

RAPPORT SCIENTIFIQUE CCR 2022



CCR au cœur de l'écosystème scientifique

$$\underbrace{\rho}_{m} \left(\underbrace{\frac{\partial v}{\partial t} + v \cdot \nabla v}_{a} \right) = \underbrace{-\nabla p}_{F \text{ pression}} + \underbrace{\mu \nabla^2 v}_{F \text{ visqueuse}}$$

CCR conçoit et développe des modèles d'impact des catastrophes naturelles et anthropiques en partenariat avec les organismes scientifiques les plus renommés dans ce secteur.



www.ccr.fr
www.catastrophes-naturelles-ccr.fr



RÉASSUREUR
PUBLIC

SOMMAIRE

- 01 Introduction par **Antoine Quantin**,
Directeur des Réassurances
et des Fonds Publics
 - 03 Perspectives 2022/2023
par **David Moncoulon**,
Directeur du Département
R&D Modélisation
-

04 CHAÎNE OPÉRATIONNELLE DE PRÉVISION DES DOMMAGES

- 06 Amélioration de la modélisation
de l'aléa débordement probabiliste
en France
 - 10 Modèle probabiliste d'exposition
aux séismes en France métropolitaine
 - 14 Développement d'une plateforme
de dommages multipéril
-

18 SÉCHERESSE

- 20 Comprendre le phénomène de retrait-
gonflement des argiles par le biais
d'un indicateur agrégé à la commune :
la magnitude des sécheresses
 - 23 Détection des arbres à partir
de données d'imagerie à très haute
résolution dans les zones exposées
à la sécheresse
-

28 CHANGEMENT CLIMATIQUE

- 30 Estimation des dommages sur les
pertes de récoltes de la ferme France
- 34 Simulations à climat constant et
simulations continues pour la
modélisation des événements extrêmes

38 ALERTE ET PRÉVENTION

- 40 Modélisation anticipée des pertes
assurantielles, une application du projet
de recherche PICS
 - 44 Apport des modèles de CCR pour
mesurer l'efficacité des mesures de
prévention sur les dommages assurés
-

48 UN PÉRIMÈTRE DE MODÈLES ÉLARGI

- 50 Modéliser l'aléa feux de forêts
 - 54 Modélisation anticipée des dommages
dus aux cyclones
-

58 INTERNATIONAL

- 60 Typologie d'événements à aléas
multiples pour l'Europe occidentale
 - 64 Amélioration de la connaissance
de l'exposition du bâti marocain
aux inondations
-

68 Prix CCR Cat Nat

- 70 Rétrospective 2021
 - 73 Rétrospective 2022
-

- 76 Citations et Publications

INTRODUCTION

« LES TRAVAUX DE MODÉLISATION MENÉS PAR CCR SONT ESSENTIELS POUR ÉCLAIRER L'ÉTAT DANS SES RÉFLEXIONS ET DÉCISIONS POUR ASSURER LA PÉRENNITÉ DU RÉGIME. »

L'année 2022 a été marquée par d'importants événements climatiques : nombreux orages et épisodes de grêle des mois de mai à juillet, sécheresse extrême particulièrement précoce, accentuée par plusieurs épisodes de canicules au cours de l'été, incendies de forêts particulièrement dévastateurs, tempête en Corse au mois d'août et tornades au mois d'octobre en Normandie et dans les Hauts-de-France.

Ces épisodes rappellent la nécessité d'améliorer en permanence les dispositifs de gestion des risques pour être en mesure de faire face à ces phénomènes et à leur aggravation attendue du fait du changement climatique. Qu'il s'agisse d'améliorer la prévention, la gestion de crise ou l'indemnisation, il est nécessaire d'approfondir la connaissance des périls auxquels les territoires sont exposés.

Maillon essentiel de la gestion des risques de l'État, CCR s'est dotée à cet effet d'une chaîne de modélisation permettant de croiser les aléas, qu'ils soient naturels ou anthropiques avec les enjeux économiques pour évaluer leur impact financier.

Cette plateforme est indispensable pour l'efficacité des dispositifs d'indemnisation ou de prévention des risques et pour accompagner l'État dans ses réflexions en matière de gestion des risques extrêmes. Elle a pu être développée et enrichie au fil des ans grâce à des partenariats scientifiques avec des acteurs de référence en France, qu'il s'agisse de centres de recherches, d'universités ou de grandes écoles. Grâce à

ces partenariats et aux retours d'expérience réalisés à la suite des événements survenus, les équipes de recherche et développement de CCR contribuent à une amélioration continue des modèles et à renforcer leur pertinence.

CCR a jusqu'à présent porté prioritairement ses efforts sur les risques d'inondation et de sécheresse mais elle étudie également d'autres périls naturels ainsi que des phénomènes d'origine anthropique dont les conséquences peuvent être extrêmes.

L'année 2022 a ainsi vu de nombreuses avancées en matière de modélisation de la sécheresse géotechnique et des tremblements de terre. En dehors du périmètre du régime Cat Nat, CCR s'est également fortement investie dans des travaux sur la connaissance des impacts des risques climatiques sur les récoltes dans le contexte du changement climatique.

En cette fin d'année 2022, l'équilibre financier du régime est mis à mal par une sécheresse exceptionnelle qui s'annonce comme l'événement le plus coûteux depuis l'instauration du régime en 1982, accompagnée d'un important choc d'inflation impactant particulièrement les périls à déroulement long. Dans ce contexte, les travaux de modélisation menés par CCR sont essentiels pour éclairer l'État dans ses réflexions de long terme, mais également à plus court terme, pour assurer la pérennité du régime./



ANTOINE QUANTIN,
Directeur des Réassurances
& Fonds Publics

« LES SERVICES AUX ENTREPRISES, AUX COLLECTIVITÉS ET AUX ASSUREURS SE POURSUIVENT ET SE RENFORCENT EN 2023. »

Les travaux de recherche et développement que mène CCR ont pour objectif d'améliorer la connaissance des conséquences économiques des catastrophes naturelles et anthropiques, composante essentielle pour assurer sa mission au service de l'État et du marché de l'assurance. Ces travaux sont menés en partenariat avec des organismes scientifiques renommés (notamment Météo-France, l'INRAE, le BRGM) qui apportent leur connaissance des aléas, indispensable à l'analyse économique de CCR. Il en résulte la conception et l'amélioration continue de modèles numériques visant à estimer les conséquences financières d'une catastrophe ou à mesurer l'exposition économique potentielle liée à la survenance d'événements très rares. En matière de risques sismiques et de risques climatiques en agriculture, les travaux 2023 vont s'appuyer sur les résultats de deux thèses soutenues avec succès en 2022. La première thèse a été effectuée avec l'Institut Agro-Rennes-Angers et Météo-France sur le thème de l'impact du changement climatique sur les pertes de récoltes agricoles et la deuxième avec l'École Nationale de Géologie de Nancy sur le développement d'un générateur stochastique de tremblements de terre. Concernant la gestion des risques climatiques en agriculture et le développement de l'assurance contre ces risques, les missions de CCR ont été élargies par une ordonnance publiée le 29 juillet 2022. Les travaux relatifs à ces sujets vont donc s'accélérer en 2023, avec par exemple la prise en compte du gel et

de la grêle dans nos modèles. Concernant les travaux sur les risques sismiques ils seront poursuivis en 2023 par une nouvelle thèse de Doctorat portant sur la propagation des ondes sismiques via des approches mécanistes numériques. Enfin, une thèse sur la modélisation de la sécheresse géotechnique démarre, reliant trois organismes majeurs autour de ce phénomène : Météo-France / CNRM pour la part météorologique, le BRGM pour la part géologique et CCR pour la part économique.

En tant que mécène de la nouvelle Chaire Geolearning (Mines Paris Tech, INRAE), CCR est associée à différents projets de recherche qui verront le jour au cours des cinq prochaines années. L'une de ces thèses portera sur un générateur stochastique de précipitations tenant compte des corrélations temporelles et spatiales via des approches novatrices.

Les services aux entreprises, aux collectivités et aux assureurs se poursuivent et se renforcent en 2023. Parmi eux, l'un des projets majeurs est l'analyse de la vulnérabilité du réseau électrique RTE aux inondations et au changement climatique qui sera livrée en mars 2023 et permettra de cibler les ouvrages les plus exposés pour mettre en place des mesures d'adaptation et de prévention. À la demande d'autres organismes, des études préalables de ce type sont en cours de réalisation et d'évaluation.

Le développement d'une plateforme multipéril de dommages, spécifique à CCR, constitue un projet transverse im-



DAVID MONCOULON,
Directeur du Département
R&D Modélisation

portant pour 2023. Il vise à renforcer la traçabilité des simulations, la flexibilité des calculs, en limitant la dépendance au système de base de données et de fichiers, la robustesse (notamment en tournant désormais sur un système Linux) et la souplesse dans le déploiement des calculs, avec l'émergence de solutions hybrides "on premise/cloud". En d'autres mots, l'objectif est de se doter d'une plateforme répondant aux meilleurs standards du marché.

Un nouveau projet d'amélioration de la vulnérabilité des biens assurés a vu le jour en ce début d'année, avec pour objectif de traiter les différents périls Cat Nat (inondations, séismes, puis sécheresse) ainsi que les risques en agriculture en allant au-delà de l'analyse statistique pour établir le lien déterministe entre aléa et sinistralité. Ce projet va enrichir notre plateforme de simulations de fonctionnalités permettant des analyses coûts-bénéfices pertinentes à des fins de prévention.

L'année 2023 s'annonce donc riche en nouveaux projets et les activités de R&D de CCR serviront l'un des axes stratégiques de l'entreprise, à savoir l'accroissement de l'expertise sur les périls couverts (catastrophes naturelles, terrorisme) mais également sur les nouveaux enjeux (cyber, agricole, grêle et gel)./

CHAÎNE OPÉRATIONNELLE DE PRÉVISION DES DOMMAGES



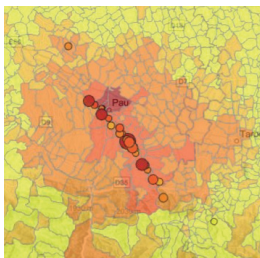
Arbres couchés suite au passage du cyclone tropical Batsirai au nord de l'île française de l'océan Indien à Saint-Denis de La Réunion le 3 février 2022.



Amélioration de la modélisation de l'aléa débordement probabiliste en France . p.06

La chaîne de modélisation de l'aléa débordement a été améliorée afin de mieux simuler les débits des grands fleuves et le débordement associé. Ces améliorations permettront, par la suite, de mieux estimer l'impact du changement climatique sur les inondations en France métropolitaine.

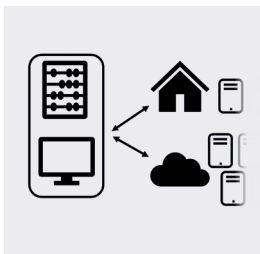
Thomas Onfroy, Étienne Leblois, Jean-Philippe Naulin et David Moncoulon



Modèle probabiliste d'exposition aux séismes en France métropolitaine . p.10

Dans cet article, le modèle propre à CCR d'estimation des coûts assurantiels induits par les séismes est présenté à l'échelle de la France métropolitaine. Ce modèle se base sur (i) un générateur stochastique de séismes, (ii) une analyse de la vulnérabilité du bâti français ainsi que (iii) le portefeuille marché de CCR. Cette approche permet d'estimer la variabilité spatiale des coûts assurantiels à différentes échelles : communale, départementale ou nationale. La génération des séismes dans le temps permet également d'établir des relations coûts – périodes de retour. Le modèle présenté dans cet article constitue le premier modèle complet d'estimation du risque sismique en France métropolitaine.

Corentin Gouache, Jean-Philippe Naulin, Pierre Tinard, François Bonneau et Julien Rey



Développement d'une plateforme de dommages multipérial . p.14

Cet article présente les principales caractéristiques d'une plateforme multipérial de calcul des dommages que CCR a choisi de développer en 2022. Une attention particulière est portée sur la robustesse du noyau de calcul, sur la traçabilité des résultats et sur la flexibilité de l'architecture. Le code sera aussi scalable et portable dans des architectures modernes.

Léa Boittin, Gilles Kieffer, Frédéric Drapeau, Jean-Philippe Naulin, Damien Dronsart et David Moncoulon



Amélioration de la modélisation de l'aléa débordement probabiliste en France

Thomas Onfroy¹, Etienne Leblois², Jean-Philippe Naulin¹, David Moncoulon¹

(1) Département R&D Modélisation, CCR

(2) Unité de recherche Riverly-Lyon, Institut national de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement (INRAE)

INTRODUCTION

La modélisation du débordement des cours d'eau lors d'une crue est une étape essentielle de la modélisation des dommages assurés consécutifs. Au regard des sinistres recensés par CCR, on estime que près de 35 % des sinistres, représentant 60 % des montants de pertes, sont localisés dans les zones de débordement des cours d'eau principaux. Les sinistres restants résultent pour leur part de phénomènes de ruissellement, du débordement de réseau, de remontées de nappes ou encore du débordement de petits cours d'eau ou des tronçons situés en tête de bassin.

Dans le cadre d'un processus d'amélioration continue des modèles Cat Nat, la chaîne de simulation du débordement a été mise à jour afin de consolider l'estimation des débits des crues et l'étalement des hauteurs d'eau au sein des lits majeurs des cours d'eau. Cette amélioration permet d'actualiser la cartographie de l'exposition ainsi que l'estimation des dommages probabilistes dus aux débordements. La modélisation de l'aléa débordement probabiliste est basée sur deux sources de modèles pluie-débit utilisés de manière complémentaire : (1) le modèle d'INRAE qui est utilisé pour modéliser les crues lentes et (2) le modèle pluie-débit de CCR, adapté à la simulation des crues rapides.

Les deux modèles utilisent en en-

trée les données ARPEGE-Climat de Météo-France. Ces données sont disponibles à climat actuel, mais également à climat futur selon les scénarios RCP 4.5 et 8.5 du GIEC. Ces dernières pourront être utilisées par la suite pour évaluer l'impact du changement climatique sur les grands cours d'eau.

Trois principaux axes d'évolution ont été explorés au cours de ces travaux :

- la prise en compte de la modélisation des débits réalisée par l'INRAE sur les grands fleuves ;
- l'amélioration de la modélisation pluie-débits sur les cours d'eau et bassins versants secondaires ;
- la conversion des débits issus des deux méthodologies en hauteurs d'eau et leur propagation sur le MNT grâce à un modèle hydraulique.

MÉTHODOLOGIE

Modélisation des débits sur les grands fleuves (INRAE)

Cette modélisation a été réalisée dans le cadre d'un partenariat avec l'INRAE pour travailler spécifiquement sur les grands fleuves qui sont concernés par les crues lentes. L'étude s'est appuyée sur les données météorologiques fournies par Météo-France dans le cadre de l'étude climatique réalisée en 2018^[1]. Il s'agit

de 400 années sur lesquelles des données de pluie, de pression atmosphérique et de vitesses de vent ont été estimées en continu par le modèle ARPEGE-Climat. Les sorties de précipitations du modèle ARPEGE sont disponibles toutes les heures et avec une résolution spatiale de 8 km de côté. Trois versions des 400 années sont disponibles. Une version avec les conditions climatiques actuelles, une version correspondant au scénario climatique RCP 4.5 et une autre au scénario RCP 8.5 du GIEC.

Le modèle pluie-débit d'INRAE est un modèle journalier, fournissant des estimations de débits à l'emplacement d'un réseau de 1054 stations hydrographiques. Il fonctionne sur l'ensemble du catalogue de 400 ans, en prenant en compte l'état de saturation du sol de manière continue, mais également la fonte des neiges sur les cours d'eau à régime nival. Ainsi, ce modèle est particulièrement bien adapté pour les crues lentes et les grands cours d'eau jaugés. Il est en revanche plus limité pour les crues rapides qui vont durer quelques heures et concerner des petits cours d'eau qui ne présentent pas de stations hydrographiques. La sélection des événements se fait à partir d'un seuil sur le débit décennal. Tous les événements qui vont dépasser ce seuil feront l'objet d'une simulation par le modèle hydraulique.

Modèle pluie-débit sur les cours d'eau secondaires (CCR)

Afin d'estimer les débits sur des événements de type crue rapide, le modèle pluie-débit de CCR a été utilisé. Contrairement au modèle d'INRAE, il s'agit d'un modèle événementiel au pas de temps infra horaire. Il est donc particulièrement bien adapté aux événements rapides mais, comme il ne prend pas en compte

l'évolution de l'humidité du sol sur le temps long et le débit de base, il est moins performant pour les crues lentes. Les simulations pluie-débit sont effectuées sur tous les événements sur lesquels la pluie dépasse le seuil décennal. Cette chaîne de modélisation a été appliquée sur un catalogue d'événements fictifs afin de déterminer l'exposition du territoire français aux événements de crue les plus extrêmes et de calculer des périodes de retour. Ces événements fictifs sont issus des simulations de 400 années en continu à climat actuel du modèle ARPEGE-Climat de Météo-France. Ces simulations avaient déjà été utilisées dans l'étude^[1] pour estimer l'impact du changement climatique.

Conversion des débits en hauteur

Lorsque les valeurs propres aux débits des cours d'eau ont été estimées ou injectées sur le réseau hydrographique en cas d'observations débitométriques, les hauteurs de débordement sont calculées et propagées au sein du lit majeur à partir du MNT 25 m. Ces données altimétriques sont prétraitées afin de corriger des valeurs d'altitude à l'emplacement des digues, la plupart du temps sous-estimées du fait de la résolution moyenne du MNT. En outre, un creusement du MNT à partir du centre du lit mineur est effectué pour estimer la bathymétrie des cours d'eau. En effet, les données brutes du MNT 25 m de l'IGN ne permettent pas de connaître la profondeur des cours d'eau. La première étape du calcul du débordement consiste à convertir les débits en hauteur d'eau. Pour ce faire, des transects topographiques ont été créés sous SIG perpendiculairement aux cours d'eau tous les kilomètres. À partir de ces transects et du MNT, l'information sur la topographie du lit du cours d'eau est récupérée tous les 25 m le long du transect

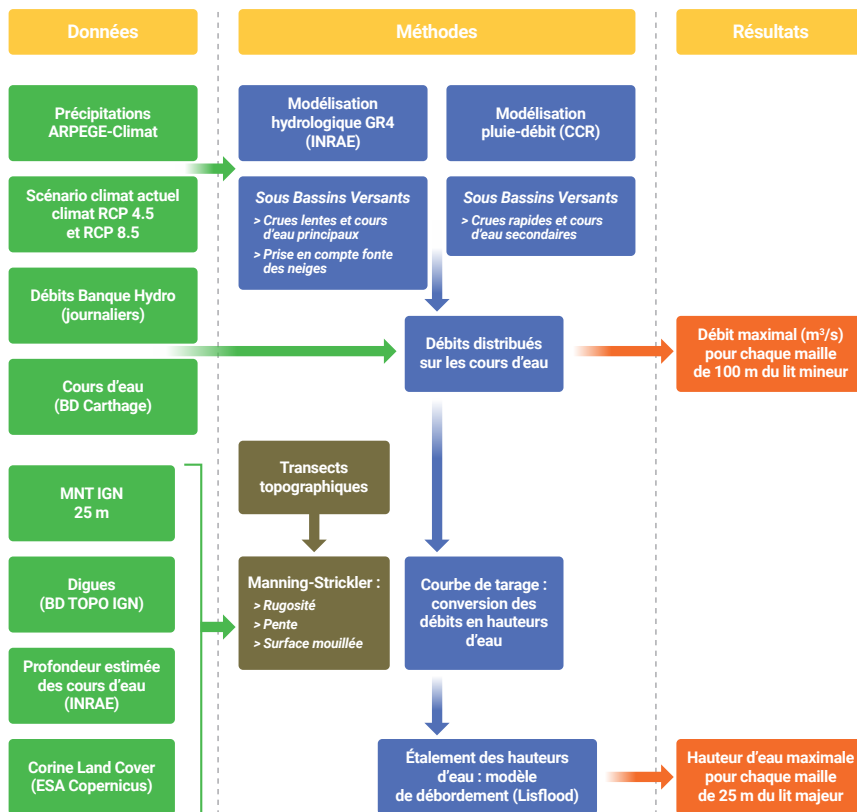


Figure 1 – Schéma fonctionnel de la modélisation du débordement

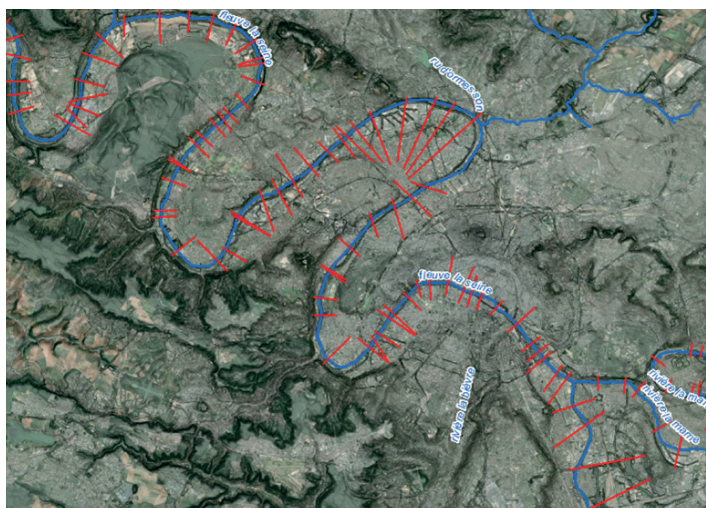


Figure 2 – Exemple de données de transects topographiques en région Parisienne

- # débordement
- # inondations
- # grands fleuves
- # changement climatique

> rendant possible le calcul d'une courbe de tarage (convertit du débit vers une hauteur d'eau) à partir de la formule de Manning-Strickler. Cette conversion est effectuée en distinguant le lit du cours d'eau en trois parties : le lit mineur, le lit majeur rive gauche et le lit majeur rive droite. Chacune de ces parties du lit présente un coefficient de rugosité dépendant de l'occupation du sol, renseignée à partir des données Corine Land Cover.

Modèle d'étalement

Une fois les hauteurs d'eau estimées, le débordement est simulé avec le modèle d'étalement. Celui-ci est basé sur les équations hydrauliques du modèle Lisflood-FP^[2], basées également sur les équations de Saint Venant. L'étalement des hauteurs peut ainsi fonctionner en régime non permanent, c'est-à-dire qu'il prend en compte la dimension temporelle dans le calcul des écoulements. Il peut être ainsi alimenté par un débit qui fluctue au cours du temps. Le modèle Lisflood estime un débit sur la base de la rugosité du sol et de la pente de la ligne d'eau. Les flux sont propagés dans 4 directions sur le MNT : haut, bas, droite et gauche. Le modèle permet in fine de fournir une estimation de la hauteur d'eau maximale atteinte lors de l'événement sur chaque maille du MNT en se basant sur les 6 h de débit où la crue a été la plus importante.

Cette chaîne de modélisation est désormais plus lente que celle développée précédemment. Cependant, cette augmentation des temps de calcul paraît raisonnable au regard de l'amélioration de la précision des simulations.

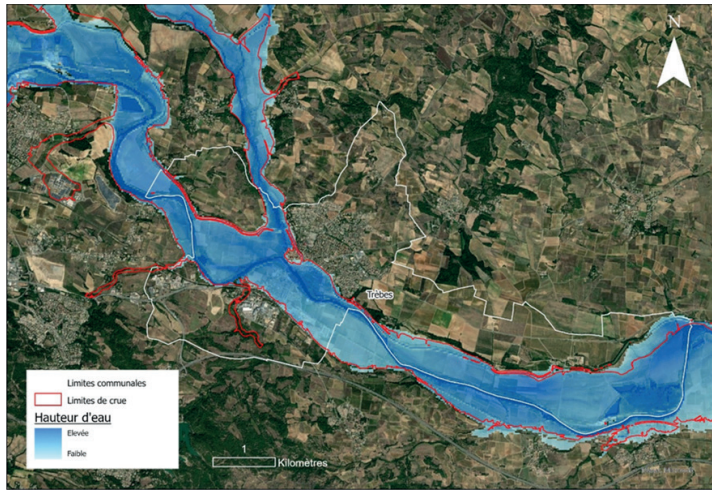


Figure 3 – Exemple de carte de hauteurs d'eau simulées pour les crues survenues dans le Languedoc en 2018.

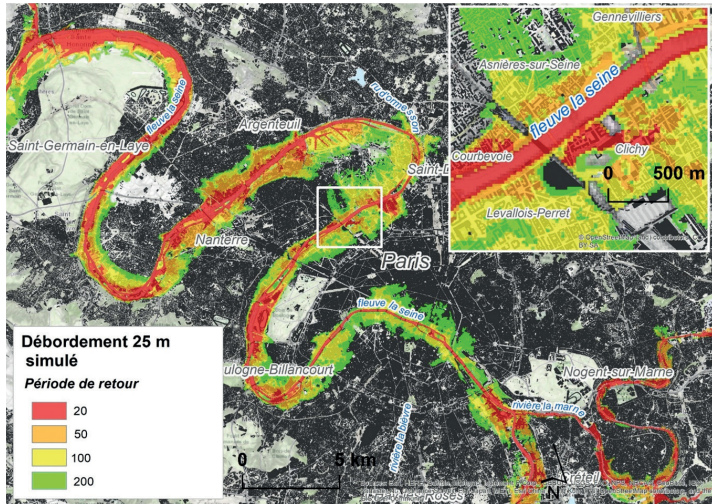


Figure 4 – Cartographie de l'aléa probabiliste dans la région parisienne.

