de plus de 8 mm d'épaisseur). Cependant, si les volets sont en bois, il est plus intéressant de fermer ses volets, le bois étant plus résistant qu'une vitre lors d'une chute de grêle.
- L'apparition de panneaux photovoltaïques sur la toiture des bâtiments, particulièrement sensibles aux chutes de grêle[79] (Majdi et al., 2021; Moore and Wilson, 1978). De nos jours, la norme internationale IEC 61215[80] décrit les essais et les critères de performance auxquels les modules photovoltaïques doivent répondre pour garantir leur fiabilité et leur sécurité dans des applications réelles. Les panneaux solaires doivent donc ainsi résister à la chute d'un grêlon de 25mm de diamètre à une vitesse de 23 m/s avec 10 points d'impacts pour être certifiés.

[79] Built to Last : Insights from NREL's 2024 Photovoltaic Reliability Workshop, kWH analytics, 2024
[80] La certification des panneaux DualSun couvre-t-elle les risques de grêle ?, DualSun

- L'apparition de la méthode d'isolation thermique par l'extérieur, particulièrement vulnérable à la grêle avec l'apparition d'impacts circulaires dès 2 cm de diamètre, ainsi que des bosselures directement au niveau de l'impact (Michel et al., 2020).

On peut voir quelques exemples de dégâts sur ces nouveaux enjeux du risque grêle sur la Figure 92.



Chute de grêle sur volets en PVV ©Xavier Leoty



Chute de grêle sur volets roulants en aluminium ©repertoiregrele.ch



Chute de grêle sur ombrières avec panneaux solaires ©Philippe Greillier

Figure 92 Exemples d'endommage associés aux chutes de grêle sur des nouveaux enjeux du risque grêle

5.1.3 La vulnérabilité des automobiles

La vulnérabilité d'une automobile au regard des chutes de grêle varie en fonction des composants impactés (Josevski et al., 2013; Schmid et al., 2024; Webb et al., 2001). La partie la plus vulnérable d'une automobile correspond à la carrosserie de l'automobile, cette dernière étant généralement fine et en matériel composite ; elle peut ainsi être cabosser dès lors que les grêlons dépassent 1,5 cm, impactant directement sur l'esthétique du véhicule. La partie vitrée des véhicules est également vulnérable à la grêle, et peut être endommagé avec des grêlons dépassant 3 cm. Lorsque les grêlons sont suffisamment importants (plus de 5 cm), ils peuvent également endommager le châssis et les rétroviseurs du véhicule, avec des dégâts majeurs sur le reste de ce dernier (pare-brise fissuré voir explosé…). On peut voir des exemples de dégâts associés à une chute de grêle sur des automobiles sur la Figure 93.

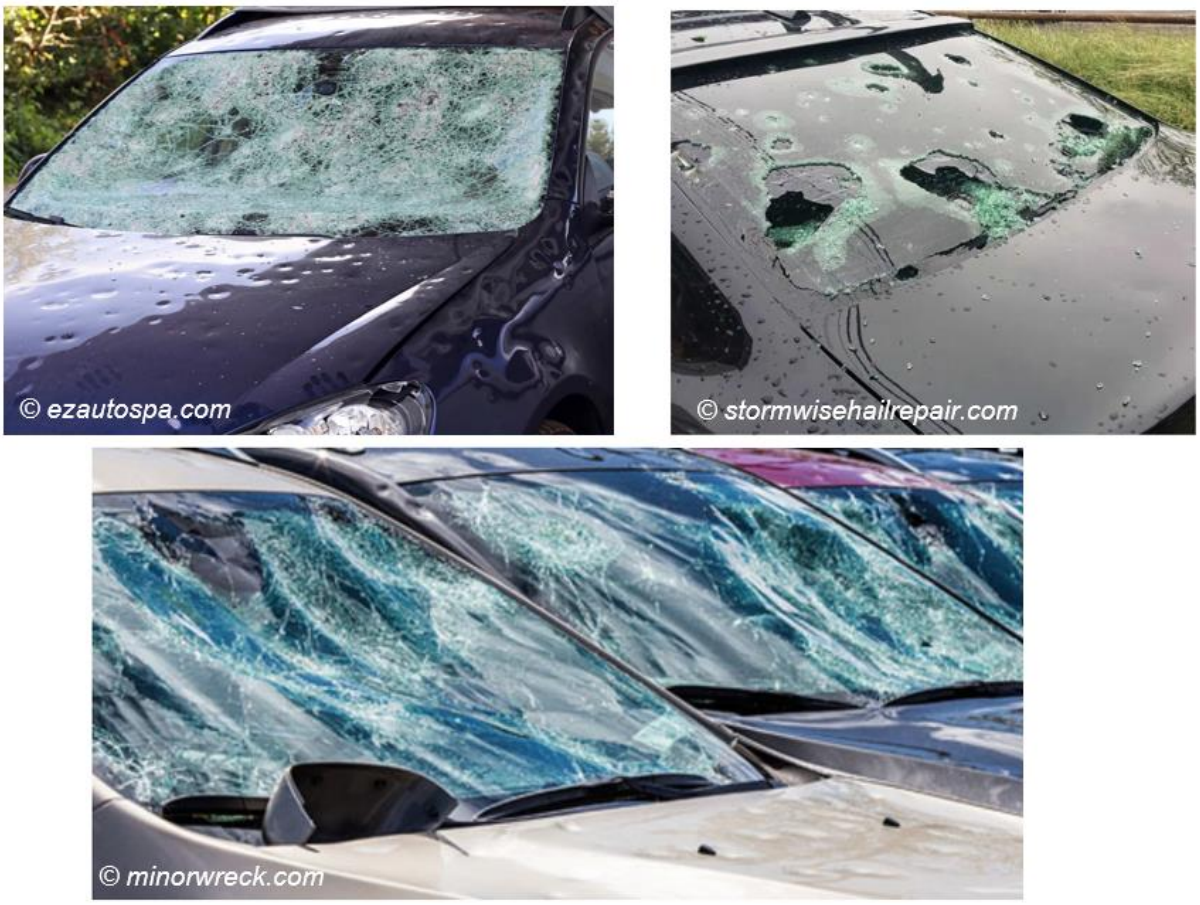


Figure 93 Exemples d'endommagement (carrosserie, parties vitrées…) associé à des chutes de grêle sur véhicule

5.2 Modèle d'estimation de la sinistralité grêle

Il existe plusieurs modèles d'estimation de l'endommagement associés à une chute de grêle. Ces modèles se focalisent généralement sur des proxy (paramètres météorologique , images, échos radars…) comme marqueur de l'aléa grêle, et se focalisent uniquement sur un secteur : le secteur agricole (Gobbo et al., 2021; Ha et al., 2022; Zhao et al., 2012), le secteur automobile (Hohl et al., 2002b) et le secteur de l'immobilier (Ackermann et al., 2024; Brown et al., 2015).

Cependant ces approches, parfois limité en lien avec des imprécisions associée à la taille des grêlons et la localisation de l'évènement, nécessitent l'utilisation de données non disponible sur le sol de la France hexagonale. C'est pourquoi nous avons fait le choix de réaliser notre propre modèle d'estimation de sinistralité grêle, à partir de notre base évènementielle et des rapports grêle journaliers fournis par Keraunos dans le cadre de notre abonnement chez Generali France.

Nous avons fait le choix de nous concentrer uniquement sur l'estimation du volume de sinistres grêle plutôt qu'une estimation du coût de l'évènement. En effet, l'estimation de l'endommagement d'un contrat à partir de la taille des grêlons et des caractéristiques du bien assuré n'a pas été possible au regard de la faible volumétrie des données disponibles.

5.2.1 Périmètre d'étude et pré-traitement des données Generali

La réalisation d'un modèle d'estimation de la sinistralité grêle est dépendante de la robustesse de la connaissance de la sinistralité grêle, mais également celle de l'exposition du portefeuille de Generali France. Il est difficile pour une entreprise comme Generali France de conserver un historique robuste de son exposition, au regard du volume (plusieurs millions de contrats actif par an) et de la complexité des données (différents types de biens assurés, fusion – acquisition d'entreprise réduisant la qualité des données…).

C'est dans cet optique que nous avons fait le choix d'entraîner notre modèle sur l'année 2022, année grêle exceptionnelle, dans le but d'accéder à une exposition robuste (car récente) tout en ayant un volume important de données sur l'ensemble des gammes d'intensité des chutes de grêle à l'aide de la BD HD. Ensuite, nous avons réalisé un calibrage dynamique de notre modèle sur 19 dates sélectionnées en 2021 (10 dates les plus sinistrées, 5 dates autour de la médiane, 5 dates les moins sinistrées mais avec au moins 2 sinistres). La Figure 94 illustre le principe de fonctionnement général du modèle, ayant pour objectif d'estimer le volume de sinistre provoqué par un évènement grêle uniquement.

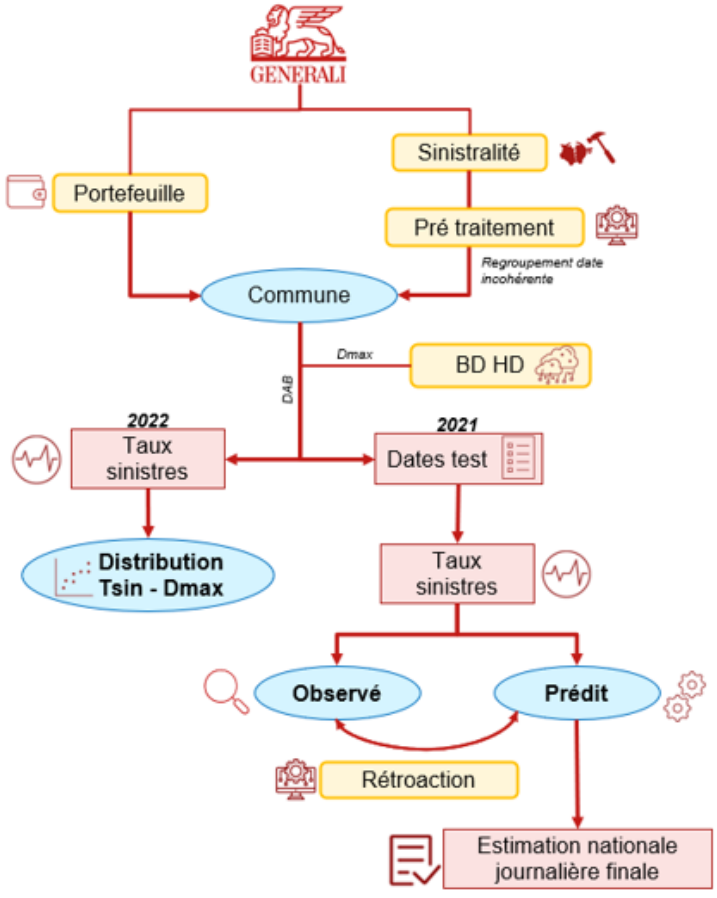


Figure 94 Schéma présentant les différentes étapes de l'élaboration du modèle d'estimation de la sinistralité grêle, ©M. Trevisani.

Les données de sinistralité grêle de Generali France peuvent être soumises à des erreurs sur la déclaration de la date du sinistre si ce dernier s'est produit durant la nuit ou une absence des propriétaires. Afin de limiter ce biais et d'entraîner notre modèle sur des données fiables, nous avons réalisé un pré-traitement des données de sinistralité ayant pour objectif de regrouper en un seul évènement les sinistres grêle présents dans un intervalle de temps prédéfini au sein d'une même

commune ; la date réelle de sinistre estimée correspond ainsi à la date avec le plus de sinistre, et nous avons fait le choix d'attribuer le plus grand diamètre de grêlon possible sur cette période dans le cas où plusieurs chutes de grêle étaient renseignées. A travers la distribution du regroupement d'HDm en fonction de la période temporelle choisie (Figure 95), nous avons fait le choix de considérer tous sinistres grêle présents sur une période glissante de 10 jours comme induits par une unique chute de grêle. On observe en effet une légère cassure de la distribution sur la période de 10 jours et de 15 jours, mais la période de 15 jours nous paraissait trop importante pour être retenue au regard de l'analyse de la récurrence des chutes de grêle à l'échelle de la commune.

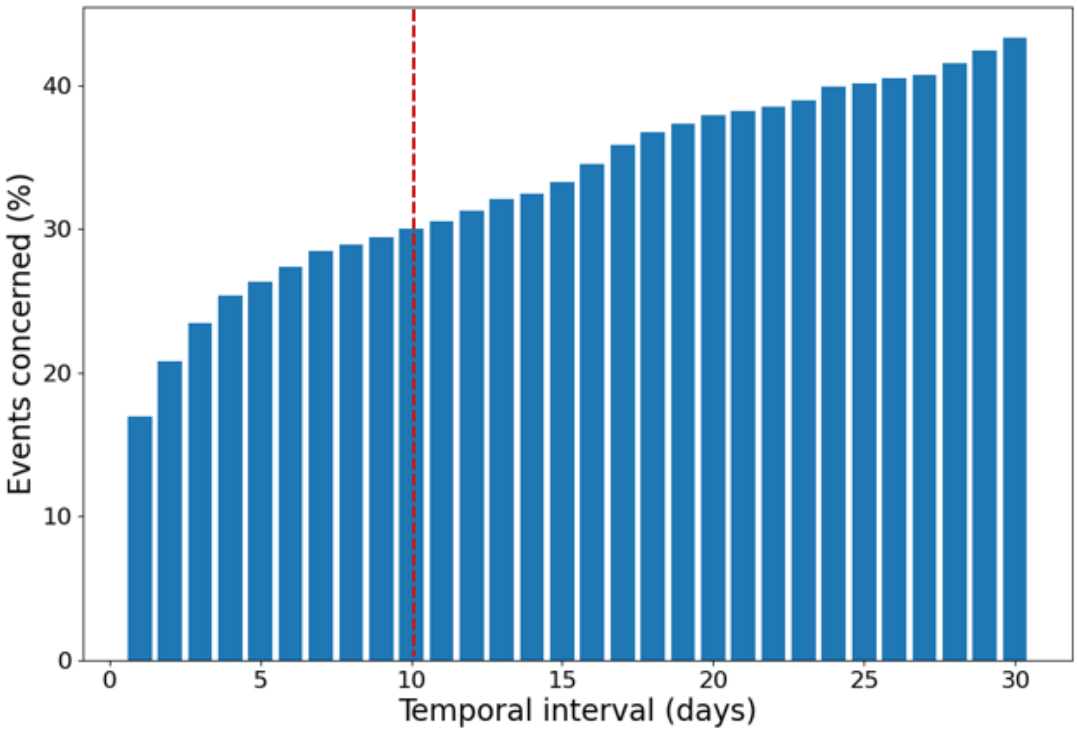


Figure 95 Pourcentage d'HDm concerné par un regroupement temporel sur différentes périodes en 2022. Le pourcentage est calculé à partir des communes touchées par plus d'une chute de grêle en 2022. La ligne rouge montre le seuil retenu pour le regroupement, ©M. Trevisani.

5.2.2 Estimation du volume de sinistre grêle

5.2.2.1 1ère étape : entrainement du modèle sur l'année 2022 pour avoir une estimation initiale du volume de sinistres

Dans un premier temps, nous avons fait le choix de nous concentrer exclusivement sur le périmètre du DAB. On retrouve l'impact du pré-traitement sur le nombre de chutes de grêle à l'échelle communale et nationale, ainsi que la proportion d'HDm exploitable dans notre modèle (HDm avec sinistre DAB) sur le Tableau 9.

Tableau 9 Impact du pré-traitement sur le nombre de chutes de grêle à l'échelle de la commune et à l'échelle nationale. On retrouve également le nombre d'HDm exploitable par notre modèle (HDm avec sinistres).

	Intervalle 10 jours		
	Avant prétraitement	Après prétraitement	
HD communaux	5 009	4 178	→ 83% du nombre initial
HD nationaux	206	199	→ 97% du nombre initial
HDm avec sinistres	1 820 (36%)	1 781 (43%)	→ Data exploitable

On remarque ainsi que ce pré-traitement permet de passer de 36% des données exploitables à 43%, soit un gain net de 7 points. L'échantillon de données reste cependant faible (1 781) pour une analyse statistique détaillée.

Un lien semble exister entre le taux de contrats sinistrés à l'échelle de la commune en fonction et la catégorie du plus gros grêlons de l'HDm (Figure 96). En effet, plus la gamme de taille du plus gros grêlon est importante, plus le taux de contrats DAB sinistrés dans la commune est importante. La corrélation n'est cependant pas parfaite puisqu'on ne constate pas une matrice rigoureusement antidiagonale.

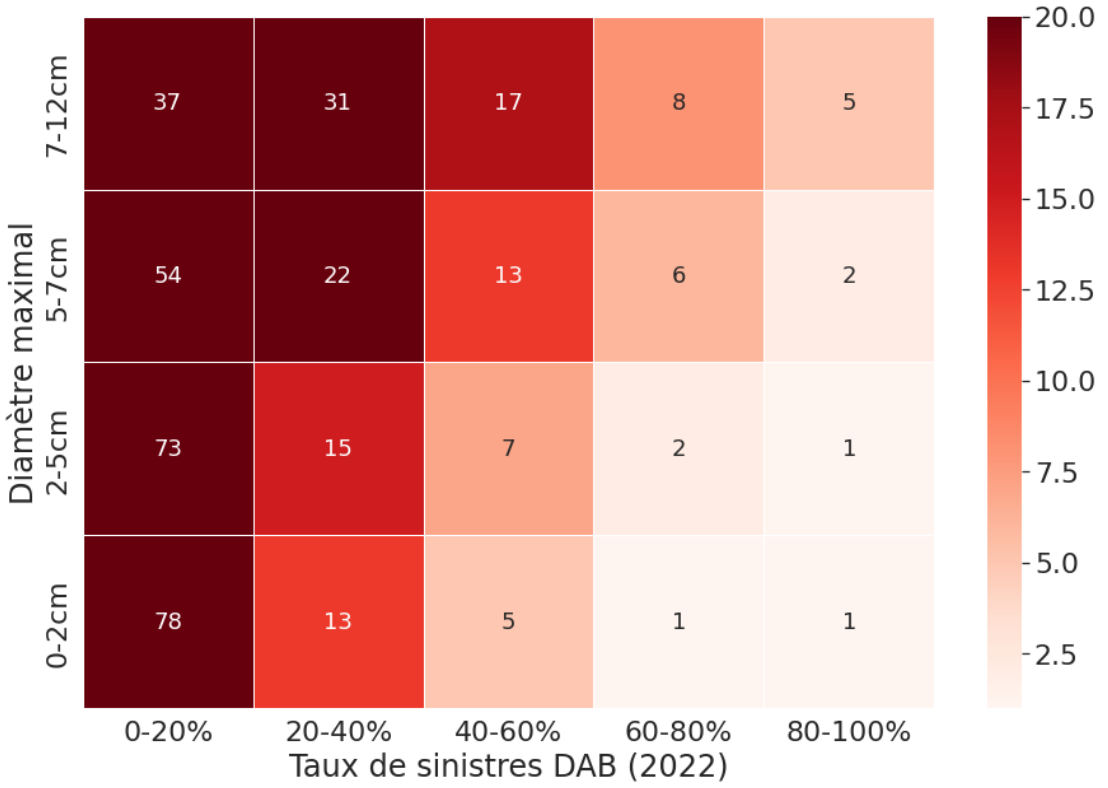


Figure 96 Carte de chaleur représentant la proportion de taux de sinistres DAB par commune en 2022 en fonction de classe de taille du plus gros grêlons, ©M. Trevisani.

On analyse ensuite la distribution du taux de sinistres DAB par commune en fonction des mêmes catégories de grêlon à l'aide d'un boxplot (Figure 97) dans le but de quantifier le lien entre la taille des grêlons et le taux de sinistres constatés à l'échelle de la commune.

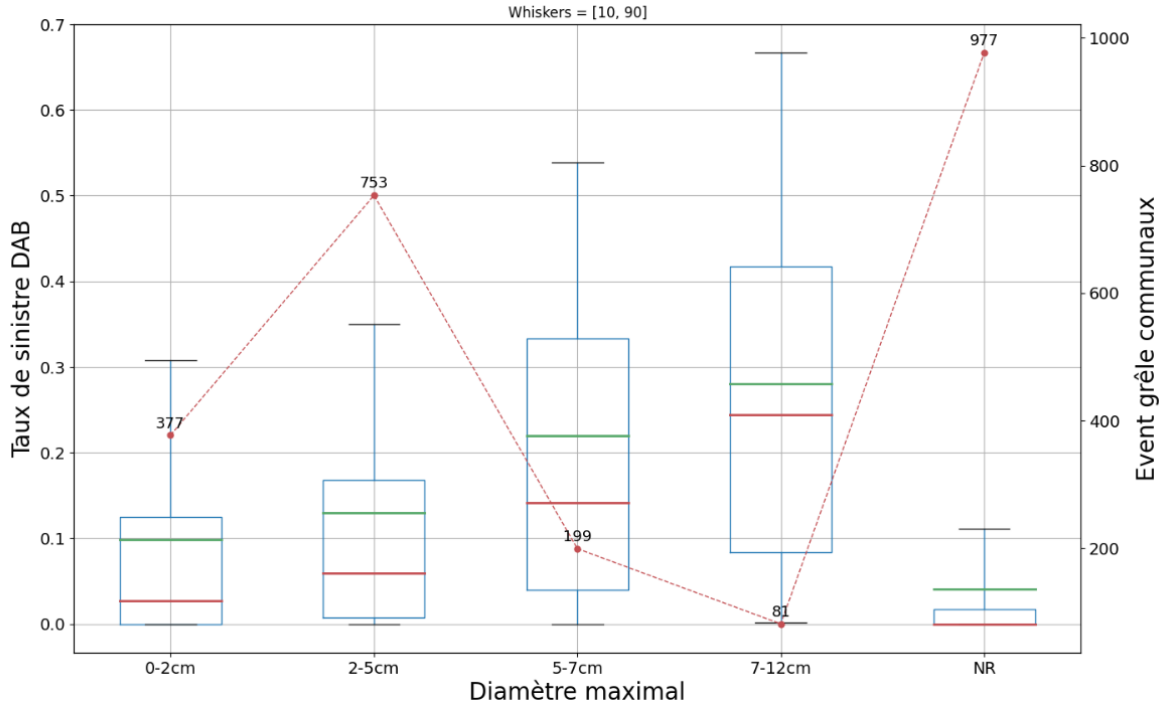


Figure 97 Distribution du taux de sinistres DAB par commune à chaque date avec sinistres grêle. La médiane est en rouge, la moyenne en vert, et les whiskers représentent les centiles 10 et 90 de la distribution. L'échantillon est renseigné au niveau de la courbe rouge, ©M. Trevisani.

Malgré la dispersion du taux de sinistres DAB de plus en plus importante lorsque la taille des grêlons augmente, on constate un net décalage de l'ensemble des paramètres statistiques (médiane, moyenne, distribution) vers un taux de sinistres DAB plus important lorsque la taille des grêlons augmente. La dispersion du taux de sinistres sur les tailles de grêlons plus importantes peut être associée au volume de données disponibles de plus en plus faible, ou bien par l'incertitude associée aux données ; un HDm avec un diamètre maximal renseigné de 7 cm ne va pas forcément impacter l'ensemble de la commune avec des grêlons de 7 cm. On constate que les communes sinistrées par la grêle, mais sans diamètre de grêlons renseigné, ont une dispersion du taux de sinistre très faible compris entre 0 et 2% malgré le volume conséquent de données.

L'ensemble de ces éléments nous conforte dans la réalisation d'un modèle d'estimation de volume de sinistralité grêle à partir du diamètre maximal des grêlons. Dans notre modèle, nous avons fait le choix d'utiliser la médiane de la distribution du taux de sinistres en fonction de la catégorie de grêlons considérée.

Cette première étape nous permet d'estimer un premier volume de sinistre (estimation initiale) à l'échelle nationale et départementale en additionnant l'ensemble des estimations. Il est difficile de descendre en dessous de l'échelle départementale avec notre modèle au regard de la dispersion de la distribution à la maille de la commune ; plus la maille d'analyse est importante, plus les incertitudes se compensent.

5.2.2.2 2ème étape : correction du modèle sur un jeu calibrage dans le but d'avoir une deuxième estimation concernant le volume de sinistre

L'endommagement provoqué par une chute de grêle (taux de sinistres) ne devrait pas être influencé par le caractère exceptionnel de 2022. L'année 2022 joue uniquement sur le volume de données disponibles pour les hautes catégories de grêlons sans influencer leurs impacts économiques ; à iso-

contrats, des grêlons de 8 cm impactent de même manière une commune en 2022 qu'en 2015 par exemple. Dans cette étape, nous avons utilisé le portefeuille DAB 2021 de Generali France.

Nous avons voulu voir comment se comportait l'estimation de notre modèle dans des conditions de haute sinistralité, moyenne sinistralité et faible sinistralité, dans le but d'avoir une vision d'ensemble de la performance de notre modèle. Nous avons ainsi sélectionné 19 dates en 2021 (Figure 98).

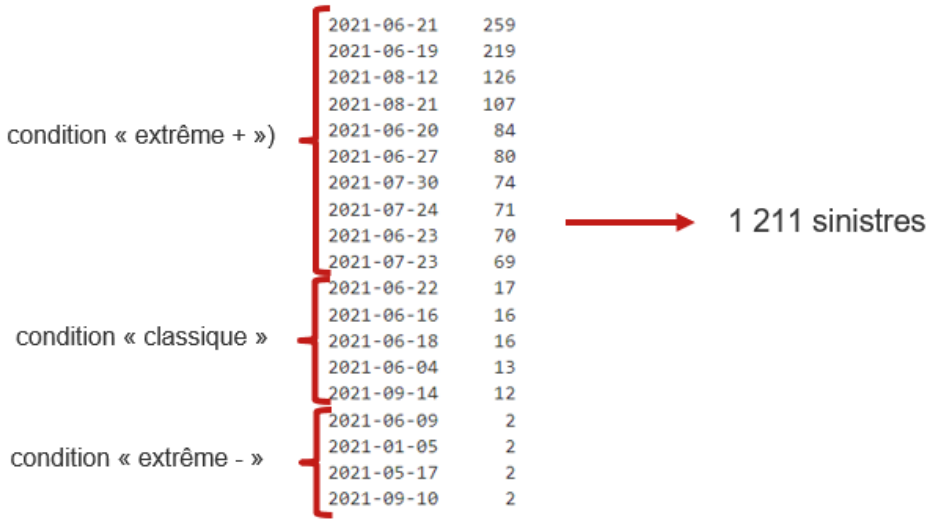


Figure 98 Nombre de sinistres par journée sélectionnée en 2021 pour notre jeu de calibrage.

Nous avons pu voir que notre première estimation était assez éloignée de la réalité sur l'ensemble des conditions de sinistralité, avec une estimation initiale en moyenne 4-5 fois plus élevée que ce qu'enregistrait Generali France sur une journée hautement sinistrée, et une surestimation de l'ordre de 50 fois pour les journées faiblement sinistrées (Figure 99).

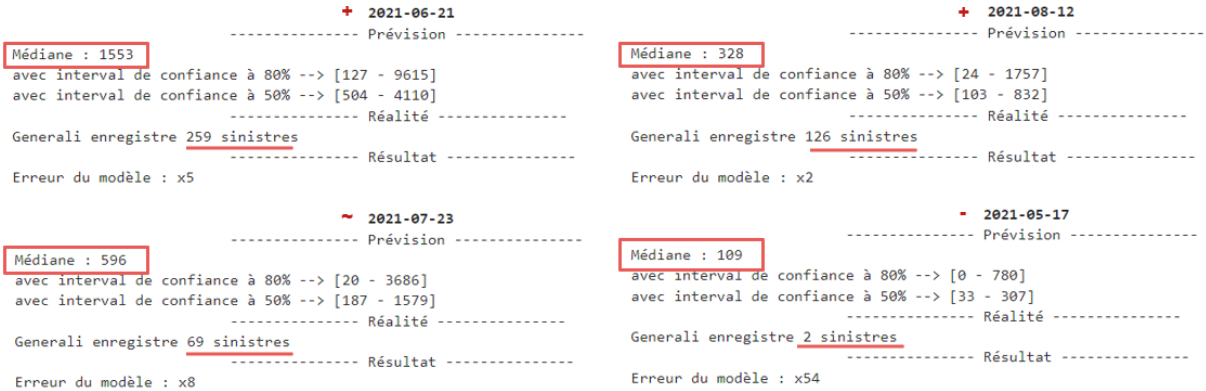


Figure 99 Estimation initiale du volume de sinistre grêle post-évènement (médiane) et volume de sinistres enregistré par Generali. Les incertitudes correspondent aux centiles de distribution (i.e. 10 et 90 pour un intervalle de confiance à 80%.). Le « + » représente une journée fortement sinistrée, « ~ » une journée moyennement sinistrée et « - » une journée faiblement sinistrée.

Malgré ces résultats peu encourageant, nous avons remarqué que :

- La hiérarchie entre chaque journée est conservée dans l'estimation initiale ; la journée avec le plus de sinistres enregistrés est également celle avec le plus de sinistres estimés initialement. Le même constat se fait pour les deux, trois… i^{ème} journée.