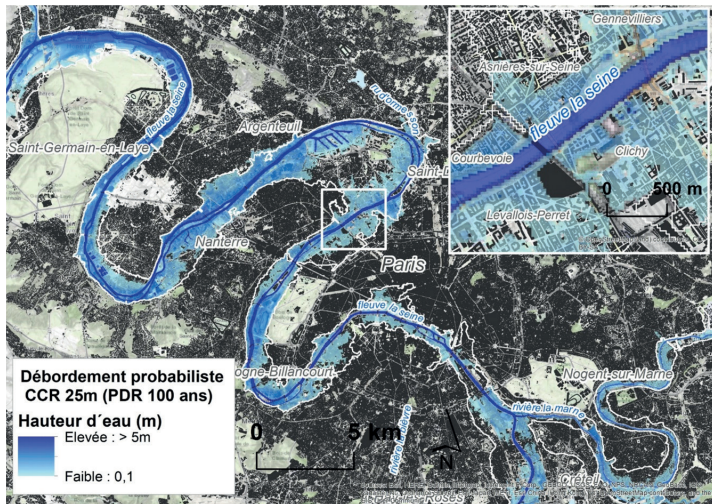


Figure 5 – Cartographie des hauteurs d'eau maximales atteintes lors d'un événement de période de retour centennal en région parisienne. L'extension de la crue de la Seine de 1910 figure en trait blanc.

L'INRAE est un organisme de recherche français spécialisé dans les thématiques de l'agriculture, l'alimentation et l'environnement. Il est constitué de plus de 10 000 agents répartis dans 18 centres de recherche localisés dans toute la France.

RÉSULTATS

Évaluation du nouveau modèle de débordement

Le modèle a été validé sur 5 événements historiques significatifs en comparant les zones inondées simulées aux zones inondées observées. Les événements retenus sont les crues du Gard en 2002, celles sur le département du Var en 2010, les crues de la Seine et de la Loire de 2016, celles de la Seine et de la Marne de 2018 et enfin l'événement survenu dans le Languedoc en 2018. Ce panel d'événements compte à la fois des crues rapides et des crues lentes. La figure 3 illustre la comparaison entre les simulations et les observations pour l'événement du Languedoc en 2018. Les emprises observées (en rouge sur la carte) proviennent des données satellitaires de l'événement à 10 m de résolution (ESA Sentinel-1 et -2). Les résultats ont montré que le nouveau modèle débordement détecte 76 % des surfaces inondées lors d'un événement contre 30 % de surfaces qui sont détectées à tort comme étant inondées (fausses détections). Ces limites sont expliquées en partie par la résolution moyenne du MNT 25 m. Pour une estimation plus précise des emprises inondées et des hauteurs d'eau, un MNT d'une résolution inférieure à 25 m sera intégré à terme dans la chaîne de modélisation des inondations.

Cartographie de l'aléa probabiliste débordement

Ces simulations basées sur 400 années de précipitations fictives permettent de réaliser une cartographie de l'aléa sur l'ensemble du territoire métropolitain dont des exemples sont présentés dans les figures 4 et 5. Il s'agit d'une part de la carte d'aléa probabiliste où chaque maille contient une estimation de la période de retour de l'événement nécessaire à une inondation. Une maille rouge risque par exemple d'être inondée tous les 20 ans.

Le second type de restitution correspond aux hauteurs d'eau simulées pour une période de retour donnée. Sur la figure 5, il s'agit des hauteurs d'eau simulées pour un événement d'une période de retour de 100 ans sur le bassin versant de la Seine. Les résultats obtenus sont cohérents avec l'extension de la crue de 1910 sur la Seine, qui y est figurée en blanc.

CONCLUSION

Ces développements réalisés pour mettre à jour la chaîne de modélisation du débordement ont permis d'augmenter la précision de l'estimation des emprises inondées et des hauteurs d'eau lors de la simulation d'une inondation à la fois sur les grands fleuves et les bassins versants secondaires.

Les évolutions ont été intégrées afin de recalibrer le modèle de dommage interne. La modélisation probabiliste permet de produire une cartographie des périodes de retour et des hauteurs d'eau associées afin de mesurer l'exposition du territoire métropolitain aux inondations pour différents scénarios climatiques. Cette modélisation pourra être répli-

RÉFÉRENCES

1. CCR (2018) Les conséquences du changement climatique sur le coût des Catastrophes Naturelles en France à horizon 2050.
2. Bates et al. 2010. A simple inertial formulation of the shallow water equations for efficient two-dimensional flood inundation modelling. *Journal Of Hydrology*

CITATION

Onfroy et al., Amélioration de la chaîne de modélisation de l'aléa débordement probabiliste en France métropolitaine. In *Rapport Scientifique CCR 2022 ; CCR, Paris, France, 2022, pp. 06-09*

quée en utilisant les jeux de données de Météo-France correspondant au scénarios climatiques RCP 4.5 et 8.5 du GIEC pour évaluer l'impact du changement climatique sur les cours d'eau en France. Ces travaux s'inscrivent dans un processus d'amélioration continue des modèles et d'autres évolutions pourront être apportées par la suite telles que l'utilisation de données de précipitations issues de modèles ou d'observations radar, le passage à des données altimétriques mieux résolues, ou encore l'amélioration de la prise en compte des ouvrages défense des crues et des réseaux souterrains./



Modèle probabiliste d'exposition aux séismes en France métropolitaine

Corentin Gouache¹, Jean-Philippe Naulin¹, Pierre Tinard², François Bonneau³ et Julien Rey⁴

(1) Département R&D Modélisation, CCR

(2) Département Cotations et Cellule Cat, CCR Re

(3) RING, ENSG, GeoRessources, Université de Lorraine, CNRS, ASGA

(4) Direction Risques et Prévention, unité Risques Sismiques et Volcaniques, BRGM

INTRODUCTION

En 2009, CCR a commencé à utiliser le logiciel RiskLink développé par la société RMS (Risk Management Solutions) pour estimer les pertes sismiques probabilistes sur le territoire français, que ce soit aux Antilles ou en métropole. Depuis 2015, CCR a travaillé en étroite relation avec le BRGM, dans le cadre d'une convention-cadre pluriannuelle, pour développer son propre modèle d'estimation de pertes sismiques déterministes. Finalement, de 2017 à 2021, la réalisation successive d'un stage ingénieur et d'une thèse de doctorat a permis de travailler sur un modèle d'aléa sismique probabiliste en France métropolitaine ayant abouti à la création en 2022 d'un modèle d'estimation des pertes assurantielles dues au péril séisme propre à CCR en métropole.

MÉTHODOLOGIE

Comme pour d'autres périls, le modèle séisme est composé de trois modules : (i) le module d'aléa qui permet de caractériser l'intensité de l'événement, (ii) le module de vulnérabilité qui détermine les biens exposés et leur capacité à résister à une charge sismique, et (iii) le module de dommages qui permet de modéliser les pertes assurantielles consécutives à un événement.

Le module d'aléa

La métrique quantitative de l'aléa sismique utilisée par CCR est représentée par l'accélération maximale du sol notée PGA pour Peak Ground Acceleration traduisant les mouvements induits par les ondes sismiques responsables des dommages aux structures. Le module d'aléa consiste à associer à un aléa sismique une probabilité d'occurrence et ce en chaque point du territoire.

Pour ce faire, CCR utilise un générateur stochastique de séismes potentiels simulant des dizaines de milliers d'années. Cette approche permet de produire des réalisations plausibles de la sismicité française, non pas en reproduisant la sismicité passée mais en se basant sur ses caractéristiques. La première étape consiste donc à étudier la sismicité passée au travers de zones sismotectoniques au sein desquelles la sismicité et la tectonique sont considérées comme uniformes. Sur ces données régionalisées, les relations statistiques entre le nombre annuel et la magnitude des séismes sont analysées à l'aide de la loi Gutenberg et Richter^[1]. Cette analyse spatio-temporelle ne concerne que les séismes indépendants les uns des autres. Les répliques et séismes précurseurs sont donc identifiés et dissociés du catalogue d'étude à l'aide de l'algorithme de declustering de Grünthal^[2]. Une fois les séismes indépendants générés grâce à une loi de Poisson non uniforme, les répliques sont (i) produites à l'aide de la distribution de proportion de répliques en fonction de la magnitude obtenue par l'algorithme de declustering puis (ii) associées à leur séisme principal grâce à la loi de Bath^[3]. Finalement, pour un catalogue de 50 000 années fictives par exemple, environ 80 000 séismes de magnitude supérieure ou égale à 4 sont générés soit 1,6 séisme par an, composés de 62,5 % de séismes indépendants et 37,5 % de répliques.

Dans un dernier temps, le PGA produit par chaque séisme fictif est calculé en surface. Ce calcul est réalisé à l'aide de l'équation de prédiction des mouvements du sol suivante^[4] :

$$\ln(PGA) = b_1 + b_2(M - 8) + b_3(M - 8)^2 + (b_4 + b_5M)\ln\left(\sqrt{D^2 + b_6^2}\right) + b_7D,$$

qui prend pour entrées, a minima, la magnitude M du séisme et la distance D entre le plan de rupture du séisme et le site en surface. Les valeurs de PGA sont ensuite transformées en intensités macrosismiques I. La relation utilisée entre le PGA et I est la suivante^[5] :

$$I = \begin{cases} 1,78 + 1,55 \log_{10}(PGA) & \text{si } PGA \leq 37 \text{ cm/s}^2 \\ -1,6 + 3,7 \log_{10}(PGA) & \text{sinon} \end{cases}$$

Dans cette étude, chaque site est espacé de 250 mètres, ce qui permet de produire une carte d'intensités macrosismiques à une résolution de 250 m sur le territoire impacté par le séisme.

Le module de vulnérabilité

Le module de vulnérabilité se base sur les polices d'assurances en renseignant notamment les caractéristiques physiques des bâtiments associés. Pour chaque police, les valeurs d'intensité macrosismique I produites par les séismes fictifs sont récupérées.

Pour le péril séisme, des informations spécifiques telles que les matériaux de construction, la hauteur ou encore l'âge des bâtiments sont obtenues grâce aux données de la BD Topo® de l'IGN. Ces caractéristiques physiques permettent d'associer, à chacun des bâtiments, un indice de vulnérabilité VI. Cet indice décrit la capacité d'un bâtiment à résister à une secousse sismique : de 0 pour un bâtiment « invulnérable » à 1 pour un bâtiment totalement dépourvu de défense contre les agressions sismiques. Un programme pluriannuel de travail conjoint avec le BRGM a permis d'estimer les indices de vulnérabilité spécifiques aux principales typologies de bâtiments français à vocation résidentielle, commerciale ou industrielle [6]. Ces études ont été régionalisées pour les bâtiments à usage d'habitation du fait de la variabilité des pratiques constructives passées en métropole. Ensuite, un lien entre les bâtiments et les polices est réalisé suivant la qualité de géolocalisation des polices et en fonction du type de risque, nature et usage, afin d'associer à chaque police un indice VI.

Le module de dommages

Le module de dommages consiste à produire des courbes d'endommagement puis d'estimer les coûts liés à un événement. Cela passe par la définition de la classe de dégâts D. Cette classe décrit les dégâts subis par le bâtiment, allant de 0 pour « aucun dégât » jusqu'à 5 pour « destruction totale ». Une fois que chaque police a été caractérisée par une intensité macrosismique I propre à chaque séisme du catalogue probabiliste et un indice de vulnérabilité VI, la classe de dégâts d'une police p impactée par un séisme s est définie comme tel [7] :

$$D_{p,s} = 2,5 \times \left[1 + \tanh \left(\frac{I_{p,s} + 6,25 \times VI_p - 13,1}{2,3} \right) \right]$$

Les courbes d'endommagement sont des relations entre la classe de dégâts D, la fréquence de sinistre FS et le taux de destruction TD. Ces relations sont établies par type de risque, nature et usage. Pour chaque police p, FS et TD sont multipliés à la valeur assurée VA de la police, afin d'estimer les coûts induits par un séisme s sur cette police tel que :

$$\text{Coût}_{p,s} = FS(D_{p,s}) \times TD(D_{p,s}) \times VA_p$$

La relation entre la fréquence de sinistre FS et la classe de dégâts D est établie par type de risque, nature et usage, par calibration sur les sinistres passés. La relation entre le taux de destruction TD et la classe de dégâts D est quant à elle basée sur celle proposée par Milutinovic et Trendafiloski (2003) [7] pour le projet européen RiskUE. Cette courbe est ensuite adaptée pour chaque type de risque, nature et usage, en la calibrant sur les sinistres passés collectés par CCR auprès de ses clients dans le cadre de relations bilatérales exclusives. Il est à noter que le séisme du Teil (2019) regroupe 88 % des sinistres contenus dans la base de données CCR.

RÉSULTATS

Dans l'optique de mesurer la pertinence des modules d'aléa, vulnérabilité et dommages utilisés dans le modèle séisme CCR, les coûts occasionnés par les trois principaux séismes ayant impactés la France métropolitaine (depuis la mise en place du régime d'indemnisation des Cat Nat en 1982) sont comparés avec ceux calculés par le modèle (Tableau 1).

Nom	Coûts réels	Coûts simulés	Ratio
Le Teil 2019	215	172	80 %
Rambervillers 2003	29	30	103 %
Annecy 1996	116	92	79 %

Tableau 1 – Comparaison des coûts réels et simulés pour trois séismes français. Les coûts sont indiqués en millions d'euros 2021.

- # séismes
- # aléa
- # vulnérabilité
- # dommage
- # probabiliste
- # métropole

> Dans cette partie, le terme « coûts » regroupe les coûts d'indemnisation Cat Nat de contenu et de contenant des bâtiments résidentiels et professionnels (commerces, industries, agricoles).

Les résultats du modèle séisme CCR sont proches des coûts réels des trois séismes analysés. Ce constat est d'autant plus encourageant que le séisme du Teil est difficile à simuler étant donné sa spécificité (très faible profondeur). Les coûts engendrés par des séismes dits historiques (ante 1982), ont également été estimés. C'est le cas, par exemple, des séismes de Arette (1967) et de Lambesc (1909) estimés respectivement à 178 M€ et 1,5 Md€.

Le modèle générant des années probables de sinistralité, il est possible de calculer le coût moyen annuel ainsi que les coûts associés à différentes périodes de retour. La carte présentée en Figure 1 illustre la répartition départementale du coût moyen annuel en France métropolitaine d'après le modèle séisme CCR et sur la base du portefeuille marché CCR. Les régions les plus exposées sont sans surprise les chaînes de montagnes, notamment les Pyrénées Occidentales et les Alpes du Nord. À noter que, plus inattendu, la vallée du Rhône ainsi que la partie centre-ouest de la France sont également assez exposées. Cette dernière région correspond au cisaillement Sud-Armoricain, reliant le sud de la Bretagne à la frontière nord-ouest du Massif Central. À l'inverse, une grande partie des bassins Aquitain et Parisien, qui sont connus pour être sismiquement peu actifs, sont confirmés comme faisant bien partie des régions les moins exposées au risque sismique.

La Figure 2 montre quant à elle les séismes impliqués dans l'année fictive la plus coûteuse sur les 50 000 années générées. Il s'agit d'un séisme principal dans le piémont pyrénéen, suivi de 26

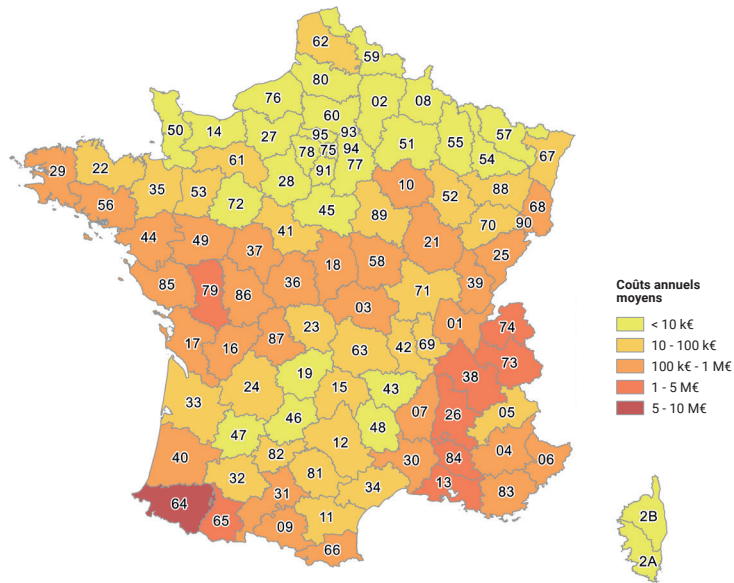


Figure 1 – Carte des coûts moyens annuels par département obtenus à partir du modèle séisme CCR et sur la base de la vision CCR du marché.

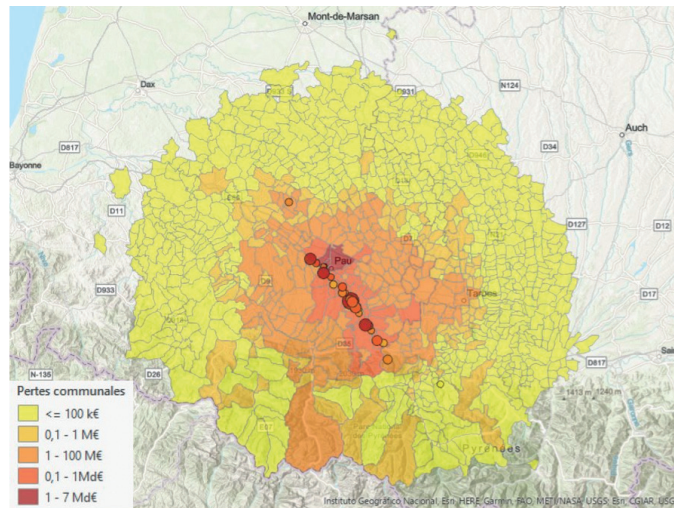


Figure 2 – Coûts par commune engendrés par la vingtaine de séismes ayant eu lieu la même année fictive selon le générateur de séismes CCR. Cet ensemble est constitué d'un séisme principal de magnitude 6,2 et de ses répliques, localisées le long de la faille (orientée NO-SE) associée au séisme principal. La taille et la couleur des séismes représentent respectivement la magnitude et les coûts induits par chacun des événements.

répliques. Les coûts communaux simulés pour l'ensemble de ces événements sont également illustrés. L'ensemble de ces coûts s'élève à plus de 47 Md€. Bien qu'environ 1 000 communes, réparties sur 5 départements, soient impactées par ces séismes, la région la plus touchée se trouve entre Pau et Lourdes. La présence de nombreux séismes fictifs plus ou moins puissants (de magnitude 4 à 6,2) à proximité de Pau, dont l'agglomération compte plus de 200 000 habitants, explique les forts coûts simulés. Les trois

communes les plus touchées (> 1 Md€) font d'ailleurs partie de l'agglomération de Pau : Pau elle-même avec plus de 6 Md€ de coûts ainsi que Billère et Lons avec un peu plus de 1 Md€ chacune.

CONCLUSION

Les composantes principales du modèle CCR d'estimation des coûts assurantiels liés aux séismes en métropole ont été présentés dans cet article. Le modèle est

LES PARTENAIRES

L'ASGA est une association loi 1901. Créée le 24 mai 1955, elle a pour objet de promouvoir l'enseignement et la recherche dans les domaines des Sciences de la Terre. L'ASGA soutient et gère le projet RING (Research for Integrative Numerical Geology) depuis 1989. Ce projet est soutenu par un consortium international regroupant 10 sponsors industriels dont CCR depuis 2018 et plus de 140 académiques. Le consortium finance largement l'équipe de recherche RING de l'École Nationale Supérieure de Géologie (ENSG) de Nancy et du laboratoire GeoRessources dont les tutelles principales sont l'Université de Lorraine et le CNRS.

composé (i) d'un **module d'aléa** générant des dizaines de milliers d'années de sismicité fictive et plausible et calculant les accélérations maximales du sol associées aux séismes fictifs, (ii) d'un **module de vulnérabilité** reposant sur le bâti et des études locales ayant permis de préciser ses caractéristiques physiques et enfin (iii) d'un **module de dommages** produisant des courbes d'endommagement par risque, nature et usage à partir d'une référence et de données de sinistralité.

En moyenne, au moins un séisme de magnitude supérieure ou égale à 4 est généré annuellement, ce qui correspond aux observations de la sismicité instrumentale sur le territoire français depuis 50 ans. Néanmoins, la plupart de ces séismes sont de magnitude faible à modérée (< 4,5). Les zones impactées par ces faibles séismes sont peu étendues et les aléas produits ne sont pas élevés. Ainsi, très peu d'entre eux aboutissent finalement à des dommages. Ceci est cohérent avec la situation observée par la population en métropole puisque la majorité des séismes ressentis n'est associée à aucun dommage notable. Le dernier exemple en date concerne le séisme proche de Mulhouse du 10 septembre 2022 de magnitude locale 4,8. Cependant, le modèle n'exclut pas le scénario où plusieurs forts séismes surviennent la même année. Si ces séismes ont lieu dans des régions densément peuplées, les dommages aux biens sur une année peuvent atteindre en cumulé plusieurs milliards d'euros.

Plusieurs axes d'amélioration peuvent être envisagés tels que la prise en compte des failles dans la localisation des séismes fictifs^[8] ou encore la modification dynamique des indices de vulnérabilité entre l'occurrence d'un séisme principal et de ses répliques. En effet, après la survenance d'un séisme, le bâti est endommagé ce qui tend à augmenter sa

Le BRGM est un établissement public à caractère industriel et commercial dont l'objectif est de comprendre les phénomènes géologiques et les risques associés dans un cadre de soutien de la politique publique de réduction et de maîtrise des risques. Outre ses travaux de recherche fondamentale, le BRGM mène de nombreux travaux de recherche appliquée en partenariat avec des acteurs socio-économiques, dont des entreprises, en réponse à leurs besoins et en particulier depuis de nombreuses années dans le domaine des risques naturels avec CCR.

RÉFÉRENCES

1. B. Gutenberg et C. F. Richter, (1944) « Frequency of earthquakes in California », *Bull. Seismol. Soc. Am.*, vol. 34, n°4, p. 185-188.
2. G. Grünthal, (1985) « The updated earthquake catalogue for the German democratic Republic and adjacent areas—statistical data characteristics and conclusions for hazard assessment », présenté à Proc. 3rd Int. Symp. On the Analysis of Seismicity and Seismic Risk, Liblice Castle, Czechoslovakia.
3. M. Båth, (déc. 1965) « Lateral inhomogeneities of the upper mantle », *Tectonophysics*, vol. 2, no 6, p. 483-514, doi: 10.1016/0040-1951(65)90003-X.
4. S. Drouet et F. Cotton, (2015) « Regional stochastic GMPEs in low-seismicity areas: Scaling and aleatory variability analysis—Application to the French Alps », *Bull. Seismol. Soc. Am.*, vol. 105, no 4, p. 1883-1902, doi: 10.1785/0120140240.
5. C. B. Worden, D. J. Wald, T. I. Allen, K. Lin, D. Garcia, et G. Cua, (déc. 2010) « A Revised Ground-Motion and Intensity Interpolation Scheme for ShakeMap », *Bull. Seismol. Soc. Am.*, vol. 100, no 6, p. 3083-3096, doi: 10.1785/0120100101.
6. J. Rey et P. Tinard, (2020) « Étude réalisée dans le cadre des projets de Service public du BRGM 2019-2020 (Convention spécifique d'application CCR – BRGM) », p. 23.
7. Z. V. Milutinovic et G. S. Trendafiloski, (sept. 2003) « WP4: Vulnerability of current buildings. », *RISK-UE, EVK4-CT-2000-00014*.
8. C. Gouache, P. Tinard et F. Bonneau, (2022) « Stochastic Generator of Earthquakes for Mainland France », *Appl. Sci.*, vol. 12, n°2, p.571, doi: 10.3390/app12020571.

CITATION

Gouache et al., Premier modèle probabiliste d'exposition aux séismes en France métropolitaine. In *Rapport Scientifique CCR 2022* ; CCR, Paris, France, 2022, pp. 10-13

vulnérabilité originelle. Au-delà de ces améliorations, un modèle similaire est en cours de développement pour les territoires français antillais. Enfin, il est envisagé de développer un modèle tsunami propre à CCR qui serait couplé avec le module d'aléa sismique./



Développement d'une plateforme de dommages multipéril

Léa Boittin¹, Gilles Kieffer², Frédéric Drapeau⁴, Jean-Philippe Naulin¹, Damien Dronsart³, David Moncoulon¹

(1) Département R&D Modélisation, CCR

(2) FoxPlan

(3) Direction des Systèmes d'Information, CCR

(4) Département Data Science, Actuariat et Provisionnement, CCR

INTRODUCTION

Pour estimer son exposition aux catastrophes naturelles, CCR a besoin de calculer les coûts occasionnés sur son portefeuille par plusieurs types de catastrophes. CCR a choisi de constituer au fil du temps son propre modèle de dommages, lui permettant ainsi de maîtriser l'ensemble des chaînes d'estimation des pertes consécutives à un événement et par là même de disposer d'un outil parfaitement adapté aux périls couverts par le régime Cat Nat en France.

Comme dans la plupart des modèles Cat commerciaux, le calcul des pertes assurantielles repose sur trois modules :

- un module d'aléa, dans lequel l'occurrence, la localisation et l'intensité du phénomène sont modélisées par des approches physiques (hydrologiques, sismologiques, etc.) ;

- un module de vulnérabilité, dans lequel on caractérise les risques (ou biens assurés) potentiellement exposés à l'aléa. Il s'agit de connaître la localisation des risques, leur type (résidentiel, professionnel, agricole), leur nature (maison, immeuble, appartement, etc.), leur usage (propriétaire occupant, propriétaire non-occupant, locataire, etc.) et leur valeur assurée ;

- un module de calcul des dommages, dans lequel on croise l'aléa aux données

de vulnérabilité pour calculer le montant des pertes. Que l'on s'intéresse à un unique événement réel, ou à un événement issu d'un catalogue probabiliste, la méthode de calcul est la même. Classiquement, la méthode repose sur des courbes d'endommagement, choisies en fonction des caractéristiques des bâtiments exposés, qui font le lien entre l'intensité du phénomène physique et un taux d'endommagement. Les modèles CCR ont également la particularité d'utiliser des courbes de probabilité de survenance d'un sinistre et d'une reconnaissance de l'état de catastrophe naturelle.