- La relation entre chaque journée est environ conservée ; si la deuxième journée représente 0,7 fois la sinistralité enregistrée par la première journée, alors elle représentera également environ 0,7 fois la sinistralité modélisée initialement.

Cette observation sert ainsi de base dans la réalisation d'une deuxième estimation, appelée « estimation corrigée ». Ainsi, si on connait le nombre de sinistres enregistrés par Generali France sur plusieurs journées de référence (journée de calibrage), il est possible de réaliser une deuxième estimation (relative à la première) en appliquant un facteur correctif à la première estimation. On retrouve le principe de fonctionnement sur la Figure 100.

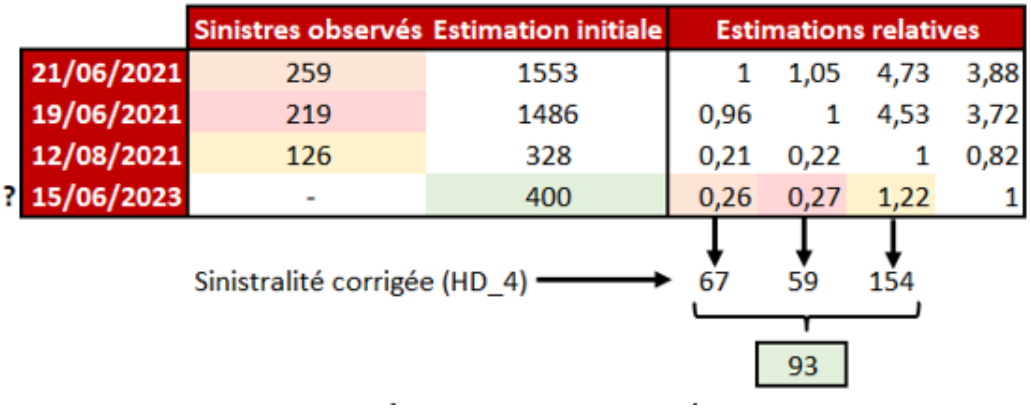


Figure 100 Principe de fonctionnement de la seconde estimation du nombre de sinistres. Dans cet exemple, il y a 3 journées de calibrage et on s'intéresse à la journée du 15/06/2023. Chaque journée est exprimée en fonction de l'estimation initiale dans la partie « estimation relative ». Les facteurs correctifs (ex : 0,26 pour la journée de référence du 21/06/2021) sont ensuite appliqués à la sinistralité observée de chaque journée de référence. L'estimation corrigée finale correspond à la moyenne des estimations corrigées.

Cette approche renseigne également l'incertitude de l'estimation corrigée finale à l'aide d'un intervalle d'estimation, calculée à partir de l'ensemble des estimations corrigées (1 par date de référence) : en ayant par exemple 10 dates dans le jeu de calibrage, il est possible d'estimer la borne basse et la borne haute de l'estimation corrigée finale en moyennant au maximum en moyennant les 4 estimations les plus faibles (borne basse) et les 4 estimations les plus hautes (borne haute).

Nos 19 dates ainsi sélectionnées en 2021 constituent notre jeu de calibrage, servant de base à la deuxième estimation du volume de sinistres (estimation corrigée). Ce jeu de calibrage est également en constante amélioration, en étant alimenté par de nouvelles dates. En effet, dès que le modèle étudie une date, celle-ci est entrée dans la base de calibrage. Elle est ensuite automatiquement exploitée lorsque la sinistralité grêle enregistrée par Generali France connue dans la mise à jour mensuelle de la base sinistres.

5.2.2.3 Caractérisation de la sévérité de la journée grêle

Afin d'affiner la deuxième estimation de notre modèle, nous attribuons à chaque journée présente dans la base de calibrage une caractérisation « Sévère », « Medium » ou « Low » en fonction des caractéristiques des chutes de grêle recensées à l'échelle de la commune (Tableau 10). Ces seuils ont été choisis après une analyse fine des caractéristiques des chutes de grêle enregistrées sur une journée, et la valeur de chaque ratio est calculé à partir des caractéristiques des chutes de grêle enregistrant le plus de sinistres (journée) entre 2013 et 2022.

Tableau 10 Tableau à double entrée illustrant les conditions retenues dans la caractérisation de la journée grêle. Le rapport est calculé à partir des 10 dates les plus sinistrées (DAB) de Generali France entre 2013 et 2022.

Rapport grêle ≥ 2 cm	Rapport grêle ≥ 5 cm: 0 - 0.1	0.1 - 0.3	> 0.3
0 - 0.1	Low	Low	Medium
0.1 – 0.7	Low	Medium	Severe
> 0.7	Medium	Severe	Severe

En fonction de la caractérisation de la journée étudiée (« Sévère », « Medium » ou « Low »), on utilise dans le jeu de calibrage :

- Les journées grêle avec au moins 100 sinistres enregistrés lorsque la journée est caractérisée comme « Sévère »,
- Les journées grêle avec au moins entre 20 et 100 sinistres enregistrés lorsque la journée est caractérisée comme « Medium »,
- Les journées grêle avec moins de 20 sinistres enregistrés lorsque la journée est caractérisée comme « Low ».

5.2.2.4 Estimation finale : initiale ou corrigée ?

La dernière étape de notre modèle est de choisir entre l'estimation initiale et corrigée. Nous avons réalisé plusieurs approches pour automatiser l'approche humaine « experte » qui se faisait dans une version antérieure du modèle.

La meilleure approche parmi celles que nous avons pu tester consister à comparer la distribution des chutes de grêle de la journée étudiée avec les journées les plus extrêmes : la journée du 20 juin 2022 ravageant le secteur de Bordeaux (journée grêle la plus importante de 2013-2022) et la journée du 9 juin 2014 ravageant l'Île-de-France (Tempête Ela, 3ème journée grêle la plus importante de 2013-2022).

On compare ainsi la dynamique grêligène de la journée étudiée avec celle de ces deux journées, à travers le nombre total de communes touchées par la grêle (indice 2) et le nombre de communes touchées par des chutes de grêle avec grêlons d'au moins 2 cm et d'au moins 5 cm (indice 1). L'arbre de décision utilisé par le modèle est présenté sur la Figure 101.

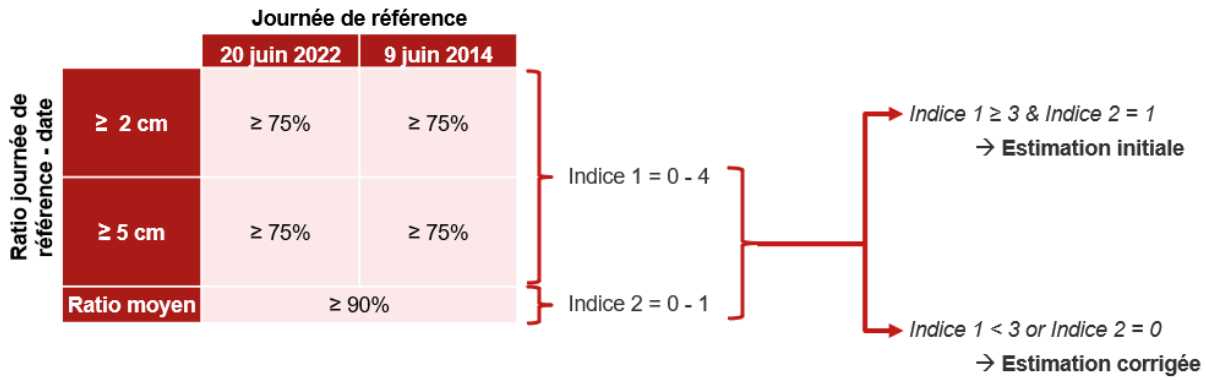


Figure 101 Arbre de décision entre l'estimation initiale ou l'estimation corrigée comme estimation finale.

5.2.2.5 Un modèle non applicable pour l'auto

L'utilisation du diamètre maximal de grêlon comme proxy de l'endommagement (taux de sinistres) n'est pas applicable pour l'automobile dans notre étude au regard de l'évolution de la distribution du taux de sinistres avec la taille de grêlons (Figure 102).

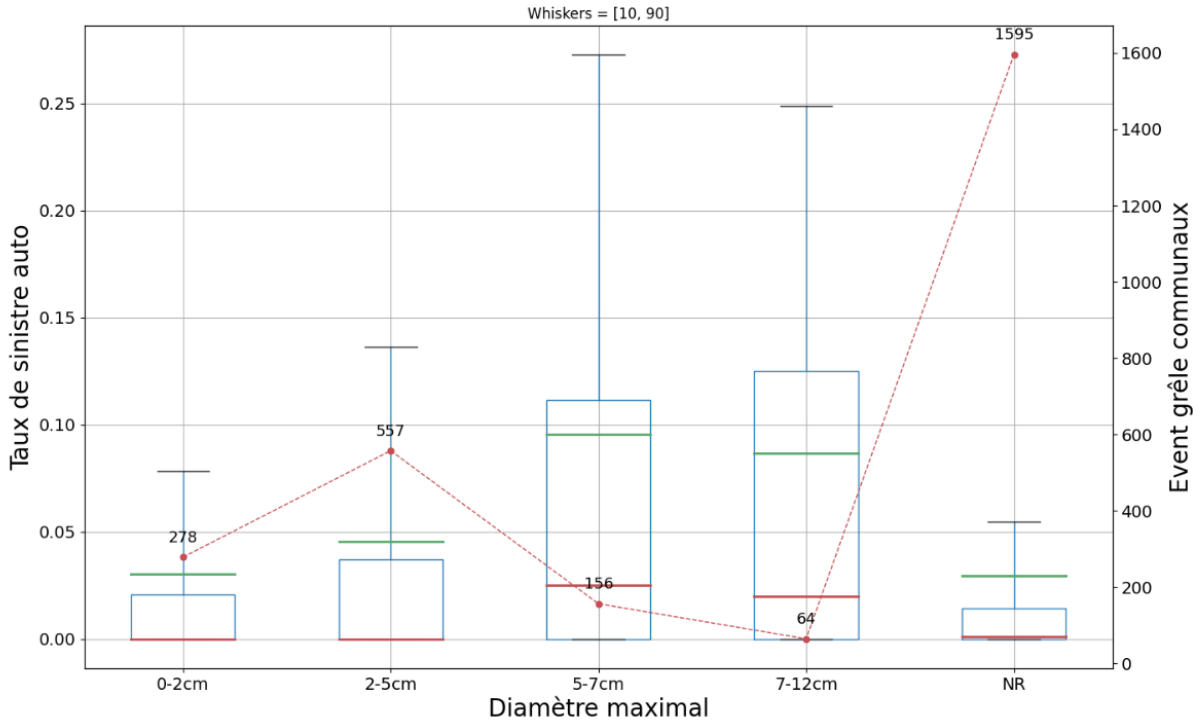


Figure 102 Distribution du taux de sinistres auto par commune à chaque date avec sinistres grêle. La médiane est en rouge, la moyenne en vert, et les whiskers représentent les centiles 10 et 90 de la distribution. L'échantillon est renseigné au niveau de la courbe rouge, ©M. Trevisani.

5.3.3 Utilisation du modèle : cas d'étude

Notre modèle est un système totalement automatisé et rapide (30 s/run). Il comporte une partie « visualisation » permettant de :

- Caractériser la distribution des diamètres de grêlons au regard de la moyenne historique et de deux journées « extrêmes » (20 juin 2022 et 9 juin 2014).
- Caractériser la répartition géographique de la taille des grêlons à la maille communale. L'échelle est également homogénéisée pour permettre une comparaison claire et rapide des chutes de grêle entre différentes journées.
- Caractériser la répartition géographique du volume de sinistres grêle à la maille départementale. L'échelle départementale est également homogénéisée pour permettre une comparaison claire et rapide entre les estimations de différentes journées.

Il classifie également le volume de sinistres au regard de la base historique de Generali France et des estimations réalisées à l'aide de ce modèle, permettant ainsi un dimensionnement rapide de l'évènement. On peut voir un exemple de sortie du modèle sur la journée du 11 juillet 2023 (Figure 103).

Classement de la journée sur

- L'ensemble de la base sinistres: **13** (Top **0.5%**)
- La base sinistres hors 2022: **6** (Top **0.3%**)
- La base sinistres 2023: **1** (Top **0.8%**)
- La base sinistres 2023 + estimations: **1** (Top **0.8%**)

Figure 103 Positionnement de l'estimation réalisée sur la journée du 11 juillet 2023 au regard de l'historique et des précédentes estimations réalisées

Le modèle nécessite uniquement un rapport grêle fourni par Keraunos au format pdf pour fonctionner (Figure 104), communiqué au plus tard à J+1 après l'évènement grêle.

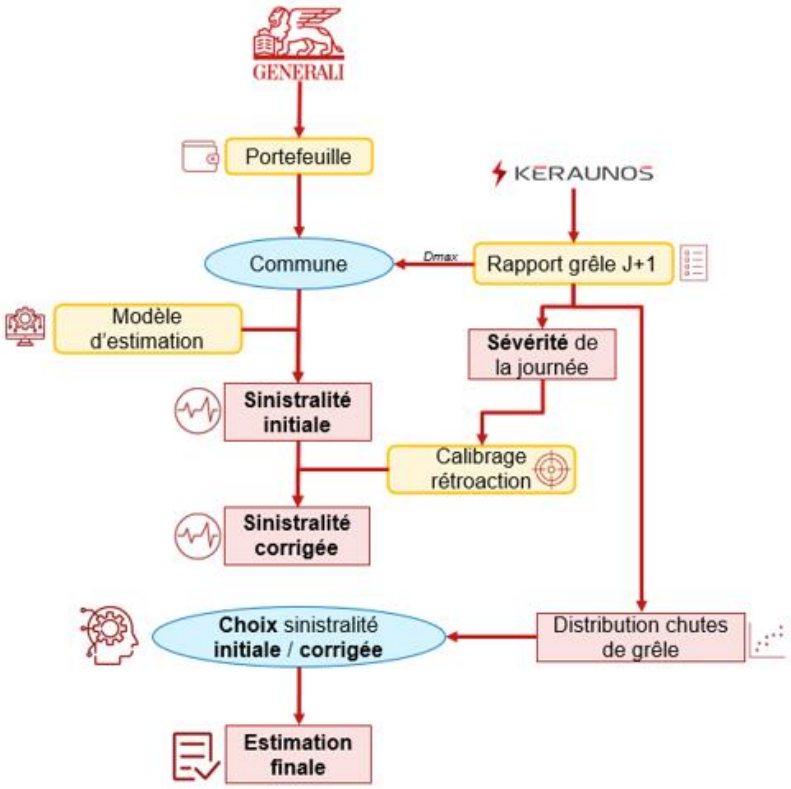


Figure 104 Schéma du fonctionnement générale du modèle dans une utilisation courante, ©M. Trevisani.

Afin d'améliorer les performances du modèle, il est également nécessaire de mettre à jour la connaissance de l'exposition (fichier « collecte » au format csv) et de la sinistralité (mise à jour mensuelle de la base sinistres) de Generali France. En effet, le modèle est en apprentissage continu ; l'incorporation de la connaissance de la sinistralité observée par Generali France sur des journées étudiées par notre modèle permet d'ajouter ces journées dans le jeu de calibrage.

Les performances finales sont très bonnes, avec une estimation finale très proche de la réalité constaté par Generali France quel que soit les caractéristiques de la journée grêligène considérée (Sévères, Medium ou Low). On peut visualiser les performances du modèle concernant les 5 dates avec le plus de sinistres enregistrés par Generali France en 2023 sur la Figure 105. Même si on constate une très légère sous-estimation du modèle sur ces dates, le nombre de sinistres grêle DAB enregistrés est presque toujours inclus entre la borne basse et haute de l'estimation.



Figure 105 Performance du modèle sur les 5 dates avec le plus de sinistres DAB enregistrés par Generali France en 2023.

On peut voir un exemple de sortie du modèle sur la journée du 11 juillet 2023, avec le profil des chutes de grêle (Figure 106), la répartition géographique de ces dernières (Figure 107), la répartition géographique des sinistres modélisés et observés (Figure 108). Notre estimation à l'échelle nationale et départementale est très proche de la réalité constaté par Generali France.

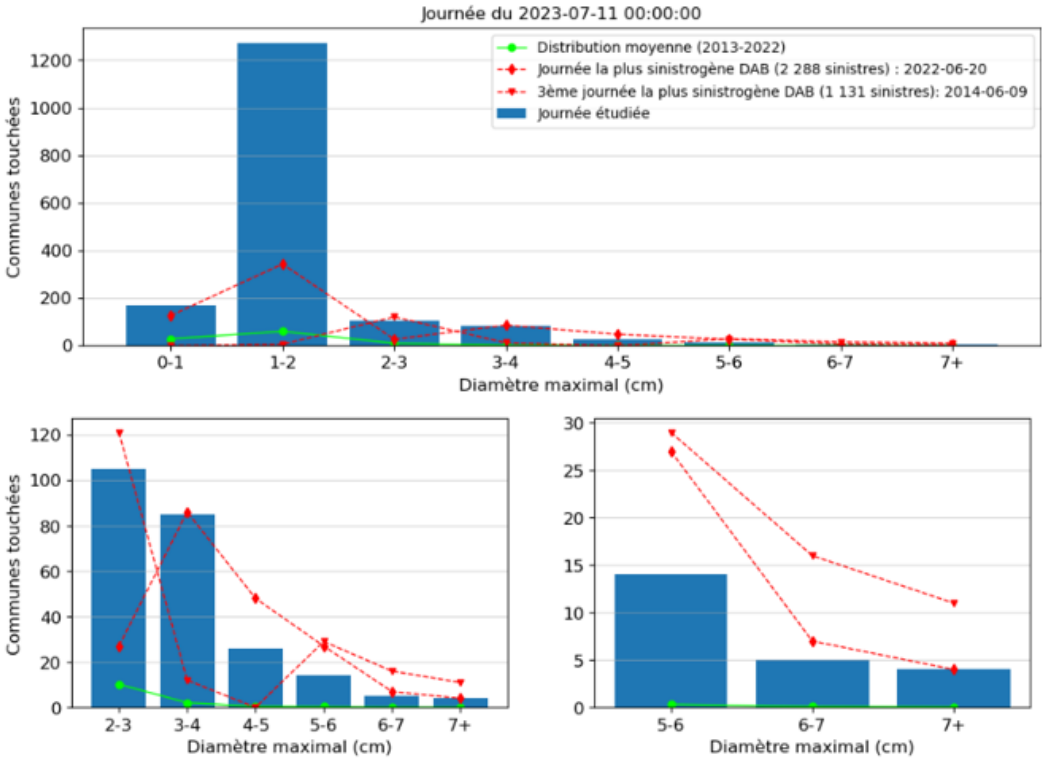


Figure 106 Profil des chutes de grêle à la maille communale sur la journée du 11 juillet 2023, ©M. Trevisani.

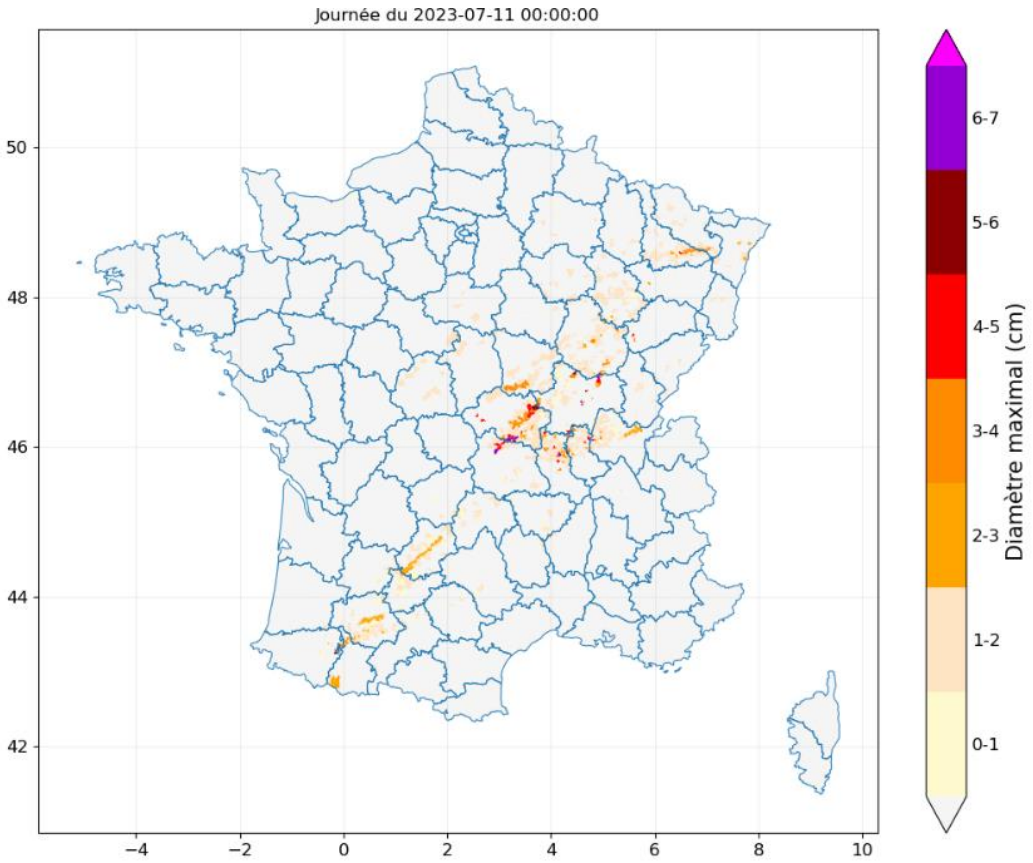


Figure 107 Répartition des chutes de grêle à la maille communale sur la journée du 11 juillet 2023, ©M. Trevisani.

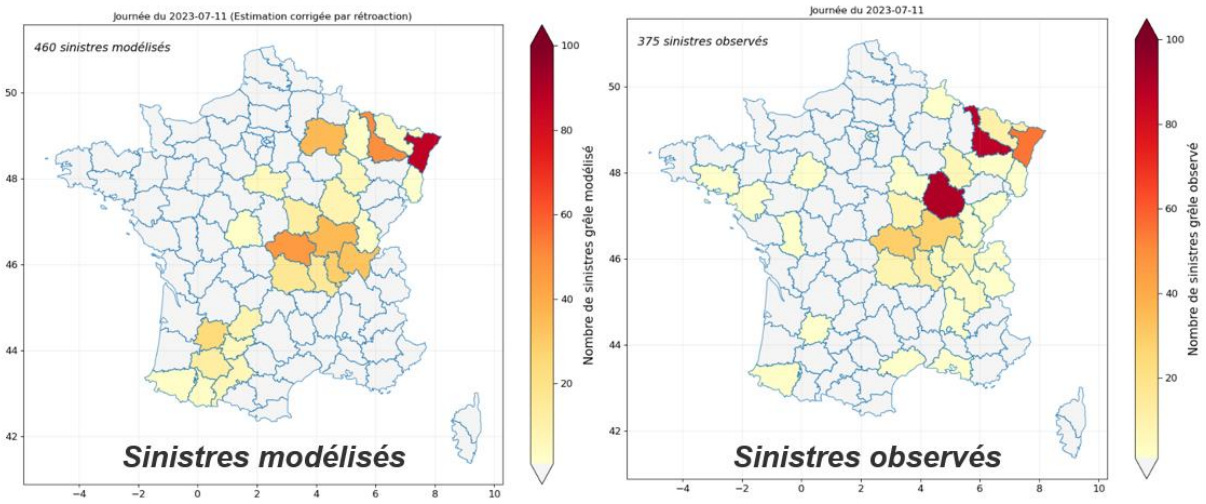


Figure 108 Répartition de la sinistralité grêle modélisée (gauche) et observée (droite) à la maille départementale sur le portefeuille DAB de Generali France lors de la journée du 11 juillet 2023, ©M. Trevisani.

5.3 Stratégies d'adaptation aux chutes de grêle

Il existe trois approches possible pour se prémunir des chutes de grêle et de leurs impacts :

- Suivre une stratégie de suppression des chutes de grêle en agissant directement sur les grêlons formés, dans le but de supprimer et limiter la croissance de ces derniers,
- Suivre une stratégie de prévention et de protection contre les chutes de grêle dans le but de réduire la vulnérabilité des enjeux.

5.3.1 La stratégie de suppression, une approche controversée

5.3.1.1 Canon anti-grêle

Le canon anti-grêle utilise une onde de choc sonore pour perturber le développement des grêlons au sein d'une cellule orageuse (Figure 109).



Figure 109 Exemple de canons anti-grêle. A droite, le canon possède un silencieux pour éviter les nuisances sonores auprès du voisinage.

Il n'existe à ce jour aucune étude prouvant l'efficacité de ce dispositif. Cet outil a également été relativement abandonné en Europe et en France (Martin et al., 2020) au profit des méthodes d'insémination artificielle du nuage, au regard des nuisances sonores marquées auprès du voisinage (120 Db à 20m[81]).

5.3.1.2 Insémination artificielle des nuages

L'insémination artificielle des nuages est l'approche la plus répandue pour lutter contre les chutes de grêle. Elle fait suite aux expérience Grossversuch réalisées en Suisse dans le cadre d'un programme de lutte contre la grêle (Federer et al., 1986, 1978; Schmid, 1967). Elle consiste à envoyer des particules, généralement des ions iodure d'Argent, à l'aide de module terrestre (cheminée) ou aérien (ballon, avion, fusée) (Dessens et al., 2016), visible sur la Figure 110.

[81] https://www.snrr.fr/protection-anti-grele-agricole/canon-anti-grele



Figure 110 Exemple de module d'insémination des nuages. De gauche à droite, ballon gonflé à l'hélium (Selerys), cheminée (Anelfa) et fusée paragrêle.

Afin d'améliorer son efficacité potentielle, les modules d'insémination artificielle sont de nos jours couplés avec des systèmes radars, permettant de suivre localement avec précision l'évolution d'une cellule orageuse en cellule potentiellement grêligène, dans le but d'agir le plus efficacement possible. Ils sont également montés en réseaux pour agir le plus efficacement possible sur les cellules orageuses.

En France, cette stratégie est appliquée par l'Anelfa (cheminée) principalement dans le Sud-Ouest et par Selerys[82] (ballon, par l'intermédiaire du système Laïco) dans l'Ouest Rhodanien.

Il n'existe à ce jour aucune étude permettant d'affirmer avec certitude de l'efficacité de cette méthode dans le France et dans le monde (Gavrilov et al., 2010; Mezeix, 1987). Cela fait notamment suite à la complexité dans la réalisation d'une expérience aléatoire afin d'éviter tous biais, puisqu'il est à ce jour impossible de savoir avec précision quelle cellule orageuse va évoluer en cellule grêligène ; on estime au mieux uniquement le potentiel grêligène d'une cellule orageuse.

De plus, sa similitude avec le domaine de la géo-ingénierie pose plusieurs questions environnementale pour une généralisation à l'échelle du globe, comme son impact sur toxicité de l'environnement (Korneev et al., 2017; Sanchez et al., 1999), sur le bilan radiatif de la terre (Rasch et al., 2009) et sur la gestion de l'eau (Essien, 2023; Malik et al., 2018).

5.3.2 La mitigation des dégâts associés aux chutes de grêle

5.3.2.1 Protection mécanique et protection économique

Il est possible de mitiger les conséquences économiques d'une chute de grêle de à l'aide de dispositif réduisant l'énergie cinétique terminale d'un grêlon, protégeant ainsi le bien assuré.

Pour les biens automobiles, l'utilisation d'une housse paragrêle est une solution efficace bien que peu pratique. En effet, elle nécessite d'incorporer manuellement l'automobile dans la housse de protection avant une chute de grêle ; il faut donc à la fois avoir reçu une alerte grêle, mais également avoir la capacité de réagir rapidement. L'efficacité de ce dispositif dépend directement de l'épaisseur du revêtement.

[82] https://selerys.fr/



Figure 111 Exemple de housse paragrêle ©Norauto

L'utilisation de filets paragrêle est également possible pour protéger des automobiles même s'il est généralement utilisé pour l'agriculture (Figure 112). C'est un dispositif couvrant une grande surface tout en protégeant efficacement des chutes de grêle. Il reste cependant très coûteux, c'est pourquoi il est principalement utilisé pour les biens à haute valeur ajoutée comme la culture viticole et l'arboriculture. Le filet paragrêle nécessite d'être installé à chaque début de saison de la grêle et nécessite d'être régulièrement surveillé : il est possible que le filet s'effondre sous le poids de la grêle, entrainant une sur-sinistralité très marquée dans ce cas.



Figure 112 Différents filets paragrêle. De gauche à droite, filet en couverture totale, filet en couverture en rang, filet en couverture totale sur un garage.

L'utilisation de cette méthode est également à mettre au regard de la baisse de l'ensoleillement perçue par les cultures (Brglez Sever et al., 2020, 2015) ; elle ne peut donc pas être utilisée pour certains labels AOP / AOC. L'utilisation des filets paragrêle en mono-rang est autorisé en AOP depuis juin 2018 à la suite d'une expérimentation conduite par la Confédération des Appellations et des Vignerons de Bourgogne de 2015 à 2017[83].

L'utilisation d'un contrat d'assurance permet de se prémunir des conséquences économiques liées à une chute de grêle ; c'est donc le dernier filet de sécurité. Cependant, l'assurance seule est limitée pour le secteur de l'agriculture. En effet, la perte totale ou partielle de la récolte peut poser problème lors d'un partenariat avec un groupe industriel (grande surface…) : en cas de situation récurrente l'industriel peut en effet rompre son contrat avec l'agriculture. Même si le contrat d'assurance protège des conséquences économiques directes (pertes de récolte) et indirectes (pertes d'exploitable), le contrat ne tient pas compte de cet aspect.

[83] Comité nationale des appellations d'origine relatives aux vins et aux boissons alcoolisées, et des boissons spiritueuses, Séance du 20 juin 2018, INAO

5.3.2.2 Bonnes pratiques à adopter

Certaines « bonnes pratiques » peuvent limiter l'impact économique d'une chute de grêle :

- Ranger l'automobile dans un garage ou sous un abris plutôt que de la laisser dehors,
- Ne pas fermer ses volets, sauf si ces derniers sont en bois ; en effet la vitre est plus résistante que le PVC (section 5.1.2 du chapitre 5),
- Adapter les matériaux de construction au niveau d'aléa de la zone ; l'épaisseur de la couche protectrice des panneaux solaires doit être adapté en fonction du niveau d'aléa local par exemple,
- Optimiser la prise en charge de la sinistralité grêle, avec par exemple la mise en place de plateforme d'expertise et de débosselage lors d'évènement local marqué (Figure 113)



Figure 113 Scanner de grande taille utilisé par MMA. Il ne nécessite que 30s pour analyser les dégâts de la grêle sur l'ensemble de la carrosserie ©Covéa

5.4 Conclusion du chapitre 5

Les conséquences économiques d'une chute de grêle sont très difficiles à estimer peu de temps après la survenance de l'évènement au regard de la forte incertitude concernant l'intensité et la localisation des chutes de grêle, limitant ainsi l'apprentissage des modèles. Pourtant, l'estimation rapide de la sinistralité grêle post évènement est un point crucial pour une société d'assurance. Elle permet à la fois d'améliorer l'image de marque d'une société d'assurance en améliorant l'expérience client grâce à la réduction du temps de prise en charge, et d'améliorer le résultat financier de l'entreprise en réduisant les frais de gestion de sinistres.

L'estimation du coût d'un évènement grêle dépend des caractéristiques des grêlons (taille, nombre) et de la vulnérabilité des biens assurés soumis à une chute de grêle. Une chute de grêle avec de nombreux petits grêlons peut ainsi détruire une culture mais ne faire aucun dommage sur automobile ou sur un bâtiment. A l'inverse, quelques gros grêlons de 5 cm par mètre carré, peuvent provoquer de lourds dommages sur une automobile et des toitures sans faire de dommages importants à une culture.

Nous avons ainsi réalisé un modèle d'estimation de volume de sinistres DAB à J+1 en utilisant le taille maximale des grêlons comme proxy de sinistralité, en utilisant les rapports grêle journaliers fournis par Keraunos lors d'évènement grêle. Le modèle est performant, autant sur les plus faibles journées grêle que sur les plus intenses, à la maille départementale et de la France entière. Cette approche n'est cependant pas transposable sur les produits agricoles et automobiles, et elle ne permet pas d'estimer le coût de la sinistralité grêle pour le moment. Cette limite s'explique principalement par la trop faible volumétrie de données disponibles pour une analyse croisée de la taille des grêlons avec les caractéristiques des bâtiments (i.e. type de toiture…).

Pour finir, il n'existe pas de solutions prouvées scientifiquement permettant de réduire l'aléa grêle en France et dans le monde. Il est cependant possible de réduire les conséquences économiques d'une chute de grêle en agissant directement sur la vulnérabilité du bien, avec l'utilisation d'une housse ou de filets paragrêles. Il est donc nécessaire d'adapter les méthodes de construction en fonction du niveau d'aléa grêle du territoire pour maîtriser au mieux les conséquences économiques lors de la survenance d'un évènement grêle.

Chapitre 6 : Cartographie de la grêle en France

Cartographier l'aléa et le risque grêle en France hexagonal est un sujet primordial pour une société d'assurance. Elle permet d'adapter la tarification de ses contrats d'assurance en fonction des niveaux de risques associés. Les tarifs sont ainsi plus concurrentiels pour des « bons risques » (i.e. risque faible), captant de ce fait une part de marché « rentable », et la souscription de « mauvais risques », généralement peu rentable, se retrouve évitée ou fortement discriminée.

6.1 I_H, un nouvel indice pour caractériser l'aléa grêle en France

6.1.1 Un indice basé sur la fréquence et l'intensité maximale des chutes de grêle

La fréquence des HDm entre 2012 et 2022 a été classée en quatre groupes distincts (Figure 114) : les communes n'ayant jamais été touchées par la grêle (17%), les communes touchées moins d'une fois tous les cinq ans (38%), les communes touchées entre une fois tous les cinq ans et une fois tous les deux ans (28%), et les communes touchées plus d'une fois tous les deux ans (17%).

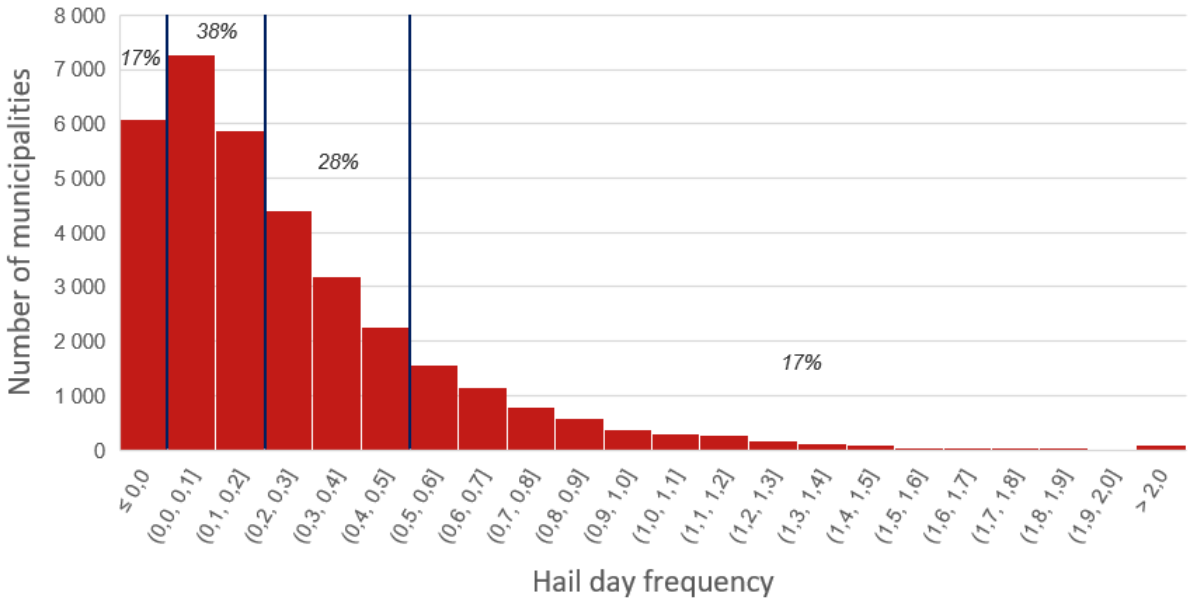


Figure 114 Distribution du nombre de HD sur la période 2013-2022 pour l'ensemble des communes de l'hexagone, ©M. Trevisani.

Les chutes de grêle ont ensuite été caractérisées en fonction de la classification présentée dans la partie 0, utilisant le diamètre maximal des grêlons (D_{max}). Les chutes de grêle sont ainsi discrétisées en 3 catégories : les chutes de grêle de « faible gravité » (D_{max} < 2 cm), les chutes de grêle de « moyenne gravité » (2 cm ≤ D_{max} < 5 cm) et les chutes de grêle « sévères » (D_{max} ≥ 5 cm). La distribution du plus gros grêlon à l'échelle de la commune entre 2013 et 2022 est visible sur la Figure 115.

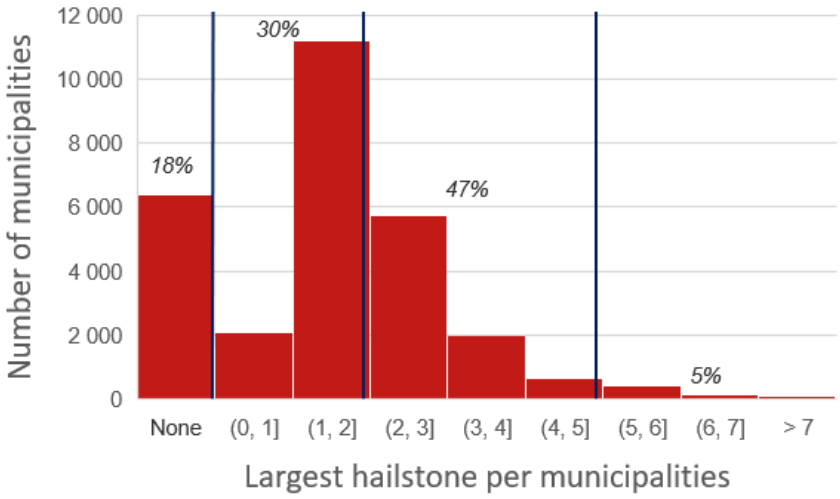


Figure 115 Distribution du diamètre maximal des grêlons recensé par commune entre 2013 et 2022, ©M. Trevisani.

On constate ainsi que dans notre base de données, 18% des communes n'ont aucune information concernant le plus gros grêlon (aucune chute de grêle ou D_{max} non renseigné), tandis que 30 % ont été touchées par des grêlons de moins de 2 cm. On enregistre également 47% des communes dont le plus gros grêlon recensé est compris entre 2 et 5 cm, alors que les grêlons de plus de 5 cm n'ont impacté que 5% des communes seulement.

Un indice aléa grêle, nommé I_H, a été développé en croisant la fréquence et le diamètre maximal des chutes de grêle dans chaque commune selon les critères présentés dans le Tableau 11. Le diamètre maximal a été utilisé pour estimer l'intensité des chutes de grêle (en J/m²) car il correspond au produit du diamètre moyen et du nombre de grêlons par mètre carré. Dans la suite du texte, nous utiliserons le diamètre maximal comme approximation de l'intensité de la grêle car les dégâts les plus importants sont principalement associés aux plus gros grêlons (Púčik et al., 2019) et que notre base de données est constituée à deux tiers (68%) de chutes de grêle de faible sévérité , il est donc plus intéressant d'utiliser le plus grands D_{max} par commune qu'un autre diamètre.

L'indice I_H pondère la fréquence et l'intensité de manière égale, mais distingue les "extrêmes polarisés" - paires avec une fréquence élevée et une faible intensité ou une intensité élevée et une faible fréquence - des communes "moyennes", qui ont une intensité et une fréquence moyennes (diagonale avec un indice I_H 4 – 3 – 4).

Tableau 11 Tableau résumant les critères d'intensité (record du diamètre maximal) et de fréquence dans l'attribution d'un score d'aléa à une commune.

		Fréquence des chutes de grêle			
		0.1- 0,2 / an	**0.2 – 0.5 / an**	**≥ 0.5 / an**	**No hail**
Plus grand D_{max}	**< 2 cm**	1	2	4	
	2-5 cm	2	3	5	
	≥ 5 cm	4	5	6	
					0

L'indice aléa grêle I_H a été recalculé pour chaque commune en tenant compte de l'indice des communes voisines ainsi que celle étudiée dans le but d'assurer la cohérence géographique de l'indice. Ce calcul a été effectué à l'aide de la formule [6.1.1] ci-dessous :

$$I_{H,f} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} I_{H,i} \qquad [6.1.1]$$

Avec :

- $I_{H,f}$ l'indice aléa grêle final arrondi à l'entier le plus proche pour chaque commune,
- $I_{H,i}$ l'indice aléa grêle initial des communes avant recalcul,
- n le nombre de commune voisine à celle étudiée.

On peut voir sur la Figure 116 et le Tableau 12 les conséquences du post traitement sur la répartition géographique de l'indice I_H.

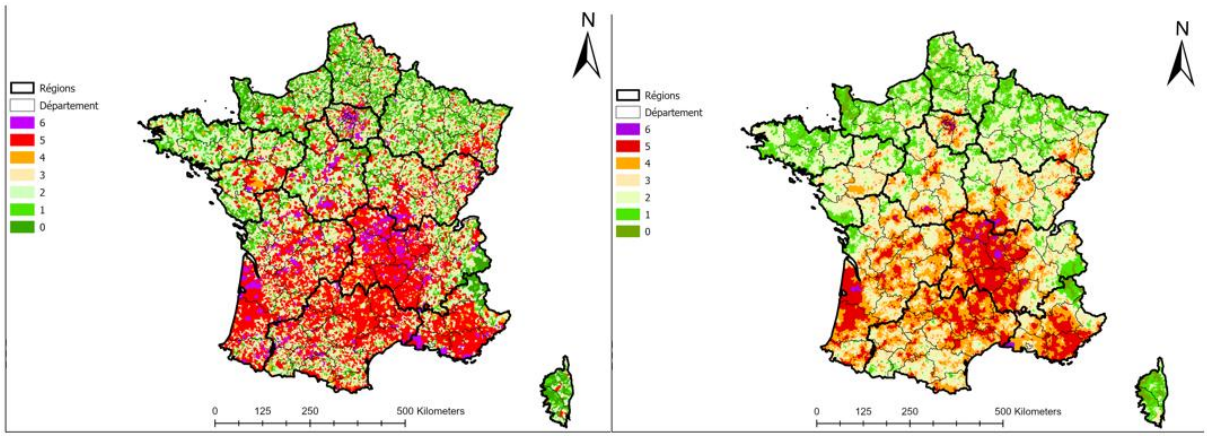


Figure 116 Représentation géographique de l'aléa grêle à travers l'indice I_H avant post traitement à gauche et après post traitement à droite, ©M. Trevisani.

Tableau 12 Tableaux représentant la distribution de l'indice I_H par commune en France. A gauche, avant post-traitement, à droite, après post-traitement

Niveau	Communes	
6	882	3%
5	6 955	20%
4	848	2%
3	7 895	23%
2	7 251	21%
1	5 032	14%
0	6 071	17%

Niveau	Communes	
6	189	1%
5	3 389	10%
4	5 614	16%
3	7 649	22%
2	10078	29%
1	6 412	18%
0	1 603	5%

6.1.2 Géographie de l'aléa grêle à travers l'indice I_H

La cartographie de l'aléa grêle à l'échelle de la commune est visible sur la Figure 117. On observe que l'aléa grêle semble être le plus élevé sur un axe Pyrénéen - Vosgien en France (axe Sud-Ouest / Nord-Est). Il semble également exister une relation entre l'orographie et l'aléa grêle étant donné que la plupart des municipalités présentant un indice élevé se trouvent en zone montagneuse. Cependant, cette relation doit être étudiée plus dans le détail avant d'être confirmée.

Il existe également un fort gradient entre la partie nord de la France, où l'indice I_H dépasse rarement le niveau 3/6 (à l'exception de la région Île-de-France), et la partie sud du pays (hors Corse et les reliefs

les plus élevés des Alpes) où l'indice I_H est rarement sous le niveau 4/6. La moitié sud compte également 80% des municipalités présentant le niveau d'aléa grêle le plus élevé (6/6).

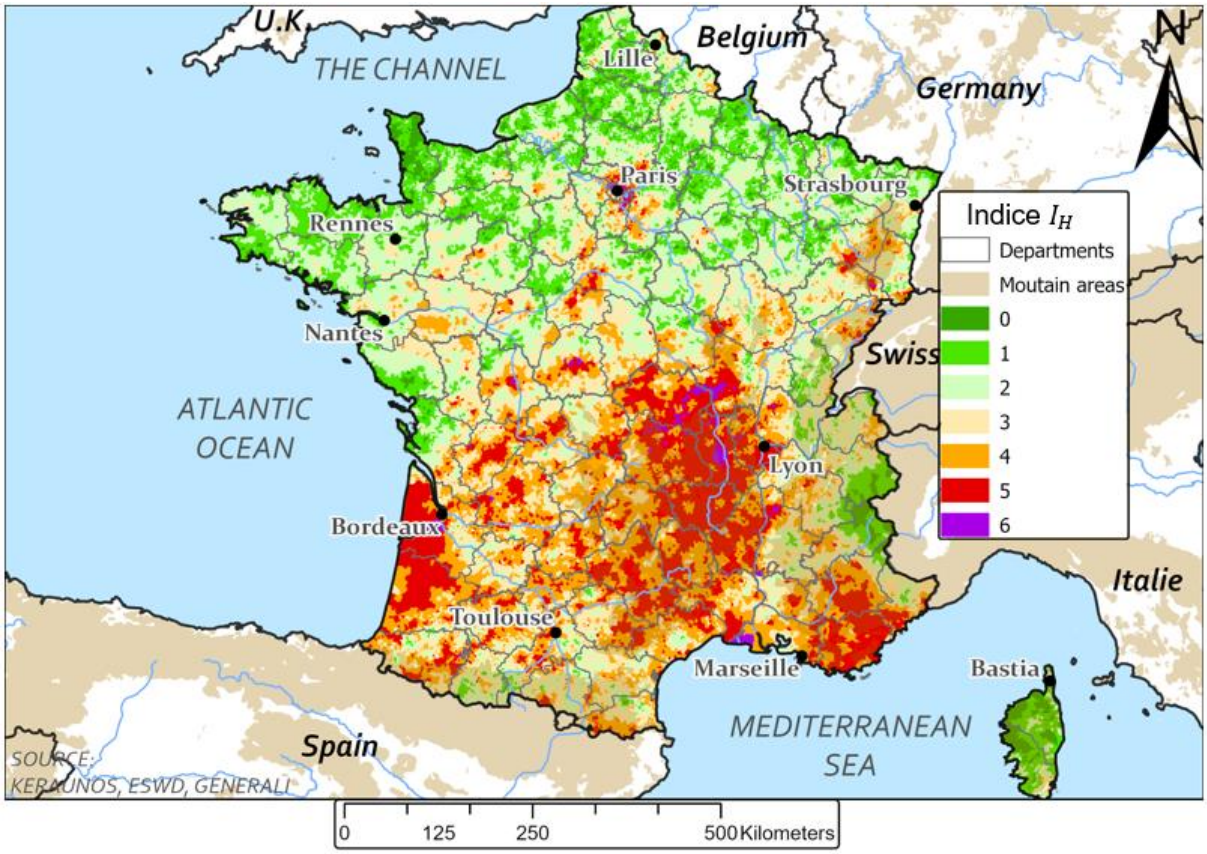


Figure 117 Répartition géographique de l'indice grêle I_H à l'échelle de la commune. L'indice représenté est celui tenant compte de l'influence des communes voisines, BD HD, ©M. Trevisani.

Quatre secteurs géographiques semblent se démarquer comme les plus touchés par l'aléa grêle :

- Le secteur le plus touché correspond au Massif Central, en particulier dans sa partie orientale. Il concentre 107 communes avec un indice maximal (6/6), soit 57% de la totalité de la zone 6.
- Le Sud-Ouest Atlantique et la région Provence-Alpes-Côte d'Azur arrivent en deuxième position, avec respectivement 20 (11%) et 6 (3%) communes avec un indice maximum et la majeure partie de leur territoire avec un niveau d'aléa supérieur à 5/6.
- L'Île-de-France arrive en quatrième position des secteurs géographiques les plus touchés par la grêle en France, avec une part non négligeable de son territoire avec un niveau d'aléa supérieur à 4/6. C'est également le seul secteur à être situé dans la moitié nord de la France, avec 20% des municipalités présentant un indice supérieur à 5/6.

6.1.3 Influence de l'année 2022 sur notre représentation de la grêle en France

L'impact de l'année 2022 sur notre cartographie de l'aléa grêle à l'aide de l'indice I_H a été étudié en comparant les résultats obtenus pour la période 2013-2022 avec celle pour 2013-2021, en conservant les seuils établis sur le Tableau 11. Les différences entre les deux cartographies sont visibles sur la Figure 118 et la Figure 119. L'indice moyen pour la période 2013-2021 est de 0,6 (médiane à 1), contre 2,6 (médiane à 2) pour la période 2013-2022. L'incorporation de 2022 dans notre cartographie entraîne donc une augmentation globale des indices I_H, avec 18% des communes qui connaissent une augmentation supérieure à 1. Cette augmentation semble également être favorisée du Centre / Centre

– Est, signe que les couloirs grêlifères de 2022 ont plutôt subi un décalage vers le Nord-Ouest au regard des couloirs grêlifères « classiques » de la période 2013-2021. À ce stade, il est encore trop tôt pour conclure sur une évolution des couloirs grêlifères en France compte tenu du caractère exceptionnel de 2022.

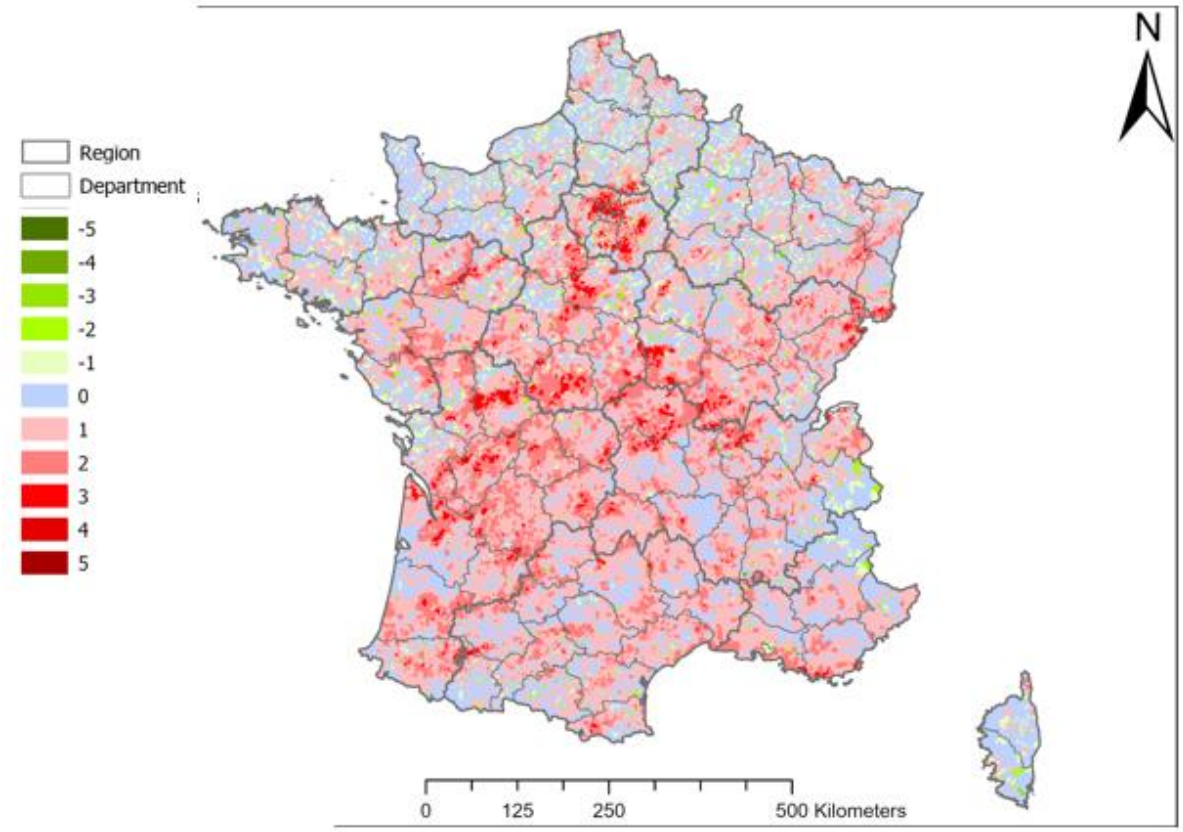


Figure 118 Différences de l'indice I_H calculé sur la période 2013-2022 avec celui calculé sur la période 2013-2021, ©M. Trevisani.

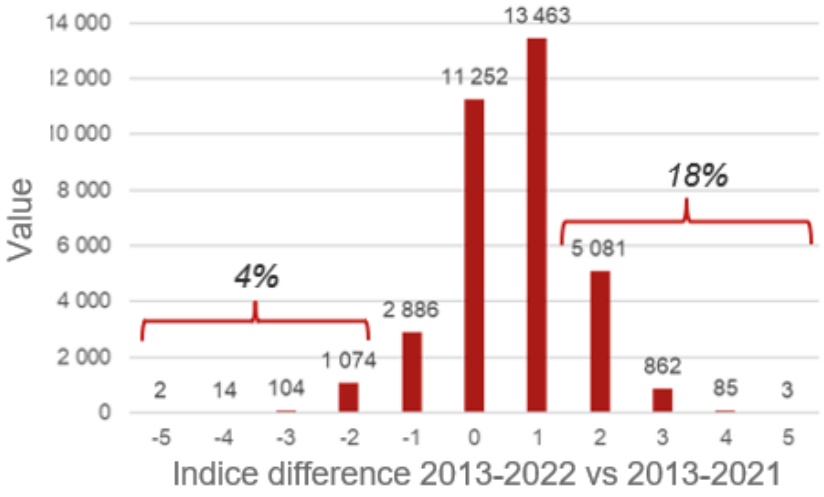


Figure 119 Différences de l'indice I_H calculé sur la période 2013-2022 avec celui calculé sur la période 2013-2021, ©M. Trevisani.

Cependant, on constate que l'augmentation de l'indice I_H par commune reste majoritairement faible, avec près de trois quart des communes ayant connues une augmentation comprise entre -1 et +1 et un tiers de communes conservant le même indice.

Cette cartographie, ayant vocation à être exploitée opérationnellement par une compagnie d'assurance, il est difficile de faire le choix d'exclure l'année exceptionnelle de 2022 de notre étude au regard des conséquences économiques majeures qu'elle a eu sur notre société. Ce choix se retrouve d'autant plus justifié par le caractère exceptionnel de la grêle de 2023 de l'autre côté des Alpes en Italie (cf. section 3.4.3 du chapitre 3).

6.1.4 Une mise-à-jour de la vision aléa grêle en France

La Figure 120 permet de comparer les principales cartographies de la grêle en France (Punge et al., 2017 et Vinet, 1998) avec celle de nos travaux. La première cartographie (Vinet, 1998) est la cartographie de référence de l'aléa grêle en France, malgré son ancienneté (> 25 ans). Elle a été réalisée en analysant la fréquence et l'énergie des chutes de grêle à partir des données du réseau de grêlimètre de l'Anelfa et des données d'assurances viticoles. La seconde cartographie (Punge et al., 2017), plus récente, examine uniquement la fréquence des chutes de grêle en France avec grêlons de plus de 2 cm. Elle a été constituée à partir des rapports ESWD, la réanalyse ERA-INTERIM (conditions atmosphériques) et la détection de sommets froids pénétrants (Meteosat).

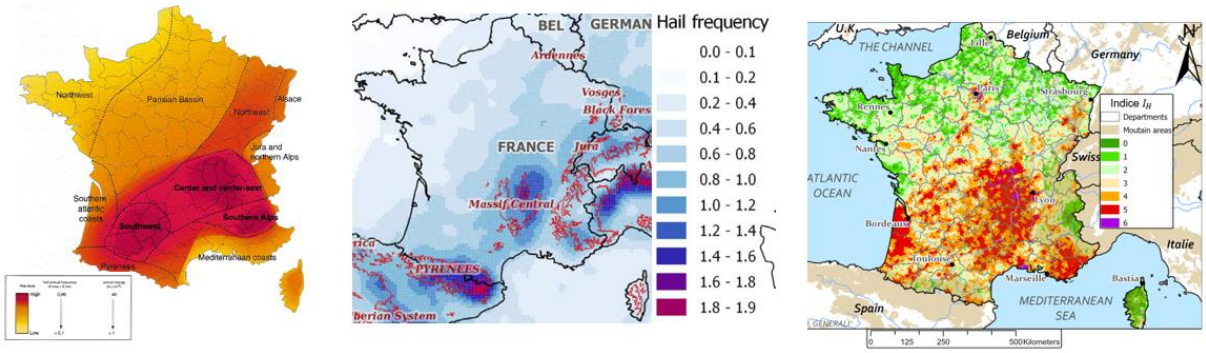


Figure 120 Comparatif des principales cartographies de la grêle en France. De gauche à droite, cartographie de l'aléa grêle par Vinet (Vinet, 1998), cartographie de la fréquence grêle par Punge et al. (Punge et al., 2017), et cartographie de l'aléa grêle de notre étude, ©M. Trevisani.

Notre cartographie de la grêle à l'échelle de la France présente la résolution la plus fine jamais réalisée. Elle considère le niveau de la commune (INSEE) comme maille d'analyse, soit une maille irrégulière d'environ 16 km², contre respectivement un maillage carré régulier de 100 km² (6x plus fin) et 400 km² (25x plus fine) pour les travaux de Punge et al. et ceux de Vinet (Trevisani, 2024).

En comparant les différents travaux entre eux, on remarque que l'axe Pyrénées – Vosges (Sud-Ouest / Nord-Est) se distingue sur l'ensemble de ces études, en particulier sur ceux s'intéressant à l'aléa grêle. On retrouve ainsi une nette distinction entre les territoires situés au Nord de cet axe et ceux situés au Sud : les territoires situés au Sud de cet axe sont bien plus touchés par la grêle.