En 2022, CCR a fait le choix de réécrire sa solution de calcul des dommages afin de disposer d'une plateforme plus performante, qui anticipe l'intégration de périls futurs et la prise en compte de périls conjoints. Ce nouveau code est en cours d'écriture dans le langage Matlab. La plateforme multipéril porte uniquement sur le troisième module, à savoir le calcul de dommages. À l'heure actuelle, elle concerne les périls inondation, sécheresse, séisme et submersion marine. À terme, elle intégrera de nouvelles fonctionnalités à savoir les dommages automobiles, les pertes d'exploitation, les pertes de récoltes agricoles.

MÉTHODOLOGIE

Un noyau de calcul robuste

Afin de proposer une plateforme la plus robuste possible, il est préférable de séparer au maximum les phases de lecture des données (par exemple données de portefeuille et d'aléa), de calcul des dommages proprement dit, et d'écriture des résultats. Le post-traitement des résultats est également séparé. L'idée est donc de disposer, pour chaque péril, d'une fonction de calcul des coûts qui associe un taux d'endommagement et une probabilité de sinistre à chaque risque. Ceux-ci sont définis par leur localisation, leur type, leur nature, leur usage et leurs valeurs assurées. Le travail de constitution d'un portefeuille dans lequel chaque risque est renseigné est réalisé en amont et n'est pas intégré au noyau de calcul. Par exemple, c'est en amont que l'on définit les coordonnées des risques dont on ne connaît pas l'adresse exacte mais seulement la commune. De la même manière, c'est en amont que l'on associe à chaque risque une ou plusieurs valeurs représentant l'aléa. Ainsi, le noyau de calcul s'occupe uniquement du calcul du taux de destruction et de la probabilité de sinistre, indépendamment de la façon dont le portefeuille a été constitué.

Une industrialisation au service de la portabilité et de la mise à l'échelle

La portabilité du modèle s'inscrit dans un projet plus vaste d'industrialisation des activités de modélisation de CCR. La portabilité est essentielle pour faire tourner un modèle aussi bien en interne sur une machine puissante, sur un cluster sur site ou sur un cluster disponible dans le cloud. Cette dernière option offre des capacités de calcul infinies avec des fournisseurs de plateforme qui développent de façon standard une offre de calcul intensif HPC (High-performance computing) de très bonne facture. Cependant, avoir un modèle portable requiert un certain nombre de conditions préalables : 1) Avoir un code qui fonctionne sur des plateformes Linux car Linux est le standard de fait pour le calcul scientifique. 2) Rendre les modèles agnostiques de leur environnement technique par l'utilisation de paramétrage, qui permet par exemple de s'affranchir d'emplacements imposés pour les données. Il ne faut pas non plus être contraint par une technologie de stockage particulière. 3) Packager les données en entrée et sortie du modèle pour que ce dernier n'ait pas d'adhérence forte au système d'information de l'entreprise pendant le déroulement des calculs.

Les besoins en capacité de calcul pour la modélisation peuvent augmenter très ponctuellement et très fortement en réponse à un besoin urgent, comme la survenance d'un événement. Il est de plus en plus difficile pour les organisations de maintenir une capacité de calcul importante de façon permanente sans que cela représente des contraintes et des coûts conséquents. Il est vital pour les organisations de développer les modèles portables qui vont exploiter la capacité disponible dans le cloud de façon standard ou sous forme de débordement ponctuel. Une possibilité supplémentaire pour ré-

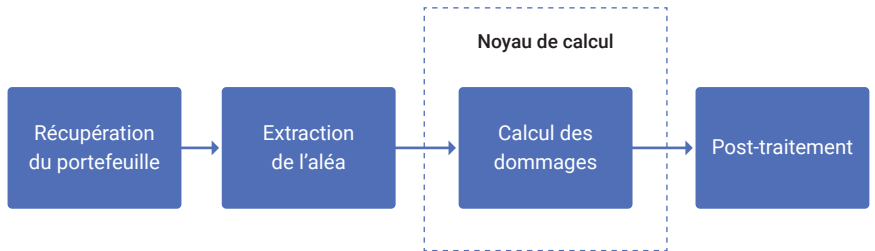


Figure 1 – Principe de fonctionnement de la plateforme de dommages multipérial

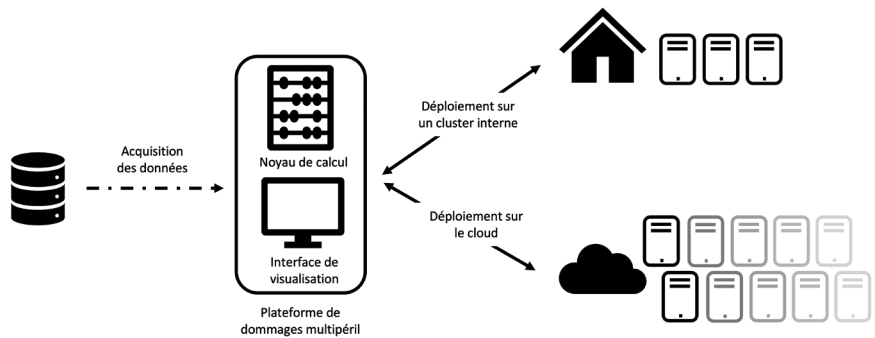


Figure 2 – Possibilités de passage à l'échelle de la plateforme

calcul des dommages

industrialisation

flexibilité

robustesse

portabilité

duire les coûts est d'exploiter la capacité résiduelle d'un fournisseur, c'est-à-dire de faire tourner des calculs en fonction de la disponibilité des machines. Cela est très avantageux financièrement, mais nécessite de pouvoir arrêter et redémarrer un calcul de façon automatique. Avoir un modèle portable va permettre non seulement d'exploiter une capacité de calcul additionnelle importante mais également de réduire les coûts de façon inégale.

Lecture des données

La gestion des chemins par le modèle a fait l'objet d'une attention particulière. Dans la nouvelle version, le format des données est prescrit, mais pas leur emplacement. Il faut respecter un certain format pour le fichier définissant l'aléa, mais cet aléa peut être lu n'importe où. De même, si l'organisation des événements au sein d'un catalogue probabiliste est contrainte, l'emplacement du catalogue ne l'est pas. Néanmoins, pour des données telles que les courbes d'endommagement, il existe des fichiers lus par défaut, mais un utilisateur peut très facilement indiquer au code de lire un autre fichier pour procéder à un test. Ceci permet potentiellement de tester facilement n'importe quel aléa ainsi que de modifier certains réglages du modèle. Enfin, il est possible de lire des données de portefeuille à partir d'une base de données ou à partir de fichiers.

Traitement des résultats et traçabilité

Les résultats sont sauvegardés à l'échelle de la commune et par type de risque, nature, usage. Ceci permet ensuite de réaliser plusieurs post-traitements selon les choix de l'utilisateur : agrégation à l'échelle globale de l'événement, à l'échelle du département, affichage par type de risque, nature, usage à ces échelles, calcul de la distribution complète des coûts. Ces traitements peuvent être effectués immédiatement après le calcul des dommages, ou ultérieurement. Cette séparation du post-traitement des résultats du reste du code et la sauvegarde des résultats à une échelle fine répondent à une exigence de traçabilité des résultats. Pour une meilleure traçabilité, un système de fichiers de paramètres permet de conserver une description des paramètres utilisés pour réaliser une simulation. Pour des études très particulières et notamment dans le cas de cédantes assurant d'importants risques industriels, il reste possible de sauvegarder les résultats à l'échelle de la police.

Anticipation de périls futurs

Actuellement, pour les périls couverts par le régime Cat Nat, l'entité élémentaire est la police assurée et on a un modèle de dommages linéaire utilisant le taux d'endommagement et la fréquence de sinistres. Pour des périls différents, hors régime Cat Nat, on peut imaginer qu'il faudra calculer des dommages pour des entités différentes via des méthodes sans taux d'endommagement. C'est le cas par exemple des parcelles agricoles, dont il faut prendre en compte le caractère surfacique lorsqu'on calcule des pertes de récoltes. Le design de la nouvelle plateforme de dommages anticipe l'ajout futur de périls potentiellement très différents de ceux actuellement traités.



LES PARTENAIRES

FoxPlan est une société de conseil qui accompagne le pilotage des projets d'entreprise. FoxPlan accompagne CCR dans son projet d'industrialisation des activités de modélisation.

CONCLUSION

Le projet actuel de plateforme multipéril de calcul des dommages répond à plusieurs exigences formulées par CCR : pouvoir calculer les dommages assurantiels de plusieurs types de catastrophes, de façon robuste, traçable, en anticipant l'ajout futur d'autres périls.

Aujourd'hui, l'estimation des dommages s'appuie sur des scripts essentiellement lancés en interne et les services de modélisation (pour un assureur par exemple) doivent être réalisés par le personnel de CCR. L'objectif est de développer d'une part, en 2023, une interface ergonomique exclusivement centrée sur la plateforme de dommages multipérils et d'autre part, à partir de 2024, permettre d'accéder à cette plateforme directement via une technologie de type API ou à l'aide de conteneurs. Ainsi, à terme cela permettrait de déployer des services de modélisation à des utilisateurs externes./

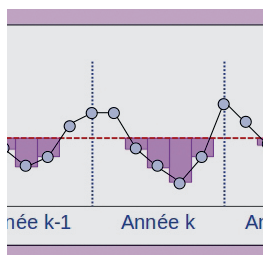
CITATION

Boittin et al., Développement d'une plateforme de dommages multipéril. In Rapport Scientifique CCR 2022 ; CCR, Paris, France, 2022, pp. 14-17

SÉCHERESSE

Maison fissurée suite au phénomène
de sécheresse (retrait-gonflement des argiles)

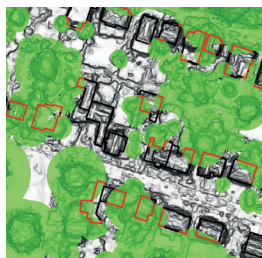




Comprendre le phénomène de retrait-gonflement des argiles par le biais d'un indicateur agrégé à la commune : la magnitude des sécheresses . p.20

Cet article présente la méthodologie générale mise en œuvre dans cette thèse de doctorat en partenariat avec Météo-France, CCR et le BRGM et qui porte sur le développement d'un modèle d'estimation de la sinistralité liée au phénomène de retrait-gonflement des argiles.

Sophie Barthelemy, Bertrand Bonan, Gilles Grandjean, David Moncoulon et Jean-Christophe Calvet



Détection des arbres à partir de données d'imagerie à très haute résolution dans les zones exposées à la sécheresse . p.23

L'emprise racinaire d'un ou plusieurs arbres situés à proximité directe des fondations d'une maison individuelle peut contribuer à l'aggravation des phénomènes de Retrait et Gonflement des Argiles (RGA) sur la structure du bâtiment. Dans l'optique d'une intégration de ces informations au sein du modèle d'aléa sécheresse RGA interne, une étude de détection des arbres à l'échelle infra-parcellaire a été menée sur la commune d'Île-de-France : Montigny-le-Bretonneux. Des données d'imagerie à Très Haute Résolution (THR à 20 cm), ainsi que des méthodes de télédétection et d'Intelligence Artificielle ont été employées pour cartographier précisément la couverture arborée, estimer la hauteur des arbres et identifier les habitations les plus exposées. Les résultats obtenus et les temps de calculs nécessaires à l'échelle communale ont permis d'évaluer l'applicabilité de l'approche à l'ensemble du territoire métropolitain.

Thomas Onfroy, Aurélien Couloumy, Antoine Labonne, Michel Médic et Jean-Baptiste Henry

Comprendre le phénomène de retrait-gonflement des argiles par le biais d'un indicateur agrégé à la commune : la magnitude des sécheresses



Sophie Barthelemy¹, Bertrand Bonan¹, Gilles Grandjean², David Moncoulon³ et Jean-Christophe Calvet¹

(1) CNRM, Université de Toulouse, Météo-France, CNRS, Toulouse, France

(2) Bureau de recherches géologiques et minières (BRGM)

(3) Département R&D Modélisation, CCR

INTRODUCTION

Le phénomène de retrait-gonflement des argiles est le second péril le plus coûteux à charge du régime d'indemnisation des catastrophes naturelles, avec plus de 15 milliards d'euros d'indemnisations depuis 1989^[1]. Comme l'illustre déjà la sécheresse de l'année 2022 en France, une augmentation de ces coûts est attendue sous l'effet du changement climatique, en raison de l'amplification des cycles annuels de sécheresse-réhydratation des sols^[2].

C'est dans ce contexte qu'une thèse de doctorat a été initiée en 2021, cofinancée par Météo-France, le BRGM et CCR. L'objectif est de développer de nouveaux outils d'estimation de la sinistralité liée au phénomène de sécheresse géotechnique en s'appuyant sur les ressources des différents partenaires. Seront exploités au cours des trois ans les modèles de surface développés par Météo-France, les modèles et les données géotechniques du BRGM, ainsi qu'une base de données de sinistralité nationale constituée par CCR.

Dans un premier volet de la thèse, le lien entre sécheresse et sinistralité est appréhendé à l'échelle communale. Un indicateur, la magnitude, est construit à partir de chroniques d'humidité du sol à plusieurs profondeurs produites par le modèle ISBA^[3,4] développé par

Météo-France. L'humidité du sol est simulée à une résolution spatiale de 8 km. L'objectif est d'extraire une information annuelle de sécheresse, qui est directement comparable via un calcul de corrélation de rang^[5] à des données de sinistralité agrégées par année et par commune. Ces données sont fournies par CCR.

La magnitude est obtenue par calcul de l'intégrale annuelle de l'indice d'humidité du sol (SWI)^[6] sous une certaine valeur seuil associée à une fréquence de sécheresse. Le manque de connaissance sur la minéralogie et le contenu en eau des sols à l'échelle de la parcelle restant à ce jour un verrou scientifique, une approche statistique est adoptée. La magnitude est calculée pour différentes valeurs seuil de SWI, correspondant aux centiles de la distribution statistique des SWI journaliers. Pour varier les situations, différentes versions du modèle ISBA sont utilisées, et plusieurs profondeurs de la couche de sol sont considérées. Les résultats du calcul de corrélation de rang révèlent la configuration optimale du calcul de la magnitude.

La méthode a été appliquée séparément à cinq ensembles de quatre communes, situées dans des contextes climatiques et géologiques différents. Les premiers résultats montrent que la meilleure corrélation avec la sinistralité est obtenue

lorsque l'on considère l'humidité de la couche de sol située entre 1,5 m et 2,0 m de profondeur, en utilisant des valeurs basses de seuil de SWI. Les couches de sol plus superficielles présentent une variabilité temporelle plus marquée, davantage liée aux variations météorologiques rapides.

Une fois la configuration optimale établie, une classification^[7] des magnitudes permet de fournir des estimations du taux de sinistralité. À ce stade, la méthode ne permet pas de caractériser plus finement la sinistralité en fonction du type de bâti ou de l'âge des constructions. L'impact de la classe d'exposition au phénomène de retrait-gonflement sera évalué dans une prochaine étape. La magnitude couplée à des scénarios climatiques futurs permettra d'analyser l'effet du changement climatique sur la sinistralité occasionnée par les sécheresses géotechniques. Ces projections utiles à l'assurance seront également utilisées en appui au régime Cat Nat./

- # sécheresse
- # retrait-gonflement des argiles (RGA)
- # modèle de surface ISBA
- # sinistralité

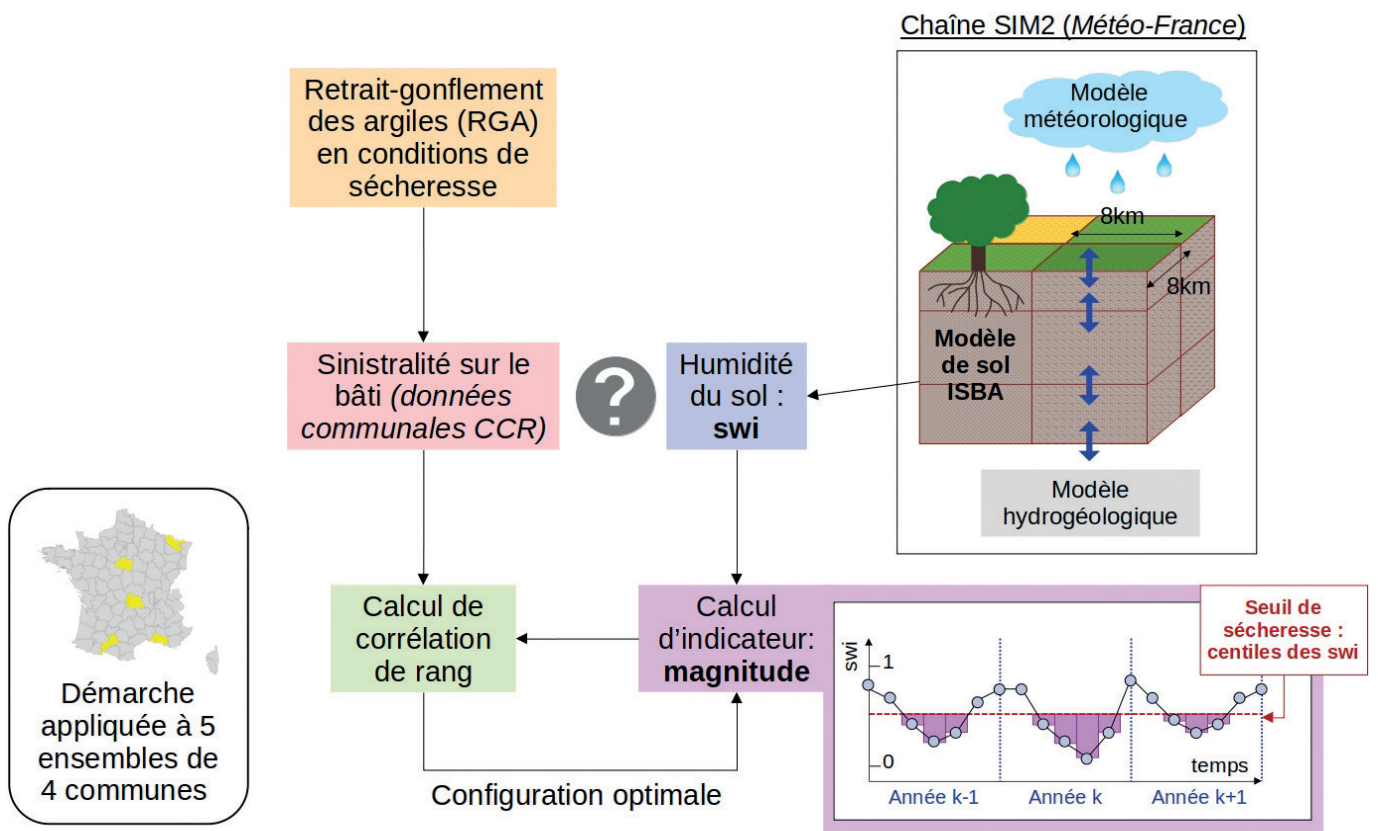


Figure 1 – Méthode de calcul de l'indicateur de sécheresse magnitude à partir du modèle ISBA, et détermination de sa configuration optimale



LES PARTENAIRES

La thèse est co-encadrée par le CNRM, le BRGM et CCR. Le CNRM (Centre national de recherches météorologiques) est une unité mixte de recherche (UMR 3589) constituée par Météo-France et le CNRS. La modélisation des surfaces continentales, ainsi que l'étude des dynamiques du climat font partie de son champ d'expertise. Le BRGM (Bureau de recherches géologiques et minières), service géologique national, est l'établissement public de référence pour gérer les risques du sol dans une perspective de développement durable.

RÉFÉRENCES

1. CCR. Les catastrophes naturelles en France, bilan 1982-2020. (2020).
2. Gourdier, S. & Plat, E. Impact du changement climatique sur la sinistralité due au retrait-gonflement des argiles. in Journées Nationales de Géotechnique et Géologie de l'Ingénieur (JNGG) (2018).
3. Noilhan, J. & Mahfouf, J. F. The ISBA land surface parameterisation scheme. Glob. Planet. Change 13, 145–159 (1996).
4. Boone, A., Masson, V., Meyers, T. & Noilhan, J. The influence of the inclusion of soil freezing on simulations by a soil-vegetation-atmosphere transfer scheme. J. Appl. Meteorol. 39, 1544–1569 (2000).
5. Kendall, M. G. Rank Correlation Methods. (Griffin London, 1970).
6. ECMWF. Soil wetness index calculation - Copernicus Services - ECMWF Confluence Wiki. <https://confluence.ecmwf.int/display/COPSRV/Soil+wetness+index+calculation> (2021).
7. Kapsambelis, D., Moncoulon, D. & Cordier, J. An innovative damage model for crop insurance, combining two hazards into a single climatic index. Climate 7, (2019).

CITATION

Barthelemy et al., Comprendre le phénomène de retrait-gonflement des argiles par le biais d'un indicateur agrégé à la commune : la magnitude des sécheresses. In Rapport Scientifique CCR 2022 ; CCR, Paris, France, 2022, pp. 20-22

Détection des arbres à partir de données d'imagerie à très haute résolution dans les zones exposées à la sécheresse



Thomas Onfroy¹, Aurélien Couloumy², Antoine Labonne², Michel Médic³, Jean-Baptiste Henry⁴

(1) Département R&D Modélisation, CCR

(2) Digital Factory, CCR

(3) Institut Paris Région

(4) Esri France

INTRODUCTION

La présence d'arbres à proximité des maisons individuelles, est l'un des facteurs aggravants de l'aléa sécheresse RGA (Retrait-Gonflement des Argiles) en France métropolitaine^[1]. Dans certains cas, elle peut même être la cause déterminante des dommages. Dans l'objectif d'intégrer ce phénomène en tant que paramètre du modèle d'aléa sécheresse RGA de CCR, une étude de détection des arbres à l'échelle infra-parcellaire a été menée sur le territoire d'une commune d'Île-de-France exposée au péril RGA : Montigny-le-Bretonneux. Dans le cadre de la prévention de ce risque, la distance préconisée par le ministère de la Transition écologique et de la Cohésion des territoires entre un arbre et le périmètre extérieur d'une maison peut varier de 0,5 H à 1,5 H, c'est-à-dire une distance correspondante à 0,5 ou 1,5 fois la hauteur de l'arbre, selon son essence. Les techniques actuelles de télédétection et d'Intelligence Artificielle permettent aujourd'hui une géolocalisation précise de chaque arbre à partir de données d'imagerie à Très Haute Résolution (THR, pour une résolution inférieure au mètre).

Au-delà de la distinction de la couverture arborée des autres types d'occupation du sol par télédétection, les caractéristiques de l'arbre telles que le diamètre de la couronne et la hauteur de la cime à une date donnée sont des informations

clés pour l'étude. Elles peuvent être collectées à partir de l'extraction des valeurs altimétriques contenues dans les données LIDAR (Laser Imaging Detection and Ranging) ou issues de traitements de MNS (Modèles Numériques de Surfaces) et de MNT (Modèle Numérique de Terrain) en THR.

La combinaison de méthodes de télédétection de la couverture arborée sur des images aériennes à 20 cm de résolution (BD ORTHO HR de l'IGN), de tâches de Deep Learning dédiées à la détection de chaque individu (Object Detection) et de traitements SIG des données altimétriques conduit ainsi à une localisation précise des arbres et de leurs dimensions. Afin d'évaluer la faisabilité d'une telle étude et dans l'optique de l'appliquer à l'échelle de la métropole, des travaux ont été initialement menés sur le territoire d'une commune. Les résultats obtenus ont permis de localiser les arbres, de connaître leurs dimensions à proximité de chaque habitation et de proposer un indicateur d'exposition relatif à la présence d'arbres.

En cas de généralisation de la méthode à l'ensemble du territoire national, les données cartographiques produites permettront d'améliorer la compréhension des causes de la sinistralité RGA et prendre en compte la présence des arbres dans la modélisation des dommages consécutifs.

MÉTHODOLOGIE

Pour localiser et mesurer précisément la hauteur, la distance et la densité des arbres à proximité des maisons individuelles, une approche hybride a été adoptée. Celle-ci combine :

- des méthodes de télédétection sur les images de la BD ORTHO HR de l'IGN à 20 cm ;
- la détection automatisée de l'emprise de chaque arbre par Deep Learning à partir de la BD ORTHO HR et d'extraits du LIDAR HD de l'IGN ;
- le traitement de données altimétriques en THR : Modèle Numérique de Surface à 20 cm de l'Institut Paris Région et Modèle Numérique de Terrain RGE ALTI à 1 m de l'IGN ;
- des analyses spatiales SIG sur les bâtiments de la BD TOPO de l'IGN.

La mise en œuvre d'une méthodologie favorisant la complémentarité entre méthodes de télédétection, techniques d'Intelligence Artificielle (Deep Learning Object Detection) et analyses SIG a permis de proposer un indicateur en fonction de la hauteur et de la proximité des arbres aux bâtis : le TreeBatiScore.

En premier lieu, la couverture arborée est cartographiée à 20 cm de résolution avec l'indice NDVI (Natural Difference Vegetation Index) à partir des images BD ORTHO HR RVB (bandes Rouge, Vert, Bleu) et IRC (Couleurs Infrarouge) de l'IGN. L'indice NDVI est considéré comme l'un des plus efficaces pour distinguer la végétation des autres types d'occupation du sol sur tous types de données optiques RVB et IRC^[2]. Le résultat du NDVI est une image à 20 cm de résolution dont les valeurs des mailles vont de -1 à 1. Le seuil considéré pour extraire les zones végétalisées et les arbres est de 0.1. Toutes les valeurs inférieures à 0.1 correspondent à d'autres types d'occupation du sol^[3].