Ces travaux s'accordent également pour identifier le Massif Central comme le secteur le plus grêlifère de France, avec un maximum situé sur la portion Ouest du Massif Central. Il existe cependant des petites nuances géographiques : notre étude identifie plutôt la portion Nord / Nord-Est du Massif Central comme maximum local, alors que c'est plutôt la portion Est sur les autres études. Ce résultat

peut s'expliquer en partie par l'année grêle exceptionnelle de 2022 impactant lourdement le Nord du Massif Central, comme ce fut le cas à Vichy le 4 juin 2022[84].

Trois autres secteurs géographiques particulièrement grêlifères ont également été identifiés dans cet article, sans que ce soit le cas dans les autres études :

- Le Sud-Ouest Atlantique, un maximum local situé autour de Bordeaux, apparait uniquement dans l'étude de Vinet (Vinet, 1998), sans que ce soit le cas dans celle de Punge et al. (Punge et al., 2017). Cependant, Vinet identifie plutôt le Sud-Ouest intérieur comme l'un des principaux secteurs grêlifères, alors qu'il s'agit plutôt d'un point froid dans notre étude.
- La Provence-Alpes-Côte d'Azur (Sud - Est), notamment dans les Préalpes, ressortent également comme particulièrement grêlifères, avec un indice I_H ne descendant que rarement sous la valeur « 4 ». Les Préalpes ne se distinguent pas véritablement dans l'étude de Punge et al. (Punge et al., 2017) même si elles apparaissent, alors que nous pouvons les trouver dans celle de Vinet (Vinet, 1998). Cependant, les Préalpes méditerranéennes ressortent uniquement dans notre étude.
- La région Île-de-France est l'unique secteur géographique grêlifère situé au Nord de l'axe Pyrénées - Vosges. Il n'apparait dans aucune autres étude, malgré l'évènement grêle exceptionnel de 2014 entrainant des pertes de l'ordre du milliard d'euros dans la région.

Il est également possible d'identifier une potentielle évolution de l'aléa grêle en comparant nos travaux avec ceux de Vinet (Vinet, 1998) car ces derniers s'intéresses à l'ensemble de l'aléa grêle (fréquence et intensité). On constate ainsi une certaine évolution des couloirs grêlifères en France, avec un décalage en direction du Nord-Est des couloirs identifiés par Vinet (Vinet, 1998). L'aléa grêle semble également avoir été sensiblement modifié dans le Sud-Ouest de la France, avec un décalage de l'aléa grêle en direction de l'Atlantique, couplé à une réduction de l'aléa dans le Sud-Ouest intérieur. Cette évolution, bien que nécessitant d'être plus approfondie et validée par d'autres études, peut être induite par :

- Une évolution de l'aléa à la suite des travaux de prévention grêle réalisés par l'Anelfa dans le Sud-Ouest de la France (cf section 5.3.1 du chapitre 5 pour l'évaluation de ces méthodes),
- Une évolution de l'aléa à la suite du changement climatique,
- La non-incorporation des données grêlimètriques de l'Anelfa, fortement biaisées géographiquement dans le Sud-Ouest de la France.

6.1.5 Correspondance de l'indice aléa avec la sinistralité grêle de Generali France

Afin de caractériser la performance de notre indice aléa grêle au regard de la sinistralité historique de Generali France entre 2013 et 2022, nous avons utilisé des indicateurs de sinistralité.

Le premier indicateur, nommé ratio L_r, met les pertes en perspectives avec les sommes assurées, pouvant être approximé comme un « taux de destruction » moyen du bien. Il est défini comme :

$$L_r = \frac{L}{E} \qquad [6.1.5.1]$$

avec :

- L les pertes cumulées sur le périmètre étudiée,

[84] Point de situation : orage de grêle 4 juin 2022, www.ville-vichy.fr

- E la sommes de la valeur des biens assures sur le périmètre étudié (exposition).

Le deuxième indicateur, nommé $T_{L/E}$, a pour objectif de décorréler la sinistralité de l'exposition d'une manière différente que le ratio L_r. Pour cela, il permet de mettre en évidence sur un territoire une sur/sous-représentation de la sinistralité au regard de la part d'exposition qu'il représente. Il est calculé en utilisant la formule suivante :

$$T_{L/E} = \frac{T_L}{T_E} = \frac{{L_i}/{L_{tot}}}{{E_i}/{E_{tot}}} \qquad [6.1.5.2]$$

Avec :

- $L_i$et E_i respectivement les pertes et l'exposition cumulée du périmètre étudié,
- $L_{tot}$and E_{tot} respectivement le total des pertes cumulées et de l'exposition cumulé.

En supposant que l'aléa est homogène sur l'ensemble du territoire, cet indice devrait être proche de la valeur « 1 » à l'échelle régionale et nationale. Par exemple, si un secteur géographique représente 30% de l'exposition totale, il devrait également porter 30 % des pertes cumulées. Par conséquent, plus l'écart de cet indicateur s'éloigne de « 1 » localement, plus cela indique un déséquilibre entre la sinistralité et l'exposition, mettant ainsi en évidence des points chauds (>> 1) et des points froids (~ 0), l'intensité locale étant directement reliée à l'éloignement de la valeur « 1 » de l'indice.

On constate que l'ensemble des indicateurs de sinistralité grêle de Generali France entre 2013 et 2022 est en parfait adéquation avec l'indice I_H (Tableau 13), signe de la robustesse de l'indice.

Tableau 13 Résumé de la répartition de l'exposition et des indicateurs de sinistres de Generali France entre 2013 et 2022, discrétisée par indice aléa grêle en France.

I_H	Commune		Expo.	Communes sinistrées	Sin max*	Pertes	Sinistres	L_r (‰)	$T_{L/E}$
0	1 603	5%	2%	2%	0,0 M€	0%	0%	0,01‰	0,0
1	6 412	18%	10%	21%	0,6 M€	2%	3%	0,02‰	0,2
2	10 078	29%	18%	27%	1,1 M€	9%	11%	0,03‰	0,4
3	7 649	22%	22%	36%	1,3 M€	16%	19%	0,05‰	0,8
4	5 614	16%	22%	45%	2,7 M€	24%	25%	0,07‰	1,5
5	3 389	10%	24%	56%	4,3 M€	34%	34%	0,10‰	3,5
6	189	1%	3%	86%	8,0 M€	14%	8%	0,34‰	26,2

**Sinistre grêle le plus coûteux de Generali France, € constants 2022.*

En effet, on constate une dégradation des indicateurs de sinistralité lorsque l'indice aléa grêle augmente, avec une explosion des indicateurs en zone maximale (6/6) :

- La proportion de communes subissant des pertes est presque nulle parmi celles du niveau 0, alors que cette proportion atteint 86% dans le niveau d'indice maximal. On constate également une augmentation moyenne de +33% de la proportion de communes sinistrées à chaque incrémentation du niveau d'aléa.
- Le sinistre le plus coûteux par niveau d'aléa grêle augmente de 70% à chaque incrémentation, avant d'exploser au sein du niveau maximal zone maximale : le sinistre le plus coûteux du niveau 6 représente 2 fois celui du niveau 5.
- Le ratio L_r augmente également en moyenne de + 60% du niveau 0 au niveau 5. Dans le niveau maximal, ce ratio explose, atteignant 0,34‰, ce qui correspond à une augmentation de +240% par rapport à la zone 5 (et 10x celui du niveau 2).

- Enfin, l'indicateur $T_{L/E}$ double entre à chaque incrémentation entre les zones 1 et 5, passant de 0,2 à 3,5, et explose une fois de plus au sein du niveau 6 avec un indicateur dépassant 26, soit plus de 7 fois celui du niveau 5.

Après une étude approfondie de la sinistralité, les caractéristiques du niveau 6 s'expliquent par la sinistralité grave (sinistre > 150 000 €), visible sur le Tableau 14 : 8,2‰ des sinistres expliquent près de 50% de la sinistralité du niveau 6. Au global, l'indice aléa grêle est toujours cohérent avec l'évolution de la sinistralité grave ; la part de sinistre grave double à chaque incrémentation du niveau d'aléa.

Tableau 14 Résumé de la répartition des sinistres graves (sinistre > 150 000 €) sur l'ensemble de la sinistralité grêle entre 2013 et 2022

I_H	Proportion de sinistres graves	Part des pertes associées aux sinistres graves
0	-	-
1	0,6‰ (1)	7%
2	1,3‰ (8)	8%
3	2,7‰ (28)	14%
4	3,6‰ (49)	19%
5	4,2‰ (79)	26%
6	8,2‰ (34)	47%

Le nombre entre parenthèse correspond au nombre de sinistres graves

Ce constat reste toujours valide lorsqu'on analyse les indicateurs de sinistralité par niveau d'aléa au sein de chaque produit assurantiel (DAB, Auto et récolte). On remarque cependant que la plus grande robustesse se retrouve pour les produits DAB et auto, alors qu'elle est moindre pour l'agricole (Tableau 15). Cela peut probablement s'expliquer par :

- La vulnérabilité variable d'une culture au cours du temps, entrainant des conséquences potentiellement très différentes pour une même chute de grêle ; une chute de grêle avant floraison n'aura pas les mêmes conséquences que si elle se produit juste avant la récolte.
- La répartition géographique du portefeuille agricole qui est beaucoup plus exposée en zone 4 et 5 ; la part du portefeuille agricole en zone 6 est en effet très faible.

Tableau 15 Résumé de la répartition des indicateurs de sinistralité par produit assurantiel (DAB, récolte et auto) au sein de chaque niveau d'aléa grêle.

		Sinistres (dont grave, ‰)			Pertes (dont grave, %)			$T_{L/E}$				S/E (‰)			
		Ag	Dab	Auto	Ag	Dab	Auto	Tot	Ag	Dab	Auto	Tot	Ag	Dab	Auto
Score aléa grêle	0	31%	39%	30%	41% (11)	38%	21%	0,0	0,0	0,0	0,0	0,01	3,6	0,00	0,06
	1	35%	39% (1,4)	26%	48%	39% (18)	14%	0,2	0,5	0,1	0,2	0,02	4,8	0,01	0,09
	2	29% (1,1)	43% (2,7)	27%	41% (4)	45% (15)	14%	0,4	0,8	0,3	0,3	0,03	5,5	0,02	0,17
	3	20% (6,8)	46% (3,1)	35%	35% (19)	47% (16)	17%	0,8	1,5	0,6	0,8	0,05	9,1	0,02	0,39
	4	13% (4,0)	49% (5,8)	38%	22% (9)	62% (26)	16%	1,5	1,7	1,5	1,5	0,07	11,2	0,05	0,48
	5	5% (5,8)	51% (7,7)	45%	9% (16)	71% (35)	20%	3,5	1,7	3,9	4,3	0,10	11,6	0,07	0,67
	6	2%	57% (13,1)	41% (0,6)	1%	89% (52)	10% (5)	26,2	1,5	36,0	15,8	0,34	18,4	0,31	1,29
	Total	13% (3,9)	49% (6,2)	38% (0,0)	19% (11)	65% (32)	16% (0)					0,07	8,30	0,05	0,44

On constate cependant une hétérogénéité géographique de la sinistralité au sein d'un même niveau aléa grêle, avec la présence de « Cold spot » (indicateurs de sinistralité anormalement faible au regard du reste du niveau) et de « Hot spot » (indicateurs de sinistralité anormalement élevés au regard du reste du niveau. Ces hétérogénéité peuvent même être particulièrement marquées pour les hauts niveaux d'aléa grêle (5 – 6), visible sur le Tableau 16.

Tableau 16 Tableau récapitulatif des « Cold spots » de sinistralité identifié au sein de chaque niveau d'aléa grêle (6 – 5 – 4)

		Zone 6		Zone 5			Zone 4		
		Île-de-France	Bordelais	Côte d'Azur	Île-de-France	Est Massif Central (inf)	Provence-Alpes-Côte d'Azur	Île-de-France	Pointe Est
	Communes	33	11	257	143	606	274	229	345
	Sinistre moy.	3 586 €	5 622 €	5 134 €	4 009 €	5 322 €	4 162 €	6 872 €	5 492 €
	S/E	0,02 ‰	0,23%	0,04 ‰	0,02 ‰	0,10 ‰	0,01 ‰	0,05 ‰	0,09 ‰
	Engagements	10 Md€ (1,7%)	2 Md€ (0,3%)	23 Md€ (4%)	35 Md€ (6,2%)	26 Md€ (4,6%)	29 Md€ (5,1%)	22 Md€ (3,9%)	5 Md€ (0,8%)
Au global	Communes	189		3 389			5 614		
	Sin. moyen	12 989 €		6 878 €			6 754 €		
	S/E	0,34 ‰		0,10 ‰			0,07 ‰		
	Engagements	16 Md€ (3%)		131 Md€ (24%)			123 Md€ (22%)		

On identifie ainsi :

- Île-de-France niveau 6 : 33 communes avec ratio moyen L_r de 0,02‰ (moyenne de 0,34‰ pour le niveau 6), avec des sinistres en moyenne 4x moins coûteux dans ce secteur que sur le reste des communes du niveau 6,
- Île-de-France zone 5 : 143 communes avec ratio moyen L_r de 0,02‰ (moyenne de 0,10‰ pour le niveau 5), avec des sinistres en moyenne plus faibles : -42% au regard du reste du niveau 5,
- Côte d'Azur zone 5 : 257 communes avec ratio moyen L_r de 0,04‰ (moyenne de 0,10‰ pour le niveau 5), avec des sinistres en moyenne plus faibles : -25% au regard du reste du niveau 5.

On constate ainsi que plus le niveau d'aléa grêle baisse, plus il est difficile d'identifier des secteurs géographiques « Cold spot ». Dans une moindre mesure, il est également possible de faire la même analyse et le même constat concernant les « Hot spots » au sein d'un même niveau d'aléa grêle.

Cette analyse plus détaillée de la sinistralité grêle de Generali France (infra niveau d'aléa grêle) met en évidence les limites de cet indice dans sa mise en perspective avec l'endommagement induit par une chute de grêle. Il pourrait donc être intéressant de coupler cet indice I_H avec l'endommagement, dans le but de créer un nouvel indice grêle amélioré pouvant approcher le risque grêle, afin d'avoir une vision prospectif du risque grêle pour Generali France.

6.2 H, un indice aléa grêle amélioré approchant le risque grêle

6.2.1 Construction du nouvel indice

Pour améliorer notre représentation de l'aléa grêle dans une problématique assurantielle, le précédant indice grêle I_H a été croisé avec la vulnérabilité moyenne des communes face à la grêle. Cette vulnérabilité a été approchée par l'endommagements causé par les chutes de grêle sur le portefeuille de Generali France entre 2013 et 2022 en utilisant le ratio L_r défini à l'aide de la formule [6.1.5.1] (section 6.1.5 du chapitre 6).

Toutes les valeurs monétaires ont été exprimées en euros constants de 2021, calculées à partir des taux d'inflation annuels communiqués par l'INSEE entre 2013 et 2022. Les montants assurés correspondent à la somme des montants assurés sur les produits DAB, automobile et agricole. Le portefeuille agricole utilisé est celui de notre période d'étude (2013-2022).

Pour le DAB et l'automobile nous avons fait l'hypothèse que les montants assurés par commune en 2022 étaient représentatifs de la période 2013-2022. Même si cette hypothèse peut paraître limitative dans un premier temps, elle reste nécessaire puisque nous n'avons pas eu accès au portefeuille pour ces deux produits avant 2020. L'approximation du portefeuille associée à cette hypothèse reste également limitée. En effet, les variations générales des portefeuilles telles que les résiliations et les

affaires nouvelles restent généralement homogènes d'une commune à l'autre. Les modifications de portefeuilles associées aux stratégies d'entreprise, tels que le " derisking ", sont effectuées à l'échelle intra-municipale. Le derisking concerne ainsi généralement une très faible fraction des communes et du portefeuille d'assurés.

Comme l'exposition de Generali France face à la grêle n'est pas parfaitement connue sur la période 2013-2022, nous avons fait le choix d'attribuer un ratio L_r « non renseigné » (NR) :

- Les communes ayant déclarées un sinistre grêle sur la période sans avoir souscrit de polices d'assurance en 2022 pour le DAB et l'auto et sur la période 2013-2022 pour l'agricole (5% des communes sans contrat d'assurance Generali France en 2022),
- Les communes avec un ratio L_r nul malgré la présence d'au moins une chute de grêle avec grêlons de plus de 2 cm de diamètre sur la période 2013-2022 (30% des communes concernés).

Le ratio L_r a été divisé en trois catégories au regard de sa distribution sur les communes sinistrées uniquement (Tableau 17).

Tableau 17 Centiles associés au ratio L/E, calculé par commune sur la période 2013-2022 (DAB, auto, agricole). A gauche, le centile est calculé uniquement sur les communes avec un ratio L/E non nul.

	L/E (‰)
P10	0,01‰
P20	0,02‰
P25	0,02‰
P30	**0,03‰**
P40	0,05‰
P50	0,09‰
P60	0,14‰
P70	0,25‰
P75	**0,34‰**
P80	0,47‰
P90	1,16‰
P95	2,55‰

La première catégorie comprend les communes dont le ratio L_r est nul. Elle concerne les communes n'ayant jamais connues de chutes de grêle et celles n'ayant jamais eu de contrat d'assurance. La deuxième catégorie comprend les communes dont le ratio est inférieur à 0,03‰ (30ème percentile), tandis que la troisième catégorie comprend celles dont le ratio est compris entre 0,03‰ et 0,34‰ (30ème – 75ème percentile). La dernière catégorie comprend les communes dont le ratio est supérieur à 0,34‰ (75ème percentile).

L'indice aléa grêle amélioré, appelé H, est calculé à l'échelle de la commune en utilisant les critères décrits dans le Tableau 18, à partir de l'indice aléa grêle I_H et la vulnérabilité de la commune, estimée à l'aide du ratio L_r lorsqu'il est non nul. Cet indice ne différencie pas les extrêmes polarisés" (couple aléa fort - faible vulnérabilité et inversement) des situations moyennes (aléa moyen et vulnérabilité moyenne), contrairement au précédent indice I_H.

Tableau 18 Indice aléa grêle amélioré, nommé H, à l'échelle de la commune.

		Aléa grêle amélioré		
		0 - 2	3 - 4	5- 6
L_r (‰)	0 - 0.03	1	2	3
	0.03 - 0.34	2	3	4
	≥ 0.34	3	4	5

Les ratios L_r nul ou NR ont été exclus lors du calcul de l'indice H. Cette exclusion se justifie en assumant qu'un ratio nul ou NR a été provoqué par une variation locale importante du nombre d'assurés Generali France entre 2013 et 2022, provoquant ainsi un biais marqué sur l'exposition de Generali France sur cette même période. En effet, il est très peu probable qu'une commune ne connaisse aucun sinistre grêle sur une période de 10 ans au regard de la distribution spatio-temporelle des chutes de grêle sur la période étudiée.

Au regard de nos différentes hypothèses 65% des communes ont ainsi un indice H renseigné initialement. Afin d'estimer cet indice dans les communes restantes, nous avons utilisé la formule [6.2.1] ci-dessous qui considère à la fois l'indice I_H de la commune étudiée et l'indice H des communes voisines dans un rayon de 10 km de la commune considérée.

$$H = \frac{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} H_i \; + \; I_H}{2} \qquad [6.2.1]$$

Avec :

- H_i l'indice aléa grêle amélioré initial des communes voisines dans un rayon de 10 km,
- n le nombre de voisin dans un rayon de 10 km avec un indice aléa grêle amélioré initial renseigné,
- I_H l'indice aléa grêle de la commune étudiée ramené sur 5 niveaux. Le niveau 6 et le niveau 0 sont respectivement inclus dans les niveaux 5 et 1.

Afin de couvrir l'ensemble des communes sans indice aléa grêle amélioré, le processus a été appliqué à 5 reprises successives. Après le premier tour, la complétude de l'indice H augmente de 65% à 93%. La complétude passe ensuite à 99% après le deuxième tour, les tours suivants ne faisant gagner que quelques dixièmes de pourcentage de complétude. Pour compléter l'indice H sur les communes restantes, le processus a été appliqué aux 5 communes voisines les plus proches (centre à centre) plutôt que celles présentes dans un rayon de 10 km. On peut voir l'influence local du processus sur la complétude de l'indice H sur la Figure 121.

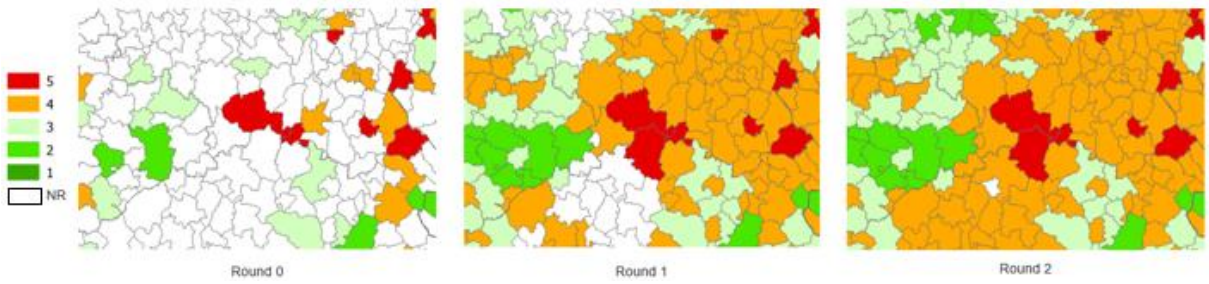


Figure 121 Influence du processus de rehaussement de l'indice H après 2 tours de traitement, ©M. Trevisani.

Dans le but de vérifier la pertinence de cet indice au regard de l'historique de la sinistralité grêle de Generali France, nous avons réalisé un sous-échantillonnage de l'historique de la sinistralité grêle chez Generali France :

- Une base d'entrainement afin d'estimer notre indice H pour chaque commune.
- Une base de test afin de mesurer le captage de la sinistralité grêle par l'intermédiaire de notre zonage, indépendamment de celle utilisée dans la constitution de l'indice.

1 000 sinistres, soit environ 2% de la sinistralité grêle cumulée entre 2013 et 2022, ont été utilisés pour constituer la base de test. Afin d'éviter la sur/sous-représentation d'une certaine année dans notre jeu de test, 100 sinistres ont été sélectionnés chaque année entre 2013 et 2022 afin de tenir compte de la forte variabilité interannuelle de la grêle d'une année à l'autre. L'indice H est ensuite estimé à partir du ratio L/E calculé sur le jeu d'entrainement.

Afin d'éviter des biais de sélection des sinistres dans notre base de test (i.e. sinistres dans le top 5% des plus coûteux), trois jeux (couple base test – base entraînement) ont été réalisés suivant la même méthode, l'indice final H correspond ainsi à la moyenne des trois jeux de données pour chaque commune. On retrouve les différentes étapes de la construction de l'indice H schématisées sur la Figure 122.

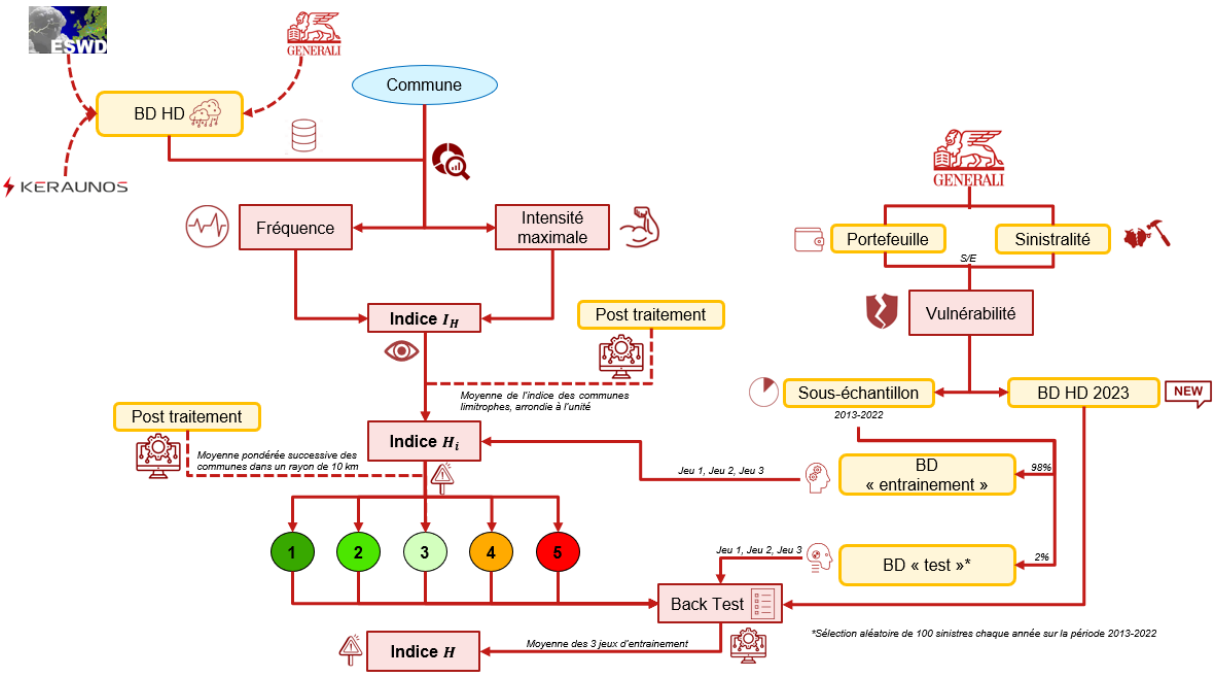


Figure 122 Schéma représentant les différentes étapes dans le calcul de l'indice H, ©M. Trevisani.

Les caractéristiques de chaque jeu de données, jeu d'entraînement et jeu de test, sont présentées sur le Tableau 19. On peut ainsi voir l'intérêt de calculer l'indice H final en moyennant les résultats obtenus au sein de chaque jeu de données puisque cela permet de réduire les biais potentiels associés à des sinistres anormalement hauts (i.e. sinistres graves), visible par exemple sur le jeu 3 (coût moyen anormalement élevé sur la zone 4).

Tableau 19 Tableaux résumant les caractéristiques de chaque jeu de données (entraînement et test), utilisé dans l'élaboration de l'indice H final.

Jeu 1

Entraînement

Risque	Population	
5	623	2%
4	6 891	20%
3	6 790	19%
2	18 059	52%
1	2 463	7%

Test

Risque	Pertes	Eng.	Ratio	Coût moyen
5	27%	2%	15,6	15 335 €
4	36%	13%	2,7	7 558 €
3	26%	26%	1,0	5 533 €
2	10%	44%	0,2	3 314 €
1	1%	15%	0,1	1 733 €

Jeu 2

Entraînement

Risque	Population	
5	615	2%
4	6 887	20%
3	6 741	19%
2	18 094	52%
1	2 489	7%

Test

Risque	Pertes	Eng.	Ratio	Coût moyen
5	18%	2%	10,6	8 717 €
4	39%	13%	3,1	6 999 €
3	25%	26%	1,0	5 141 €
2	15%	44%	0,3	5 137 €
1	2%	16%	0,2	3 120 €

Jeu 3

Entraînement

Risque	Population	
5	617	2%
4	6 864	20%
3	6 773	19%
2	18 107	52%
1	2 465	7%

Test

Risque	Pertes	Eng.	Ratio	Coût moyen
5	15%	2%	9,4	13 287 €
4	58%	13%	4,4	16 486 €
3	17%	26%	0,7	5 045 €
2	8%	44%	0,2	3 349 €
1	2%	16%	0,1	3 579 €

6.2.2 *Géographie de l'aléa grêle amélioré à travers l'indice* H

L'utilisation de cet indice H permet une approche du risque grêle, en combinant aléa et vulnérabilité locale. La géographie de cet indice est présentée sur la Figure 123, et sa distribution est indiquée dans le Tableau 20 (moyenne nationale à 2).

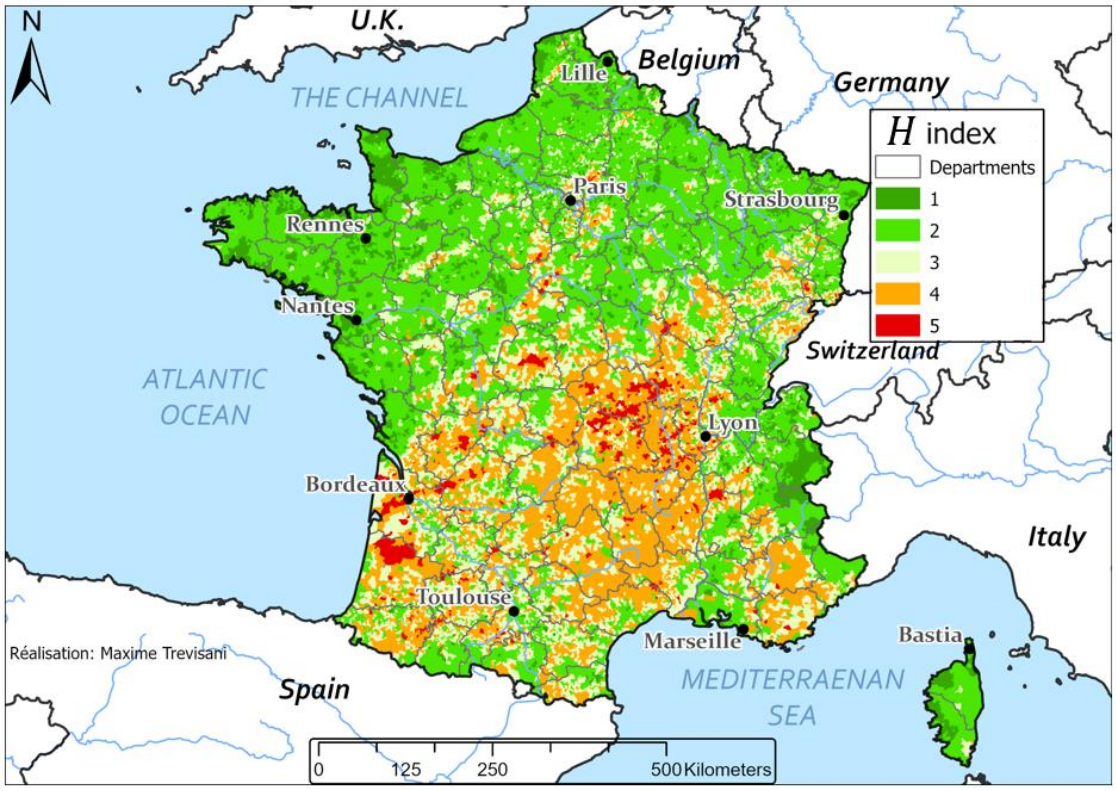


Figure 123 Répartition géographique de l'indice grêle H à l'échelle de la commune. L'indice représenté correspond à l'indice moyen calculé à partir des 3 différents jeux d'entraînement, BD HD, ©M. Trevisani.

Tableau 20 Distribution par commune de l'indice H final (après moyenne avec les 3 jeux de données)

Risque	Population	
5	623	2%
4	7 931	23%
3	8 319	24%
2	16 768	48%
1	1 185	3%

Ce nouvel indice approchant le risque de grêle met encore plus en évidence l'axe Pyrénées - Vosges que celui présenté dans la section 6.1.2 du chapitre 6, puisque la région Île-de-France ne se démarque plus comme une territoire particulièrement grêlifère. On constate une fois de plus une certaine corrélation entre l'orographie régionale et le niveau moyen de l'indice de risque, même si cette dernière devrait être plus recherchée avant de conclure définitivement.

Il met également en évidence trois secteurs géographiques comme « Hot spots » de la grêle (risque élevé), contre quatre pour le premier indice (disparition de la région Île-de-France). Les secteurs avec un haut niveau de risque grêle sont tous situés sous l'axe Pyrénées – Vosges, et leur localisation géographique est plus fine que celle avec l'indice I_H :

- Le Massif Central, en particulier sa partie Nord / Nord - Est, se distingue comme le secteur présentant le plus haut niveau de risque grêle. La grande majorité des communes du niveau 5 se trouvent dans ce secteur géographique, et presque toutes les communes (> 95%) ont un indice de 4 ou plus.
- L'axe Bordeaux - Paris, avec un maximum local au niveau du Sud-Ouest Atlantique, est la deuxième zone avec le plus haut niveau de risque grêle. Dans l'ensemble, le reste des communes de niveau 5 se trouve dans cette zone géographique, et environ 40% des communes sont au niveau 4 ou plus.
- La région Provence-Alpes-Côte d'Azur se démarque enfin comme le troisième secteur géographique avec le plus haut niveau de risque grêle, avec un maximum local situé au niveau de la région préalpines. Le niveau de risque de ce secteur reste cependant bien derrière celui des 2 premiers.

Certaines villes avec un haut niveau d'indice I_H ont ainsi vu leur niveau de risque grêle s'adapter en fonction de leur vulnérabilité (Tableau 21)

Tableau 21 Exemples du niveau d'aléa grêle et du niveau de risque grêle estimé sur plusieurs communes

	Niveau aléa grêle (I_H)	Niveau de risque grêle (H)
Paris	5/6	3/5
Lyon	5/6	3/5
Bordeaux	5/6	4/5
Châteauroux	6/6	5/5
Vichy	6/6	5/5
Nanterre	6/6	4/5
Clichy-la-Garenne	6/6	3/5

En croisant cette nouvelle cartographie avec les indicateurs de sinistré, on constate une homogénéité géographique de ces indicateurs au sein d'un même niveau de risque, résolvant ainsi la limite associée au premier indice I_H. On constate également une cohérence renforcée de ces indicateurs au regard de

l'indice final de risque grêle H ; il enregistre près de trois fois plus de communes en zone maximale pour une performance similaire à celle de l'indice I_H(Tableau 22).

Tableau 22 Discrétisation des indicateurs de sinistralité en fonction du niveau de risque grêle final

H	Communes		Exposition	Pertes	L_r (‰)	$T_{L/E}$
1	2 464	7%	16%	1%	0,06	0,1
2	18 052	52%	43%	7%	0,11	0,2
3	6 809	20%	26%	19%	0,51	0,7
4	6 879	20%	13%	38%	2,07	2,9
5	622	2%	2%	35%	14,52	20,4

Cette cartographie du risque grêle est maintenant utilisée opérationnellement chez Generali France en étant intégrée dans la tarification sur le renouvellement 2024 pour les produits RI, MRI et G&C, avec des perspectives d'implémentation dès 2025 sur les produits MRC et MRH.

Elle est également utilisée dans des travaux internes dans l'analyse prospective de nouveaux clients et sur l'analyse de la vulnérabilité face à la grêle des biens assurés (toiture en fibrociment sur le RI, vulnérabilité des contrats MRH) dans le but de réaliser un derisking de portefeuille de Generali France.

6.3 Evolution du risque grêle en France

Il existe très peu d'études concernant l'évolution du risque grêle en France. Cette évolution peut être induite à la fois par des mutations socio-économiques du territoires (apparition de nouvelles vulnérabilité comme les panneaux solaires, isolation par l'extérieur…), mais également par une mutation de l'aléa en France, en particulier dans un contexte de changement climatique.

Toutes les études ne s'accordent pas sur les tendances concernant les évolutions de l'aléa grêle en France (Hermida et al., 2015; Raupach et al., 2021). Cependant, la fréquence des chutes de grêle en France devrait diminuer au cours de la période estivale et augmenter lors de la période automnale sur le pourtour de la côte Méditerranéenne (Sanchez et al., 2017, pp. 1948–2015; Thurnherr et al., 2024). Les chutes de grêle sévères devraient également être plus fréquentes et plus intenses dans le futur (Ghasemifard et al., 2024; Kunz et al., 2020; Rädler et al., 2019).

Plusieurs études privées se sont intéressées à l'évolution de la grêle en France et des dommages qu'elles peuvent provoquer. Elles ont été conduites par des assureurs comme Covea[85], Swiss Re[86], Munich Re[87] et France Assureurs[88] et s'accordent pour identifier une explosion de la sinistralité grêle d'ici 2050.

L'étude réalisée par Covea s'intéresse à l'évolution du risque grêle d'ici 2050, en croisant les scénarios de mutations socio-économiques et les évolutions de l'aléa grêle associé au réchauffement climatique (RCP 8.5). Elle estime une augmentation de l'ordre de +40% de la fréquence des orages grêligènes à horizon 2050, entraînant augmentation de l'ordre de +20% de la sinistralité grêle sur le DAB et l'auto (Figure 124). Cette augmentation serait pour moitié provoquée à l'augmentation de l'aléa et pour

[85] Livre Blanc Covea, Changement climatique et assurance : quelles conséquences sur la sinistralité à horizon 2050 ?, Covea, 2022
[86] Sigma 01/2024: Natural catastrophes in 2023, Swiss Re, 2024
[87] Hail, tornado and flash flood, Munich Re
[88] Impact du changement climatique sur l'assurance à horizon 2050, France, 2021

moitié liée à la redistribution spatiale des expositions. Elle rejoint également notre étude en estimant un décalage vers le Nord-Est des territoire particulièrement fortement exposés aux chutes de grêle.

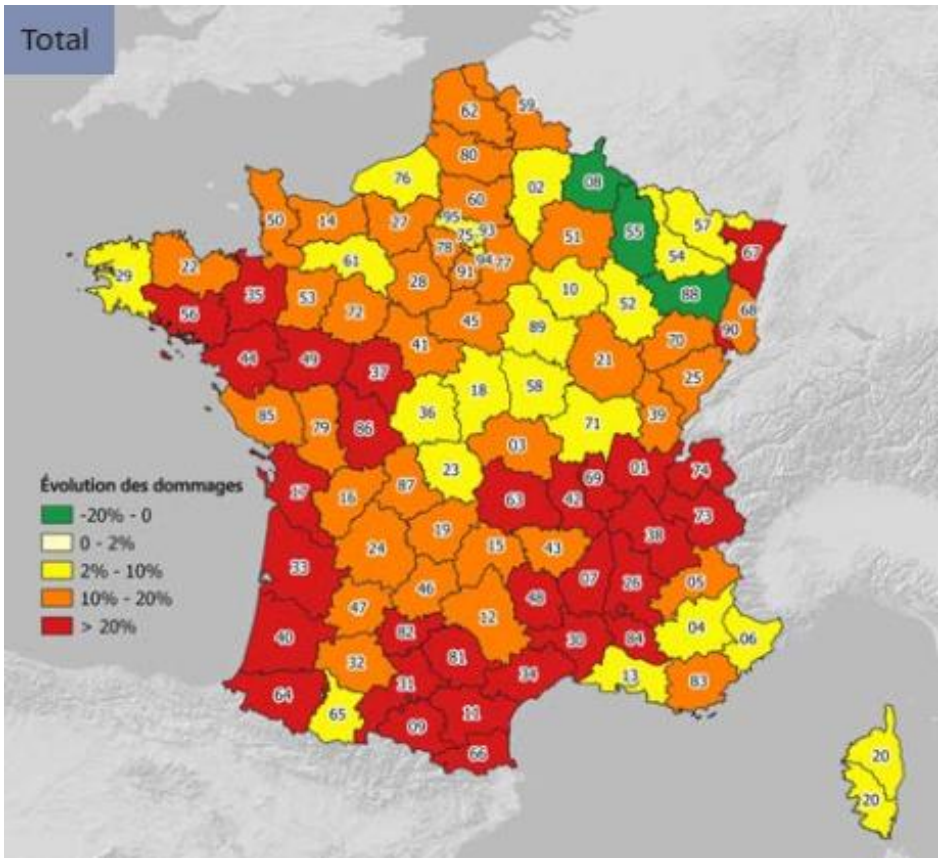


Figure 124 Évolution de la sinistralité annuelle moyenne "grêle" par département à horizon 2050 sur les produits DAB et Auto, ©Covea

Cette explosion de la sinistralité grêle sur les années récentes par les assureurs (Púčik et al., 2019; Taszarek et al., 2020), couplée à une tenance similaire concernant les autres aléas climatiques, pose la question de l'assurabilité des risques climatiques sur notre territoire.

Afin d'éviter la situation extrême constatée aux Etats-Unis, avec le retrait du marché de certains assureurs en Floride[89], Bruno Le Maire et Christophe Béchu ont lancé une mission sur l'assurabilité des risques climatiques le 26 mai 2023 (mission Langreney), chargée de faire des propositions pour garantir la soutenabilité du régime d'indemnisation des catastrophes naturelles et renforcer le rôle du système assurantiel dans la prévention, l'atténuation et l'adaptation face au dérèglement climatique. Le rapport de mission Langreney a été remis aux ministres Bruno Le Maire et Christophe Béchu le 2 avril[90]. Le rapport formule 11 objectifs majeurs et 37 recommandations, qui visent le rééquilibrage financier du régime d'indemnisation des catastrophes naturelles, le renforcement des efforts de prévention individuelle et collective face aux aléas climatiques et le maintien d'un système assurantiel protecteur, accessible et mutualisé entre tous les assurés. A la suite de ces travaux, le Gouvernement agira pour renforcer l'assurabilité face au changement climatique, avec un plan d'action basé sur deux piliers :

- L'adaptation du modèle assurantiel, afin de préserver la mutualisation entre les assurés des périls climatiques couverts par le régime d'indemnisation des catastrophes naturelles. Le Gouvernement souhaite ainsi étudier comment moduler la cotisation sur les primes Cat Nat

[89] Le changement climatique fait flamber le prix des assurances habitation aux Etats-Unis, La Tribune, 2023
[90] Adapter le système assurantiel français face à l'évolution des risques climatiques, 2023

en fonction des aléas possibles dans chaque zone. L'objectif est de mobiliser un levier financier puissant pour éviter que certaines zones soient délaissées par le marché assurantiel.
- Le renforcement de la prévention des risques naturels et de la résilience des bâtiments, à travers des mesures de sensibilisation en lien avec le secteur assurantiel, des mesures de connaissance des risques et par un ciblage des efforts financiers de prévention et d'adaptation.

6.4 Conclusion du chapitre 6

L'objectif de ce chapitre était d'étudier la répartition de la grêle en France et du risque associé.

A travers la création d'un indice aléa grêle nommé I_H, calculé à partir de la fréquence et du diamètre maximal des grêlons recensés à la maille communale, nous avons pu cartographier l'aléa grêle en France avec une précision jamais atteinte à ce jour, avec une résolution moyenne de 16 km² contre 100 km² et 400 km² pour respectivement les travaux de Punge et al. et ceux de Vinet. Notre analyse identifie quatre secteurs géographiques comme les plus touchés par l'aléa grêle en France :

- Le secteur le plus touché correspond au Massif Central, en particulier dans sa partie orientale, secteur également identifié au sein d'autres études de l'aléa grêle et de la fréquence des chutes de grêle en France, avec cependant quelques subtilités géographiques d'une étude à l'autre.
- Le Sud-Ouest Atlantique et la région Provence-Alpes-Côte d'Azur arrivent en deuxième position, sans être particulièrement mis en évidence dans la littérature. En effet, c'est plutôt le Sud-Ouest intérieur et le massif pyrénéen qui ressortent dans la littérature, ainsi que le Sud des Alpes, sans que ce ne soit particulièrement le cas dans notre étude.
- Pour finir l'Île-de-France, unique secteur géographique au Nord de l'axe Pyrénées – Vosges, arrive en quatrième position des secteurs géographiques les plus touchés par la grêle en France. Ce secteur est uniquement mis en évidence dans notre étude et n'apparait dans aucune autre étude sur la grêle, malgré les conséquences économiques désastreuses de l'orages de grêle de 2014 sur cette région (tempête Ela).

Nous avons ensuite approché le risque grêle à l'aide d'un nouvel indice nommé $\boldsymbol{H}$, combinant notre indice aléa grêle I_H avec la vulnérabilité estimée à partir des données assurantielles de Generali France. Il permet de mettre en évidence trois secteurs géographiques à risque grêle élevé, tous situés sous l'axe Pyrénées – Vosges ; l'Île-de-France ne se distingue véritablement du reste du territoire. On retrouve ainsi :

- Le Massif Central, en particulier sa partie Nord / Nord - Est, se distingue comme le secteur présentant le niveau de risque grêle.
- L'axe Bordeaux - Paris, avec un maximum local au niveau du Sud-Ouest Atlantique, est la deuxième zone avec le plus haut niveau de risque grêle.
- La région Provence-Alpes-Côte d'Azur se démarque enfin comme le troisième secteur géographique avec le plus haut niveau de risque grêle, avec un maximum local situé au niveau de la région préalpines.

Il existe très peu d'études concernant l'évolution du risque grêle en France, et toutes les études ne s'accordent pas sur les tendances concernant les évolutions de l'aléa grêle en France. Cependant, la fréquence des chutes de grêle en France devrait diminuer au cours de la période estivale et augmenter lors de la période automnale sur le pourtour de la côte Méditerranéenne. Les chutes de grêle sévères devraient également être plus fréquentes et plus extrêmes dans le futur. Les assureurs estiment ainsi

une hausse de la sinistralité grêle à +20% en France (DAB et auto), pour moitié provoquée à l'augmentation de l'aléa et pour moitié liée à la redistribution spatiale des expositions.

En conclusion, cette étude nous offre une compréhension approfondie de la climatologie de la grêle en France hexagonale, mettant en lumière les tendances et les potentiels risques associés aux événements grêle dans le pays. Ces informations sont précieuses pour les assureurs et les décideurs politiques dans le but de gérer au mieux les impacts de la grêle sur les communautés et les infrastructures française.

Le risque grêle nécessite d'être maîtrisé, en même temps que les autres risques climatiques, afin de ne pas menacer l'assurabilité des risques climatiques sur notre territoire.

Conclusion de la partie 2

La constitution d'une base de données exhaustives renseignant les chutes de grêle en France a été la première étape de nos travaux puisque le réseau de grêlimètres ne couvre pas l'ensemble du pays et qu'il n'existe pas de base de données complète en France. L'utilisation de plusieurs sources de données pour étudier les chutes de grêle possède l'avantage majeur d'améliorer la complétude et la couverture spatiale des données, tout en permettant de réduire le biais de la base finale : les biais associés à chaque source de données, notamment le biais d'exposition, se compensent. La base de données a ainsi été constituée à partir d'observations et de données assurantielles, à l'aide des données de Keraunos, Generali France et de l'ESWD. ; les données d'observations constituent donc la majeure partie de notre base de données.

L'analyse climatologique de la grêle entre 2013 et 2022 révèle une augmentation notable de la fréquence des chutes de grêle à l'échelle communale. Cette augmentation est particulièrement marquée sur la période récente et sur les chutes de grêle de plus forte intensité (> 5 cm). Les chutes de grêle semblent ainsi augmenter à la fois en intensité et en fréquence en France, avec de plus en plus de communes touchées chaque année. Les chutes de grêle les plus sévères à l'échelle de la commune semblent également devenir plus fréquents et plus intenses qu'auparavant.

Les chutes de grêle semblent principalement soumises à l'influence du régime avant juin, alors que l'influence du régime méditerranéen domine après juin. Juin semble ainsi être le mois charnière de la grêle en France, avec une intensité, une fréquence et une couverture spatiale maximale des chutes de grêle au regard des autres mois. Le Centre-Est de la France se démarque comme principale région grêlifère de France, autant au regard de la fréquence des chutes de grêle que de l'intensité marquée de ces dernières.

L'utilisation du diamètre maximal des grêlons est un bon proxy pour estimer le volume de la sinistralité observée sur le DAB, et permet même une estimation de la sinistralité à la maille du département. Cette approche, bien que très performante sur le DAB, ne peut pas être également utilisée pour les produits d'assurance agricole et automobile. L'analyse approfondie de la vulnérabilité spécifique de chaque bien peut également être une bonne piste d'amélioration du modèle, puisque cette analyse permettrait de quantifier la vulnérabilité de « profils types », permettant ainsi de remonter à une estimation du coût d'un évènement grêle.

Les critères de différentiation régionale du risque grêle ont été estimés en utilisant la fréquence des chutes de grêle, la plus forte intensité (plus gros grêlons) et le taux de destruction économique moyen (vulnérabilité) observés à l'échelle de la commune. Cette approche permet de mettre en évidence deux Frances distinctes : une France située au-dessus d'un axe Pyrénées – Vosges avec un faible niveau de risque grêle, et une France située sous cet axe avec un risque grêle bien plus marqué. La France possède ainsi trois région « Hotspot » au regard du risque grêle : le Massif Central, l'axe Bordeaux-Paris et la Provence-Alpes-Côte d'Azur. Ce risque n'est cependant pas fixé dans le temps, et devrait s'intensifier sur notre territoire au cours des prochaines années au regard des mutations socio-économiques et de l'impact du changement climatique. Les assureurs anticipent ainsi une hausse de la sinistralité grêle à +20% en France (DAB et auto) d'ici 2050, pour moitié provoquée à l'augmentation de l'aléa et pour moitié liée à la redistribution spatiale des expositions.

A ce jour, il n'existe pas de solutions prouvées scientifiquement permettant de réduire l'aléa grêle sur un territoire. Il est uniquement possible de réduire le risque grêle en modifiant la vulnérabilité d'un bien à l'aide de système de protection comme une housse ou un filet paragrêle.

Conclusion générale

Le risque résulte de la convergence de facteurs naturels et humains qui ont leurs propres modes de fonctionnement et leurs propres logiques. La définition d'un risque dépend donc d'une part des modalités d'action de l'aléa (les chutes de grêle) et de l'autre des de la vulnérabilité des enjeux exposés.

Les premiers résultats concernant la géographie de la grêle ont été obtenus grâce au croisement de plusieurs sources de nature différentes (observation et sinistralité), croisement rendu nécessaire par l'insuffisance des sources prises séparément et le caractère « aléatoire » et extrêmement variable de la grêle.

L'ensemble des résultats de notre étude converge pour identifier la région du Massif Central comme la région la plus grêlifère de France, en particulier sur sa moitié orientale ; les chutes de grêle sévères sont plus fréquentes dans cette région, et elle enregistre également la plus haute fréquence et la plus haute intensité des chutes de grêle du territoire français. Le relief, en particulier le Massif Central, semble ainsi jouer un rôle majeur dans la géographie des chutes de grêle en France en favorisant l'instabilité de l'atmosphère (soulèvement orographique, zone de conflit de masse d'air, sur la trajectoire des flux Sud-Ouest…). Le même effet semble également être provoqué en Suisse du Sud et en Italie du Nord par les Alpes. Au-delà de cette région, un espace grêlifère s'étirant des Pyrénées aux Vosges sépare la France en deux parties : une moitié au Sud de cet espace fortement grêlifère, avec des « Hot Spots » locaux autour du Sud-Ouest Atlantique et de la Provence-Alpes-Côte d'Azur, et une moitié au Nord de cet espace faiblement grêlifère à l'exception de la région de l'Île-de-France. L'identification de la région Île-de-France est un résultat intéressant puisque seule notre étude met en évidence cette région comme particulièrement grêlifère, malgré les conséquences économiques sévères de la tempête Ela en 2014. La récurrence d'évènements grêle exceptionnelles dans le Sud-Ouest de l'Europe (2014 en France, 2022 en France, 2023 en Italie…) fait également craindre une modification marquée de l'aléa grêle induite par le changement climatique ; les chutes de grêle exceptionnelles semblent ainsi être plus intenses et plus fréquentes.

Le mois de juin semble également être le mois charnière de la grêle en France, en enregistrant la plus haute fréquence, la plus haute intensité, et la plus grande couverture spatiale des chutes de grêle sur le territoire français. Il semble également couper l'année en deux, en distinguant une première période avant juin principalement soumise à l'influence du régime océanique, contre plutôt une influence du régime méditerranéen après juin. Ce constat semble également être en accord avec plusieurs études européennes dans la région méditerranéenne.

À la répartition de l'aléa grêle se superpose la géographie de la vulnérabilité des enjeux face aux chutes de grêle. La géographie du risque-grêle se révèle ainsi plus nuancée que la géographie du seul aléa. La concentration économique du risque se fait donc sur les biens particulièrement vulnérables. Historiquement, le risque grêle est donc principalement en lien avec la répartition géographique des vignes et de l'arboriculture, biens assurés particulièrement vulnérables aux chutes de grêle de par leur répartition géographique et leur date de récolte ; la vulnérabilité d'une culture augmente avec le rapprochement de sa date de récolte. Cependant, la répartition du risque grêle a été fortement modifiée au cours des dernières années, avec l'impact du changement climatique et les objectifs de réduction de gaz à effet de serre, avec par exemple l'introduction et le développement à grande échelle des panneaux photovoltaïques et de l'isolation par l'extérieur. Le risque grêle a été approché dans

notre étude en croisant les caractéristiques locales de l'aléa grêle et de la vulnérabilité. La vulnérabilité a été estimée à l'aide de l'exposition et de la sinistralité enregistrée par Generali France sur son portefeuille DAB. On distingue ainsi les régions à fort risque grêle : elles combinent un aléa marqué couplé à une sinistralité très dégradée. Le Massif Central, en particulier sa partie Nord / Nord-Est se distingue ainsi comme le secteur avec le plus haut niveau de risque grêle en France. Cette région est suivie par l'axe Bordeaux-Paris et par la région préalpines. La région Île-de-France, bien que marquée par un aléa important, ne ressort pas particulièrement comme à fort risque grêle. En effet, les conséquences économiques d'une chute de grêle sont généralement faibles sur ce territoire, malgré celles désastreuses de la tempête Ela en 2014.

Cependant, la récurrence « d'années grêle exceptionnelles » sur la période récente pose la question de la pertinence du qualificatif employé : une chute de grêle jugée comme exceptionnelle hier ne le sera pas forcément demain. C'est tout l'enjeu derrière la connaissance du risque grêle en France. C'est pourquoi l'estimation des conséquences économiques d'une chute de grêle est un enjeu crucial pour un assureur. Elle lui permet de modéliser l'amélioration (ou la dégradation) du risque grêle en comparant la sinistralité observée avec la sinistralité modélisée lors de différents scénarios historiques sur son portefeuille actuel. De plus, le dimensionnement rapide d'un évènement grêligène et son impact économique sur le portefeuille est également un enjeu clef pour une société d'assurance. Il permet à la fois d'améliorer l'image de marque d'une société d'assurance en améliorant l'expérience client grâce à la réduction du temps de prise en charge, et d'améliorer le résultat financier de l'entreprise en réduisant les frais de gestion de sinistres. L'utilisation du diamètre maximal des grêlons dans notre étude donne des résultats très concluants pour estimer le volume de sinistre sur le DAB, et permet même une estimation à maille du département.

Afin de ne pas mettre en péril l'assurabilité de la grêle en France et éviter un scénario comme celui de la Floride, avec le retrait de certains assureurs sur le marché de l'assurance, il est nécessaire d'améliorer la résilience de la société en réduisant l'impact économique des chutes de grêle. Cette résilience est atteinte en quantifiant le risque grêle d'un territoire à travers la connaissance locale de l'aléa et de la vulnérabilité des enjeux, en adaptant les méthodes de construction et en utilisant des méthodes de protection efficaces (i.e. prouvées scientifiquement) et adaptées au niveau du risque grêle local.

Bibliographie

Ackermann, L., Soderholm, J., Protat, A., Whitley, R., Ye, L., Ridder, N., 2024. Radar and environment-based hail damage estimates using machine learning. Atmospheric Meas. Tech. 17, 407–422. https://doi.org/10.5194/amt-17-407-2024

Allen, J.T., Giammanco, I.M., Kumjian, M.R., Jurgen Punge, H., Zhang, Q., Groenemeijer, P., Kunz, M., Ortega, K., 2020. Understanding Hail in the Earth System. Rev. Geophys. 58, e2019RG000665. https://doi.org/10.1029/2019RG000665

Allen, J.T., Tippett, M.K., Kaheil, Y., Sobel, A.H., Lepore, C., Nong, S., Muehlbauer, A., 2017. An Extreme Value Model for U.S. Hail Size. Mon. Weather Rev. 145, 4501–4519. https://doi.org/10.1175/MWR-D-17-0119.1

Allen, J.T., Tippett, M.K., Sobel, A.H., 2015. An empirical model relating U.S. monthly hail occurrence to large-scale meteorological environment. J. Adv. Model. Earth Syst. 7, 226–243. https://doi.org/10.1002/2014MS000397

Atlas, D., Hardy, K.R., Joss, J., 1964. Radar reflectivity of storms containing spongy hail. J. Geophys. Res. 1896-1977 69, 1955–1961. https://doi.org/10.1029/JZ069i010p01955

Atlas, D., Ludlam, F.H., 1961. Multi-wavelength radar reflectivity of hailstorms. Q. J. R. Meteorol. Soc. 87, 523–534. https://doi.org/10.1002/qj.49708737407

Barkemeyer, R., Figge, F., Hoepner, A., Holt, D., Kraak, J.M., Yu, P.-S., 2017. Media coverage of climate change: An international comparison. Environ. Plan. C Polit. Space 35, 1029–1054. https://doi.org/10.1177/0263774X16680818

Battaglioli, F., Groenemeijer, P., Púčik, T., Taszarek, M., Ulbrich, U., Rust, H., 2023. Modeled Multidecadal Trends of Lightning and (Very) Large Hail in Europe and North America (1950–2021). J. Appl. Meteorol. Climatol. 62, 1627–1653. https://doi.org/10.1175/JAMC-D-22-0195.1

Beatty, K., Rasmussen, E.N., Straka, J.M., 2008. The Supercell Spectrum. Part I: A Review of Research Related to Supercell Precipitation Morphology. E-J. Sev. Storms Meteorol. 3, 1–21. https://doi.org/10.55599/ejssm.v3i4.17

Beatty, K., Rasmussen, E.N., Straka, J.M., Lemon, L.R., 2009. The Supercell Spectrum. Part II: A Semi-Objective Method for Radar Classification of Supercell Type. E-J. Sev. Storms Meteorol. 4, 1–30. https://doi.org/10.55599/ejssm.v4i1.18

Bedka, K.M., 2011. Overshooting cloud top detections using MSG SEVIRI Infrared brightness temperatures and their relationship to severe weather over Europe. Atmospheric Res. 99, 175–189. https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2010.10.001

Bell, B., Hersbach, H., Simmons, A., Berrisford, P., Dahlgren, P., Horányi, A., Muñoz-Sabater, J., Nicolas, J., Radu, R., Schepers, D., Soci, C., Villaume, S., Bidlot, J.-R., Haimberger, L., Woollen, J., Buontempo, C., Thépaut, J.-N., 2021. The ERA5 global reanalysis: Preliminary extension to 1950. Q. J. R. Meteorol. Soc. 147, 4186–4227. https://doi.org/10.1002/qj.4174

Berthet, C., Dessens, J., Sanchez, J.L., 2011. Regional and yearly variations of hail frequency and intensity in France. Atmospheric Res., 5th European Conference on Severe Storms 100, 391–400. https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2010.10.008

Berthet, C., Wesolek, E., Dessens, J., Sanchez, J.L., 2013. Extreme hail day climatology in Southwestern France. Atmospheric Res., 6th European Conference on Severe Storms 2011. Palma de Mallorca, Spain 123, 139–150. https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2012.10.007

Blair, S.F., Deroche, D.R., Boustead, J.M., Leighton, J.W., Barjenbruch, B.L., Gargan, W.P., 2011. A Radar-Based Assessment of the Detectability of Giant Hail. E-J. Sev. Storms Meteorol. 6, 1–30. https://doi.org/10.55599/ejssm.v6i7.34

Bluestein, H.B., Lindsey, D.T., Bikos, D., Reif, D.W., Wienhoff, Z.B., 2019. The Relationship between Overshooting Tops in a Tornadic Supercell and Its Radar-Observed Evolution. Mon. Weather Rev. 147, 4151–4176. https://doi.org/10.1175/MWR-D-19-0159.1

Brglez Sever, M., Tojnko, S., Breznikar, A., Skendrović Babojelić, M., Ivančič, A., Sirk, M., Unuk, T., 2020. The influence of differently coloured anti-hail nets and geomorphologic characteristics on microclimatic and light conditions in apple orchards. J. Cent. Eur. Agric. 21, 386–397. https://doi.org/10.5513/JCEA01/21.2.2582

Brglez Sever, M., Tojnko, S., Unuk, T., 2015. Impact of various types of anti-hail nets on light exposure in orchards and quality parameters of apples– a rewiev. Agricultura 12, 25–31. https://doi.org/10.1515/agricultura-2016-0004

Bromley-Trujillo, R., Dunk, B., Karch, A., 2023. Analyzing variation in state newspaper coverage of climate change. Clim. Change 176, 174. https://doi.org/10.1007/s10584-023-03638-6

Brown, T.M., Pogorzelski, W.H., Giammanco, I.M., 2015. Evaluating Hail Damage Using Property Insurance Claims Data. Weather Clim. Soc. 7, 197–210. https://doi.org/10.1175/WCAS-D-15-0011.1

Browning, K.A., 1963. The growth of large hail within a steady updraught. Q. J. R. Meteorol. Soc. 89, 490–506. https://doi.org/10.1002/qj.49708938206

Burton, M.L., Hicks, M.J., 2005. Hurricane Katrina: Preliminary Estimates of Commercial and Public Sector Damages. Hurric. Katrina.