- # arbres
- # sécheresse RGA
- # imagerie THR
- # télédétection
- # apprentissage profond
- # détection d'objet

La hauteur de la végétation et des arbres est ensuite estimée par la soustraction entre un Modèle Numérique de Surface (MNS à 20 cm de l'Institut Paris Région) et un Modèle Numérique de Terrain (MNT RGE ALTI 1m de l'IGN). Cela permet d'obtenir le Canopy Height Model (CHM) à 20 cm. Le CHM résultant permet de connaître les valeurs altimétriques de tous les éléments du sursol y compris celles de la végétation. La plupart des haies et buissons ne dépassent pas 3 m de hauteur sur la commune de l'étude. Ainsi, le seuil choisi pour définir un arbre est ici de 3 m. Cela permet de masquer toutes les valeurs du CHM inférieures à 3 m et d'obtenir une cartographie des arbres (caractérisés en amont par l'indice NDVI) et de leur hauteur (figure 1).

Parallèlement aux traitements réalisés par télédétection et SIG, un modèle de Deep Learning "Deep Forest"^[4] de type Détection d'Objet a été utilisé pour identifier chaque arbre à partir de la BD ORTHO HR RVB à 20 cm. Ce modèle a dû être réentraîné compte tenu de la spécificité de la tâche (images du National Ecological Observatory Network 10 cm contre images BD ORTHO 20 cm).

Afin de réentraîner le modèle, un travail d'annotation a été nécessaire. Des « bounding boxes » de pré-annotation ont été déterminées à partir de la base LIDAR HD de l'IGN. Plus exactement, les points LIDAR correspondant à la végétation haute ont d'abord été sélectionnés puis analysés à l'aide de la librairie PyCrown^[5]. Un travail de post-processing a permis de reproduire ces « bounding boxes » pour chaque arbre détecté.

Ces pré-annotations ont grandement facilité le travail d'annotation manuel final. Cela a permis de réentraîner DeepForest sur 2 zones LIDAR : Louhans (Saône-et-Loire) et Manosque (Alpes-de-Haute-Provence). Après prise en compte de seuils

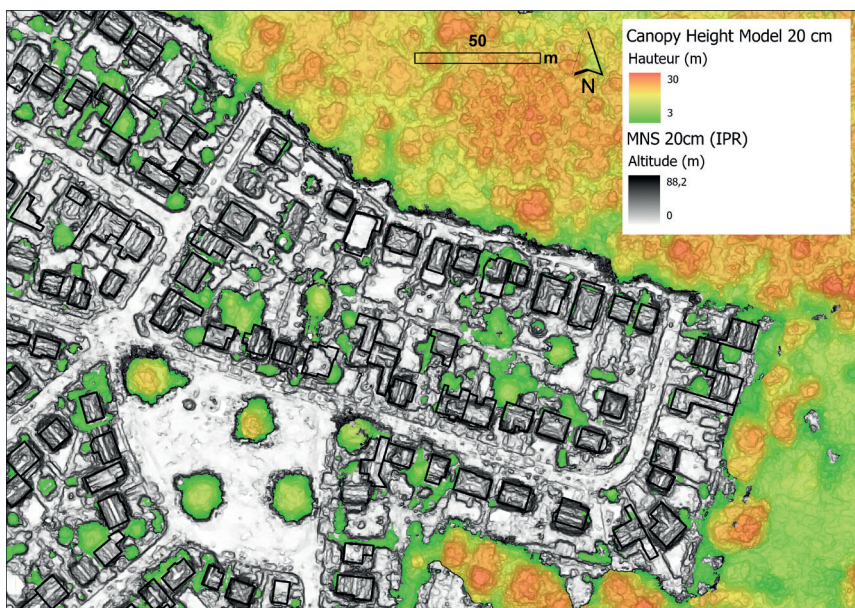


Figure 1 – Canopy Height Model et Modèle Numérique de Surface à 20 cm

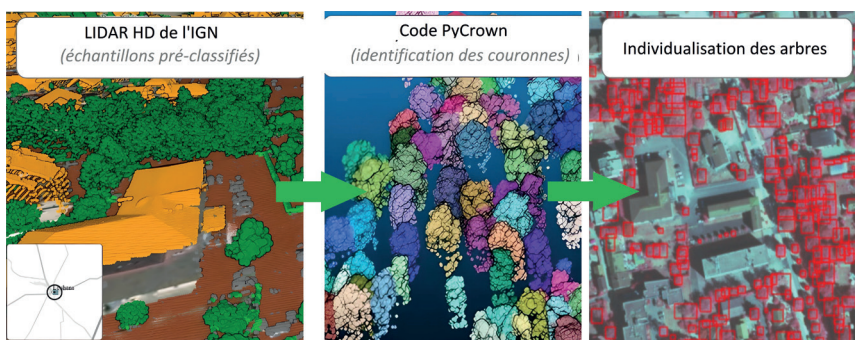


Figure 2 – Exemple de traitement PyCrown des données LiDAR et post-traitement

de détection (fonction softmax), une augmentation significative des performances du modèle au regard du modèle pré-entraîné a été observée sur la base de test de Montigny-le-Bretonneux.

En sortie de ce modèle, des emprises rectangulaires sont obtenues pour chaque arbre. Comme on peut l'observer sur certaines parties de la Figure 3, certains arbres ne sont pas détectés par l'indice NDVI mais le sont par les emprises obtenues par Deep Learning et réciproquement.

Ainsi, les différentes approches de traitement d'image (indice NDVI, CHM et tâches Deep Learning) se complètent pour une minimisation des données manquantes. Cette complétion réciproque est non négligeable et rend les deux approches complémentaires.

À partir du CHM à 20 cm et d'une fonction de l'outil "R-ArcGIS ForestTools" [6], les cimes des arbres sont localisées par un algorithme de fenêtre glissante. Lorsqu'une cellule du CHM donnée se trouve être la plus haute dans la fenêtre, elle est étiquetée comme le point le plus haut de la canopée. Ce point est appelé le Tree Top Maxima. Les valeurs maximales de chaque arbre sont ensuite utilisées en tant que zones tampons dont le rayon représente la distance de sécurité entre l'arbre et le périmètre extérieur de l'habitation. On peut noter que pour chaque arbre détecté par l'approche Deep Learning et non-détecté par le NDVI le Tree Top Maxima est également récupéré dans chaque emprise par une fonction de statistique zonale.

La distance préconisée entre un arbre et une habitation peut varier de $0.5 H$ à $1.5 H$ en fonction de l'espèce d'arbre. La classification des espèces d'arbres à partir d'imagerie en THR nécessite une étude de télédétection approfondie qui n'a pas été priorisée dans la présente



Figure 3 – Emprises des arbres produites par Deep Learning et avec le CHM (Canopy Height Model)

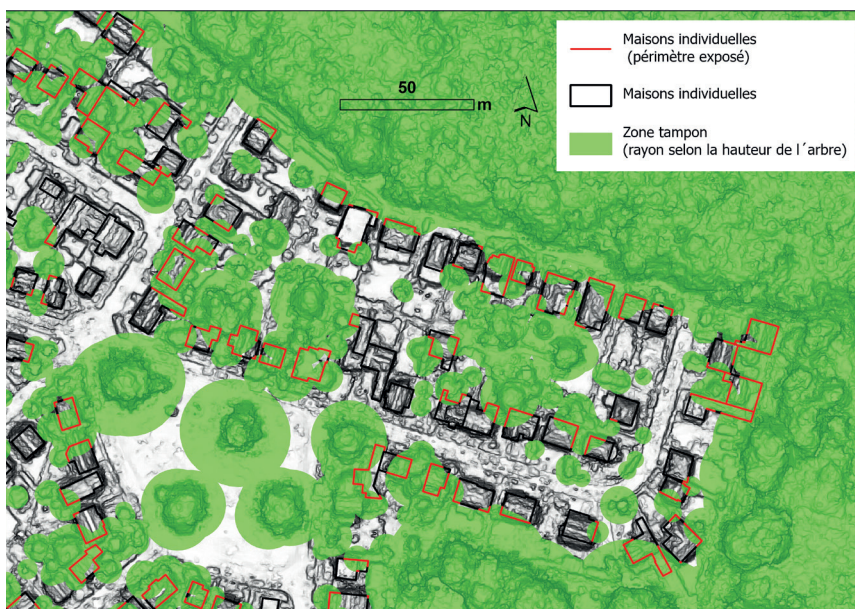


Figure 4 – Périmètre exposé par habitation (linéaire de mur en rouge)

- # arbres
- # sécheresse RGA
- # imagerie THR
- # télédétection
- # apprentissage profond
- # détection d'objet

étude. Ainsi, la distance arbre-maison est ici fixée à 1 H. Le linéaire de mur exposé peut-être calculé sous SIG avec la couche de la BD TOPO de l'IGN. Il s'agit du linéaire de mur en rouge sur la Figure 4. La généralisation de cette méthodologie à l'ensemble du territoire national soulève des enjeux pratiques et techniques majeurs. En premier lieu, la question de la disponibilité de données d'imagerie comparables en résolutions spatiale et spectrale, d'un millésime suffisamment récent sera au cœur de la reproductibilité de l'approche. La présente étude a été menée à l'échelle d'une commune comportant un certain échantillon de végétation. Aussi, la généralisation à un territoire plus vaste imposera un entraînement complémentaire et extensif des modèles de Deep Learning. Se posera ensuite la problématique de la gestion technique du volume de données engendré par ces diverses couvertures à très haute résolution, tant sur leur mode de stockage, de diffusion que de traitement. Enfin, cette méthodologie ne donnera tout son potentiel qu'avec une capacité à suivre l'évolution de la couverture végétale et l'imperméabilisation des sols dans le temps, à partir de données régulièrement mises à jour, accentuant d'autant plus le besoin d'une automatisation complète des procédés d'extraction.

RÉSULTATS

Ces travaux ont permis de localiser chaque arbre sur des données d'imagerie en THR et de mesurer leur hauteur et leur distance par rapport aux habitations. Le pourcentage de linéaire de mur extérieur exposé par un ou plusieurs arbres trop proches en fonction de leur taille, et selon une distance de sécurité arbre-

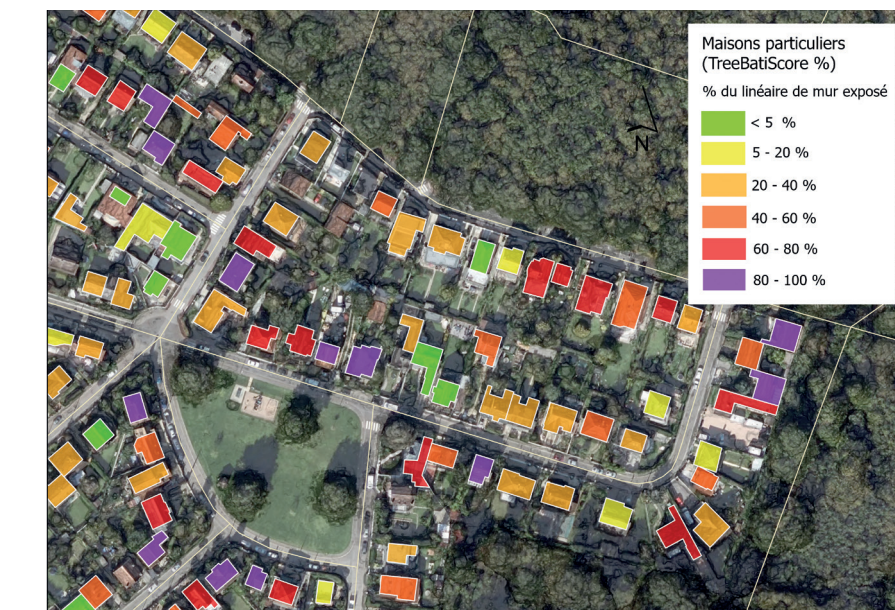


Figure 5 – Résultats du TreeBatiScore sur les maisons de particuliers (Pourcentage du linéaire de mur exposé)

maison de 1 H, a été calculé pour chaque habitation.

Le TreeBatiScore visible sur la Figure 5 correspond au pourcentage du linéaire de mur extérieur exposé par habitation. La présence d'arbres à proximité directe des fondations d'une maison individuelle contribue à l'aggravation de l'aléa sécheresse RGA, cependant, d'autres facteurs physiques et structurels participent aux dommages RGA sur les maisons individuelles^[7].

L'environnement de chaque parcelle doit également être considéré : pentes, présence de drains, de réseaux de recueil des eaux de pluie, de puisards ou tranchées techniques d'alimentation d'eau, profondeur et emprise des réseaux d'électricité ou de gaz. Ces éléments ne

sont pas tous disponibles et leur numérisation à l'échelle du territoire métropolitain reste incomplète. Les données relatives aux matériaux de construction et à la structure de chaque bâtiment peuvent être utilisées et mises en relation avec les informations propres à l'aléa sécheresse RGA. Sur ce dernier point, la Base de Données Nationale des Bâtiments (BDNB) sera explorée.

Lorsque l'ensemble de ces données (environnement de la parcelle et matériaux de construction) seront disponibles sous forme de base de données géographiques, celles-ci pourront être prises en compte en tant que facteurs aggravants du péril RGA et intégrées dans un indicateur multicritère.



LES PARTENAIRES

L'Institut Paris Région a pour mission essentielle de réaliser des études et travaux nécessaires à la prise de décision de la Région Île-de-France et de ses partenaires. De l'échelon local à l'échelon des grandes métropoles, il intervient dans de nombreux domaines tels que l'urbanisme, les transports et la mobilité, l'environnement, l'économie et les questions de société. Il apporte son soutien aux politiques d'aménagement et de développement des communes, des intercommunalités et des départements. Il réalise également pour les organismes qui lui en font la demande des études, tant en Île-de-France qu'à l'étranger.

CONCLUSION

La combinaison de méthodes de télédétection à partir de données d'imagerie à Très Haute Résolution (THR) et d'un modèle de Deep Learning a permis de localiser précisément les arbres à proximité des maisons. Pour délimiter les couronnes des arbres et une estimation de la hauteur de chaque individu, un Modèle Numérique de Surface, un Modèle Numérique de Terrain ou des données LIDAR à THR sont des données essentielles.

Les résultats du TreeBatiScore, basés sur la présence des arbres, pourront être croisés avec les données géolocalisées liées au péril RGA. La proximité des arbres aux bâtis n'étant pas le seul facteur aggravant, les données relatives à l'environnement des habitations et aux matériaux de construction doivent être utilisées afin d'établir un diagnostic complet de la vulnérabilité des maisons.

Afin de généraliser les méthodes employées sur l'ensemble du territoire, la problématique de la gestion et du stockage des données devra être considérée. La capacité à suivre l'évolution de la couverture végétale et la hauteur de chaque arbre dans le temps imposera une automatisation complète des procédés d'extraction.

Les données du LIDAR HD de l'IGN, disponibles à partir de fin 2025 sur toute la métropole, permettront de décrire très précisément l'altitude du terrain et les éléments du sursol y compris le couvert végétal.

In fine, lorsque les données sur les arbres seront produites à l'ensemble du territoire national, celles-ci pourront être utilisées en entrée du modèle RGA interne afin d'améliorer la prédiction des sinistres./

Esri France distribue et développe les usages d'ArcGIS, la plateforme cartographique et d'analyse spatiale d'Esri Inc. La société propose des solutions bureautiques et en ligne complètes en valorisant l'approche géographique.

Fondée en 1969 sous le nom d'Environmental Systems Research Institute en tant que société de conseil en aménagement du territoire, l'entreprise possède 10 bureaux régionaux aux États-Unis et plus de 80 distributeurs à l'international, avec environ un million d'utilisateurs dans 200 pays et 3 800 employés dans le monde.

RÉFÉRENCES

1. Li, J., & Guo, L. (2017). Field investigation and numerical analysis of residential building damaged by expansive soil movement caused by tree root drying. *Journal of Performance of Constructed Facilities*
2. Tucker, C.J. (1979) 'Red and Photographic Infrared Linear Combinations for Monitoring Vegetation', *Remote Sensing of Environment*
3. Kang, et al. (2021) Land Cover and Crop Classification Based on Red Edge Indices Features, *MDPI Remote Sensing*
4. Weinstein, et al. (2019) Individual Tree-Crown Detection in RGB Imagery Using Semi-Supervised Deep Learning Neural Networks. *Remote Sensing*
5. Zörner, , et al. (2018) PyCrown - Fast raster-based individual tree segmentation for LIDAR data. *Landcare Research NZ Ltd*
6. Plowright. (2021) Canopy analysis in R using Forest Tools, *CRAN-R Project*
7. IFSTTAR 2017. Retrait et gonflement des argiles Analyse et traitement des désordres créés par la sécheresse, *Guide Technique IFSTTAR*

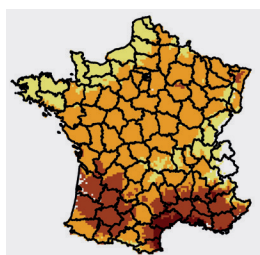
CITATION

Onfroy et al., Détection des arbres à partir de données d'imagerie à Très Haute Résolution dans les zones exposées au péril Retrait Gonflement des Argiles In *Rapport Scientifique CCR 2022* ; CCR, Paris, France, 2022, pp. 23-27

CHANGEMENT CLIMATIQUE



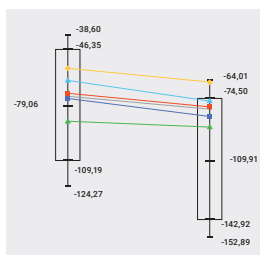
Un champ de tournesols dévasté par la sécheresse 2022 dans la région Rhône-Alpes.



Estimation des dommages sur les pertes de récoltes de la ferme France . p.30

Cet article présente le modèle d'impact développé chez CCR pour chiffrer les dommages consécutifs aux événements extrêmes de sécheresse et d'excès d'eau sur le blé tendre d'hiver, l'orge d'hiver et les prairies. Le modèle intègre la représentation de l'aléa climatique, la simulation des pertes de récoltes à l'échelle départementale et le chiffrage des conséquences économiques à l'échelle individuelle. Les résultats présentés mettent en évidence des profils de risques différents selon les filières.

Dorothee Kapsambelis, David Moncoulon et Jean Cordier



Simulations à climat constant et simulations continues pour la modélisation des événements extrêmes . p.34

Cet article présente la comparaison des simulations à climat constant du modèle ARPEGE-Climat de Météo-France et les trajectoires climatiques simulées par les modèles EURO-CORDEX pour la modélisation des événements extrêmes de sécheresse sur la France métropolitaine à horizon futur selon le scénario 8.5 du GIEC. Les résultats montrent que pour des études spécifiques sur les événements extrêmes, du fait de leur faible nombre de représentations, il est nécessaire de posséder un large panel d'événements climatiques sur une même année cible pour pouvoir les caractériser.

Dorothee Kapsambelis, Martine Veysseire et David Moncoulon

Estimation des dommages sur les pertes de récoltes de la ferme France



Dorothee Kapsambelis¹, David Moncoulon¹, Jean Cordier²
(1) Département R&D Modélisation, CCR
(2) Institut Agro Rennes-Angers, Économie et Gestion, UMR SMART

INTRODUCTION

Les risques climatiques engendrent des pertes en quantité et en qualité sur les productions végétales des exploitations agricoles et fragilisent leur économie^[1]. Sur la période 1980-2004, le montant annuel moyen des dommages à la suite d'événements climatiques s'élève à 1,2 Md€ sur la France métropolitaine^[2]. Ce montant est de 1,95 Md€ sur la période 2015-2020. Le changement climatique serait une des principales causes de cette augmentation significative de la sinistralité moyenne annuelle^[3]. Le montant de la sinistralité est d'autant plus important lors d'un événement extrême, comme la sécheresse de 2003, dont le chiffrage des dommages s'élève à 4 Md€ pour la France métropolitaine^[4]. Ce type d'événement est celui dont la gestion est la plus complexe pour l'ensemble des acteurs du risque, car du fait de son caractère systémique, il ne permet pas une mutualisation des sinistres à l'échelle du territoire.

En France, afin de mieux soutenir le revenu des exploitations agricoles en cas d'événement climatique extrême, une réforme de la gestion des risques est en cours d'élaboration. Dans ce contexte, la loi du 2 mars 2022 prévoit un système à trois étages où chaque acteur – Agriculteur-Assureur-État – prend en charge une partie de la sinistralité. Pour quantifier l'allocation nécessaire de l'État et les fonds propres requis par les assureurs, le chiffrage du coût des événements climatiques extrêmes intégrant

l'impact du changement climatique est nécessaire.

Cet article présente la chaîne de modélisation développée par CCR : celle-ci intègre le développement d'un nouvel indice agro-climatique représentant les aléas de sécheresse et d'excès d'eau à fine échelle sur le territoire, un modèle de dommages permettant la simulation des pertes de récoltes à l'échelle départementale et une descente d'échelle permettant d'évaluer les dommages économiques à l'échelle de l'exploitation agricole. Ce modèle d'impact est également utilisé pour réaliser des projections à horizon 2050 pour prendre en compte l'effet du changement climatique.

Ce travail a fait l'objet d'une thèse en partenariat avec l'Institut Agro-Rennes et Météo-France, sous la direction de Jean Cordier et de David Moncoulon soutenue le 12 juillet 2022.

MÉTHODOLOGIE

Données utilisées

Les données sur les productions végétales sont issues de deux sources :

- l'AGRESTE qui référence par département et par culture les surfaces et les rendements depuis 1989 jusqu'en 2020 ;
- le RICA public (Réseau d'Information Comptable Agricole) qui présente les productions développées sur un échantillon représentatif d'exploitations agricoles qui ont une production brute standard

d'au moins 25 000 euros en France métropolitaine. Cet échantillon est constitué d'environ 7 000 exploitations agricoles chaque année sur l'historique 2000-2019 dont la localisation géographique est à l'échelle des régions administratives.

Les données climatiques de précipitations et d'évapotranspiration potentielle sont issues de la base de données SAFRAN sur l'historique 1989-2018 sur une grille de 8 x 8 km sur la France métropolitaine. Les projections climatiques en 2050 sont réalisées à partir des simulations ARPEGE-Climat à climat constant fournies par Météo-France selon le scénario d'émissions RCP 8.5 du GIEC.

L'étude réalisée se concentre sur les céréales à paille (blé tendre d'hiver et orge d'hiver) et sur les prairies.

Modélisation de l'impact du changement climatique sur les pertes de récoltes à l'échelle départementale

Le lien entre le climat et les pertes de récoltes est réalisé par la création d'un nouvel indice climatique basé sur l'anomalie décadaire cumulée du bilan hydrique, et qui représente les événements extrêmes de sécheresse et d'excès d'eau. Cet indice est corrélé aux pertes de récoltes et est calculé sur une maille de 8 km par 8 km sur la France métropolitaine. Cette grille est croisée avec le référentiel parcellaire graphique pour prendre en compte l'occupation du sol. Le modèle développé permet d'associer à chaque valeur d'indice (en mm) une valeur de pertes de récoltes départementale par culture (%) en ajustant sur l'historique deux courbes de dommages permettant de prédire la survenance des sinistres et le montant des pertes en cas de sinistre.

Le modèle ARPEGE-Climat de Météo-France est ensuite utilisé pour

modéliser l'impact du changement climatique. Ce modèle simule 400 répétitions de l'année cible 2000 et 400 répétitions de l'année 2050 selon le scénario RCP 8.5 du GIEC. Cette méthode permet d'envisager un large spectre de scénarios possibles dont les événements extrêmes, qui sont rares par définition. Les variables climatiques de précipitations et d'évapotranspiration sont en sorties du modèle ARPEGE-Climat, à partir desquelles l'indice est recalculé et les pertes de récoltes départementales et nationales simulées.

Descente d'échelle

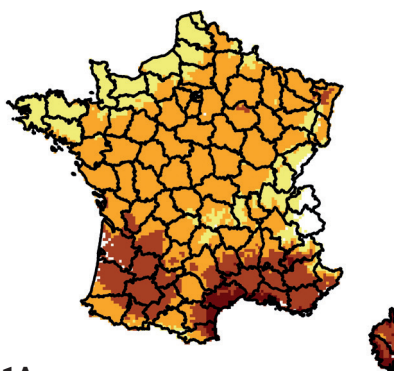
Afin de simuler les pertes de récoltes à l'échelle de l'exploitation agricole, une méthodologie de descente d'échelle entre les bases de données AGRESTE et RICA public est établie en étudiant la distribution des pertes de récoltes individuelles et la moyenne nationale de pertes de récoltes. Cette étude permet de construire une relation polynomiale d'ordre 2 entre l'écart-type des pertes de récoltes individuelles et la moyenne nationale de pertes de récoltes.

Une fois cette relation établie, les pertes de récoltes à l'échelle agricole sont simulées en utilisant une loi deWeibull centrée autour des paramètres de moyenne et d'écart-type. Cette méthodologie permet d'analyser la distribution des pertes de récoltes individuelles sur le climat 2000 et le climat 2050 par culture et d'en déduire un profil de risque par filière agricole.

RÉSULTATS

L'aléa – Exemple de la sécheresse

La Figure 1A présente l'évolution moyenne annuelle de l'indice agroclimatique (DOWKlsech) entre le climat 2000 et le climat 2050 : sur le climat futur,



1A

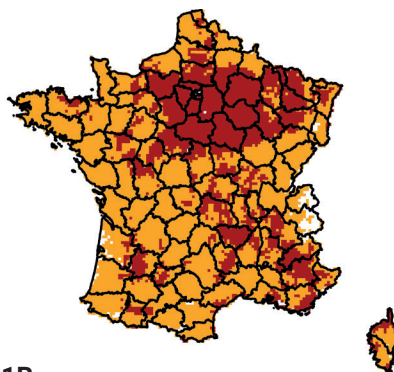
Évolution des valeurs moyennes du DOWKlsech (%) entre le climat 2000 et le climat 2050 (RCP 8.5)



Figure 1 – Illustration de l'aléa de sécheresse avec l'indice agroclimatique.

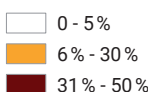
Figure 1A – Évolution des valeurs moyennes de l'indice agroclimatique entre le climat 2000 et le climat 2050 (RCP 8.5).