Calmet, C., 2018. La vigilance météorologique, une innovation pour le grand public. La Météorologie 2018, 56–65. https://doi.org/10.4267/2042/65143

Castro, A., Sánchez, J.L., Fraile, R., 1992. Statistical comparison of the properties of thunderstorms in different areas around the Ebro-Valley (Spain). Atmospheric Res. 28, 237–257. https://doi.org/10.1016/0169-8095(92)90011-X

Cecil, D.J., 2009. Passive Microwave Brightness Temperatures as Proxies for Hailstorms. J. Appl. Meteorol. Climatol. 48, 1281–1286. https://doi.org/10.1175/2009JAMC2125.1

Changnon, S.A., 1992. Temporal and Spatial Relations between Hail and Lightning. J. Appl. Meteorol. 1988-2005 31, 587–604.

Cheong, F., Cheong, C., 2011. Social Media Data Mining: A Social Network Analysis Of Tweets During The 2010-2011 Australian Floods. PACIS 2011 Proc.

Chernokulsky, A., Shikhov, A., Bykov, A., Kalinin, N., Kurgansky, M., Sherstyukov, B., Yarinich, Y., 2022. Diagnosis and modelling of two destructive derecho events in European Russia in the summer of 2010. Atmospheric Res. 267, 105928. https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2021.105928

Czajkowski, J., Simmons, K.M., 2014. Convective Storm Vulnerability: Quantifying the Role of Effective and Well-Enforced Building Codes in Minimizing Missouri Hail Property Damage. Land Econ. 90, 482–508. https://doi.org/10.3368/le.90.3.482

Czernecki, B., Taszarek, M., Marosz, M., Półrolniczak, M., Kolendowicz, L., Wyszogrodzki, A., Szturc, J., 2019. Application of machine learning to large hail prediction - The importance of radar reflectivity, lightning occurrence and convective parameters derived from ERA5. Atmospheric Res. 227, 249–262. https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2019.05.010

Dai, A., 2011. Drought under global warming: a review. WIREs Clim. Change 2, 45–65. https://doi.org/10.1002/wcc.81

Dai, Q., Han, D., Rico-Ramirez, M.A., Islam, T., 2013. The impact of raindrop drift in a three-dimensional wind field on a radar–gauge rainfall comparison. Int. J. Remote Sens. 34, 7739–7760. https://doi.org/10.1080/01431161.2013.826838

Dai, Q., Han, D., Rico-Ramirez, M.A., Zhuo, L., Nanding, N., Islam, T., 2015. Radar rainfall uncertainty modelling influenced by wind. Hydrol. Process. 29, 1704–1716. https://doi.org/10.1002/hyp.10292

Davies-Jones, R., 2015. A review of supercell and tornado dynamics. Atmospheric Res. 158–159, 274–291. https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2014.04.007

Decker, F.W., Calvin, L.D., 1961. Hailfall of 10 September 1959 Near Medford, Oregon. Bull. Am. Meteorol. Soc. 42, 475–481. https://doi.org/10.1175/1520-0477-42.7.475

Deneke, H.M., Roebeling, R.A., 2010. Downscaling of METEOSAT SEVIRI 0.6 and 0.8 µm channel radiances utilizing the high-resolution visible channel. Atmospheric Chem. Phys. 10, 9761–9772. https://doi.org/10.5194/acp-10-9761-2010

Dessens, J., 1986. Hail in Southwestern France. I: Hailfall Characteristics and Hailstrom Environment. J. Appl. Meteorol. Climatol. 25, 35–47. https://doi.org/10.1175/1520-0450(1986)025<0035:HISFIH>2.0.CO;2

Dessens, J., Berthet, C., Sanchez, J.L., 2007. A point hailfall classification based on hailpad measurements: The ANELFA scale. Atmospheric Res., European Conference on Severe Storms 2004 83, 132–139. https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2006.02.029

Dessens, J., Fraile, R., Pont, V., Sánchez, J.L., 2001. Day-of-the-week variability of hail in southwestern France. Atmospheric Res., 13th International Conference on Clouds and Precipitation 59–60, 63–76. https://doi.org/10.1016/S0169-8095(01)00109-0

Dessens, J., Sánchez, J.L., Berthet, C., Hermida, L., Merino, A., 2016. Hail prevention by ground-based silver iodide generators: Results of historical and modern field projects. Atmospheric Res. 170, 98–111. https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2015.11.008

Dieling, C., Smith, M., Beruvides, M., 2020. Review of Impact Factors of the Velocity of Large Hailstones for Laboratory Hail Impact Testing Consideration. Geosciences 10, 500. https://doi.org/10.3390/geosciences10120500

Dotzek, N., Groenemeijer, P., Feuerstein, B., Holzer, A.M., 2009. Overview of ESSL's severe convective storms research using the European Severe Weather Database ESWD. Atmospheric Res., 4th European Conference on Severe Storms 93, 575–586. https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2008.10.020

Eastin, M.D., Link, M.C., 2009. Miniature Supercells in an Offshore Outer Rainband of Hurricane Ivan (2004). Mon. Weather Rev. 137, 2081–2104. https://doi.org/10.1175/2009MWR2753.1

Eccel, E., Cau, P., Riemann-Campe, K., Biasioli, F., 2012. Quantitative hail monitoring in an alpine area: 35-year climatology and links with atmospheric variables: HAIL CLIMATOLOGY IN AN ALPINE AREA. Int. J. Climatol. 32, 503–517. https://doi.org/10.1002/joc.2291

Enno, S.-E., Sugier, J., Alber, R., Seltzer, M., 2020. Lightning flash density in Europe based on 10 years of ATDnet data. Atmospheric Res. 235, 104769. https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2019.104769

Essien, M., 2023. Evaluation of Cloud Seeding Techniques for Precipitation Enhancement. Glob. J. Clim. Stud. 1, 53–64.

Farnell, C., Rigo, T., Heymsfield, A., 2022. Shape of hail and its thermodynamic characteristics related to records in Catalonia. Atmospheric Res. 271, 106098. https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2022.106098

Federer, B., Schmid, P., Waldvogel, A., 1978. The design of Grossversuch IV, a randomized hail suppression experiment in Switzerland. Atmosphere-Ocean 16.

Federer, B., Waldvogel, A., Schmid, W., Schiesser, H.H., Hampel, F., Schweingruber, M., Stahel, W., Bader, J., Mezeix, J.F., Doras, N., D'Aubigny, G., DerMegreditchian, G., Vento, D., 1986. Main Results of Grossversuch IV. J. Appl. Meteorol. Climatol. 25, 917–957. https://doi.org/10.1175/1520-0450(1986)025<0917:MROGI>2.0.CO;2

Fekete, A., Sandholz, S., 2021. Here Comes the Flood, but Not Failure? Lessons to Learn after the Heavy Rain and Pluvial Floods in Germany 2021. Water 13, 3016. https://doi.org/10.3390/w13213016

Feudale, L., Manzato, A., 2014. Cloud-to-Ground Lightning Distribution and Its Relationship with Orography and Anthropogenic Emissions in the Po Valley. J. Appl. Meteorol. Climatol. 53, 2651–2670. https://doi.org/10.1175/JAMC-D-14-0037.1

Fluck, E., Kunz, M., Geissbuehler, P., Ritz, S.P., 2021. Radar-based assessment of hail frequency in Europe. Nat. Hazards Earth Syst. Sci. 21, 683–701. https://doi.org/10.5194/nhess-21-683-2021

Flüeler, P., Stucki, M., Guastala, F., Egli, T., 2008. Hail Impact Resistance of Building Materials Testing, Evaluation and Classification.

Frédéric, L., Freddy, V., 2006. La vulnérabilité, un concept fondamental au cœur des méthodes d'évaluation des risques naturels. pp. 9–25.

French, M.M., Burgess, D.W., Mansell, E.R., Wicker, L.J., 2015. Bulk Hook Echo Raindrop Sizes Retrieved Using Mobile, Polarimetric Doppler Radar Observations. J. Appl. Meteorol. Climatol. 54, 423–450. https://doi.org/10.1175/JAMC-D-14-0171.1

Fujita, T., 1965. FORMATION AND STEERING MECHANISMS OF TORNADO CYCLONES AND ASSOCIATED HOOK ECHOES. Mon. Weather Rev. 93, 67–78. https://doi.org/10.1175/1520-0493(1965)093<0067:FASMOT>2.3.CO;2

Gaviola, E., Fuertes, F.A., 1947. HAIL FORMATION, VERTICAL CURRENTS, AND ICING OF AIRCRAFT. J. Atmospheric Sci. 4, 116–120. https://doi.org/10.1175/1520-0469(1947)004<0116:HFVCAI>2.0.CO;2

Gavrilov, M.B., Lazić, L., Pešic, A., Milutinović, M., Marković, D., Stanković, A., Gavrilov, M.M., 2010. Influence of Hail Suppression on the Hail Trend in Serbia. Phys. Geogr. 31, 441–454. https://doi.org/10.2747/0272-3646.31.5.441

Ghasemifard, H., Groenemeijer, P., Battaglioli, F., Púčik, T., 2024. Do changing circulation types raise the frequency of summertime thunderstorms and large hail in Europe? Environ. Res. Clim. 3, 015008. https://doi.org/10.1088/2752-5295/ad22ec

Giddens, A., 2009. Politics of Climate Change. Polity.

Givone, C., 1997. Circulation et contrôle des données climatologiques à Météo-France. La Météorologie 1997, 31–40. https://doi.org/10.4267/2042/47031

Gobbo, S., Ghiraldini, A., Dramis, A., Dal Ferro, N., Morari, F., 2021. Estimation of Hail Damage Using Crop Models and Remote Sensing. Remote Sens. 13, 2655. https://doi.org/10.3390/rs13142655

Greenfeld, S.H., 1969. Hail Resistance of Roofing Products. Building Research Division, U.S. Institute for Applied Technology.

Grieneisen, M.L., Zhang, M., 2011. The current status of climate change research. Nat. Clim. Change 1, 72–73. https://doi.org/10.1038/nclimate1093

Groenemeijer, P., Púčik, T., Holzer, A.M., Antonescu, B., Riemann-Campe, K., Schultz, D.M., Kühne, T., Feuerstein, B., Brooks, H.E., Doswell, C.A., Koppert, H.-J., Sausen, R., 2017. Severe Convective Storms in Europe: Ten Years of Research and Education at the European Severe Storms Laboratory. Bull. Am. Meteorol. Soc. 98, 2641–2651. https://doi.org/10.1175/BAMS-D-16-0067.1

Guillou, Y., 2018. L'automatisation des observations météorologiques de surface à Météo-France. Une révolution. La Météorologie 2018, 96–99. https://doi.org/10.4267/2042/65150

Ha, T., Shen, Y., Duddu, H., Johnson, E., Shirtliffe, S.J., 2022. Quantifying Hail Damage in Crops Using Sentinel-2 Imagery. Remote Sens. 14, 951. https://doi.org/10.3390/rs14040951

He, Y., Manful, D., Warren, R., Forstenhäusler, N., Osborn, T.J., Price, J., Jenkins, R., Wallace, C., Yamazaki, D., 2022. Quantification of impacts between 1.5 and 4 °C of global warming on flooding risks in six countries. Clim. Change 170, 15. https://doi.org/10.1007/s10584-021-03289-5

Hermida, L., López, L., Merino, A., Berthet, C., García-Ortega, E., Sánchez, J.L., Dessens, J., 2015. Hailfall in southwest France: Relationship with precipitation, trends and wavelet analysis. Atmospheric Res. 156, 174–188. https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2015.01.005

Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Horányi, A., Muñoz-Sabater, J., Nicolas, J., Peubey, C., Radu, R., Schepers, D., Simmons, A., Soci, C., Abdalla, S., Abellan, X., Balsamo, G., Bechtold, P., Biavati, G., Bidlot, J., Bonavita, M., De Chiara, G., Dahlgren, P., Dee, D., Diamantakis, M., Dragani, R., Flemming, J., Forbes, R., Fuentes, M., Geer, A., Haimberger, L., Healy, S., Hogan, R.J., Hólm, E., Janisková, M., Keeley, S., Laloyaux, P., Lopez, P., Lupu, C., Radnoti, G., de Rosnay, P., Rozum, I., Vamborg, F., Villaume, S., Thépaut, J.-N., 2020. The ERA5 global reanalysis. Q. J. R. Meteorol. Soc. 146, 1999–2049. https://doi.org/10.1002/qj.3803

Heymsfield, A.J., Giammanco, I.M., Wright, R., 2014. Terminal velocities and kinetic energies of natural hailstones. Geophys. Res. Lett. 41, 8666–8672. https://doi.org/10.1002/2014GL062324

Heymsfield, A.J., Jameson, A.R., Frank, H.W., 1980. Hail Growth Mechanisms in a Colorado Storm: Part II: Hail Formation Processes. J. Atmospheric Sci. 37, 1779–1807. https://doi.org/10.1175/1520-0469(1980)037<1779:HGMIAC>2.0.CO;2

Hohl, R., Schiesser, H.-H., Aller, D., 2002a. Hailfall: the relationship between radar-derived hail kinetic energy and hail damage to buildings. Atmospheric Res. 63, 177–207. https://doi.org/10.1016/S0169-8095(02)00059-5

Hohl, R., Schiesser, H.-H., Knepper, I., 2002b. The use of weather radars to estimate hail damage to automobiles: an exploratory study in Switzerland. Atmospheric Res. 61, 215–238. https://doi.org/10.1016/S0169-8095(01)00134-X

Houze Jr., R.A., 2012. Orographic effects on precipitating clouds. Rev. Geophys. 50. https://doi.org/10.1029/2011RG000365

Howell, J.L., Beaman, J.F., 2006. MINI-SUPERCELL EVENT OF 23 OCTOBER 2004 IN THE MEMPHIS COUNTY WARNING AREA.

Hulton, F., Schultz, D.M., 2024. Climatology of large hail in Europe: characteristics of the European Severe Weather Database. Nat. Hazards Earth Syst. Sci. 24, 1079–1098. https://doi.org/10.5194/nhess-24-1079-2024

Intempéries : 10 000 oiseaux sont morts à cause des orages et de la grêle [WWW Document], 2022. . ladepeche.fr. URL https://www.ladepeche.fr/2022/06/06/intemperies-10-000-oiseaux-sont-morts-a-cause-des-orages-et-de-la-grele-10341580.php (accessed 1.24.23).

Jin, X., 2020. Exploring crisis communication and information dissemination on social media: social network analysis of hurricane Irma tweets. J. Int. Crisis Risk Commun. Res. 3, 179–210. https://doi.org/10.3316/INFORMIT.101413594994700

Josevski, N., Sandvik, A., Jones, C., Pok, T., Orton, T., Richardson, S., 2013. Analysis of Damage Caused to Vehicle Body Panels by Impacting Hail and Various Tools and Objects. SAE Int. J. Passeng. Cars - Mech. Syst. 6, 956–984. https://doi.org/10.4271/2013-01-1438

Kaltenboeck, R., Ryzhkov, A., 2013. Comparison of polarimetric signatures of hail at S and C bands for different hail sizes. Atmospheric Res., 6th European Conference on Severe Storms 2011. Palma de Mallorca, Spain 123, 323–336. https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2012.05.013

Kang, F., Zhang, Q., Lu, S., 2007. Validation and development of a new hailstone formation theory: Numerical simulations of a strong hailstorm occurring over the Qinghai-Tibetan Plateau. J. Geophys. Res. Atmospheres 112. https://doi.org/10.1029/2005JD006227

Kennedy, P.C., Rutledge, S.A., Petersen, W.A., Bringi, V.N., 2001. Polarimetric Radar Observations of Hail Formation. J. Appl. Meteorol. Climatol. 40, 1347–1366. https://doi.org/10.1175/1520-0450(2001)040<1347:PROOHF>2.0.CO;2

Kleissl, J., Honrath, R.E., Dziobak, M.P., Tanner, D., Val Martín, M., Owen, R.C., Helmig, D., 2007. Occurrence of upslope flows at the Pico mountaintop observatory: A case study of orographic flows on a small, volcanic island. J. Geophys. Res. Atmospheres 112. https://doi.org/10.1029/2006JD007565

Knight, C.A., Knight, N.C., 2005. Very Large Hailstones From Aurora, Nebraska. Bull. Am. Meteorol. Soc. 86, 1773–1782. https://doi.org/10.1175/BAMS-86-12-1773

Knight, C.A., Knight, N.C., 1970. Hailstone Embryos. J. Atmospheric Sci. 27, 659–666. https://doi.org/10.1175/1520-0469(1970)027<0659:HE>2.0.CO;2

Knight, N.C., 1981. The Climatology of Hailstone Embryos. J. Appl. Meteorol. Climatol. 20, 750–755. https://doi.org/10.1175/1520-0450(1981)020<0750:TCOHE>2.0.CO;2

Knupp, K.R., Stalker, J.R., McCaul, E.W., 1998. An observational and numerical study of a mini-supercell storm. Atmospheric Res. 49, 35–63. https://doi.org/10.1016/S0032-5910(97)93378-7

Kopp, J., Manzato, A., Hering, A., Germann, U., Romppainen-Martius, O., 2023. How observations from automatic hail sensors in Switzerland shed light on local hailfall duration and compare with hailpad measurements. Atmospheric Meas. Tech. 16, 3487–3503.

Korneev, V.P., Potapov, E.I., Shchukin, G.G., 2017. Environmental aspects of cloud seeding. Russ. Meteorol. Hydrol. 42, 477–483. https://doi.org/10.3103/S106837391707007X

Kotroni, V., Lagouvardos, K., 2016. Lightning in the Mediterranean and its relation with sea-surface temperature. Environ. Res. Lett. 11, 034006. https://doi.org/10.1088/1748-9326/11/3/034006

Kouloukoui, D., Sant'Anna, Â.M.O., da Silva Gomes, S.M., de Oliveira Marinho, M.M., de Jong, P., Kiperstok, A., Torres, E.A., 2019. Factors influencing the level of environmental disclosures in sustainability reports: Case of climate risk disclosure by Brazilian companies. Corp. Soc. Responsib. Environ. Manag. 26, 791–804. https://doi.org/10.1002/csr.1721

Koutsoyiannis, D., 2012. Clausius-Clapeyron equation and saturation vapour pressure: simple theory reconciled with practice. Eur. J. Phys. 33, 295–305. https://doi.org/10.1088/0143-0807/33/2/295

Kumjian, M., 2013. Principles and Applications of Dual-Polarization Weather Radar. Part I: Description of the Polarimetric Radar Variables. J. Oper. Meteorol. 1, 226–242. https://doi.org/10.15191/nwajom.2013.0119

Kumjian, M.R., Lombardo, K., 2020. A Hail Growth Trajectory Model for Exploring the Environmental Controls on Hail Size: Model Physics and Idealized Tests. J. Atmospheric Sci. 77, 2765–2791. https://doi.org/10.1175/JAS-D-20-0016.1

Kunz, M., Puskeiler, M., 2010. High-resolution assessment of the hail hazard over complex terrain from radar and insurance data. Meteorol. Z. 427–439. https://doi.org/10.1127/0941-2948/2010/0452

Kunz, M., Wandel, J., Fluck, E., Baumstark, S., Mohr, S., Schemm, S., 2020. Ambient conditions prevailing during hail events in central Europe. Nat. Hazards Earth Syst. Sci. 20, 1867–1887. https://doi.org/10.5194/nhess-20-1867-2020

La grêle de 2022 en France marque une nouvelle ère pour le secteur de l'assurance [WWW Document], 2022. . L'AGEFI. URL https://www.agefi.fr/banque-assurance/actualites/quotidien/20221116/grele-2022-en-france-marque-nouvelle-ere-secteur-l-353893 (accessed 2.1.23).

Lack, S.A., Fox, N.I., 2012. Development of an automated approach for identifying convective storm type using reflectivity-derived and near-storm environment data. Atmospheric Res., Remote Sensing of Clouds and Aerosols: Techniques and Applications - Atmospheric Research 116, 67–81. https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2012.02.009

Lack, S.A., Fox, N.I., 2007. An examination of the effect of wind-drift on radar-derived surface rainfall estimations. Atmospheric Res. 85, 217–229. https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2006.09.010

Lambergeon, D., Leroy, M., 2006. L'automatisation de l'observation météorologique sur les aérodromes français. La Météorologie 2006, 18–27. https://doi.org/10.4267/2042/20052

Latrach, M.M., 2013. La grêle en Tunisie : diagnostic et gestion d'un risque agricole émergent (These de doctorat). Montpellier 3.

Laviola, S., Monte, G., Cattani, E., Levizzani, V., 2022. Hail Climatology in the Mediterranean Basin Using the GPM Constellation (1999–2021). Remote Sens. 14, 4320. https://doi.org/10.3390/rs14174320

Leroy, S.A.G., 2006. From natural hazard to environmental catastrophe: Past and present. Quat. Int., Holocene environmental catastrophes in South America: from the lowlands to the Andes 158, 4–12. https://doi.org/10.1016/j.quaint.2006.05.012

Levizzani, S.L., Giulio Monte, Elsa Cattani, Vincenzo, 2023. How Hail Hazards Are Changing Around the Mediterranean [WWW Document]. Eos. URL http://eos.org/science-updates/how-hail-hazards-are-changing-around-the-mediterranean (accessed 4.8.24).

Li, X., Tao, W.-K., Khain, A.P., Simpson, J., Johnson, D.E., 2009a. Sensitivity of a Cloud-Resolving Model to Bulk and Explicit Bin Microphysical Schemes. Part II: Cloud Microphysics and Storm Dynamics Interactions. J. Atmospheric Sci. 66, 22–40. https://doi.org/10.1175/2008JAS2647.1

Li, X., Tao, W.-K., Khain, A.P., Simpson, J., Johnson, D.E., 2009b. Sensitivity of a Cloud-Resolving Model to Bulk and Explicit Bin Microphysical Schemes. Part I: Comparisons. J. Atmospheric Sci. 66, 3–21. https://doi.org/10.1175/2008JAS2646.1

Lin, Y.-L., Deal, R.L., Kulie, M.S., 1998. Mechanisms of Cell Regeneration, Development, and Propagation within a Two-Dimensional Multicell Storm. J. Atmospheric Sci. 55, 1867–1886. https://doi.org/10.1175/1520-0469(1998)055<1867:MOCRDA>2.0.CO;2

Lucy, R.L., Petty, S.E., 2021. Hail Damage Assessments to Low-Sloped Roof Systems, in: Forensic Engineering. CRC Press.

Lung, T., Lavalle, C., Hiederer, R., Dosio, A., Bouwer, L.M., 2013. A multi-hazard regional level impact assessment for Europe combining indicators of climatic and non-climatic change. Glob. Environ. Change 23, 522–536. https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2012.11.009

Majdi, A., Alqahtani, M.D., Almakytah, A., Saleem, M., 2021. Fundamental study related to the development of modular solar panel for improved durability and repairability. IET Renew. Power Gener. 15, 1382–1396. https://doi.org/10.1049/rpg2.12079

Malik, S., Bano, H., Rather, D.-R., Ahmad, S., 2018. Cloud Seeding; Its Prospects and Concerns in the Modern World-A Review 6. https://doi.org/10.18782/2320-7051.6824

Manzato, A., Serafin, S., Miglietta, M.M., Kirshbaum, D., Schulz, W., 2022. A Pan-Alpine Climatology of Lightning and Convective Initiation. Mon. Weather Rev. 150, 2213–2230. https://doi.org/10.1175/MWR-D-21-0149.1

Martin, J.E., Saul, V., Novick, D., Allen, D., 2020. Assessing the Vulnerability of Unmanned Aircraft Systems to Directed Acoustic Energy (No. SAND-2020-10260). Sandia National Lab. (SNL-NM), Albuquerque, NM (United States). https://doi.org/10.2172/1670875

McBean, G., Rodgers, C., 2010. Climate hazards and disasters: the need for capacity building. WIREs Clim. Change 1, 871–884. https://doi.org/10.1002/wcc.77

Merino, A., López, L., Sánchez, J.L., García-Ortega, E., Cattani, E., Levizzani, V., 2014. Daytime identification of summer hailstorm cells from MSG data. Nat. Hazards Earth Syst. Sci. 14, 1017–1033. https://doi.org/10.5194/nhess-14-1017-2014

Merino, Andrés, Wu, X., Gascón, E., Berthet, C., García-Ortega, E., Dessens, J., 2014. Hailstorms in southwestern France: Incidence and atmospheric characterization. Atmospheric Res. 140–141, 61–75. https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2014.01.015

Mezeix, J.F., 1987. Comments on “Hail in Southwestern France. Part II: Results of a 30-Year Hail Prevention Project with Silver Iodide Seeding from the Ground.” J. Appl. Meteorol. Climatol. 26, 1774–1776. https://doi.org/10.1175/1520-0450(1987)026<1774:COISFP>2.0.CO;2

Michaud, A.B., Dore, J.E., Leslie, D., Lyons, W.B., Sands, D.C., Priscu, J.C., 2014. Biological ice nucleation initiates hailstone formation. J. Geophys. Res. Atmospheres 119, 12,186-12,197. https://doi.org/10.1002/2014JD022004

Michel, L., 2018. Les événements météorologiques extrêmes dans un contexte de changement climatique. OBSERVATOIRE NATIONAL SUR LES EFFETS DU RÉCHAUFFEMENT CLIMATIQUE.

Michel, S., Flüeler, P., Jordi, M., Welter, R., 2020. Failure Analysis of a Total Damage by Hail Impact of an External Thermal Insulation Composite Systems, in: XV International Conference on Durability of Building Materials and Components. eBook of Proceedings. Presented at the XV International Conference on Durability of Building Materials and Components, CIMNE. https://doi.org/10.23967/dbmc.2020.240

Mikuš, P., Strelec Mahović, N., 2013. Satellite-based overshooting top detection methods and an analysis of correlated weather conditions. Atmospheric Res., 6th European Conference on Severe Storms 2011. Palma de Mallorca, Spain 123, 268–280. https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2012.09.001

Milán-García, J., Caparrós-Martínez, J.L., Rueda-López, N., de Pablo Valenciano, J., 2021. Climate change-induced migration: a bibliometric review. Glob. Health 17, 74. https://doi.org/10.1186/s12992-021-00722-3

Mirkovic, D., Zrnic, D.S., 2023. Library of rough hailstone backscattering coefficients at 2.8 GHz. Sci. Data 10, 456. https://doi.org/10.1038/s41597-023-02352-3

Mirkovic, D., Zrnic, D.S., Melnikov, V., Zhang, P., 2022. Effects of Rough Hail Scattering on Polarimetric Variables. IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 60, 1–14. https://doi.org/10.1109/TGRS.2021.3091907

Mohr, S., Kunz, M., Geyer, B., 2015. Hail potential in Europe based on a regional climate model hindcast. Geophys. Res. Lett. 42, 10,904-10,912. https://doi.org/10.1002/2015GL067118

Molina, M.J., Gagne, D.J., Prein, A.F., 2021. A Benchmark to Test Generalization Capabilities of Deep Learning Methods to Classify Severe Convective Storms in a Changing Climate. Earth Space Sci. 8, e2020EA001490. https://doi.org/10.1029/2020EA001490

Montagnat, M., Bourcier, M., Philip, A., Bons, P., Bauer, C., Deconinck, P., Hereil, P., 2021. Texture characterization of some large hailstones with an automated technique. J. Glaciol. 1–15. https://doi.org/10.1017/jog.2021.66

Moore, D.M., Wilson, A., 1978. Photovoltaic solar panel resistance to simulated hail. Department of Energy.

Morgan, G.M., Towery, N.G., 1976. On the Role of Strong Winds in Damage to Crops by Hail and Its Estimation with a Simple Instrument. J. Appl. Meteorol. Climatol. 15, 891–898. https://doi.org/10.1175/1520-0450(1976)015<0891:OTROSW>2.0.CO;2

Murillo, E.M., Homeyer, C.R., Allen, J.T., 2021. A 23-Year Severe Hail Climatology Using GridRad MESH Observations. Mon. Weather Rev. 149, 945–958. https://doi.org/10.1175/MWR-D-20-0178.1

Naylor, J., Gilmore, M.S., Thompson, R.L., Edwards, R., Wilhelmson, R.B., 2012. Comparison of Objective Supercell Identification Techniques Using an Idealized Cloud Model. Mon. Weather Rev. 140, 2090–2102. https://doi.org/10.1175/MWR-D-11-00209.1

Nevzorov, A.N., 2006. Internal mechanism of metastable liquid water crystallization and its effects on intracloud processes. Izv. Atmospheric Ocean. Phys. 42, 765–772. https://doi.org/10.1134/S0001433806060107

Niehaus, G., 2002. The allocation of catastrophe risk. J. Bank. Finance 26, 585–596. https://doi.org/10.1016/S0378-4266(01)00235-7

Nisi, L., Martius, O., Hering, A., Kunz, M., Germann, U., 2016. Spatial and temporal distribution of hailstorms in the Alpine region: a long-term, high resolution, radar-based analysis: Spatial and Temporal Distribution of Hailstorms in the Alpine Region. Q. J. R. Meteorol. Soc. 142, 1590–1604. https://doi.org/10.1002/qj.2771

Nyberg, D., Ferns, G., Vachhani, S., Wright, C., 2022. Climate Change, Business, and Society: Building Relevance in Time and Space. Bus. Soc. 61, 1322–1352. https://doi.org/10.1177/00076503221077452

ÓhAiseadha, C., Quinn, G., Connolly, R., Connolly, M., Soon, W., 2020. Energy and Climate Policy—An Evaluation of Global Climate Change Expenditure 2011–2018. Energies 13, 4839. https://doi.org/10.3390/en13184839

Ortega, K.L., Krause, J.M., Ryzhkov, A.V., 2016. Polarimetric Radar Characteristics of Melting Hail. Part III: Validation of the Algorithm for Hail Size Discrimination. J. Appl. Meteorol. Climatol. 55, 829–848. https://doi.org/10.1175/JAMC-D-15-0203.1

Orville, H.D., 1977. A Review of Hailstone-Hailstorm Numerical Simulations, in: Borland, S.W., Browning, K.A., Changnon, S.A., Cooper, W.A., Danielsen, E.F., Dennis, A.S., Federer, B., Flueck, J.A., Foote, G.B., Goyer, G.G., Hitschfeld, W.F., Jameson, A.R., List, R., Macklin, W.C., Marwitz, J.D., Maxwell, J.B., McGinley, J.A., Mielke, P.W., Miller, R.C., Morgan, G.M., Nicholas, T.R., Orville, H.D., Renick, J.H., Srivastava, R.C., Vali, G., Veal, D.L., Young, K.C., Foote, G.B., Knight, C.A. (Eds.), Hail: A Review of Hail Science and Hail Suppression, Meteorological Monographs. American Meteorological Society, Boston, MA, pp. 49–64. https://doi.org/10.1007/978-1-935704-30-0_2

Palencia, C., Castro, A., Dario, G., Stel, F., Freddy, V., Fraile, R., 2009. Hailpad-based research: A bibliometric review. Atmospheric Res. 93, 664–670. https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2008.09.025

Petty, S.E., 2021. Hail Damage Assessments for Residential and Light Commercial Exterior Finished Surfaces and Steep-Slope Roof Systems, in: Forensic Engineering. CRC Press.

Pigeon, P., 2002. Réflexions sur les notions et les méthodes en géographie des risques dits naturels. Ann. Géographie 111, 452–470. https://doi.org/10.3406/geo.2002.21624

Piper, D.A., Kunz, M., Allen, J.T., Mohr, S., 2019. Investigation of the temporal variability of thunderstorms in central and western Europe and the relation to large-scale flow and teleconnection patterns. Q. J. R. Meteorol. Soc. 145, 3644–3666. https://doi.org/10.1002/qj.3647

Porter, K.A., 2022. A Benefit-Cost Analysis of Impact-Resistant Asphalt Shingle Roofing.

Potvin, C.K., Gallo, B.T., Reinhart, A.E., Roberts, B., Skinner, P.S., Sobash, R.A., Wilson, K.A., Britt, K.C., Broyles, C., Flora, M.L., Miller, W.J.S., Satrio, C.N., 2022. An Iterative Storm Segmentation and Classification Algorithm for Convection-Allowing Models and Gridded Radar Analyses. J. Atmospheric Ocean. Technol. 39, 999–1013. https://doi.org/10.1175/JTECH-D-21-0141.1

Pounds, L.E., Ziegler, C.L., Adams-Selin, R.D., Biggerstaff, M.I., 2024. Analysis of Hail Production via Simulated Hailstone Trajectories in the 29 May 2012 Kingfisher, Oklahoma, Supercell. Mon. Weather Rev. 152, 245–276. https://doi.org/10.1175/MWR-D-23-0073.1

Prein, A.F., Holland, G.J., 2018. Global estimates of damaging hail hazard. Weather Clim. Extrem. 22, 10–23. https://doi.org/10.1016/j.wace.2018.10.004

Púčik, T., Castellano, C., Groenemeijer, P., Kühne, T., Rädler, A.T., Antonescu, B., Faust, E., 2019. Large Hail Incidence and Its Economic and Societal Impacts across Europe. Mon. Weather Rev. 147, 3901–3916. https://doi.org/10.1175/MWR-D-19-0204.1

Punge, H.J., Bedka, K.M., Kunz, M., Reinbold, A., 2017. Hail frequency estimation across Europe based on a combination of overshooting top detections and the ERA-INTERIM reanalysis. Atmospheric Res. 198, 34–43. https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2017.07.025

Punge, H.J., Kunz, M., 2016. Hail observations and hailstorm characteristics in Europe: A review. Atmospheric Res. 176–177, 159–184. https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2016.02.012

Purdy, J.C., Austin, G.L., 2003. The role of synoptic cloud in orographic rainfall in the Southern Alps of New Zealand. Meteorol. Appl. 10, 355–365. https://doi.org/10.1017/S1350482703001087

Rädler, A.T., Groenemeijer, P., Faust, E., Sausen, R., 2018. Detecting Severe Weather Trends Using an Additive Regressive Convective Hazard Model (AR-CHaMo). J. Appl. Meteorol. Climatol. 57, 569–587. https://doi.org/10.1175/JAMC-D-17-0132.1

Rädler, A.T., Groenemeijer, P.H., Faust, E., Sausen, R., Púčik, T., 2019. Frequency of severe thunderstorms across Europe expected to increase in the 21st century due to rising instability. Npj Clim. Atmospheric Sci. 2, 30. https://doi.org/10.1038/s41612-019-0083-7

Rasch, P.J., Latham, J., Chen, C.-C. (Jack), 2009. Geoengineering by cloud seeding: influence on sea ice and climate system. Environ. Res. Lett. 4, 045112. https://doi.org/10.1088/1748-9326/4/4/045112

Rasmussen, E.N., Blanchard, D.O., 1998. A Baseline Climatology of Sounding-Derived Supercell andTornado Forecast Parameters. Weather Forecast. 13, 1148–1164. https://doi.org/10.1175/1520-0434(1998)013<1148:ABCOSD>2.0.CO;2

Raupach, T.H., Martius, O., Allen, J.T., Kunz, M., Lasher-Trapp, S., Mohr, S., Rasmussen, K.L., Trapp, R.J., Zhang, Q., 2021. The effects of climate change on hailstorms. Nat. Rev. Earth Environ. 2, 213–226. https://doi.org/10.1038/s43017-020-00133-9

Ribaud, J.-F., 2015. Etude tridimensionnelle de l'activité électrique, microphysique et dynamique d'une ligne de grain observée pendant la campagne HyMeX (phd). Université de Toulouse, Université Toulouse III - Paul Sabatier.

Rigo, T., Pineda, N., 2016. Inferring the Severity of a Multicell Thunderstorm Evolving to Supercell, by Means of Radar and Total Lightning. E-J. Sev. Storms Meteorol. 11, 1–27. https://doi.org/10.55599/ejssm.v11i2.62

Rosinski, J., Kerrigan, T.C., 1969. The Role of Aerosol Particles in the Formation of Raindrops and Hailstones in Severe Thunderstorms. J. Atmospheric Sci. 26, 695–715. https://doi.org/10.1175/1520-0469(1969)26<695:TROAPI>2.0.CO;2

Ryzhkov, A.V., Schuur, T.J., Burgess, D.W., Heinselman, P.L., Giangrande, S.E., Zrnic, D.S., 2005. The Joint Polarization Experiment: Polarimetric Rainfall Measurements and Hydrometeor Classification. Bull. Am. Meteorol. Soc. 86, 809–824. https://doi.org/10.1175/BAMS-86-6-809

Sadri, A.M., Ukkusuri, S.V., Ahmed, M.A., 2021. Review of social influence in crisis communications and evacuation decision-making. Transp. Res. Interdiscip. Perspect. 9, 100325. https://doi.org/10.1016/j.trip.2021.100325

Saint Fleur, B., 2021. Vers une meilleure prise en compte des comportements multi-échelles des hydrosystèmes complexes par les modèles à réseaux de neurones : application aux crues éclair. IMT - MINES ALES.

Sanchez, J.L., Dessens, J., Marcos, J.L., Fernández, J.T., 1999. Comparison of Rainwater Silver Concentrations from Seeded and Non-seeded Days in León (Spain). J. Weather Modif. 31, 87–90. https://doi.org/10.54782/jwm.v31i1.251

Sánchez, J.L., Fraile, R., Madrid, J.L. de la, Fuente, M.T. de la, Rodríguez, P., Castro, A., 1996. Crop Damage: The Hail Size Factor. J. Appl. Meteorol. Climatol. 35, 1535–1541. https://doi.org/10.1175/1520-0450(1996)035<1535:CDTHSF>2.0.CO;2

Sánchez, J.L., Gil-Robles, B., Dessens, J., Martin, E., Lopez, L., Marcos, J.L., Berthet, C., Fernández, J.T., García-Ortega, E., 2009. Characterization of hailstone size spectra in hailpad networks in France, Spain, and Argentina. Atmospheric Res. 93, 641–654. https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2008.09.033

Sanchez, J.L., Merino, A., Melcón, P., García-Ortega, E., Fernández-González, S., Berthet, C., Dessens, J., 2017. Are meteorological conditions favoring hail precipitation change in Southern Europe? Analysis of the period 1948–2015. Atmospheric Res. 198, 1–10. https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2017.08.003

Sandford, C., 2015. Correcting for wind drift in high resolution radar rainfall products: a feasibility study. J. Hydrol., Hydrologic Applications of Weather Radar 531, 284–295. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.03.023

Schleusener, R.A., Jennings, P.C., 1960. An Energy Method for Relative Estimates of Hail Intensity. Bull. Am. Meteorol. Soc. 41, 372–376. https://doi.org/10.1175/1520-0477-41.7.372

Schmetz, J., Pili, P., Tjemkes, S., Just, D., Kerkmann, J., Rota, S., Ratier, A., 2002. AN INTRODUCTION TO METEOSAT SECOND GENERATION (MSG). Bull. Am. Meteorol. Soc. 83, 977–992. https://doi.org/10.1175/1520-0477(2002)083<0977:AITMSG>2.3.CO;2

Schmid, P., 1967. On “Grossversuch III” a randomized hail suppression experiment in Switzerland. Proc. Fifth Berkeley Symp. Math. Stat. Probab. Vol. 5 Weather Modif. 5, 141–160.

Schmid, T., Portmann, R., Villiger, L., Schröer, K., Bresch, D.N., 2024. An open-source radar-based hail damage model for buildings and cars. Nat. Hazards Earth Syst. Sci. 24, 847–872. https://doi.org/10.5194/nhess-24-847-2024

Schmidt, A., Ivanova, A., Schäfer, M.S., 2013. Media attention for climate change around the world: A comparative analysis of newspaper coverage in 27 countries. Glob. Environ. Change 23, 1233–1248. https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2013.07.020

Schulte, K., Weigand, B., 2018. On the analytical modelling of the initial ice growth in a supercooled liquid droplet. Int. J. Heat Mass Transf. 127, 1070–1081. https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.06.089

Schuster, S.S., Blong, R.J., McAneney, K.J., 2006. Relationship between radar-derived hail kinetic energy and damage to insured buildings for severe hailstorms in Eastern Australia. Atmospheric Res. 81, 215–235. https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2005.12.003

Setvák, M., Bedka, K., Lindsey, D.T., Sokol, A., Charvát, Z., Šťástka, J., Wang, P.K., 2013. A-Train observations of deep convective storm tops. Atmospheric Res., 6th European Conference on Severe Storms 2011. Palma de Mallorca, Spain 123, 229–248. https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2012.06.020

Setvák, M., Rabin, R.M., Doswell, C.A., Levizzani, V., 2003. Satellite observations of convective storm tops in the 1.6, 3.7 and 3.9 µm spectral bands. Atmospheric Res., European Conference on Severe Storms 2002 67–68, 607–627. https://doi.org/10.1016/S0169-8095(03)00076-0

Shield, S.A., Houston, A.L., 2022. Diagnosing Supercell Environments: A Machine Learning Approach. Weather Forecast. 37, 771–785. https://doi.org/10.1175/WAF-D-21-0098.1

Skripniková, K., Řezáčová, D., 2019. Comparison of Radar-Based Hail Detection Using Single- and Dual-Polarization. Remote Sens. 11, 1436. https://doi.org/10.3390/rs11121436
Skripniková, K., Řezáčová, D., 2014. Radar-based hail detection. Atmospheric Res., Perspectives of Precipitation Science - Part II 144, 175–185. https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2013.06.002
Soderholm, J.S., Kumjian, M.R., 2023. Automating the analysis of hailstone layers. Atmospheric Meas. Tech. 16, 695–706. https://doi.org/10.5194/amt-16-695-2023
Suman, A., 2021. Role of renewable energy technologies in climate change adaptation and mitigation: A brief review from Nepal. Renew. Sustain. Energy Rev. 151, 111524. https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111524
Sung, M., Hwang, J.-S., 2014. Who drives a crisis? The diffusion of an issue through social networks. Comput. Hum. Behav. 36, 246–257. https://doi.org/10.1016/j.chb.2014.03.063
Tabary, P., 2007. The New French Operational Radar Rainfall Product. Part I: Methodology. Weather Forecast. 22, 393–408. https://doi.org/10.1175/WAF1004.1
Tamru, B., 2002. L'émergence du risque d'inondation à Addis-Abeba : pertinence d'une étude des dynamiques urbaines. Ann. Géographie 111, 614–636. https://doi.org/10.3406/geo.2002.21618
Tanaka, K.K., Kimura, Y., 2019. Theoretical analysis of crystallization by homogeneous nucleation of water droplets. Phys. Chem. Chem. Phys. 21, 2410–2418. https://doi.org/10.1039/C8CP06650G
Taszarek, M., Allen, J., Púčik, T., Groenemeijer, P., Czernecki, B., Kolendowicz, L., Lagouvardos, K., Kotroni, V., Schulz, W., 2019. A Climatology of Thunderstorms across Europe from a Synthesis of Multiple Data Sources. J. Clim. 32, 1813–1837. https://doi.org/10.1175/JCLI-D-18-0372.1
Taszarek, M., Allen, J.T., Groenemeijer, P., Edwards, R., Brooks, H.E., Chmielewski, V., Enno, S.-E., 2020. Severe Convective Storms across Europe and the United States. Part I: Climatology of Lightning, Large Hail, Severe Wind, and Tornadoes. J. Clim. 33, 10239–10261. https://doi.org/10.1175/JCLI-D-20-0345.1
Tetens, O., 1930. Uber einige meteorologische begriffe. null.
Thouret, J.-C., d'Ercole, R., 1996. Vulnérabilité aux risques naturels en milieu urbain : effets, facteurs et réponses sociales. Cah. Sci. Hum. ORSTOM 32, 407–422.
Thurai, M., Chobanyan, E., Bringi, V. n., Notaroš, B. m., 2015. Large raindrops against melting hail: calculation of specific differential attenuation, phase and reflectivity. Electron. Lett. 51, 1140–1142. https://doi.org/10.1049/el.2015.1564
Thurnherr, I., Cui, R., Velasquez, P., Brennan, K., Wilhelm, L., Wernli, H., Steger, C.R., Schär, C., 2024. How does 3°C global warming affect hail over Europe? (No. EGU24-11130). Presented at the EGU24, Copernicus Meetings. https://doi.org/10.5194/egusphere-egu24-11130
Trevisani, M., 2024. A 10-Year climatology of hail in France: towards an estimate of the hail hazard (No. EGU24-15286). Presented at the EGU24, Copernicus Meetings. https://doi.org/10.5194/egusphere-egu24-15286
Veyret, Y., Reghezza-Zitt, M., 2005. L'émergence du risque en géographie. Cah. Nantais 64, 3–9. https://doi.org/10.3406/canan.2005.1153
Vinet, F., 2001. Climatology of hail in France. Atmospheric Res. 56, 309–323. https://doi.org/10.1016/S0169-8095(00)00082-X
Vinet, F., 1998. Le risque-grêle en France : étude géographique (These de doctorat). Lille 1.
Vinet, F., 1994. Les dégâts de la grêle sur les cultures: l'averse du 1er juin 1993 dans le Saumurois. Mappemonde 36, 41–43. https://doi.org/10.3406/mappe.1994.1162
Wapler, K., 2017. The life-cycle of hailstorms: Lightning, radar reflectivity and rotation characteristics. Atmospheric Res. 193, 60–72. https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2017.04.009
Waters, M.C., 2016. Life after Hurricane Katrina: The Resilience in Survivors of Katrina (RISK) Project. Sociol. Forum 31, 750–769. https://doi.org/10.1111/socf.12271
Webb, J.D.C., Elsom, D.M., Reynolds, D.J., 2001. Climatology of severe hailstorms in Great Britain. Atmospheric Res., Conference on European Tornadoes and Severe Storms 56, 291–308. https://doi.org/10.1016/S0169-8095(00)00081-8

Weisman, M.L., Klemp, J.B., 1986. Characteristics of Isolated Convective Storms, in: Ray, P.S. (Ed.), Mesoscale Meteorology and Forecasting. American Meteorological Society, Boston, MA, pp. 331–358. https://doi.org/10.1007/978-1-935704-20-1_15

Weisman, M.L., Klemp, J.B., 1984. The Structure and Classification of Numerically Simulated Convective Stormsin Directionally Varying Wind Shears. Mon. Weather Rev. 112, 2479–2498. https://doi.org/10.1175/1520-0493(1984)112<2479:TSACON>2.0.CO;2

Wilhelm, J., Mohr, S., Punge, H.J., Mühr, B., Schmidberger, M., Daniell, J.E., Bedka, K.M., Kunz, M., 2021. Severe thunderstorms with large hail across Germany in June 2019. Weather 76, 228–237. https://doi.org/10.1002/wea.3886

Wilhelm, L., Martius, O., Schröer, K., Schwierz, C., 2024. Long-Term Trends and Drivers of Hailstorms in Switzerland (No. EGU24-19897). Presented at the EGU24, Copernicus Meetings. https://doi.org/10.5194/egusphere-egu24-19897

Wonneberger, A., Meijers, M.H.C., Schuck, A.R.T., 2020. Shifting public engagement: How media coverage of climate change conferences affects climate change audience segments. Public Underst. Sci. 29, 176–193. https://doi.org/10.1177/0963662519886474

Yan, J., Bárdossy, A., 2019. Short time precipitation estimation using weather radar and surface observations: With rainfall displacement information integrated in a stochastic manner. J. Hydrol. 574, 672–682. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.04.061

Zakinyan, R.G., 2008. On the theory of hailstone growth. Izv. Atmospheric Ocean. Phys. 44, 207–212. https://doi.org/10.1134/S0001433808020084

Zhang, H., Lin, X., Zhang, Q., Bi, K., Ng, C.-P., Ren, Y., Xue, H., Chen, L., Chang, Z., 2023. Analysis of insoluble particles in hailstones in China. Atmospheric Chem. Phys. 23, 13957–13971. https://doi.org/10.5194/acp-23-13957-2023

Zhao, J.L., Zhang, D.Y., Luo, J.H., Huang, S.L., Dong, Y.Y., Huang, W.J., 2012. Detection and mapping of hail damage to corn using domestic remotely sensed data in China. Aust. J. Crop Sci. 6, 101–108. https://doi.org/10.3316/informit.053615300514851

Zheng, H., Zhao, Y., Huang, Y., Zhang, W., Luo, C., Wei, M., Qiu, X., 2021. Observational Analysis of a Wind Gust Event during the Merging of a Bow Echo and Mini-Supercell in Southeastern China. Atmosphere 12, 1511. https://doi.org/10.3390/atmos12111511

Zrnic, D.S., Zhang, G., Melnikov, V., Andric, J., 2010. Three-Body Scattering and Hail Size. J. Appl. Meteorol. Climatol. 49, 687–700. https://doi.org/10.1175/2009JAMC2300.1

Table des figures

Figure 1 Régimes d'indemnisation des produits assurantiels concernant les risques climatiques, ©M. Trevisani. 3
Figure 2 Le système risque et son environnement naturel ©Pigeon, 2002. 4
Figure 3 Définition du risque utilisée dans notre étude selon les travaux de Thouret, d'Ercole, Tamru, Vinet et Leone, ©M. Trevisani 5
Figure 4 Les panneaux photovoltaïque de la ferme solaire de Vitry-en-Charollais après les chutes de grêle du 21 juin 2022, ©Luxel 6
Figure 5 Evolution des Pertes associées aux principaux évènements naturels depuis 1988 selon France Assureurs (Md€ constants 2022). La sécheresse correspond à la sécheresse géotechnique, ©M. Trevisani. 11
Figure 6 Mécanisme de convection dans la formation d'un nuage, ©M. Trevisani 16
Figure 7 Mécanisme du soulèvement orographique dans la formation d'un nuage. Les variables z et T représentent respectivement l'altitude et la température de la parcelle d'air, ©M. Trevisani 17
Figure 8 Mécanisme de soulèvement frontal dans la formation d'un nuage, ©M. Trevisani 17
Figure 9 Fonctionnement d'un cumulonimbus, ©M. Trevisani d'après (Fujita, 1965). 18
Figure 10 Photographie aérienne d'un cumulonimbus au-dessus de l'Océan Pacifique, ©Santiago Borja Lopez, 2016. 19
Figure 11 Cycle de formation du grêlon au sein d'un cumulonimbus, ©M. Trevisan d'après (Heymsfield et al., 1980). 20
Figure 12 Coupe d'un grêlon. On peut voir sur l'embryon (orange), une couche de croissance opaque correspondant à un régime sec (bleu), une couche translucide correspondant à une phase de croissance humide (vert) ainsi que la présence de bulles d'air (violet). ©Soderholm and Kumjian, 2023. 21
Figure 13 Photographie de grêlons. A gauche un grêlon en grappe de raisin (©The New York Times), à droite un grêlon de 19 cm fortement asymétrique issu des orages touchant le nord de l'Italie le 24 juillet 2023 (©Marilena Tonin). 22
Figure 14 Vue en plan d'un orage multicellulaire classique. Les cellules orageuses sont représentées par un cercle, le numéro indiquant leur ordre d'apparition dans l'orage multicellulaire, ©M. Trevisani. 24
Figure 15 Image thermique satellite de l'orage en V sur le Gard le 11 septembre 2021 entre 7h00 et 9h30, Meteogix. On distingue bien la pointe du V au niveau de Nîmes ainsi que les 2 branches du V. 25
Figure 16 Capture d'écran du radar des précipitations (mm/h) estimées à partir des échos radars le 5 juin 2022 à 19h40 sur Meteociel (radar zoom HD). Les flèches noires indiquent la direction du flux d'altitude et les flèches rouges la direction des cellules orageuses. L'écho en crochet est entourée d'un cercle blanc. 26
Figure 17 Coupe horizontale d'une SP classique (a), haute précipitation (b) et sèche (c). La position du mésocyclone est représentée par la lettre « T », ©Emmanuel Wesolek, Keraunos. 27
Figure 18 Vue satellite des impacts d'un couloir de grêle le 2 juillet 2017 entre la Dakota du Sud et le Minnesota aux USA, NASA, ©M. Trevisani 30
Figure 19 Image tirée des travaux de Vinet mettant en évidence deux cœurs de grêle par un réseau de grêlimètre dans le Saumurois le 1er juin 1993 ©(Vinet, 1994). 31

Figure 20 Photo d'un grêlimètre (a), d'une plaque de polystyrène impactée par de la grêle avant encrage (b) et une autre après encrage (c), ©ANELFA. 32
Figure 21 A gauche, cartographie à la maille communale (INSEE) des grêlimètres (M) seuls et des grêlimètres couplés à un système de prévention grêle (E+M) du réseau ANELFA en 2023, ©M. Trevisani, 2023. A droite, cartographie des régions viticoles de France, ©Ministères de l'Agriculture, 2022. 33
Figure 22 Capture d'écran (téléphone) d'une publication Facebook sur les orages de grêle dans le lyonnais le 30 juin 2022 par Lyon Météo (a) et des réactions de sa communauté (b). Les données ont été anonymisées. 35
Figure 23 Capture d'écran sur la communication de Météo-France (a) et du ministère de l'Intérieur (b) sur Twitter le 14 novembre 2022 au regard des inondations majeures en cours. 35
Figure 24 Les chutes de grêle en France en 2022 enregistrées sur l'ESWD. 36
Figure 25 Décalage potentiel entre la chute de grêle modélisée à partir de paramètres mesurés en altitude et la chute de grêle observée au sol, ©M. Trevisani 37
Figure 26 Principe de fonctionnement d'un radar météorologique, ©Météo France. 38
Figure 27 Réseau de radars Météo-France au cours de l'année 2023, ©Météo France. Les cercles autour des radars en bande S (en rouge) et C (en bleu, en noir pour les radars limitrophes) ont un rayon de 100 km. Les cercles autour des radars en bande X (en vert) ont un rayon de 50km. Dpol veut dire double polarisation. 39
Figure 28 Répartition géographique de la fréquence annuelle des chutes de grêle de plus de 2,5 cm dans le monde (100 x 100 km) selon les travaux de Prein et Holland ©Prein and Holland, 2018. 40
Figure 29 Répartition géographique de la fréquence annuelle des chutes de grêle en Europe (résolution 10 x 10 km) selon les travaux de Punge et al., ©Punge et al., 2017. 41
Figure 30 Répartition géographique de la fréquence annuelle des chutes de grêle en France, Allemagne, Belgique et Luxembourg (1 x 1 km) selon les travaux de Fluck et al. Des sous-domaines sont également indiqués, ©Fluck et al., 2021. 42
Figure 31 Nombre de périodes de 6h avec grêle d'au moins 2 cm par an sur un maillage 0.75° x 0.75° selon Rädler ©Rädler et al., 2018. 43
Figure 32 Répartition géographique de la fréquence annuelle moyenne des chutes de grêle d'au moins 2 cm (a) et d'au moins 5 cm (b) sur une grille de 0.5° latitude x 0.5° longitude selon les travaux de Pùčik, ©Púčik et al., 2019. 43
Figure 33 A gauche, nombre d'heures moyen modélisé avec grêle d'au moins 5 cm de diamètres par an sur une grille de 0,25° x 0,25°. A droite, changement sur le nombre d'heures moyen avec grêle d'au moins 5 cm par décennie. Les tendances significatives ont étés hachées ($p < 0,05$), ©Battaglioli et al., 2023. 44
Figure 34 Répartition géographique de la fréquence et de l'intensité des orages de grêle dans le monde, ©Nathan World Map of Natural Hazard, Munich Re, 2011. 45
Figure 35 Répartition géographique de l'aléa grêle en France selon les travaux de Vinet, ©Vinet, 1998. 46
Figure 36 Exemple des données grêle disponibles sur le site Meteo-Suisse. A gauche, diamètre des grêlons associé à une période de retour de 10 ans. A droite, nombre de journée grêle avec grêlon d'au moins 4 cm sur l'année 2022, ©Meteo-Suisse. 47
Figure 37 Vigilance météo diffusée le 6 septembre 2022 au regard des prévisions du mercredi 7 septembre 2022, ©Météo France. De nombreuses chutes de grêle de plus de 5 cm ont été recensées dans le Centre-Est de la France 47
Figure 38 Capture d'écran de la prévision des orages sur la journée du 7 septembre 2022, © Keraunos. 48