Figure 1B – Évolution des valeurs décennales de l'indice agroclimatique entre le climat 2000 et le climat 2050 (RCP 8.5)



1B

Évolution des valeurs décennales du DOWKlsech (%) entre le climat 2000 et le climat 2050 (RCP 8.5)



il est observé un assèchement généralisé sur la France métropolitaine. Le déficit hydrique est encore plus marqué sur le pourtour méditerranéen et le Bassin aquitain. La figure 1B présente l'évolution des valeurs décennales de l'anomalie de bilan hydrique. Les résultats montrent que la sécheresse décennale augmente en intensité à horizon 2050. L'anomalie cumulée de bilan hydrique tend à s'homogénéiser sur le territoire métropolitain avec une évolution plus marquée dans la moitié nord de la France (le Bassin parisien), très productrice en céréales.

Domages économiques à l'échelle nationale

La Figure 2 présente les pertes économiques des exploitations agricoles pour les trois cultures étudiées sur le climat 2000 et sur le climat 2050 à la suite d'événements de sécheresse et d'excès d'eau. Les pertes économiques annuelles moyennes sont de 1,2 Md€ en 2000 et de 1,5 Md€ en 2050, soit une évolution de 22 %. Sur ces montants des dommages, les prairies représentent environ 70 % de la sinistralité.

- # événements extrêmes
- # pertes de récoltes
- # changement climatique
- # modélisation
- # dommages économiques

> Les pertes décennales augmentent de 34 % entre le climat 2000 et le climat 2050 passant de 2 Md€ à 2,6 Md€. Ces résultats montrent que quel que soit le système de gestion des risques mis en place, il doit avoir la capacité de constituer rapidement des réserves pour indemniser les producteurs et faire face aux événements extrêmes dont la fréquence augmente à horizon 2050.

Estimation des pertes individuelles par secteur de production

La Figure 3 présente la distribution des pertes de récoltes des agriculteurs sur le climat 2000 et sur le climat 2050 pour le blé tendre d'hiver sur un événement moyen, décennal, vingtennal et cinquantennal par classe de pertes de récoltes individuelles. Les seuils choisis pour illustrer cette distribution de pertes de récoltes sont de 25 % (franchise actuelle de l'assurance récolte) et 50 % (seuil de pertes de récoltes extrêmes).

Sur un événement moyen (5 % de pertes de récoltes à l'échelle de la France métropolitaine), 90 % des agriculteurs enregistrent des pertes inférieures à 25 % dont 50 % à taux de perte nul à climat actuel et futur. Cela signifie que ces événements sont locaux et non systémiques. Sur les événements extrêmes, le nombre d'exploitations agricoles enregistrant des pertes augmente avec l'effet du changement climatique. Pour un événement cinquantennal, seulement 11 % des exploitations agricoles n'enregistrent pas de pertes. Cependant, les pertes extrêmes (>50 %) sont peu nombreuses (elles concernent moins de 3 % des exploitations agricoles). Le montant national des dommages est donc la somme de pertes de récoltes modérées à l'échelle de l'exploitation agricole et ces risques climatiques extrêmes s'intensifient en termes d'étendue spatiale à climat futur.

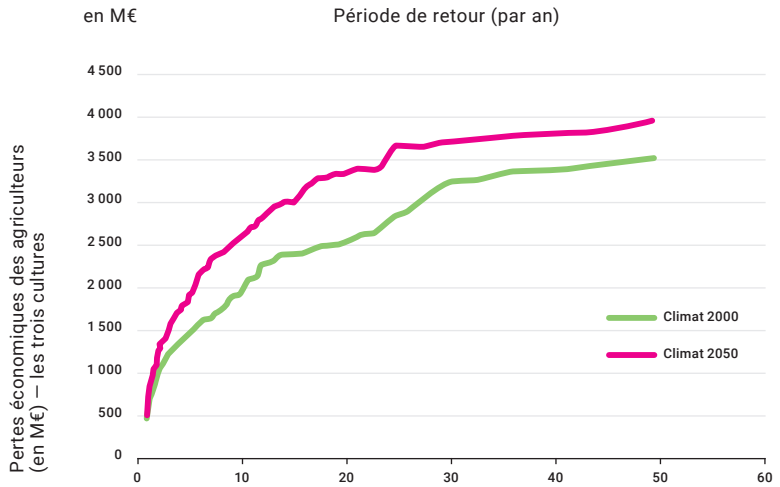


Figure 2 – Pertes économiques des agriculteurs (M€) sur les cultures de blé tendre d'hiver, orge d'hiver et prairies sur le climat 2000 et le climat 2050 en fonction de leur période de retour.

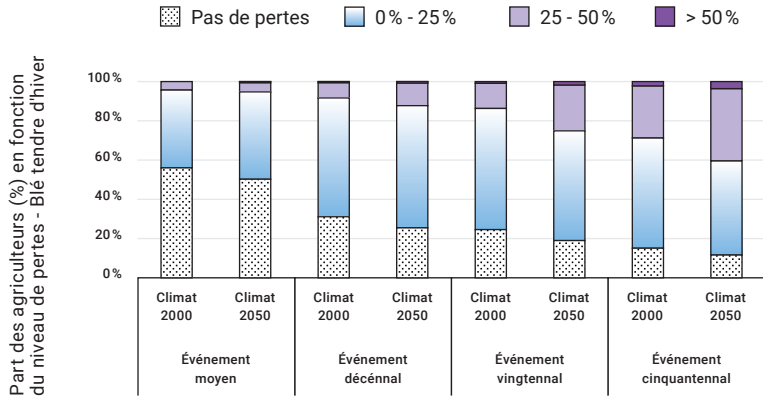


Figure 3 – Part des agriculteurs (%) en fonction de leur niveau de pertes de récoltes sur le climat 2000 et le climat 2050 pour un événement moyen, événement décennal, vingtennal, cinquantennal sur le blé tendre d'hiver.

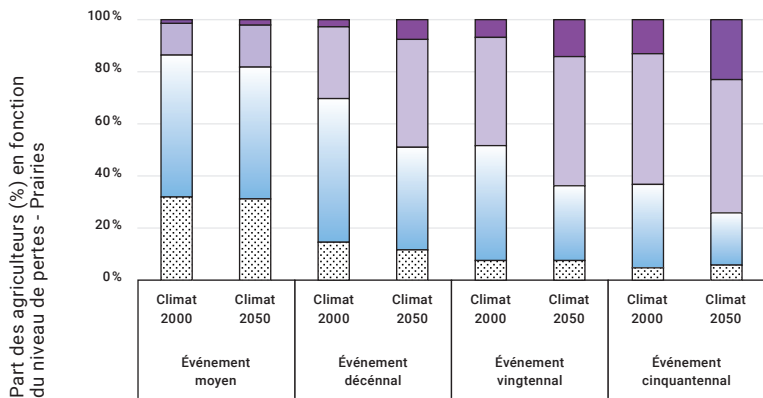
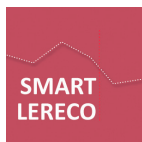


Figure 4 – Part des agriculteurs (%) en fonction de leur niveau de pertes de récoltes sur le climat 2000 et le climat 2050 pour un événement moyen, événement décennal, vingtennal, cinquantennal sur les prairies.



LES PARTENAIRES

L'unité Mixte de Recherche "SMART-LERECO" a été officiellement créée le 1er janvier 2017, dans la continuité d'un projet scientifique qui a rassemblé des économistes de l'UMR SMART de Rennes et de l'UR LERECO de Nantes. Cette UMR regroupe recherche et enseignement en économie appliquée à l'agriculture, à l'agroalimentaire et à l'environnement.

La recherche s'articule autour de 2 grands axes : Organisations, structures et performances (OSP) et Production et marchés agricoles

Pour les céréales, le risque extrême climatique impacte un nombre important d'agriculteurs car plus de 70 % d'entre eux enregistrent des pertes. Cependant, ces pertes sont modérées. En effet très peu d'agriculteurs enregistrent des pertes supérieures à 50 %. À l'échelle de la France métropolitaine, ce type de risque est qualifié d'horizontal et systémique : c'est le cumul de pertes modérées sur un nombre important d'agriculteurs qui entraîne un montant des dommages économiques important.

Ces résultats illustrent la difficulté de mutualisation du risque à l'échelle du territoire français métropolitain. Ils mettent également en évidence le fait que la gestion des risques extrêmes ne doit pas se focaliser sur des niveaux de perte individuels très élevés mais sur un cumul de pertes.

La même analyse est réalisée sur les prairies et présentée en Figure 4. Sur un événement moyen, 30 % des agriculteurs n'enregistrent pas de pertes. Ce chiffre est bien inférieur à celui obtenu sur les céréales, mais néanmoins, le risque moyen reste mutualisable car il n'est pas systémique. En revanche, sur les événements cinquantennaux, le nombre d'agriculteurs enregistrant des pertes extrêmes (>50 %) évolue par rapport au climat 2000 et représente plus de 20 % des exploitations agricoles. Par ailleurs, les exploitations agricoles sans pertes de récoltes sont marginales. Ces sécheresses sont systémiques et leur intensité est extrême.

Ainsi pour les prairies, les sécheresses extrêmes présentent, à climat actuel, un profil comparable à celui des céréales à paille. En revanche, sur le climat futur, le profil de risque change. À l'échelle de la France métropolitaine, le montant des dommages résulte à la fois d'une forte étendue du risque (tous les agriculteurs sont impactés) avec des pertes de récoltes

individuelles élevées. Ce profil de risque est qualifié de horizontal et vertical.

CONCLUSION

Cette étude permet de modéliser l'impact du changement climatique en termes de dommages économiques sur les productions agricoles jusqu'à l'échelle individuelle. Cette méthodologie innovante, ayant pour cible les événements extrêmes, permet d'anticiper les risques et de les chiffrer, ce qui est nécessaire pour évaluer un système de gestion des risques adapté et pérenne dans le futur. Les résultats montrent une augmentation de l'exposition aux risques de sécheresses extrêmes des céréales à paille et des prairies. Sur ce périmètre, le seuil de 2,6 Md€ de dommages serait dépassé en moyenne tous les 10 ans si toute la ferme France était assurée. L'analyse de

RÉFÉRENCES

1. Cordier, J., Erhel A., Pindard, A., et Frédéric Courleux. 2008. « La gestion des risques en agriculture de la théorie à la mise en oeuvre: éléments de réflexion pour l'action publique », 40.
2. OCDE 2012. Gestion des risques en agriculture : Évaluation et conception des politiques. OECD. <https://doi.org/10.1787/9789264174795-fr>.
3. Boyer, Philippe. 2008. « Assurer les calamités agricoles ? » Notes et Etudes Economiques, no 30 (mars). <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03043063>.
4. IPCC. 2022. « Climate Change 2022 : impacts, adaptation and vulnerability ».
5. Létard, V., Flandre, H. et Lepeltier, S. 2004. « La France et les Français face à la canicule : les leçons d'une crise ». Rapport d'information au Sénat 195. <https://www.senat.fr/rap/r03-195/r03-19510.html>

CITATION

Kapsambelis, D., et al., Estimation des dommages sur les pertes de récolte de la ferme France dans un contexte de changement climatique. In Rapport Scientifique CCR 2022 ; CCR, Paris, France, 2022, pp. 30-33

Simulations à climat constant et simulations continues pour la modélisation des événements extrêmes



Dorothee Kapsambelis¹, Martine Veysseire², David Moncoulon¹

(1) Département R&D Modélisation, CCR

(2) Direction des Services Météorologiques, Météo-France

INTRODUCTION

Ces dernières années sont marquées par des événements climatiques de grande ampleur (crue de la Seine et excès d'eau de 2016, Ouragan Irma de 2017, sécheresse de 2018 et 2022) et la France enregistre des dommages économiques assurés et des pertes agricoles importantes. Ces événements qui se succèdent rappellent l'exposition du territoire français et la vulnérabilité de notre société aux risques naturels. Afin d'adapter les politiques publiques de gestion des risques, il est nécessaire de chiffrer les événements climatiques extrêmes sur le long terme. Dans ce contexte, pour connaître l'exposition aux risques de nos territoires dans le futur, en intégrant l'impact du changement climatique, les experts du climat ont développé de nombreux modèles climatiques globaux et régionaux. Ces modèles sont construits sur les lois de la thermodynamique et les concepts de la mécanique des fluides. Ils sont complétés par des paramétrisations complexes qui permettent de représenter certains phénomènes du climat. Pour une modélisation spécifique sur le territoire français métropolitain, la base de données DRIAS référence les paramètres climatiques simulant le changement climatique des modèles EURO-CORDEX. La base DRIAS a l'avantage de posséder les données débiaisées sur la grille de ré-analyse SAFRAN.

La question se pose alors du choix du modèle à utiliser voire de la création d'une combinaison de modèles pour avoir plus de robustesse dans les résultats. Chez CCR, le choix a été fait d'utiliser le modèle ARPEGE-Climat et de réaliser une modélisation à climat constant. L'intérêt de cette méthodologie est de simuler pour une même année cible, un panel d'événements climatiques possibles, qui ne se sont pas nécessairement produits. Pour les deux années cibles 2000 et 2050, 400 simulations sont réalisées et doivent être interprétées comme des réalisations possibles de l'année dont la probabilité d'occurrence est calculée. Cette méthodologie innovante permet de faire une analyse spécifique sur les événements extrêmes, qui sont rares par définition. Cependant, le choix de l'utilisation d'un seul modèle climatique peut être discuté. C'est pourquoi, cet article propose de confronter les résultats obtenus avec les simulations à climat constant d'ARPEGE-Climat et ceux obtenus avec les simulations continues de trajectoires climatiques de 5 modèles d'EURO-CORDEX. Les résultats sont présentés sur la sécheresse et l'indicateur climatique utilisé pour la représenter est l'indice agro-climatique développé par CCR, qui représente une anomalie décennale cumulée du bilan hydrique basé sur la différence entre les précipitations et l'évapotranspiration potentielle^[1]. Pour représenter le climat futur, le scénario RCP 8.5 du GIEC est étudié.

MÉTHODOLOGIE

Données multi-modèles utilisées et calcul de l'indice

Les données utilisées sont issues de la base de données du DRIAS : modélisation régionale EURO-CORDEX et descente d'échelle pour la France à partir des données SAFRAN à 8 km. Cinq modèles ont été utilisés, en plus du modèle CNRM-CM5. Il s'agit des modèles suivants :

- IPSL-CM5A développé par l'Institut Pierre Simon Laplace (ISPL), couple le modèle d'atmosphère LDMZ, le modèle d'océan OPA, le modèle de glace LIM et le modèle de surface ORCHIDEE^[2].

- CNRM-CM5, développé par le Centre national de recherches météorologiques (CNRM). Il est constitué de plusieurs modèles. Ainsi, il intègre le modèle ARPEGE-Climat pour l'atmosphère, le modèle d'océan NEMO, le modèle de glace de mer GEMATO, le modèle de surface continentale et flux océan-atmosphère SURFEX et le modèle TRIP pour simuler le transport de l'eau douce des fleuves vers les océans^[3].

- NCC, développé par le centre du climat de Norvège et l'Université de Corporation for Atmospheric Research en Norvège^[4]. Il intègre un modèle d'océan, un modèle atmosphérique, un modèle de glace, un module pour le cycle de carbone et est utilisé pour des prévisions climatiques.

- MPI, développé par Max-Planck-Institut für Meteorologie. Il couple un modèle d'océan, d'atmosphère et de surface continentale^[5].

- MOHC, développé par le Met Office Hadley Centre, et intègre un modèle d'océan, un modèle d'atmosphère et un modèle de surface continentale^[6].

- Une dernière simulation intégrant les valeurs de tous ces modèles est également réalisée et se nomme « multi-modèles ».

Ces modèles ne possèdent pas plusieurs représentations d'une année cible, il s'agit de simulations de trajectoires climatiques forcées selon les différents scénarios RCP du GIEC. Il existe donc une seule représentation de l'année 2000 et une seule représentation de l'année 2050. Ainsi, pour représenter le climat 2000, l'indice agro-climatique est calculé sur la période 1985- 2005 qui correspond à la période de référence de ces modèles. Pour représenter le climat 2050, l'indice agro-climatique est calculé sur la période 2040-2060 (selon le scénario 8.5 du GIEC). Cela permet d'avoir un panel de 21 événements sur les deux périodes. L'indice est calculé à l'échelle de la maille de 8 km x 8 km sur la France métropolitaine et sa valeur moyenne annuelle est ensuite calculée sur la France entière, ainsi que la valeur décennale France entière de l'indice sur les deux climats.

Calcul de l'indice agro-climatique sur les simulations à climat constant

Afin de comparer les résultats obtenus sur les simulations continues et sur les simulations à climat constant, il a fallu adapter la méthodologie de calcul de l'indice agro-climatique pour qu'il soit calculé sur 21 ans à climat constant.

Les valeurs de l'indice agro-climatique ont donc été calculées sur 21 années successives de simulations à climat constant avec le modèle ARPEGE-Climat. Ainsi, 100 tirages de valeurs de l'indice à l'échelle nationale sont obtenus.

La distribution des valeurs moyennes et des valeurs décennales de l'indice agro-climatique des 100 tirages à climat constant est étudiée et comparée avec les résultats des valeurs d'indice sur les modèles à trajectoires continues.

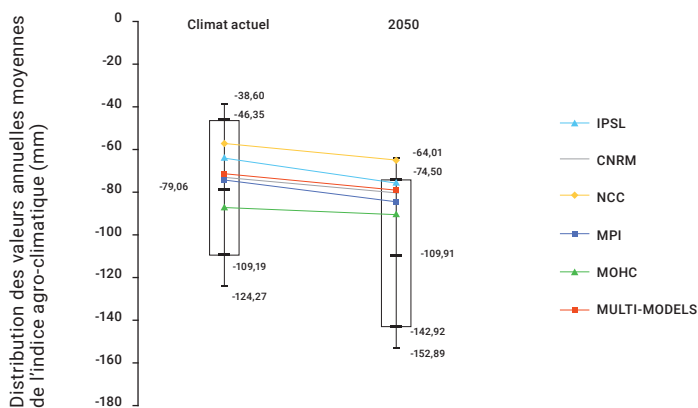


Figure 1 – Distribution des valeurs annuelles moyennes sur la France métropolitaine de l'indice agro-climatique sur le modèle ARPEGE-Climat (box plot) et valeurs de l'indice agro-climatique pour les 5 modèles d'EURO-CORDEX (points en couleur) entre le climat 2000 et le climat 2050.

RÉSULTATS

La Figure 1 présente la comparaison des valeurs annuelles moyennes de l'indice agro-climatique sur la France métropolitaine sur le climat 2000 et le climat 2050. Cette distribution de 100 tirages à climat constant contient l'ensemble des valeurs annuelles moyennes de chacune des simulations continues. On constate que tous les modèles montrent un assèchement généralisé avec une diminution de l'anomalie de bilan hydrique décadaire. Cependant, les valeurs extrêmes

de l'indice sont mieux représentées avec les simulations à climat constant du fait du nombre important de simulations sur l'année cible. Les simulations à climat constant sont donc plus adaptées à des études sur les événements extrêmes. Cette analyse porte sur une approche moyenne nationale des valeurs de l'indice. Elle peut cacher des variations plus importantes à une échelle géographique plus fine. Cela fait l'objet de travaux en cours.

- # événements extrêmes climatiques
- # simulations à climat constant
- # simulations continues

La Figure 2 présente l'évolution des valeurs annuelles moyennes sur la France métropolitaine de l'indice entre le climat actuel et le climat futur. La moyenne des simulations à climat constant est supérieure à l'évolution obtenue pour chacun des modèles d'EURO-CORDEX.

La Figure 3 présente la comparaison des valeurs décennales de l'indice agro-climatique sur la France métropolitaine sur le climat actuel et le climat futur. La distribution des valeurs de l'indice calculée à climat constant sur le modèle ARPEGE-Climat contient toutes les valeurs décennales des autres modèles, ce qui valide la robustesse de la simulation à climat constant pour la prise en compte d'événements extrêmes.

Sur les modélisations continues, seules 21 représentations de l'année cible sont possibles. Ainsi, la valeur décennale de l'indice agro-climatique est calculée uniquement sur 2 valeurs ce qui entraîne de nombreuses incertitudes. De plus, un des modèles (modèle MOHC) montre une tendance contraire aux autres, ce qui signifie que les sécheresses décennales seraient moins intenses à horizon 2050. Ces résultats semblent peu probables au vu des nombreuses études réalisées et publiées et de la tendance représentée par les autres modèles^[7].

L'évolution des sécheresses décennales sur la France métropolitaine sur les simulations EURO-CORDEX et sur les 100 tirages d'ARPEGE-Climat à climat constant est présentée en Figure 4. Il apparaît que selon les modèles, l'évolution est très différente et n'est pas homogène. Néanmoins, la distribution de l'évolution des valeurs de l'indice agro-climatique des 100 tirages de simulation d'ARPEGE-Climat contient toutes les évolutions des modèles, ce qui montre la robustesse des simulations à climat constant pour la simulation des événements extrêmes à horizon futur.

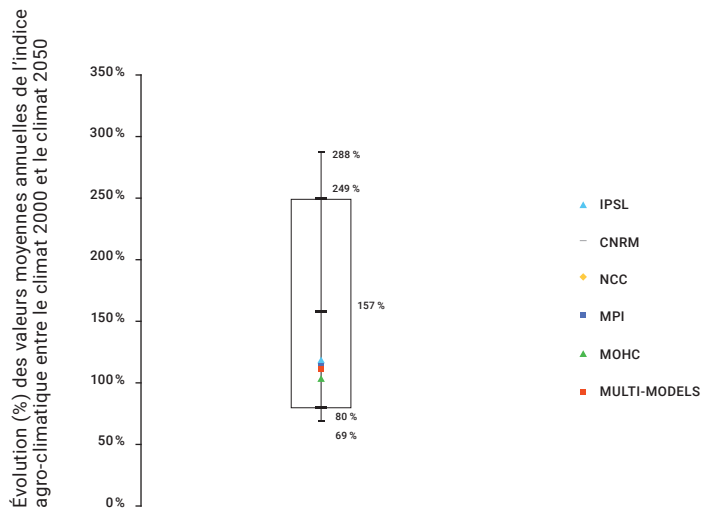


Figure 2 – Evolution (%) des valeurs de l'indice agro-climatique entre le climat futur (RCP 8.5) et le climat actuel calculé sur les simulations du modèle ARPEGE-Climat de Météo-France (100 tirages - boxplot) et sur les modèles EURO-CORDEX (un point par modèle)

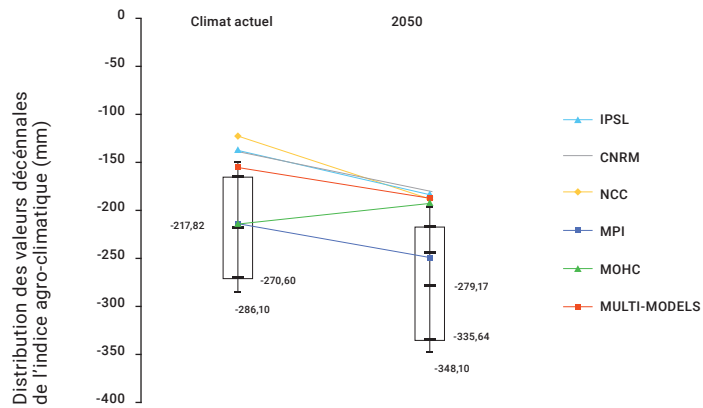


Figure 3 – Distribution des valeurs décennales sur la France métropolitaine de l'indice agro-climatique sur le modèle ARPEGE-Climat (box plot) et valeurs de l'indice agro-climatique pour les 5 modèles d'EURO-CORDEX (points en couleur) entre le climat 2000 et le climat 2050.

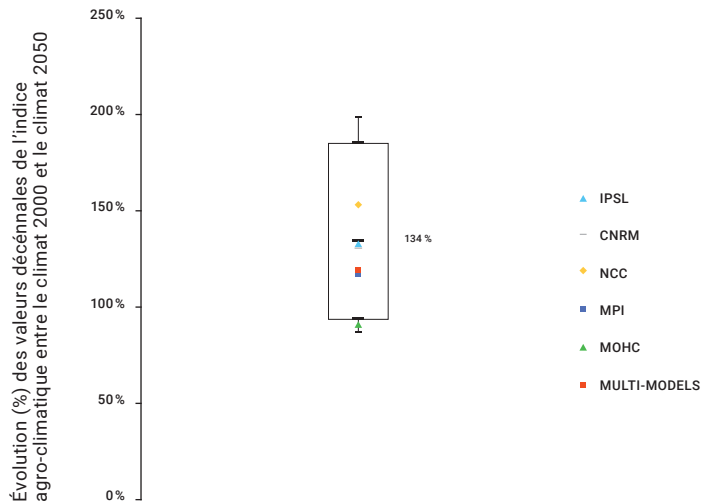


Figure 4 – Évolution (%) des valeurs de l'indice agro-climatique entre le climat futur (RCP 8.5) et le climat actuel calculé sur les simulations du modèle ARPEGE-Climat de Météo-France (100 tirages - boxplot) et sur les modèles EURO-CORDEX (un point par modèle).



LES PARTENAIRES

Météo-France en tant que service météorologique et climatologique national conduit des travaux, études et recherches sur le climat et son évolution future. À ce titre, Météo-France est une source d'information et d'expertise essentielle pour la bonne réalisation des missions de CCR. Météo-France et CCR entretiennent un partenariat depuis 2013.

Enfin, du fait des variations importantes des valeurs de l'indice entre les modèles, et particulièrement sur les valeurs décennales, en couplant les différents modèles pour faire un multi-modèle, et en calculant des valeurs extrêmes de manière statistique (quantiles 10-90), il est calculé un quantile 90 qui correspond à la valeur générée par un des modèles utilisés et un quantile 10 qui correspond à la valeur générée par un autre modèle EURO-CORDEX. Ainsi, il est généré un biais qui s'ajoute aux biais de chacun des modèles et qui engendre la simulation d'une distribution d'événements climatiques non homogène et qui n'est pas nécessairement réaliste.

CONCLUSION

Cet article propose une méthodologie pour comparer les simulations à climat constant du modèle ARPEGE-Climat et les trajectoires climatiques simulées par les modèles EURO-CORDEX sur le climat 2050 en utilisant le scénario RCP 8.5 du GIEC. Cette étude met en évidence la nécessité de posséder un large panel d'événements climatiques pour réaliser une étude spécifique sur les événements extrêmes. Afin de combiner l'intérêt de disposer de plusieurs modèles et la nécessité, démontrée ici, de disposer d'un grand nombre de simulations d'une même année cible, il sera nécessaire à l'avenir de croiser ces deux approches. Cependant, à ce jour, les temps de calcul nécessaires et la volumétrie des données en sortie limitent la capacité opérationnelle à réaliser ce type de simulations. Mais au vu de l'augmentation permanente des capacités de calcul, cette option reste envisageable pour le futur./

RÉFÉRENCES

1. Kapsambelis, Dorothée, David Moncoulon, et Jean Cordier. 2019. « An Innovative Damage Model for Crop Insurance, Combining Two Hazards into a Single Climatic Index » *Climate* (7) (11): 125. <https://doi.org/10.3390/cli7110125>.
2. Marti, Olivier, Pascale Braconnot, Jacques Bellier, Rachid Benschila, Sandrine Bony, Patrick Brockmann, Patricia Cadule, et al. 2006. « The new IPSL climate system model: IPSL-CM4 ». Other Notes scientifiques du Pôle de modélisation du climat. 26. IPSL. <https://hal.archivesouvertes.fr/hal-03319443>.
3. Voltaire, Aurèle, Emilia Sanchez-Gomez, David Salas y Méliá, B. Decharme, Christophe Cassou, Stéphane Sénési, Sophie Valcke, et al. 2013. « The CNRM-CM5.1 Global Climate Model: Description and Basic Evaluation ». *Climate Dynamics* 40 (mai): 2091. <https://doi.org/10.1007/S00382-011-1259-Y>.
4. Bentsen, M., I. Bethke, J. B. Debernard, T. Iversen, A. Kirkevåg, Ø Seland, H. Drange, et al. 2013. « The Norwegian Earth System Model, NorESM1-M – Part 1: Description and Basic Evaluation of the Physical Climate ». *Geoscientific Model Development* 6 (3): 687-720. <https://doi.org/10.5194/gmd-6-687-2013>
5. Gutjahr, Oliver, Dian Putrasahan, Katja Lohmann, Johann H. Jungclaus, Jin-Song von Storch, Nils Brüggemann, Helmuth Haak, et Achim Stössel. 2018. « Max Planck Institute Earth System Model (MPI-ESM1.2) for High-Resolution Model Intercomparison Project (HighResMIP) ». Preprint. *Climate and Earth System Modeling*. <https://doi.org/10.5194/gmd-2018-286>.
6. Bellouin, N., W. J. Collins, I. D. Culverwell, P. R. Halloran, S. C. Hardiman, T. J. Hinton, C. D. Jones, R. E. McDonald, A. J. McLaren, et F. M. O'Connor. 2011. « The HadGEM2 family of met office unified model climate configurations ». *Geoscientific Model Development* 4 (3): 723-57.
7. Soubeyroux, Jean-Michel, Sébastien Bernus, Lola Corre, Agathe Drouin, Brigitte Dubuisson, Pierre Etchevers, Viviane Gouget, et al. 2020. « Les nouvelles projections climatiques de référence DRIAS 2020 pour la métropole », Météo-France. 98.

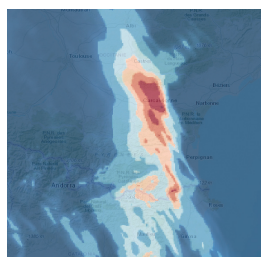
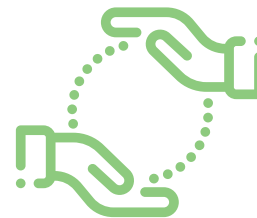
CITATION

Kapsambelis D. et al., Comparaison des simulations à climat constant et des simulations continues pour la modélisation des événements extrêmes de sécheresse. In Rapport Scientifique CCR 2022 ; CCR, Paris, France, 2022, pp. 34-37

ALERTE ET PRÉVENTION

Des pelleteuses consolident la digue du Lay, à La Faute-sur-Mer le 30 mars 2010, près de pavillons qui ont été inondés lors de la tempête Xynthia survenue fin février 2010.

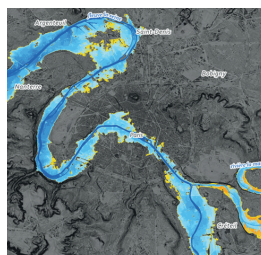




Modélisation anticipée des pertes assurantielles, une application du projet de recherche PICS . p.40

Des travaux ont été réalisés dans le cadre du projet de recherche ANR PICS afin d'utiliser des prévisions de pluie pour alimenter le modèle de dommages inondation de CCR. Ces tests ont montré l'intérêt de ces produits qui peuvent permettre d'anticiper de plusieurs heures les montants des dommages à venir. Ils peuvent également être utilisés pour localiser en avance les secteurs les plus touchés, ce qui pourrait s'avérer très utile pour les acteurs de la gestion de crise.

Jean-Philippe Naulin et Olivier Payrastra

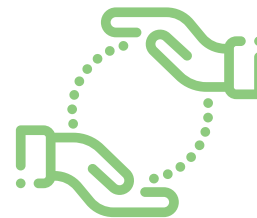


Apport des modèles de CCR pour mesurer l'efficacité des mesures de prévention sur les dommages assurés . p.44

Les modèles développés par CCR servent à mesurer les conséquences économiques des catastrophes naturelles. Ces modèles peuvent être adaptés pour prendre en compte des mesures de prévention et estimer leur impact à différentes échelles (risque, commune, etc.). Ainsi, ils ont été mis en œuvre pour réaliser des analyses coût-bénéfice de ces mesures et plusieurs illustrations sont proposées dans cet article.

Jérémy Desarthe, David Moncoulon et Roxane Marchal

Modélisation anticipée des pertes assurantielles, une application du projet de recherche PICS



Jean-Philippe Naulin¹, Olivier Payrastré²

(1) Département R&D Modélisation, CCR

(2) Laboratoire Eau Environnement, Dép. Géotechnique Environnement Risques naturels et Sciences de la terre, Université Gustave Eiffel

INTRODUCTION

Dans le contexte de la gestion d'un épisode de crue soudaine, l'anticipation et la qualité des informations disponibles jouent un rôle clé dans la prise de décision. C'est cette problématique qu'a abordé le projet ANR PICS, portant sur la Prévision Immédiate Intégrée des Impacts des Crues Soudaines. Ce projet financé par l'Agence Nationale pour la Recherche (ANR) a pu traiter de nombreux aspects allant de la prévision des pluies à partir de modèles météorologiques, à la modélisation des impacts sur le terrain, en passant par la modélisation hydrologique pluie-débit et les simulations hydrauliques pour représenter les zones inondées. Ce projet a également mobilisé un groupe d'utilisateurs regroupant plusieurs acteurs de la gestion du risque inondation, tels que les services de prévision des crues, les Services Départementaux d'Incendie et de Secours (SDIS), les assureurs, la SNCF, etc. pour évaluer les différents outils développés.

Parmi les outils mis en œuvre dans ce projet, CCR a travaillé à l'élaboration d'un modèle de dommages, adapté aux crues éclaircies. Contrairement aux modèles développés en interne à CCR, ce modèle a pu bénéficier de données d'aléa issues des organismes impliqués dans le projet, incluant notamment des estimations de hauteurs d'eau à 5 m de résolution^[1], et des lames d'eau radar. Le modèle d'im-

pact a également été utilisé avec des données de prévisions de précipitations, issues de modèles météorologiques, afin d'évaluer s'il était possible d'anticiper les montants de dommages à venir et de localiser les secteurs les plus impactés par un événement.

MÉTHODOLOGIE

Calibration du modèle de dommages

Le modèle de dommages fonctionne à l'échelle d'un bien assuré. Pour chaque bien, les dommages sont estimés comme étant le produit entre la probabilité que le bien soit sinistré, son taux de destruction estimé et sa valeur assurée. Cette dernière est une donnée transmise par les assureurs ou encore estimée par CCR à partir des informations disponibles telles que la superficie du bâtiment, sa localisation ou encore son usage. La probabilité de sinistre et le taux de destruction sont issus de modèles, calibrés à partir des sinistres également transmis par les assureurs chaque année. Ces modèles mettent en relation des variables explicatives dépendantes de l'événement (le cumul de pluie, le ratio entre le cumul de pluie et la pluie décennale, ou encore la hauteur d'eau par exemple) et des variables indépendantes de l'événement telles que la hauteur du bâtiment ou la différence d'altitude avec le cours

d'eau le plus proche.

Plusieurs modèles ont été testés tels que les régressions linéaires multiples, la méthode Lasso ou les forêts aléatoires. La calibration a eu lieu sur six événements et la validation sur deux autres. In fine, le modèle retenu repose sur une calibration expertisée par régression linéaire multiple. L'expertise porte sur la distinction entre les zones touchées par du débordement de cours d'eau et celles concernées par le ruissellement, ainsi que sur le contrôle des tendances afin de ne pas conserver de modèles contre intuitifs. Les résultats obtenus lors de cette calibration, présentés dans la Figure 1, sont satisfaisants. Il apparaît que le modèle de dommage est sensible à l'aléa simulé : la résolution de 5 m du modèle de débordement permet d'obtenir de meilleures performances qu'avec 25 m de résolution, de même que l'utilisation de lames d'eau radar en remplacement de la pluie krigée. Le modèle a néanmoins tendance à surestimer les pertes sur des événements de faible intensité.

Application à partir de prévisions de pluie issues du modèle AROME PI

Les prévisions de pluie issues du modèle AROME PI^[2] ont été mises à disposition par Météo-France dans le cadre du projet PICS. Ce modèle permet d'anticiper les pluies à venir jusqu'à 6 h d'échéance et au pas de temps de 15 minutes. Les pré-

visions sont actualisées toutes les heures. La Figure 2 montre les cumuls de pluie prévus à différents pas de temps pour l'événement du Languedoc en 2018. À 0 h, le modèle prévoyait un événement modéré, puis à partir de 6 h, les prévisions font apparaître un événement de plus en plus intense.

Ces données ont été implémentées dans la chaîne de modélisation CCR permettant de modéliser le débit des cours d'eau, puis de simuler le débordement à une résolution de 25 m, et enfin de simuler les dommages.

RÉSULTATS

Le premier résultat de cette évaluation est présenté dans la Figure 3. Ce résultat montre que 10 h avant le pic de crue à Carcassonne, le modèle pouvait ressentir un événement significatif à plus de 170 M€. Dans les heures qui suivent, le coût de l'événement va s'affiner pour aboutir le 16 octobre 2018 à un montant de 291 M€. Le montant réel de l'événement a été pour sa part estimé à posteriori à 220 M€. Cet écart entre la prévision et l'estimation en fin d'événement est en grande partie dû aux prévisions de pluie qui sont moins précises que les observations radar. Cependant, l'ordre de grandeur des dommages est respecté et ce résultat montre que les prévisions de pluie peuvent être utilisées avec intérêt pour anticiper les dommages à venir. Des sorties spatialisées du modèle de dommages ont également été produites en agrégeant les coûts à une maille de 250 m. Les cartes de dommages ainsi obtenues permettent de prévoir l'évolution temporelle des dommages. Dès minuit, les communes qui vont être frappées le plus durement par l'événement sont détectées par le modèle de dommages.

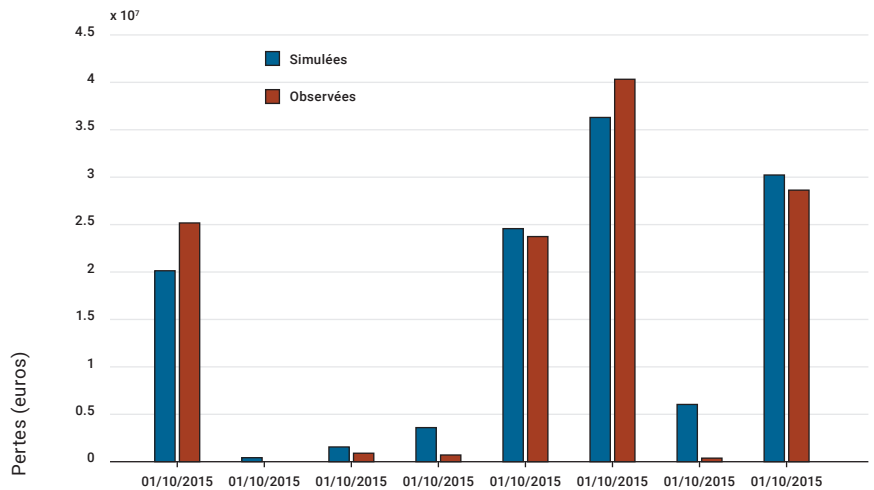


Figure 1 – Comparaison entre les pertes observées et simulées sur les risques de particuliers occupants d'une maison (les événements du 14/06/2010 et du 09/10/2014 ont été utilisés pour la validation du modèle)

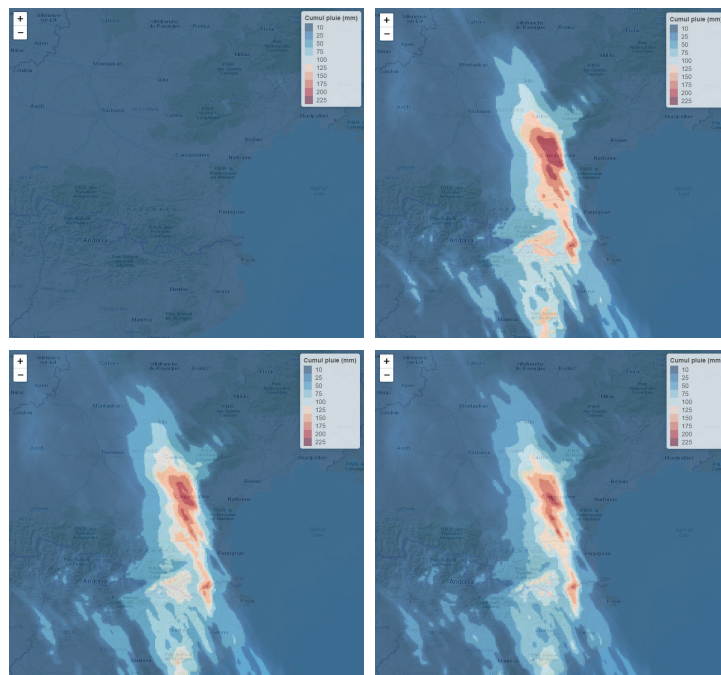


Figure 2 – Cartes de cumul de pluie sur l'événement issues des prévisions du modèle Arome PI à 18 h le 14/10/2018 (en haut à gauche) puis à 0 h, 6 h et 12 h le 15/10/2018

- # PICS
- # modèle de dommages
- # inondation
- # gestion de crise
- # anticipation des sinistres

Les pertes sont confirmées sur les pas de temps suivants. On notera cependant une exception au niveau de la ville de Carcassonne où les dommages sont surestimés. Cet écart n'est pas lié aux prévisions de pluie mais plutôt au modèle lui-même, qui surestime les secteurs touchés par le débordement de l'Aude. Ceci confirme que le modèle est très dépendant de la qualité de l'aléa simulé.

Un avantage qui ressort du modèle de dommages est qu'il n'est pas focalisé sur les cours d'eau principaux, mais va également considérer les territoires soumis au ruissellement. Ces cartes pourraient donc constituer une information utile pour les gestionnaires de crise, car elles permettent de localiser de façon anticipée les endroits les plus touchés par un événement, en tenant compte de l'ensemble des processus d'inondation, et de la localisation des enjeux.

Le projet PICS a également permis de travailler sur la représentation des incertitudes des prévisions de pluie. Pour cela, de nouveaux produits de prévisions ensemblistes de précipitations ont été proposés par Météo-France, c'est-à-dire des prévisions qui incluent un grand nombre de scénarios. Ces dernières, en alimentant le modèle de dommages ont permis de générer plusieurs scénarios de dommages ayant des niveaux de probabilité différents : un scénario médian correspondant au quantile 50 (50 % de chance de se produire) et un scénario plus sévère correspondant au quantile 90 (10 % de chance de se produire). Les cartes de dommages associées à ces scénarios de prévisions peuvent également être actualisées toutes les heures, et fournissent une information tenant compte du niveau d'incertitude des prévisions.

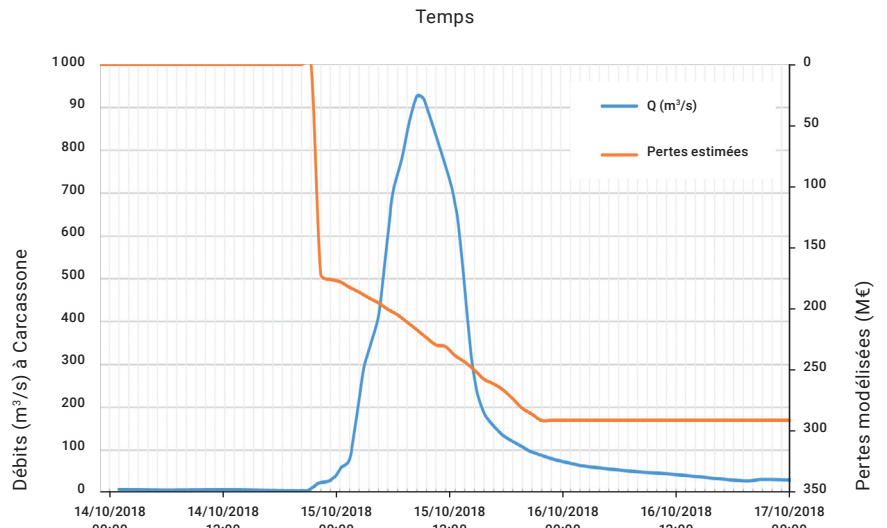


Figure 3 – Superposition de l'hydrogramme de crue à Carcassonne et des pertes simulées à partir des prévisions de pluie AROME PI

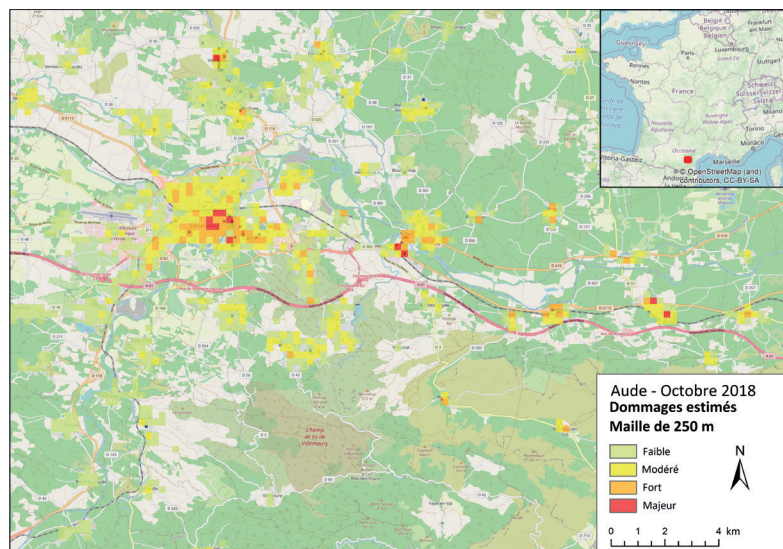


Figure 4 – Pertes simulées dans le secteur de Carcassonne sur une maille de 250m pour un échantillon de polices le 15/10/2018 à 0h

LES PARTENAIRES

La réalisation du projet PICS est rendue possible grâce à une subvention de l'ANR (n°ANR-17- CE03-0011). Nous adressons nos remerciements aux membres du projet PICS et du groupe utilisateurs qui ont accepté de s'impliquer dans ce projet.

CONCLUSION

Cette étude réalisée par CCR dans le cadre du projet de recherche PICS a permis de construire une chaîne de modélisation des dommages adaptée aux crues soudaines. Ce travail a permis de confirmer l'importance de considérer conjointement les débordements des très petits cours d'eau, le ruissellement et les remontées de réseau pour modéliser correctement les dommages.

Le modèle de dommages par ailleurs s'est avéré capable d'anticiper des dommages à venir lorsqu'il est alimenté par des données issues d'un modèle de prévisions météorologiques. Même si ces estimations sont sujettes à des incertitudes importantes, ces incertitudes peuvent être représentées, et ces estimations pourraient donc permettre d'anticiper l'impact d'événements en cours ou à venir en donnant une idée des montants en jeu et des zones touchées.

Cet article ne présente qu'une petite partie de l'ensemble des résultats du projet PICS qui a permis des avancées significatives dans les domaines de l'anticipation des crues soudaines et de leurs impacts. Le projet dispose d'un site web : <https://pics.ifsttar.fr> où il est possible de consulter les principaux travaux et résultats obtenus./

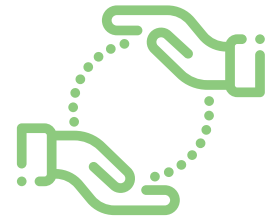
RÉFÉRENCES

1. Hocini N., Payrastré O., Bourgin F., Gaume E., Davy P., Lague D., Poinignon L., and Pons F., 2021. Performance of automated methods for flash flood inundation mapping: a comparison of a digital terrain model (DTM) filling and two hydrodynamic methods, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 25, 2979–2995, <https://doi.org/10.5194/hess-25-2979-2021><https://doi.org/10.5194/hess-25-2979-2021>
2. Lovat, A., Vincendon, B., and Ducrocq, V., 2020. Hydrometeorological evaluation of two nowcasting systems for Mediterranean heavy precipitation events with operational considerations, *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.* [preprint], <https://doi.org/10.5194/hess-2020-629>, accepted for publication.

CITATION

Naulin et al., Modélisation anticipée des pertes assurantielles, une application du projet PICS. In *Rapport Scientifique CCR 2022* ; CCR, Paris, France, 2022, pp. 40-43

Apport des modèles de CCR pour mesurer l'efficacité des mesures de prévention sur les dommages assurés



Jérémy Desarthe¹, David Moncoulon², Roxane Marchal²

(1) Département Fonds Publics et Prévention, CCR

(2) Département R&D Modélisation, CCR

INTRODUCTION

Le partenariat avec la DGPR

À l'automne 2021, une convention pluriannuelle a été signée entre CCR et la Direction générale de la prévention des risques (DGPR) du ministère de la Transition écologique. Cette convention confie à CCR des missions d'intérêt général relatives à la connaissance des risques naturels et des dispositifs de prévention. Grâce à la mobilisation des données et modèles de CCR, les travaux visent plus précisément à améliorer les diagnostics de l'exposition des territoires aux risques naturels notamment à l'horizon 2050 ; à analyser la mise en œuvre des dispositifs publics de prévention, à en évaluer les bénéfices et à apporter un appui à la structuration des politiques publiques de prévention et un accompagnement aux services déconcentrés de l'État dans leurs travaux et leurs réflexions.

La modélisation et les projections en 2050 en résumé

Par son rôle au sein du régime d'indemnisation des catastrophes naturelles, CCR développe depuis plus de quinze ans, une plateforme de modélisation des aléas et des dommages assurés. L'objectif de ces travaux de modélisation est, d'une part, de fournir une estimation des dommages consécutifs aux événements extrêmes

quelques jours après leur survenance et, d'autre part, d'apporter sur le temps long les éléments nécessaires à la pérennité de l'équilibre du régime Cat Nat. Dans cette perspective, plusieurs études ont été menées avec Météo-France pour évaluer l'impact du changement climatique sur le montant des catastrophes naturelles à l'horizon 2050. Une méthodologie originale a été mise en place, avec les scénarios ARPEGE-Climat à climat constant : c'est à dire la simulation de 400 ans de climat type "2000" et la simulation de 400 ans de climat type "2050" selon différents scénarios de concentration de gaz à effet de serre issus des travaux du GIEC. En 2018, l'étude s'est focalisée sur les conséquences du scénario RCP 8.5, le plus sévère et correspondant à une hausse de température probable de + 4 °C en 2100. Les résultats ont montré que le changement climatique se traduirait par une hausse moyenne de 35 % des dommages annuels moyens assurés du fait de l'accroissement de la fréquence et de la sévérité des catastrophes naturelles. Si l'on intègre l'effet lié à la concentration des populations, prévue par l'INSEE, dans les zones à risques, cette hausse serait évaluée à + 50 %.

L'effet le plus marquant est celui sur les submersions marines. En effet, les dommages augmenteraient de + 82 % du fait essentiellement d'une hausse de 23 cm du niveau marin. Cette hausse qui peut paraître faible, devient un facteur important d'accroissement des dommages en cas de submersion marine due à une tempête côtière.

Les études liées à la prévention et à la réduction des dommages

Impact de la loi Elan

La sécheresse géotechnique liée au retrait-gonflement des argiles (RGA) constitue aujourd'hui un risque prégnant. Sur la période 2016 - 2021, elle représente près de 49 % des indemnités versées au titre du régime Cat Nat. La sécheresse géotechnique devance ainsi les inondations qui ont été à l'origine de 53 % des dommages assurés depuis 1982.

En 2018, la loi Elan a tenté d'apporter une réponse à cette problématique en proposant tout d'abord une cartographie de l'exposition du territoire au phénomène RGA. Cette cartographie s'accompagne de recommandations sur les études à mener concernant les nouveaux projets de construction. L'objectif est de permettre la construction de logements tout en n'aggravant pas l'exposition des enjeux au phénomène de retrait et gonflement des argiles.