Figure 39 Historique de la charge des sinistres des événements naturels en France selon France Assureur, ©France Assureur. 51
Figure 40 Evolutions des principaux évènements climatiques majeurs entre 1988 et 2022 selon France Assureurs. A gauche le nombre d'évènements cumulés, à droite les pertes cumulées exprimés en euros constants 2022 revalorisés par l'indice FFB à fin 2022, ©M. Trevisani. 52
Figure 41 Evolution de la fréquence des sinistres (taux de contrats ayant bénéficiés d'une indemnisation au titre d'un sinistre grêle au sein de la garantie TGN du marché entre 1990 et 2022), source : France assureurs. 1999 non renseignée, ©M. Trevisani. 53
Figure 42 Evolution de la sinistralité grêle moyenne entre 1990 et 2022 de la garantie TGN du marché assurantiel français, exprimée en € constants 2022. La sinistralité moyenne de 1999 n'est pas renseignée, ©M. Trevisani. 54
Figure 43 Evolution des cotisations du marché de l'assurance récolte en France entre 2015 et 2022 selon les données de France Assureurs, ©M. Trevisani. 56
Figure 44 Fonctionnement de l'ancien dispositif de l'assurance récolte (avant 2023), ©M. Trevisani 58
Figure 45 Evolution du ratio S/P de l'ensemble du secteur assurantiel au regard des assurances récoltes entre 2013 et 2021, données France Assureurs, ©M. Trevisani. 59
Figure 46 Nouveau dispositif de l'assurance récolte à 3 niveaux (après 2023). Chaque acteur intervient à partir d'un certain seuil de pertes, ©M. Trevisani. 61
Figure 47 Nombre de contrat (DAB, Auto, récolte) Par commune chez Generali France en 2022, ©M. Trevisani. 62
Figure 48 Engagements annuels par commune du portefeuille Generali France (DAB, Auto, récolte). Les engagements DAB et Auto correspondent à ceux de l'année 2022, et les engagements des récoltes correspondent à la moyenne annuelle de la période 2013-2022. Les sommes sont exprimées en € constants 2022, ©M. Trevisani. 63
Figure 49 Pertes annuelles de Generali France en France hexagonale pour la garantie TGN et CatNat sur le DAB et l'Auto, ©M. Trevisani. 64
Figure 50 Répartition des pertes par aléa au sein de la garantie TGN (à gauche) et CatNat (à droite) chez Generali France entre 2013-2023, ©M. Trevisani. 65
Figure 51 Evolution de la part des pertes associées à la grêle au sein de la garantie TGN chez Generali France entre 2013 et 2023, ©M. Trevisani. 66
Figure 52 Evolution des pertes associées aux principaux périls climatiques chez Generali France entre 2013 et 2022, ©M. Trevisani. 66
Figure 53 Evolution des pertes cumulées associées aux principaux périls climatiques chez Generali France entre 2013 et 2022, ©M. Trevisani. 67
Figure 54 Sinistralité par produit des principaux périls climatiques entre 2013 et 2023 sur le portefeuille Generali France, ©M. Trevisani. 68
Figure 55 Sinistralité grêle cumulée par produit entre 2013 et 2022 sur le portefeuille de Generali France. A gauche on retrouve les pertes (€ constants 2022), à droite le nombre de sinistre. 68
Figure 56 Zoom sur la sinistralité grêle cumulée par produit entre 2013 et 2023 sur le portefeuille Generali France, ©M. Trevisani. 69
Figure 57 Statistique de foudroiement sur juin 2022, ©Météorage. 70
Figure 58 Les chutes e grêle du 18 et le 23 mai 2022. A gauche le diamètre maximal des grêlons recensés par commune (données Keraunos, ESWD et Generali France), à droite la sinistralité grêle enregistrée par Generali France (DAB + auto) à l'échelle de la commune (vision novembre 2022), ©M. Trevisani. 71
Figure 59 A gauche, échos radars de la SP exceptionnelle évoluant aux alentours de Poitier à 21h25. La position du hook écho est indiqué par la flèche blanche, la direction du flux principal est montrée par la flèche noir et celle de la SP par la flèche rouge, ©Meteociel. A droite, température au sommet du

nuage aux alentours de Poitier à 21h15. La position du sommet pénétrant de la SP exceptionnelle est indiquée par le cercle blanc. 71
Figure 60 Dommages sur véhicules, sur bâtiments, végétations, associés aux chutes de grêle du 2 juin 2022 à Châteauroux, ©M. Trevisani. 72
Figure 61 Répartition géographique de la situation entre le 2 et le 5 juin 2022. A gauche le diamètre maximal des grêlons recensés par commune (données Keraunos, ESWD et Generali France), à droite la sinistralité grêle enregistrée par Generali France (DAB + auto) à l'échelle de la commune (vision novembre 2022), ©M. Trevisani. 73
Figure 62 Répartition géographique de la situation entre le 18 juin et le 4 juillet 2022. A gauche le diamètre maximal des grêlons recensés par commune (données Keraunos, ESWD et Generali France), à droite la sinistralité grêle enregistrée par Generali France (DAB + auto) à l'échelle de la commune (vision novembre 2022), ©M. Trevisani..... 74
Figure 63 Modèle de grêle Keraunos. Les chutes de grêle sont déduites d'après les observations et les paramètres météorologiques environnants. Dans cet exemple, si des grêlons de 2 cm sont observés dans les municipalités A et C, et que la municipalité B se trouve sur le chemin de l'orage de grêle avec des conditions atmosphériques favorables à la grêle, une chute de grêle de 2 cm (selon les conditions atmosphériques environnantes) est déduite sur la municipalité B, ©M. Trevisani. 81
Figure 64 Répartition géographique des HDm en France hexagonale entre 2013 et 2022 à partir des données ESWD, ©M. Trevisani. 83
Figure 65 Nombre de sinistres grêle en France cumulé entre 2000 et 2023. Le total du nombre de sinistre a été normalisé à 1, ©M. Trevisani. 84
Figure 66 Répartition des HDm entre 2013 et 2022 pour chaque base de données : Keraunos, ESWD, Generali France (DAB, Auto, Agricole). Dans ce graphique, un HDm peut être présent dans plusieurs bases de données, mais apparaît seulement une fois dans la BD HD finale, BD HD, ©M. Trevisani. .. 85
Figure 67 Caractérisation des diamètres renseignés, réhaussés et non renseignés (NR) dans la BD HD, ©M. Trevisani..... 86
Figure 68 Taille des grêlons dans la TORRO Hailstorm Intensity Scale, ©Webb et al., 2001. 87
Figure 69 La TORRO Hailstorm Intensity Scale (H0 to H10), ©Webb et al., 2001. 87
Figure 70 Classification des chutes de grêle selon l'Anelfa. Le niveau est potentiellement suivi d'un « - » ou d'un « + » en fonction de la densité de grêlons par unité de surface, ©Dessens et al., 2007. 88
Figure 71 Variation du nombre d'HD nationaux et d'HD nationaux avec grêle d'au moins 2 cm entre 2013 et 2022. La moyenne est indiquée en ligne pointillée. Le nombre de HD nationaux a été calculé sur une période glissante de 10 jours, BD HD, ©M. Trevisani. 90
Figure 72 Cumul du nombre de HD entre 2013 et 2022 en France avec grêlons d'au moins 2 cm, BD HD, ©M. Trevisani..... 90
Figure 73 Distribution mensuelle de la fréquence des chutes de grêle et du diamètre maximal des grêlons, BD HD, ©M. Trevisani..... 91
Figure 74 Variations spatio-temporelles à l'échelle de la commune de la fréquence des chutes de grêle (haut) et du diamètre maximal des grêlons (bas) sur la période mars-octobre (2013-2022). La fréquence des chutes de grêle a été normalisée au regard du maximum mensuel, BD HD, ©M. Trevisani. 92
Figure 75 Relation entre la fréquence des chutes de grêle et le plus gros grêlon recensé à l'échelle de la commune entre 2013 et 2022. La couleur de la carte de densité est exprimée au regard du maximum de population (9 783), BD HD, ©M. Trevisani..... 93
Figure 76 Distribution du $Dmax$ parmi tous les HDm recensés entre 2013 et 2022, BD HD, ©M. Trevisani. 93
Figure 77 Plus gros grêlon recensé à la maille communale entre 2013 et 2022, BD HD, ©M. Trevisani. 94

Figure 78 Distribution annuelle de la moyenne du diamètre maximal des grêlons (HD ≥ 2 cm), du plus gros grêlon et du nombre de jour de grêle avec grêlons d'au moins 2 cm de diamètre, BD HD, ©M. Trevisani. 95
Figure 79 Variation de la moyenne annuelle du plus gros grêlon par HD national entre 2013 et 2022, BD HD, ©M. Trevisani. 95
Figure 80 Variation temporelle du plus gros grêlon recensé en France chaque mois, BD HD, ©M. Trevisani. 96
Figure 81 Variation annuelle du nombre d'HDm de moyenne gravité (≥ 2 cm), BD HD, ©M. Trevisani. 96
Figure 82 Evolution du nombre de communes distinctes touchées par une chute de grêle avec grêlons de plus de 2 cm, BD HD, ©M. Trevisani. 97
Figure 83 Carte de densité sur le nombre de HD sur la période 2013-2017 au regard de 2018-2022. La couleur est exprimée en fonction de la plus grande population du couple ligne-colonne, BD HD. 97
Figure 84 Distribution mensuelle du nombre de HDm avec grêlons de plus de 2 cm, BD HD, ©M. Trevisani. 98
Figure 85 Répartition géographique de la fréquence des chutes de grêle de moyenne gravité à l'échelle de la commune entre 2013 et 2022, BD HD, ©M. Trevisani. 98
Figure 86 Evolution annuelle du nombre de HD sévères entre 2013 et 2022, BD HD, ©M. Trevisani. 99
Figure 87 Répartition annuelle du diamètre maximal des HDm parmi les évènements de plus de 2 cm à l'échelle de la commune. Le pourcentage correspond à la proportion de HDm sévères (≥ 5 cm) parmi les HDm d'au moins 2 cm, BD HD, ©M. Trevisani. 100
Figure 88 Fréquence annuelle à l'échelle du département des chutes de grêle avec grêlons de plus de 5 cm, BD HD, ©M. Trevisani. 101
Figure 89 Exemple de dommages associés aux chutes de grêle sur les grandes cultures (2 photos du haut), sur le maraichage (2 photos du milieu) et sur l'arboriculture (4 photos du bas), ©National Institute of Abiotic Stress Management, 2014. 104
Figure 90 Composants d'une maison individuelle les plus impactés lors d'une chute de grêle, ©Lettre d'information n°34, MRN, 2020 105
Figure 91 Exemples de dommages lors d'un épisode grêle endommageant des bâtiment 107
Figure 92 Exemples d'endommage associés aux chutes de grêle sur des nouveaux enjeux du risque grêle 108
Figure 93 Exemples d'endommagement (carrosserie, parties vitrées…) associé à des chutes de grêle sur véhicule 109
Figure 94 Schéma présentant les différentes étapes de l'élaboration du modèle d'estimation de la sinistralité grêle, ©M. Trevisani. 110
Figure 95 Pourcentage d'HDm concerné par un regroupement temporel sur différentes périodes en 2022. Le pourcentage est calculé à partir des communes touchées par plus d'une chute de grêle en 2022. La ligne rouge montre le seuil retenu pour le regroupement, ©M. Trevisani. 111
Figure 96 Carte de chaleur représentant la proportion de taux de sinistres DAB par commune en 2022 en fonction de classe de taille du plus gros grêlons, ©M. Trevisani. 112
Figure 97 Distribution du taux de sinistres DAB par commune à chaque date avec sinistres grêle. La médiane est en rouge, la moyenne en vert, et les whiskers représentent les centiles 10 et 90 de la distribution. L'échantillon est renseigné au niveau de la courbe rouge, ©M. Trevisani. 113
Figure 98 Nombre de sinistres par journée sélectionnée en 2021 pour notre jeu de calibrage. 114
Figure 99 Estimation initiale du volume de sinistre grêle post-évènement (médiane) et volume de sinistres enregistré par Generali. Les incertitudes correspondent aux centiles de distribution (i.e. 10 et 90 pour un intervalle de confiance à 80%.). Le « + » représente une journée fortement sinistrée, « ~ » une journée moyennement sinistrée et « - » une journée faiblement sinistrée. 114

Figure 100 Principe de fonctionnement de la seconde estimation du nombre de sinistres. Dans cet exemple, il y a 3 journées de calibrage et on s'intéresse à la journée du 15/06/2023. Chaque journée est exprimée en fonction de l'estimation initiale dans la partie « estimation relative ». Les facteurs correctifs (ex : 0,26 pour la journée de référence du 21/06/2021) sont ensuite appliqués à la sinistralité observée de chaque journée de référence. L'estimation corrigée finale correspond à la moyenne des estimations corrigées. 115
Figure 101 Arbre de décision entre l'estimation initiale ou l'estimation corrigée comme estimation finale. 116
Figure 102 Distribution du taux de sinistres auto par commune à chaque date avec sinistres grêle. La médiane est en rouge, la moyenne en vert, et les whiskers représentent les centiles 10 et 90 de la distribution. L'échantillon est renseigné au niveau de la courbe rouge, ©M. Trevisani. 117
Figure 103 Positionnement de l'estimation réalisée sur la journée du 11 juillet 2023 au regard de l'historique et des précédentes estimations réalisées 118
Figure 104 Schéma du fonctionnement générale du modèle dans une utilisation courante, ©M. Trevisani. 118
Figure 105 Performance du modèle sur les 5 dates avec le plus de sinistres DAB enregistrés par Generali France en 2023. 119
Figure 106 Profil des chutes de grêle à la maille communale sur la journée du 11 juillet 2023, ©M. Trevisani. 119
Figure 107 Répartition des chutes de grêle à la maille communale sur la journée du 11 juillet 2023, ©M. Trevisani. 120
Figure 108 Répartition de la sinistralité grêle modélisée (gauche) et observée (droite) à la maille départementale sur le portefeuille DAB de Generali France lors de la journée du 11 juillet 2023, ©M. Trevisani. 120
Figure 109 Exemple de canons anti-grêle. A droite, le canon possède un silencieux pour éviter les nuisances sonores auprès du voisinage. 121
Figure 110 Exemple de module d'insémination des nuages. De gauche à droite, ballon gonflé à l'hélium (Selerys), cheminée (Anelfa) et fusée paragrêle. 122
Figure 111 Exemple de housse paragrêle ©Norauto 123
Figure 112 Différents filets paragrêle. De gauche à droite, filet en couverture totale, filet en couverture en rang, filet en couverture totale sur un garage. 123
Figure 113 Scanner de grande taille utilisé par MMA. Il ne nécessite que 30s pour analyser les dégâts de la grêle sur l'ensemble de la carrosserie ©Covéa 124
Figure 114 Distribution du nombre de HD sur la période 2013-2022 pour l'ensemble des communes de l'hexagone, ©M. Trevisani. 126
Figure 115 Distribution du diamètre maximal des grêlons recensé par commune entre 2013 et 2022, ©M. Trevisani. 127
Figure 116 Représentation géographique de l'aléa grêle à travers l'indice IH avant post traitement à gauche et après post traitement à droite, ©M. Trevisani. 128
Figure 117 Répartition géographique de l'indice grêle IH à l'échelle de la commune. L'indice représenté est celui tenant compte de l'influence des communes voisines, BD HD, ©M. Trevisani. 129
Figure 118 Différences de l'indice IH calculé sur la période 2013-2022 avec celui calculé sur la période 2013-2021, ©M. Trevisani. 130
Figure 119 Différences de l'indice IH calculé sur la période 2013-2022 avec celui calculé sur la période 2013-2021, ©M. Trevisani. 130
Figure 120 Comparatif des principales cartographies de la grêle en France. De gauche à droite, cartographie de l'aléa grêle par Vinet (Vinet, 1998), cartographie de la fréquence grêle par Punge et al. (Punge et al., 2017), et cartographie de l'aléa grêle de notre étude, ©M. Trevisani. 131

Figure 121 Influence du processus de rehaussement de l'indice H après 2 tours de traitement, ©M. Trevisani. 137
Figure 122 Schéma représentant les différentes étapes dans le calcul de l'indice H, ©M. Trevisani. 138
Figure 123 Répartition géographique de l'indice grêle H à l'échelle de la commune. L'indice représenté correspond à l'indice moyen calculé à partir des 3 différents jeux d'entraînement, BD HD, ©M. Trevisani. 139
Figure 124 Évolution de la sinistralité annuelle moyenne "grêle" par département à horizon 2050 sur les produits DAB et Auto, ©Covea 142

Table des tableaux

Tableau 1 Bilan Comparatif entre la grêle et d'autres aléas climatiques en France. L'ordre de grandeur de la durée, la fréquence nationale et la surface impactée sont renseignées, France Assureurs..... 2
Tableau 2 Principales sources de quantification et de spatialisation du risque grêle. 9
Tableau 3 Mix portefeuille des principaux produits de Generali France en 2022, ©M. Trevisani. 63
Tableau 4 Caractérisation des HDm renseignés au sein des données Keraunos, ESWD et Generali France. Les diamètres de moins de 2 cm chez Keraunos représentent la majorité des données (62%). Les données de Generali France étant originaire de la sinistralité, le diamètre des grêlons n'est pas renseigné, ©M. Trevisani. 81
Tableau 5 Taux de recouvrement des HD communaux pour chaque source entre 2013-2022. Sens de lecture : 1% des évènements de Keraunos sont présents dans ESWD, BD HD, ©M. Trevisani..... 85
Tableau 6 Equivalence des niveaux de grêle entre l'échelle développé par l'Anelfa et par TORRO. L'équivalence à été déterminée à partir de la taille maximale (Anelfa) et de la gamme de taille (TORRO) des grêlons, ©M. Trevisani. 88
Tableau 7 Nombre d'HD nationaux par an associé à chaque source de données, BD HD, ©M. Trevisani. 89
Tableau 8 Caractéristiques moyennes de l'ensemble des chutes de grêle sur la période mai-septembre au regard d'octobre-avril, BD HD, ©M. Trevisani. 92
Tableau 9 Impact du pré-traitement sur le nombre de chutes de grêle à l'échelle de la commune et à l'échelle nationale. On retrouve également le nombre d'HDm exploitable par notre modèle (HDm avec sinistres). 111
Tableau 10 Tableau à double entrée illustrant les conditions retenues dans la caractérisation de la journée grêle. Le rapport est calculé à partir des 10 dates les plus sinistrées (DAB) de Generali France entre 2013 et 2022. 116
Tableau 11 Tableau résumant les critères d'intensité (record du diamètre maximal) et de fréquence dans l'attribution d'un score d'aléa à une commune. 127
Tableau 12 Tableaux représentant la distribution de l'indice IH par commune en France. A gauche, avant post-traitement, à droite, après post-traitement 128
Tableau 13 Résumé de la répartition de l'exposition et des indicateurs de sinistres de Generali France entre 2013 et 2022, discrétisée par indice aléa grêle en France. 133
Tableau 14 Résumé de la répartition des sinistres graves (sinistre > 150 000 €) sur l'ensemble de la sinistralité grêle entre 2013 et 2022 134

Tableau 15 Résumé de la répartition des indicateurs de sinistralité par produit assurantiel (DAB, récolte et auto) au sein de chaque niveau d'aléa grêle. 134
Tableau 16 Tableau récapitulatif des « Cold spots » de sinistralité identifié au sein de chaque niveau d'aléa grêle (6 – 5 – 4) 135
Tableau 17 Centiles associés au ratio L/E, calculé par commune sur la période 2013-2022 (DAB, auto, agricole). A gauche, le centile est calculé uniquement sur les communes avec un ratio L/E non nul. 136
Tableau 18 Indice aléa grêle amélioré, nommé H, à l'échelle de la commune. 137
Tableau 19 Tableaux résumant les caractéristiques de chaque jeu de données (entraînement et test), utilisé dans l'élaboration de l'indice H final. 138
Tableau 20 Distribution par commune de l'indice H final (après moyenne avec les 3 jeux de données) 140
Tableau 21 Exemples du niveau d'aléa grêle et du niveau de risque grêle estimé sur plusieurs communes 140
Tableau 22 Discrétisation des indicateurs de sinistralité en fonction du niveau de risque grêle final141

Sommaire détaillé

Remerciements I
Lexique des sigles IV
Introduction générale 1
1. Les risques climatiques 1
1.1 Une préoccupation grandissante 1
1.2 Les risques climatiques dans le système français d'assurance 2
2. Le risque grêle 3
2.1 La notion de risque 3
2.2 La grêle : une sous composante des systèmes convectifs 7
2.3 Un aléa orphelin complexe à anticiper 7
2.4 Les données grêle disponibles en France hexagonale 8
2.5 Une zone d'étude à l'échelle du territoire hexagonal à maille fine 9
3. Les enjeux du risque grêle 10
3.1 Un risque « non catastrophique » 10
3.2 Une montée en puissance qui inquiète les assureurs 10
4. Problématique et annonce du plan 11
Partie 1 Le phénomène grêle et ses impacts sur une société d'assurance 14
Chapitre 1 : Formation d'une chute de grêle 15
1.1 Un nuage d'orage producteur de grêle : le cumulonimbus 15
1.1.1 Définition 15
1.1.2 Formation d'un nuage 15
1.1.3 Evolution d'un nuage en cumulonimbus 17
1.1.4 Potentiel orageux d'une cellule convective 19
1.2 Microphysique de la formation des grêlons 19
1.2.1 Une phase embryonnaire favorisée par les noyaux glaçogènes 20
1.2.2 Phase de croissance et phase de chute 21
1.3 Facteurs d'intensité des chutes de grêle 22
1.3.1 Les orages de nature monocellulaire : des orages classiques 23
1.3.1.1 Orage monocellulaire ordinaire 23
1.3.1.2 Orage monocellulaire à pulsation 23
1.3.2 Les orages de nature multicellulaire : des orages plus violents 23
1.3.3 Les orages de nature supercellulaire : les orages les plus extrêmes 25

1.3.3.1 SP classique 27
1.3.3.2 SP haute précipitation 27
1.3.3.3 SP basse précipitation. 27
1.3.3.4 SP mini 28
1.4 Conclusion du chapitre 1 28
Chapitre 2 : Un aléa difficile à appréhender 29
2.1 Un aléa ponctuel dans le temps et l'espace 29
2.2 La mesure de la grêle : le grêlimètre 31
2.2.1 Principe de fonctionnement 31
2.2.2 Une mesure de la grêle depuis 1970 en France 32
2.2.3 Un réseau grêlimètre couvrant principalement le Sud-Ouest de la France 33
2.3 Nouvelles méthodes de détection des chutes de grêle 34
2.3.1 Des témoins oculaires par le biais des réseaux d'observateurs professionnels et amateurs 34
2.3.2 Des prédicteurs de grêle comme proxy 36
2.3.3 Détection de la grêle par des radars à polarisation 37
2.4 Limites des cartographies de la grêle en France pour une société d'assurance 39
2.4.1 Des cartographies de la fréquence des chutes de grêle, sous composante de l'aléa grêle 39
2.4.2 Des cartographies de l'aléa grêle limitées à l'échelle de la France hexagonale 44
2.4.3 Un exemple européen dans l'étude de la grêle : la Suisse 46
2.5 Une anticipation très limitée des évènements grêligènes en France 47
2.6 Conclusion du chapitre 2 48
Chapitre 3 : La grêle dans le système assurantiel français 50
3.1 Des aléas naturels qui inquiètent le marché français, en particulier la grêle 50
3.1.1 Un marché de plus en plus sinistré 51
3.1.2 La montée en puissance de la grêle en France 52
3.2 Périmètre assurantiel concerné par la grêle 55
3.2.1 Le Dommage aux Biens (DAB) et l'automobile couverts par le régime TGN 55
3.2.2 Les assurances récoltes 55
3.2.2.1 Les différents contrats d'assurance récolte 56
3.2.2.1.1 Un contrat d'assurance récolte « historique » et spécifique : les contrats d'assurance G/T 56
3.2.2.1.2 Un nouveau contrat d'assurance récolte multirisques poussé par l'Etat : le rMRC 57
3.2.2.2 Dispositif d'assurance récolte 57
3.2.2.2.1 Un ancien dispositif d'assurance récolte à bout de souffle 57

3.2.2.2.2 Une réforme attendue des différents acteurs du régime de l'assurance des récoltes applicable dès 2023 59
3.3 La grêle chez Generali France 61
3.3.1 Portefeuille et exposition aux aléas climatiques 62
3.3.2 Positionnement de la grêle face aux autres aléas climatiques 64
3.3.2.1 Sinistralité climatique au sein des garanties TGN et CatNat 64
3.3.2.2 Positionnement de la grêle face aux principaux périls climatiques 65
3.4 La grêle en 2022 : une année exceptionnelle en France 69
3.4.1 Une succession de 3 vagues grêligènes exceptionnelles 70
3.4.1.1 1ère vague : des grêlons records 70
3.4.1.2 2ème vague : une sévérité orageuse marquée sur l'ensemble du territoire 72
3.4.1.3 3ème vague : une situation hybride de la 1ère et 3ème vague 73
3.4.2 Des difficultés à prendre en charge une sinistralité exceptionnelle 74
3.4.3 Dans la continuité de 2022 : 2023, une année grêligène record en Italie 75
3.5 Conclusion chapitre 3 75
Conclusion de la partie 1 76
Partie 2 Besoins opérationnels de Generali France pour appréhender le risque grêle en France 78
Chapitre 4 : Une nouvelle base de données pour caractériser la grêle en France hexagonale : la BD HD 79
4.1 Sources retenues dans la constitution de la BD HD 79
4.1.1 Keraunos 80
4.1.2 ESWD 82
4.1.3 Generali France 83
4.2 Constitution de la base de données grêle (BD HD) 84
4.3 Caractéristiques des chutes de grêle en France 86
4.3.1 Les différentes catégories de chutes de grêle 86
4.3.2 Saisonnalité des chutes de grêle 89
4.4 Distribution de la taille des grêlons 93
4.4.1 Répartition géographiques des plus gros grêlons 93
4.4.2 Variation annuelle de l'intensité grêligène 94
4.4.3 Evolution mensuelle de l'intensité grêligène 95
4.5 Distribution de la fréquence des chutes de grêle 96
4.5.1 Chutes de grêle de moyenne gravité 96
4.5.2 Chutes de grêle sévères 99
4.6 Conclusion du chapitre 4 101
Chapitre 5 : Estimation de l'endommagement sur le portefeuille Generali lors d'un évènement grêle intense 103

5.1 Analyse de la vulnérabilité des biens exposés à la grêle 103
5.1.1 La vulnérabilité des cultures 103
5.1.2 La vulnérabilité des bâtiments 105
5.1.3 La vulnérabilité des automobiles 108
5.2 Modèle d'estimation de la sinistralité grêle 109
5.2.1 Périmètre d'étude et pré-traitement des données Generali 110
5.2.2 Estimation du volume de sinistre grêle 111
5.2.2.1 1ère étape : entrainement du modèle sur l'année 2022 pour avoir une estimation initiale du volume de sinistres 111
5.2.2.2 2ème étape : correction du modèle sur un jeu calibrage dans le but d'avoir une deuxième estimation concernant le volume de sinistre 113
5.2.2.3 Caractérisation de la sévérité de la journée grêle 115
5.2.2.4 Estimation finale : initiale ou corrigée ? 116
5.2.2.5 Un modèle non applicable pour l'auto 117
5.3.3 Utilisation du modèle : cas d'étude 117
5.3 Stratégies d'adaptation aux chutes de grêle 120
5.3.1 La stratégie de suppression, une approche controversée 121
5.3.1.1 Canon anti-grêle 121
5.3.1.2 Insémination artificielle des nuages 121
5.3.2 La mitigation des dégâts associés aux chutes de grêle 122
5.3.2.1 Protection mécanique et protection économique 122
5.3.2.2 Bonnes pratiques à adopter 124
5.4 Conclusion du chapitre 5 124
Chapitre 6 : Cartographie de la grêle en France 126
6.1 IH, un nouvel indice pour caractériser l'aléa grêle en France 126
6.1.1 Un indice basé sur la fréquence et l'intensité maximale des chutes de grêle 126
6.1.2 Géographie de l'aléa grêle à travers l'indice IH 128
6.1.3 Influence de l'année 2022 sur notre représentation de la grêle en France 129
6.1.4 Une mise-à-jour de la vision aléa grêle en France 131
6.1.5 Correspondance de l'indice aléa avec la sinistralité grêle de Generali France 132
6.2 H, un indice aléa grêle amélioré approchant le risque grêle 135
6.2.1 Construction du nouvel indice 135
6.2.2 Géographie de l'aléa grêle amélioré à travers l'indice H 139
6.3 Evolution du risque grêle en France 141
6.4 Conclusion du chapitre 6 143
Conclusion de la partie 2 145

Conclusion générale 147
Bibliographie..... 149
Table des figures..... 161
Table des tableaux..... 167
Sommaire détaillé 169