Ainsi, une modélisation de l'évolution des dommages consécutifs au phénomène de sécheresse RGA a été réalisée en négligeant les dommages aux nouvelles constructions dans les zones à risque, considérés comme pris en compte par la prévention. Pour ce faire, l'identification de ces nouvelles constructions en lien avec leur localisation par rapport au zonage du BRGM a été menée et un nouveau portefeuille de biens assurés pour le marché a été construit.

Les simulations de 400 années à climat actuel et 400 années à climat futur ont été reprises en modifiant les paramètres d'évolution des populations dans ces zones à risques.

Les résultats montrent des dommages qui augmentent moins vite à horizon 2050, mettant en évidence l'efficacité de la loi Elan pour limiter les conséquences du changement climatique en se concentrant sur la problématique liée à la construction du bâti. L'application stricte de cette nouvelle réglementation devrait ainsi permettre de réduire de 100 M€ la sinistralité moyenne annuelle à l'horizon 2050.

En cumulant ces bénéfices sur la période 2022 – 2050, on obtient une "économie" de 2,8 Md€ pour le régime d'indemnisation des catastrophes naturelles.

Investissements dans les ouvrages hydrauliques

Destinés à réduire la fréquence et l'intensité des inondations, la création ou le confortement d'ouvrages hydrauliques constitue un des principaux leviers de la politique de prévention. Sur la dernière décennie, ils ont représenté **38 % des délégations brutes du Fonds de prévention des risques naturels majeurs (FPRNM)**. Sur la période 2016 - 2020, cela représente un investissement moyen annuel de **96 M€ par le FPRNM**. Cette somme ne représente qu'une partie des investissements dans les ouvrages hydrauliques puisque les collectivités locales participent également au financement. Au total, chaque année, ce sont donc **215 M€ qui sont investis dans les ouvrages hydrauliques**.

Pour évaluer les effets de ces ouvrages, CCR a cherché à déterminer les bénéfices des investissements sur la sinistralité à l'horizon 2050. La méthodologie retenue s'appuie sur celle établie par

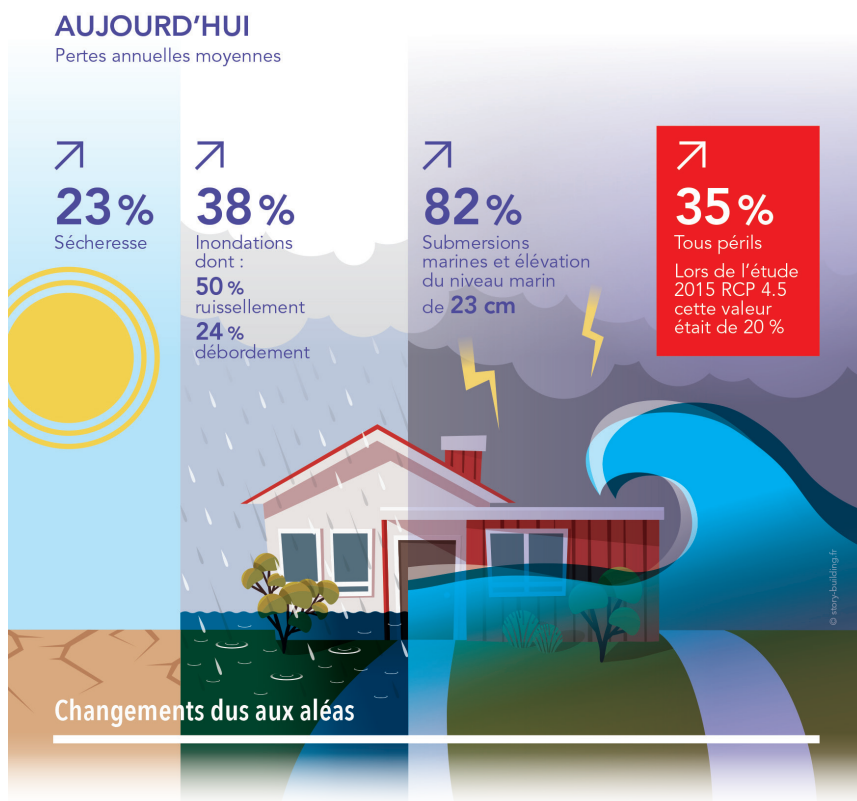


Figure 1 – Évolution des pertes annuelles moyennes par type d'aléas sous l'effet du changement climatique à horizon 2050.

modélisation

mesures de prévention

dommages assurés

analyse coût-bénéfices

le commissariat général au développement durable (CGDD) et qui est mise en œuvre actuellement dans le cadre des Programmes d'actions de prévention des inondations (PAPI). Pour déterminer sur le long terme, les bénéfices, c'est-à-dire les dommages évités, il est nécessaire de disposer de l'indicateur B/C qui détermine, pour un coût d'investissement (C) et les bénéfices attendus de la mesure (B). L'analyse des rapports des PAPI soumis à la labellisation par la Commission mixte inondation pour la période 2018 - 2020 a permis de définir un ratio B/C moyen de 3,5 c'est-à-dire que pour 1 € investi, les bénéfices attendus sont de 3,5 € sur une période de 50 ans.

En considérant le maintien des investissements annuels observés sur la période 2016 - 2020, la sinistralité due aux événements d'inondation et submersion marine en 2050 serait réduite de 130 M€. Au final, l'application de la loi Elan et la poursuite des investissements dans la prévention des inondations par le financement d'ouvrages hydrauliques devraient permettre d'enrayer partiellement la hausse attendue de la sinistralité qui s'élèverait à 32 % (contre 50 % sans ces dispositifs de prévention).

Impact des grands lacs de Seine

À la suite de la sécheresse de 1920 et des inondations de 1924, plusieurs actions ont été mises en œuvre pour réduire la vulnérabilité du bassin de la Seine aux risques hydrologiques.

Un vaste programme de création de lacs-réservoirs permettant à la fois de lutter contre les crues et les étiages de la Seine a été lancé. Le premier à voir le jour est le lac-réservoir de Pannecières situé sur l'Yonne en 1949, ensuite viennent celui de la Seine en 1966, celui sur la Marne en 1974 et enfin celui de l'Aube en 1991. Au total, ces quatre lacs-réservoirs ont une

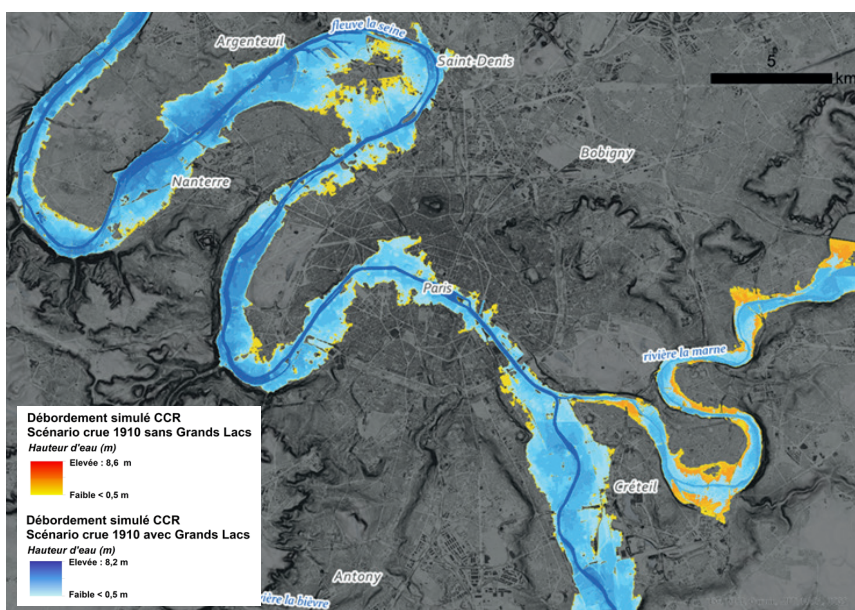


Figure 2 – Modélisation à l'échelle communale de l'effet des grands lacs (GL) sur les dommages consécutifs à la crue de janvier 1910.

capacité de 807 millions de mètres cubes et sont chargés d'assurer la régulation du bassin amont de la Seine. Le projet de La Bassée dont la construction du site pilote a été lancée en 2021 permettra à terme d'accroître cette capacité à 862 millions de mètres cubes.

À la suite des inondations de 2018, CCR en collaboration avec l'EPTB Seine Grand Lac a cherché à évaluer l'efficacité de ces grands lacs sur le montant des dommages assurés. Il s'agissait de déterminer les bénéfices, c'est-à-dire les dommages évités, qu'avaient permis la présence de ces bassins.

Dans un premier temps, l'efficacité des grands lacs de Seine a été mesurée lors de la survenance de la crue hivernale de 2018, pendant laquelle les grands lacs ont pu jouer pleinement leur rôle

d'ouvrages écrêteurs de crue. Sur les dommages estimés à l'époque, leur efficacité a été de réduire la hauteur d'eau de 65 cm sur la Seine et de 75 cm sur la Marne aval, réduisant ainsi les dommages assurés de près de 100 M€, soit 30 % des dommages estimés au moment de la survenance de l'événement.

Afin d'évaluer l'efficacité de ces dispositifs de protection, la crue de janvier 1910 a été simulée, si elle se produisait aujourd'hui, avec et sans la présence des grands Lacs. Ainsi, il a pu être montré, d'une part, que sans les grands lacs, les dommages assurés pour cet événement pourraient atteindre 15 à 33 Md€. D'autre part, avec une gestion appropriée de la crue par les grands Lacs, ces dommages diminueraient jusqu'à 12 - 28 Md€, soit une économie, en

moyenne, de 3,5 Md€ (dont 2,5 Md€ de dommages aux professionnels). La fréquence annuelle d'occurrence d'un tel événement est estimée entre 1/100^{ème} et 1/200^{ème}.

Commune	Dommages évités du fait des GL (%)
Paris	-15 %
Boulogne-Billancourt	-19 %
Levallois-Perret	-24 %
Asnières-sur-Seine	-18 %
Troyes	-15 %
Saint-Maur-des-Fossés	-49 %
Puteaux	-6 %
Gennevilliers	-20 %
Issy-les-Moulineaux	-4 %
Colombes	-3 %
Clichy	-39 %
Vitry-sur-Seine	-2 %
Nanterre	-15 %
Neuilly-sur-Seine	-26 %
Alfortville	-16 %
Rueil-Malmaison	-12 %
Meaux	-18 %
Villeneuve-Saint-Georges	-6 %
Argenteuil	-8 %

Tableau 1 – Modélisation à l'échelle communale de l'effet des grands lacs (GL) sur les dommages consécutifs à la crue de janvier 1910.

CONCLUSION

En conclusion, les modèles développés par CCR depuis de nombreuses années sont mis en œuvre pour réaliser des études prospectives pour mesurer l'efficacité des mesures de prévention. Ces modèles ont été calibrés sur les dommages historiques constatés par l'ensemble des acteurs du marché de l'assurance en France et constituent donc à ce jour les outils d'estimation des dommages les plus robustes sur ce périmètre. En modifiant la vulnérabilité des biens dans ces modèles, il devient possible de réaliser des études à fine échelle de l'impact des mesures de prévention. Ensuite, à l'aide de catalogues stochastiques d'événements, de généraliser ces impacts à l'ensemble du territoire métropolitain. Cette approche est actuellement mise en œuvre dans le cadre de la convention entre la DGPR et CCR afin d'estimer les dommages évités permis par la présence d'ouvrage hydraulique lors des inondations qui ont touché l'Aude en 2018 et le Var en 2020./

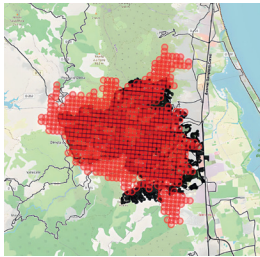
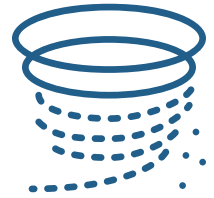
CITATION

Desarthe et al., Mise en œuvre des modèles de CCR pour mesurer l'efficacité des mesures de prévention sur les dommages assurés. In Rapport Scientifique CCR 2022 ; CCR, Paris, France, 2022, pp. 44 - 47

UN PÉRIMÈTRE DE MODÈLES ÉLARGI

Les pompiers luttent contre un feu de forêt de grande ampleur près de Louchats en Gironde, dans le sud-ouest de la France le 17 juillet 2022.

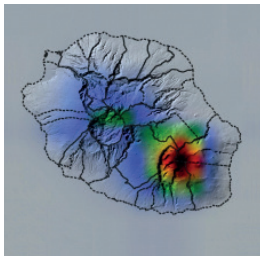




Modéliser l'aléa feux de forêts . p.50

Les dommages consécutifs aux feux de forêt n'étant pas couverts en France par le régime d'indemnisation des catastrophes naturelles, CCR n'a commencé à travailler sur ce sujet que récemment, en 2021. Une première analyse réalisée avec l'Euro Institut d'Actuariat de l'Université de Bretagne Occidentale a permis de concevoir un modèle Cat basé sur des méthodes de machine-learning. Pour poursuivre ces travaux, un travail de stage a visé à améliorer la modélisation physique de l'aléa. Le présent article a pour objectif de présenter le modèle d'aléa mis en place pour modéliser la survenance et la propagation des feux de forêts.

Quentin Jolivet et Roxane Marchal

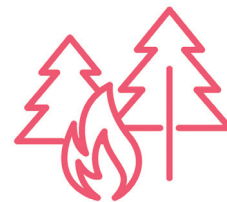


Modélisation anticipée des dommages dus aux cyclones . p.54

Les cyclones sont des événements météorologiques extrêmes, à l'origine de dommages importants dans les territoires ultra-marins. Afin d'établir une veille cyclonique automatisée et d'être en mesure d'anticiper les conséquences d'un cyclone en termes de dommages assurés, CCR, en collaboration avec RiskWeatherTech, a mis en place une chaîne opérationnelle de suivi et de modélisation de l'activité cyclonique aux Antilles et à la Réunion.

Blandine L'Hévéder, Gilles André, Léa Boittin, Roxane Marchal

Modéliser l'aléa feux de forêts



Quentin Jolivet¹, Roxane Marchal²

(1) Master 2 AIMA, Université de Rouen

(2) Département R&D Modélisation, CCR

INTRODUCTION

Les travaux menés par Gualdi et al., 2022^[1] ont permis de souligner l'exposition de la France aux feux de forêts avec l'évolution du climat dans le futur. Les zones les plus exposées sont la Corse et le sud-est de la France (région méditerranéenne). En 2022, 72 000 hectares ont brûlé en France pour environ 290 feux déclenchés^[2].

Historiquement, la France a mis en place un système de prévention des feux de forêts avec des plans de prévention créés en 1987, des infrastructures (routes coupe-feu, bassins de rétentions etc.) et des interventions de débroussaillages. D'un point de vue assurantiel, les dommages aux biens consécutifs à ce péril sont couverts par l'assurance multirisque habitation mais ne sont pas intégrés dans le régime d'indemnisation des catastrophes naturelles.

Dans les faits, 95 % des feux sont d'origine humaine et 80 % des incendies se déclenchent à moins de 50 m des habitations^[3]. CCR s'intéresse à la modélisation de ce péril au regard de l'augmentation des intensités de températures, vents et sécheresses pouvant favoriser les départs de feux dits naturels. La modélisation des facteurs anthropiques est plus complexe et seules les conditions favorisant les départs de feux sont estimées.

L'étude est géographiquement centrée sur les départements les plus exposés, c'est-à-dire ceux de l'Arc méditerranéen. L'article présente les travaux réalisés pour construire un module d'aléa permettant de modéliser la probabilité de survenance et la propagation des feux.

MÉTHODOLOGIE

Le modèle d'aléa s'appuie dans un premier temps, sur la collecte de données. Tout d'abord, les données opendata météorologiques (températures, précipitations, vitesse et direction du vent) ont été téléchargées depuis le portail DRIAS au format NetCDF et sont au pas de temps journalier. Le format NetCDF permet de stocker un grand nombre de données multidimensionnelles qui sont à la fois des données spatiales et temporelles. L'Indice forêt météo (IFM) fourni quotidiennement par Météo-France a été utilisé car il est calculé à partir de cinq variables dont les variables de sécheresse et d'humidité de l'air. Pour la France, les valeurs de l'IFM vont de 0 à 20 points. Ensuite, les données d'occupation du sol OSO THEIA et les données d'images satellites de ESA Copernicus concernant les zonages des surfaces brûlées lors des événements historiques ont été récupérées pour développer le modèle et le valider.

Le modèle de probabilité de survenance

Dans le modèle d'aléa seuls les feux dont la superficie est supérieure à 4 ha ont été traités afin de limiter la surreprésentation des feux de petite superficie. Les incendies criminels ne sont pas considérés.

Chaque carreau DFCI (Défense des forêts contre les incendies) à 2 km de résolution se voit attribuer des données météorologiques par l'application de la méthode des plus proches voisins. À partir d'un point E, qui représente l'endroit où un feu s'est déclenché historiquement, on recherche la maille Safran à laquelle il appartient en calculant les longueurs du point E aux différents centres des carrés des mailles. La longueur minimale nous informe du carré correspondant. Le modèle de survenance est basé sur un modèle logistique de caractère binaire : un feu (1), pas de feu (0).

L'effet de localisation est pris en compte par une maille de poids basée sur l'historique depuis 1981. Plus le nombre de feux historiques est important, plus le poids attribué à cette zone est élevé.

Les variables climatiques et géographiques ont donc été combinées dans un « score pour mise à feu » en donnant une importance plus forte lors des périodes de fortes chaleurs (soit supérieure à 25 °C), d'IFM supérieur à 9 et de faibles précipitations (inférieur à 0.2 mm). Ces seuils ont été définis selon l'analyse des quantiles.

$$\text{Score} = 1 \{IFM * Temp \geq 234\} * 1 \{Precip < 0.2\}$$

Afin d'optimiser les temps de calcul, le modèle tourne uniquement sur 150 jours par an, soit les derniers mois de printemps, les trois mois d'été et le premier mois d'automne.

Le score est par la suite pondéré par le nombre de feux historiques de 1981 dans la même maille :

$$\alpha^x = \frac{x}{40 * 150}$$

Le modèle de propagation

Le modèle de propagation est basé sur un modèle de percolation, c'est-à-dire un modèle qui évolue de proche en proche. Le modèle de percolation prend en entrée le point désigné par le modèle de survénance. Puis, il renvoie une liste de tous les points qui ont brûlé en fonction de l'occupation du sol.

Par la suite, on vérifie que les points récupérés n'appartiennent pas à la liste des points brûlés, car ceux-ci ne peuvent plus s'embraser à nouveau. Ensuite, les probabilités sont testées afin de savoir si les points retenus s'enflamment ou non.

La variable du vent est intégrée à ce moment-là car elle modifie les probabilités de transmission de proche en proche. S'il n'y a pas de vent ou si la vitesse d'un vent est supérieure à 140 km/h, la probabilité n'est pas modifiée (Figure 1).

En présence de vent, la probabilité de transfert est modifiée. Par exemple, si on considère un vent purement horizontal de l'ouest vers l'est, les probabilités de brûler des points au nord et au sud du point enflammé ne sont pas modifiées. En revanche, le point à l'est aura une probabilité de mise à feu supérieure à celle en temps non venteux, et le point à l'ouest aura une probabilité inférieure.

L'influence de la température

La considération de cette variable a été intégrée afin d'évaluer la corrélation entre la surface brûlée et la température. La température est la seule variable météorologique qui joue un rôle sur l'apparition d'un incendie et sur sa propagation.

Différentes classes de températures ont été créées et les surfaces brûlées moyennes sont attribuées pour chaque classe. L'augmentation est exponentielle. La Figure 2 montre l'évolution du logarithme népérien de la surface moyenne brûlée par un feu en fonction de la température maximale atteinte cette journée-là. La droite rouge correspond à la régression linéaire appliquée à la courbe du logarithme de la surface moyenne brûlée en fonction de la classe de température.

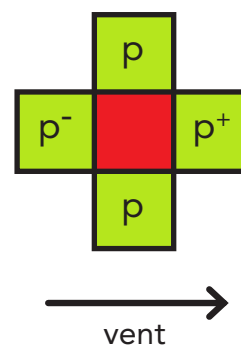


Figure 1 – Modification des probabilités par l'intégration de la variable "vent"

RÉSULTATS

Les départements de l'Arc méditerranéen ne sont pas tous exposés de manière identique. Les courbes période de retour / superficie du feu par département soulignent une plus forte exposi- >

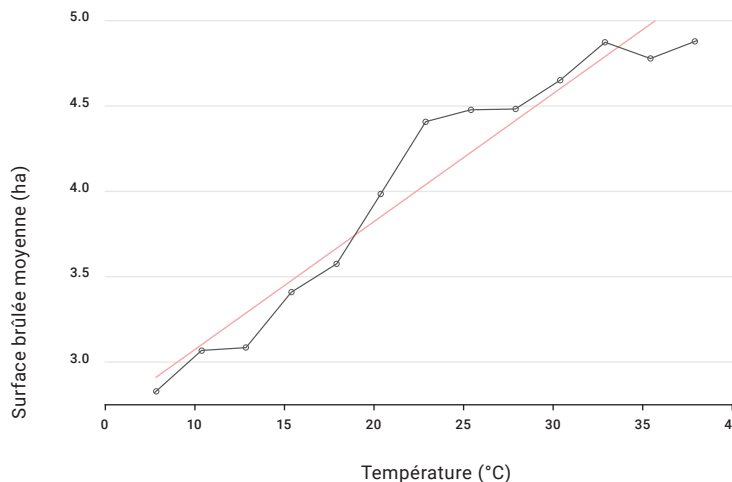


Figure 2 – Logarithme népérien de la surface brûlée moyenne en fonction de la température.

feux de forêts

probabilité de survenance

aléa

> tion des départements du Var (83), de la Corse (2A et 2B) et des Bouches-du-Rhône (13). Au contraire, les départements des Hautes-Alpes (05), Drôme (26) et Lozère (48) sont moins exposés avec des superficies brûlées plus petites et moins fréquentes (Figure 3).

Le modèle de survenance a été calibré sur l'historique des données Prométhée en comparant les feux prédits des feux réels. 278 feux sont survenus en 2017, et le modèle en prédit 257 (Figure 4). Les feux prédits par le modèle probabiliste ne peuvent correspondre exactement à l'historique notamment du fait des incertitudes relatives aux déclenchements accidentels. Cependant, les départements fortement exposés sont bien représentés. On retrouve les départements de Corse, ainsi que les Bouches-du-Rhône. L'intégration de la variable température permet d'évaluer la corrélation entre surfaces brûlées et température. La Figure 5 représente la répartition des surfaces brûlées sur l'historique. La loi de distribution des superficies discrètes semble être géométrique (courbe rouge).

En prenant en compte la température, une diminution de la fréquence d'apparition des petits feux de 4 ou 5 ha est observée. À 0 °C, plus de 85 % des feux ont une surface de moins de 15 ha. En revanche, pour la température extrême de 40 °C, seuls 25 % ont une superficie de moins de 15 ha. De manière similaire, une nette augmentation du nombre de grands feux en fonction de la température est considérée.

Le modèle de propagation a été validé en utilisant les zonages historiques des surfaces brûlées téléchargés depuis ESA Copernicus. Page suivante la Figure 6 est une sortie du modèle de propagation avec prise en compte de l'effet du vent, pour différentes vitesses et intégration de la direction du vent dominant.

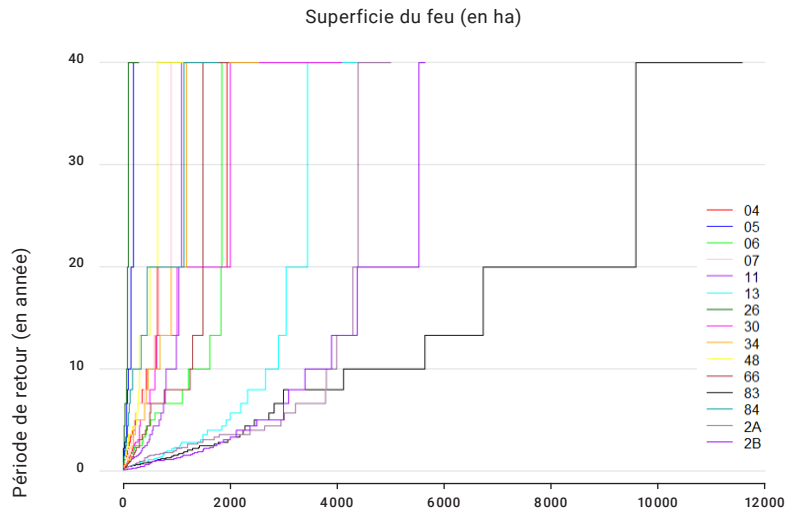


Figure 3 – Période de retour (en année) d'un feu d'intensité supérieure à une aire brûlée (en ha), par département.

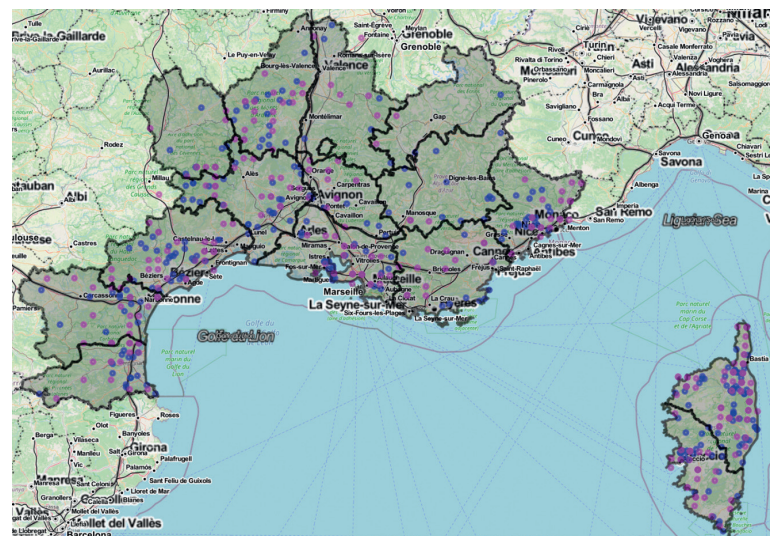


Figure 4 – Modèle de prédiction pour l'année 2017. En bleu, les feux réellement survenus en 2017, en rose les feux prédits par le modèle.

CONCLUSION

Ce nouveau modèle Cat participe à l'amélioration de la connaissance des risques naturels pouvant survenir en France. Il permet de définir les probabilités de déclenchement d'un feu et la pro-

pagation de ce dernier en fonction des données météorologiques et spatiales. La capacité de définir les dommages assurés de façon prospective permet de participer au développement des

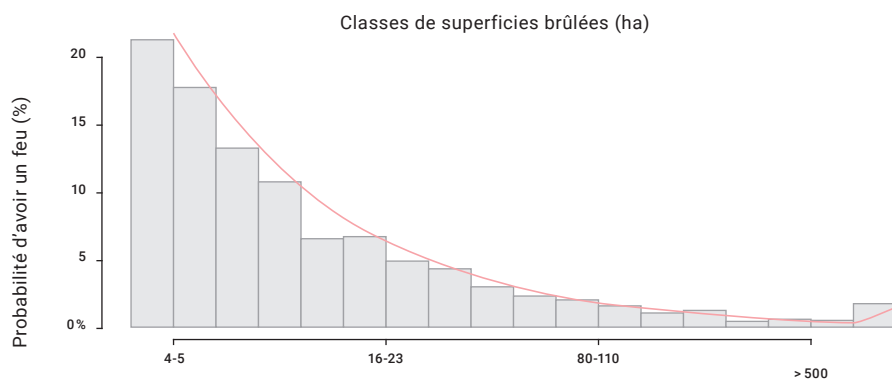


Figure 5 – Histogramme des superficies brûlées depuis 1981 par classe sans prise en compte de la température.

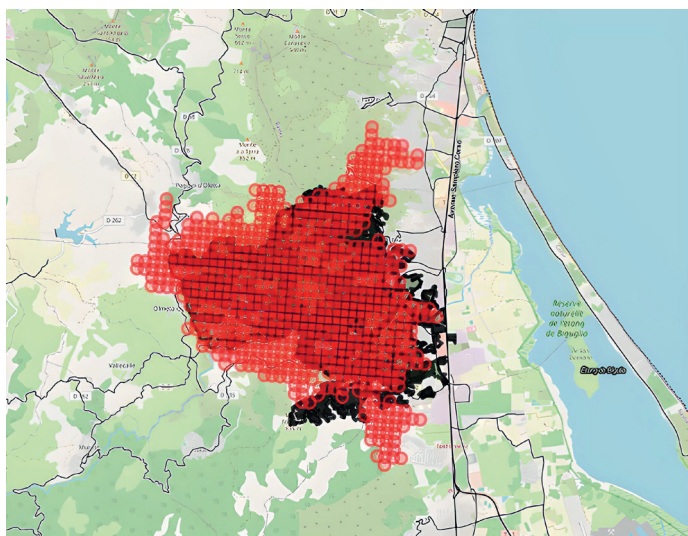


Figure 6 – Résultats du modèle de propagation (en rouge) et comparaison avec la zone réellement brûlée (en noir). Prise en compte du vent dominant ouest-est sur le secteur d'Ometta-di-Tuda (Corse) feu de 2017

échanges sur l'intégration possible de ce risque dans le régime Cat Nat. Au-delà de la gestion assurantielle de ce risque, cette étude peut s'insérer dans les politiques de prévention des incendies./

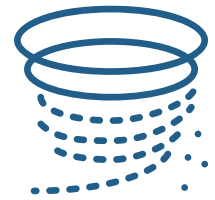
RÉFÉRENCES

1. Gualdi, B.; Binet-Stéphan, E.; Bahabi, A.; Marchal, R.; Moncoulon, D. Modelling Fire Risk Exposure for France Using Machine Learning. *Appl. Sci.* 2022, 12, 1635. <https://doi.org/10.3390/app12031635>
2. Retour d'expérience sur la saison des feux de forêts 2022, <https://www.interieur.gouv.fr/actualites/communiqués/retour-dexperience-sur-saison-des-feux-de-forêts-2022-caroline-cayeux-recoit>, consulté en novembre 2022
3. Bouisset C., L'urbanisation anarchique, facteur aggravant des incendies dans les Landes, *The Conversation*, 2022, consulté le 30/08/2022 <https://theconversation.com/lurbanisation-anarchique-facteur-aggravant-des-incendies-dans-les-landes-188619>

CITATION

Jolivet et al., Modéliser les feux de forêts. In *Rapport Scientifique CCR 2022* ; CCR, Paris, France, 2022, pp. 50-53

Modélisation anticipée des dommages dus aux cyclones



Blandine L'Hévéder¹, Gilles André¹, Léa Boittin², Roxane Marchal²

(1) RiskWeatherTech

(2) Département R&D Modélisation, CCR

INTRODUCTION

En septembre 2017, le cyclone Irma frappe le nord des Petites Antilles, provoquant des dégâts colossaux à Saint-Martin et Saint-Barthélemy. Il rentre dans la catégorie des ouragans les plus puissants enregistrés dans l'Atlantique nord. Les dommages assurés sur ces deux îles consécutifs au cyclone Irma sont évalués à plus de 2 Md€.

Une première estimation des dommages assurés a été réalisée dans les jours qui ont suivi le passage du cyclone, à partir des modèles développés et calibrés chez CCR sur les événements passés. Au vu des montants de dommages générés par ce type d'événement, une meilleure anticipation permettrait d'alerter l'État ainsi que les sociétés d'assurance de l'ampleur de la catastrophe à venir. CCR souhaite donc mettre en place une veille cyclonique automatisée en mesure de générer une alerte plusieurs jours auparavant lorsqu'un cyclone s'approche d'un territoire ultra-marin. Ce système d'alerte doit permettre, lorsque la trajectoire la plus probable croise un territoire couvert par le régime Cat Nat, de mettre en œuvre des simulations anticipées à fine échelle spatiale et de simuler les vitesses de vents et cumuls de précipitations. Ces prévisions à fine échelle des aléas météorologiques permettront la modélisation des dommages assurés liés aux inondations et au vent jusqu'à 4 jours avant la catastrophe, avec un in-

tervalle de confiance intégrant l'incertitude sur la trajectoire.

La chaîne opérationnelle se décompose en deux phases : la première est un système d'alerte précoce (SAP) qui alerte CCR d'un événement cyclonique dont une des trajectoires possibles croise un territoire ultra-marin ; la seconde, déclenchée si l'alerte se confirme, est une descente d'échelle de l'aléa et une prévision des dommages assurés à J-4 puis à J-1. Cette deuxième phase s'articule en deux parties : la simulation atmosphérique puis celle des aléas avec les modèles CCR. Les prévisions atmosphériques à fine échelle sont réalisées par RiskWeatherTech (RWT) via une descente d'échelle avec le modèle WRF^[1] à partir des prévisions du modèle météorologique américain (GFS^[2]). Elles fournissent les données d'entrée aux modèles d'aléas CCR (ruissellement et vent), eux-mêmes croisés avec la vulnérabilité, permettant d'effectuer l'estimation des dommages. Les territoires couverts sont les îles des Antilles (Saint-Martin, Saint-Barthélemy, Guadeloupe et Martinique), Mayotte, l'île de la Réunion et l'Europe (pour traiter les éventuels médicanes).

MÉTHODOLOGIE

L'architecture de la chaîne opérationnelle de suivi et de modélisation de l'activité cyclonique est composée de trois unités : (1) un système d'alerte précoce (SAP) ; (2) en cas d'alerte cyclonique prolongée, une descente d'échelle à moyenne résolution réalisée pour deux trajectoires cycloniques, à savoir la plus probable et la plus risquée ; (3) en cas d'alerte renforcée, une descente d'échelle à haute résolution est réalisée 24 h avant que le cyclone ne touche l'île.

Le SAP tourne quotidiennement sur chaque bassin océanique en période cyclonique (de mai à novembre pour les Antilles et d'octobre à mars pour l'île de la Réunion). Il est basé sur l'utilisation des prévisions ensemblistes^[3] du modèle atmosphérique américain, le GEFS^[4], composé d'un ensemble de 30 prévisions météorologiques.

Chaque matin, les prévisions des 30 membres du GEFS sont rapatriées pour les cinq jours suivants et des cartes mondiales de risque sont élaborées pour l'inondation et les vents forts sur la période de 5 jours (Figure 1). Le seuil du risque vent est fixé à 90 km/h. Le seuil du risque inondation est fixé à un cumul journalier supérieur à 120 mm. Les régions en période cyclonique sont sélectionnées et une alerte vent ou inondation est émise si au moins 10 % des membres dépassent le seuil d'alerte sur le territoire. Un email est envoyé auto-

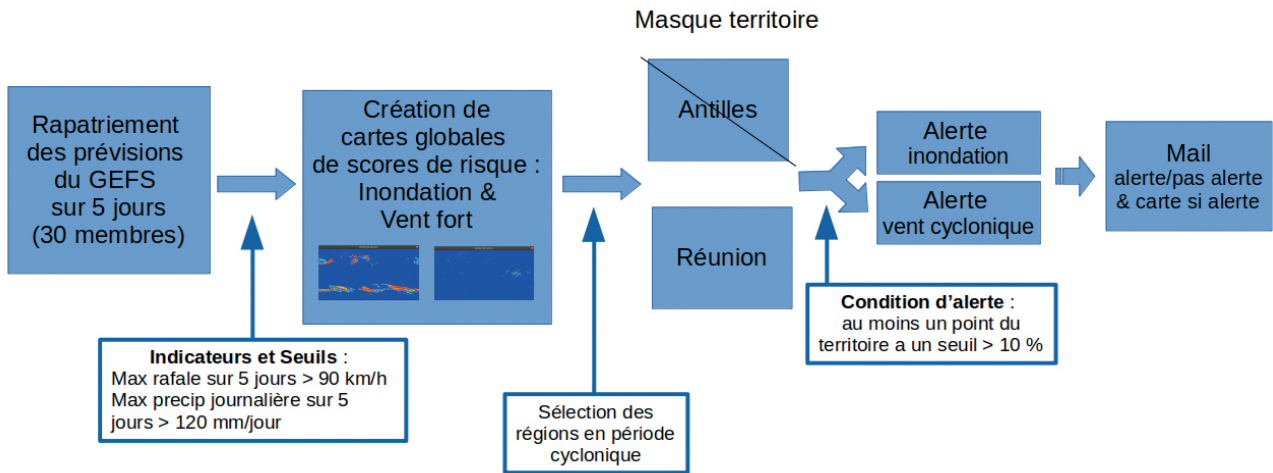


Figure 1 – Description du SAP

matiquement à l'équipe de modélisation des risques naturels de CCR, avec une carte de probabilité du risque sur le territoire en cas d'alerte vent ou inondation. En cas d'alerte cyclonique prolongée, correspondant à 3 jours consécutifs d'alerte vent, la phase 2 est déclenchée. Deux trajectoires parmi les 30 trajectoires possibles du cyclone dans l'ensemble de prévisions du GEFS sont sélectionnées : la trajectoire la plus à risque pour le territoire et la trajectoire la plus probable. Pour chacune de ces deux trajectoires, une descente d'échelle est réalisée avec le modèle atmosphérique WRF à la résolution de 4 km, sur une période de 5 jours afin de couvrir le passage du cyclone sur l'île (Figure 2).

Les simulations WRF sont effectuées sur un cluster de calcul et nécessitent l'utilisation conjointe de 288 CPUs. Les données de précipitations et de vent en sortie de la simulation WRF à 4 km de résolution sont stockées à la fréquence horaire et sont utilisées par CCR pour évaluer le risque cyclonique potentiel pour le territoire à J-4 (Exemple du cyclone Batsirai sur l'île de la Réunion sur la Figure 3).

Enfin, en cas d'alerte renforcée, la prévision de la trajectoire du cyclone devient relativement fiable 24 à 48 h avant que celui-ci ne touche l'île. Une deuxième simulation de descente d'échelle avec WRF est réalisée, cette fois-ci à une résolution plus fine, de 1 km, afin d'être en

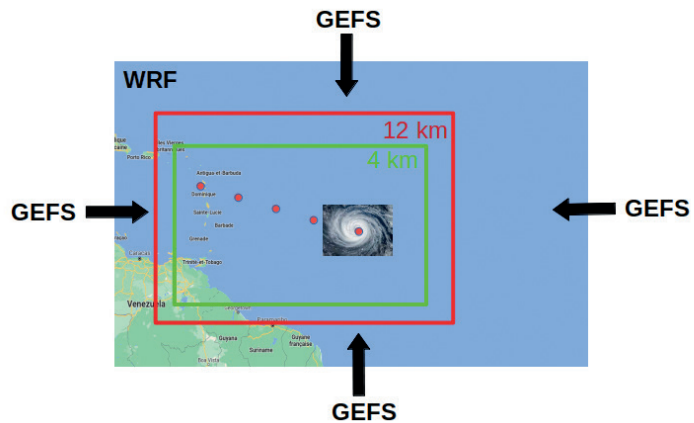


Figure 2 – Configuration du modèle WRF pour la phase 2. Les simulations GEFS étant à 50 km de résolution, la configuration WRF est constituée de deux domaines emboîtés à 12 km et 4 km de résolution. La simulation sur le domaine à 12 km de résolution sert à forcer la simulation finale sur le domaine à 4 km de résolution.

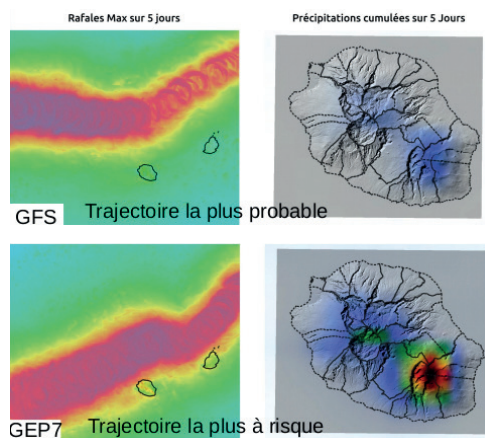


Figure 3 – Configuration du modèle WRF pour la phase 2. Les simulations GEFS étant à 50 km de résolution, la configuration WRF est constituée de deux domaines emboîtés à 12 km et 4 km de résolution. La simulation sur le domaine à 12 km de résolution sert à forcer la simulation finale sur le domaine à 4 km de résolution. Simulation de la trajectoire la plus probable et de la trajectoire la plus à risque à J-4 pour le cyclone Batsirai passé à proximité de l'île de la Réunion en février 2022.

- # alerte cyclonique
- # modélisation WRF
- # cyclone
- # précipitations
- # vents
- # dommages assurés

mesure d'évaluer les dommages assurés avec une précision suffisante (Figure 4). Les données de précipitations et de vent fournies par cette simulation sont ensuite intégrées dans les modèles d'aléas CCR ruissellement et vent puis dans les modèles de dommages afin d'avoir les premières estimations des montants de sinistres attendus.

RÉSULTATS

En février 2022, la chaîne opérationnelle a été testée lors du passage du cyclone Batsirai à proximité de la Réunion. À J-4, les cumuls de précipitations et les vitesses de vents ont été modélisés à 4 km de résolution pour la trajectoire la plus probable et pour la trajectoire la plus à risque pour la Réunion (Figure 3). À J-1, une deuxième simulation WRF a été réalisée à 1 km de résolution (Figure 4), à partir de laquelle les modèles d'aléas et de dommages CCR ont permis d'estimer les dommages à hauteur de 33 à 45 M€ pour la trajectoire la plus probable et les conditions météorologiques associées.

Le 2 février 2022, l'île de la Réunion a été placée en alerte rouge cyclonique à 16 h, heure locale. Ce cyclone de catégorie 4 est passé suffisamment loin au nord de l'île de la Réunion, ce qui a engendré des dommages mineurs pour un cyclone de cette catégorie.

Il est cependant intéressant de comparer les prévisions du GFS utilisées dans la chaîne opérationnelle avec les prévisions des autres modèles disponibles : ICON le modèle allemand, ECMWF le modèle européen et ARPEGE et AROME les modèles français. 24 h avant le passage du cyclone à proximité de l'île de la Réunion, les trajectoires des différents modèles ainsi que l'estimation de l'inten-

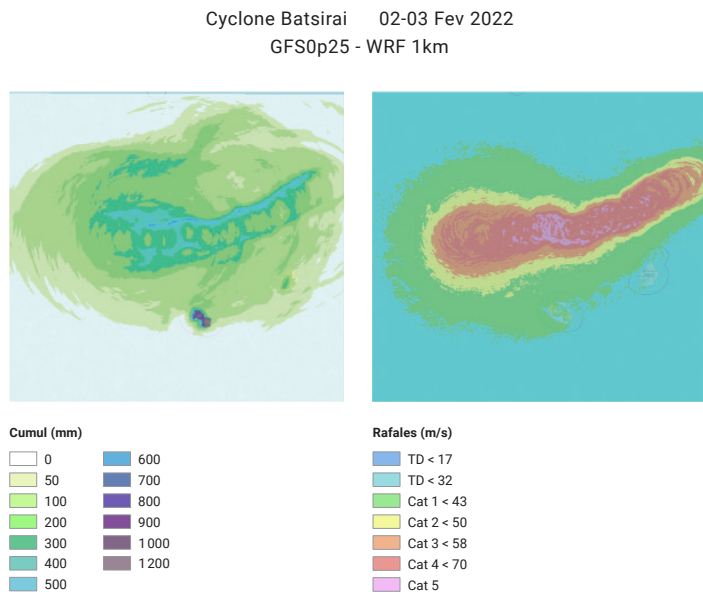


Figure 4 – Simulation de la trajectoire la plus probable à J-1 pour le cyclone Batsirai passé à proximité de l'île de la Réunion en février 2022.

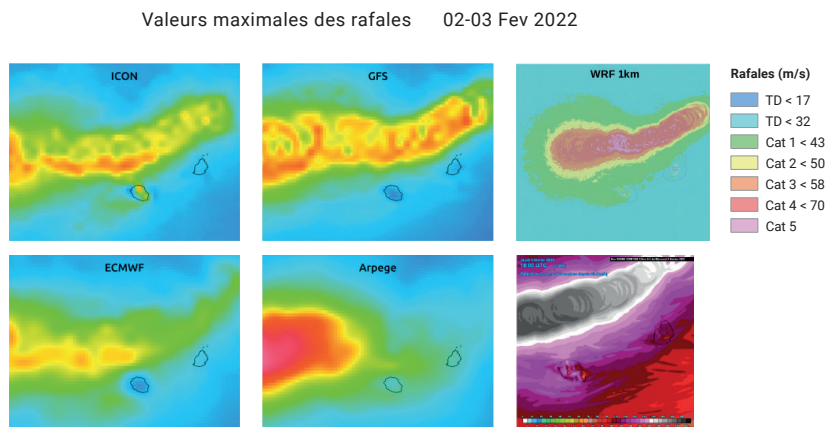


Figure 5 – Comparaison des valeurs maximales des rafales dans les prévisions des différents modèles à J-1 avant le passage de Batsirai.



LES PARTENAIRES

RiskWeatherTech et CCR sont partenaires, notamment dans le cadre des projets relatifs à la modélisation des conséquences du changement climatique sur les pertes assurées. Quant au bureau d'étude indépendant Atmoterra, ce projet a permis d'enclencher une première collaboration lors du montage du projet Actuarial modelling of financial losses from Flood Risk in Morocco - Selection n° 1267599, Banque Mondiale et de son développement.

sité des vents forts et du cumul de précipitations sont encore assez différentes (Figure 5).

CONCLUSION

Cette chaîne opérationnelle de veille de l'activité cyclonique, réalisée en collaboration avec RiskWeatherTech, permet de suivre en temps réel l'évolution des cyclones dans les différents bassins océaniques couverts par le système mis en place. Ce processus encore en phase de test, doit permettre d'anticiper les zones les plus touchées par les aléas vent et précipitations intenses (ruissellement) et les dommages consécutifs. L'objectif de CCR étant d'anticiper un événement majeur pour alerter les pouvoirs publics et les assureurs le plus en amont possible. Du fait de l'incertitude dans les trajectoires modélisées plusieurs jours à l'avance, ce système, une fois en place, doit être testé et validé avant d'être utilisé opérationnellement./

RÉFÉRENCES

1. WRF (Weather Research and Forecasting Model) est un modèle méso-échelle développé par le NCAR.
2. GFS (Global Forecast System) est le modèle de prévision météorologique du National Weather Service des États-Unis.
3. La prévision d'ensemble est une technique de prévision météorologique à l'aide de modèles numériques de prévision, qui consiste à perturber l'état initial du modèle avec des perturbations inférieures aux erreurs d'observation. En effet, les calculs effectués par un modèle numérique voient leur fiabilité diminuer à mesure que leur échéance s'éloigne du moment des relevés d'observation : ainsi
4. GEFS (Global Ensemble Forecast System) est un modèle météorologique créé par le NCEP qui génère 30 prévisions différentes, appelées les membres de l'ensemble, afin d'estimer les incertitudes liées à la modélisation atmosphérique.

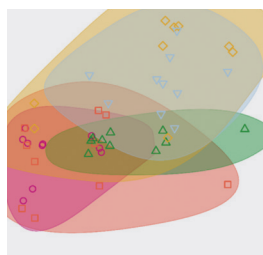
CITATION

L'Hévéder, B., et al., Alertes cycloniques et prévision des dommages assurés. In Rapport Scientifique CCR 2022 ; CCR, Paris, France, 2022, pp. 54-57

INTERNATIONAL



Des eaux de crue traversent la région méridionale de Ouarzazate au Maroc, le 22 novembre 2014.



Typologie d'événements à aléas multiples pour l'Europe occidentale • p.60

L'étude des interrelations des risques naturels souligne la complexité des processus climatologiques, géophysiques et hydrologiques extrêmes et pose de nouveaux défis scientifiques. Il est nécessaire de comprendre les vecteurs et déterminants menant aux interrelations entre aléas pour l'analyse de leur impact sur les territoires exposés. Cet article vise à aller au-delà de l'étude des paires d'aléas en proposant une typologie d'événements à multiple aléas : les réseaux multi-aléas. Cette typologie regroupe 16 aléas naturels (multi-aléas) de la Région atlantique européenne (RAE) et propose cinq réseaux multi-aléas.

Aloïs Tilloy et Bruce D. Malamud



Amélioration de la connaissance de l'exposition du bâti marocain aux inondations • p.64

Des travaux ont été réalisés par l'Agence Spatiale Européenne afin de détecter au mieux la distribution spatiale des bâtiments au Maroc ainsi que leurs spécificités. Les différentes zones d'habitations ont été cartographiées via l'utilisation d'images satellites et d'outils de machine learning. Ce travail participe à l'amélioration du modèle de dommages fourni par le consortium CCR, RiskWeatherTech et Atmorra en 2020 au FSEC lors d'un projet financé par la Banque mondiale.

Thomas Esch, Mattia Marconcini, Miguel A. Belenguer-Plomer, Alberto Lorenzo, Abderrahim Chaffai, Abderrahim Oulidi, Noureddine Filali, Ahmed Reda Hadji, Reda Aboutajdine, Fabio Cian, Jean-Philippe Naulin, Roxane Marchal, Thomas Onfroy et David Moncoulon

Typologie d'événements à aléas multiples pour l'Europe occidentale



Aloïs Tilloy^{1,2}, Bruce D. Malamud²

(1) Commission Européenne, Joint Research Centre, Italie

(2) Département de Géographie, King's College London, Angleterre

INTRODUCTION

À l'échelle mondiale et annuelle, les aléas naturels peuvent entraîner des pertes socio-économiques importantes. Cependant, ils sont loin d'être indépendants^[1,2]. L'interaction ou la concurrence de différents aléas peut entraîner un impact supérieur à la somme des effets des aléas pris indépendamment^[3]. Les événements extrêmes incluant plusieurs aléas sont généralement évoqués avec les termes événements multi-aléas (multi-hazard events) ou événements composés (compound events). Nous pouvons prendre deux exemples récents de tels phénomènes ayant impacté la France : - en 2010, la tempête Xynthia atteint la façade atlantique. La tempête n'était pas particulièrement extrême pour la saison, mais la coïncidence de vents extrêmes, de marées hautes et d'une forte houle, combinés à des sols déjà saturés ont causé d'importants dégâts ; - lors de l'été 2022, la superposition d'une sécheresse intense et des canicules successives, a contribué au développement de nombreux feux de forêts. Des études récentes ont entrepris de regrouper les aléas interdépendants en événements afin d'améliorer la compréhension des processus conduisant à des aléas multiples^[4,5]. Cet article s'inscrit dans cet effort, avec l'objectif de comprendre le paysage multi-aléas d'une région donnée^[6] en tenant compte de ses caractéristiques climatiques et géophysiques. Cet article propose d'identifier et de regrouper les aléas naturels en réseaux multi-aléas pertinents pour l'Europe occidentale. La région étudiée est définie

selon le concept de région biogéographique, soit une zone présentant des caractéristiques relativement homogènes en termes de biote (faune et flore) et de climat. L'Union européenne a délimité neuf régions biogéographiques pour l'Europe. Parmi celles-ci se trouve la Région atlantique européenne (RAE) qui comprend l'ensemble du Royaume-Uni et la partie ouest de la France (Figure 1) et qui a été étudiée dans cet article.

MÉTHODOLOGIE

Sélection des aléas

Chaque année, la RAE est exposée à une grande variété d'aléas naturels. Par exemple, alors que les basses terres côtières sont plus vulnérables aux tempêtes extratropicales, les zones montagneuses sont plus sujettes aux glissements de terrain. Les parties méridionales (Espagne, Portugal, France) de la RAE peuvent connaître d'importants incendies de forêt en été, tandis que les plaines de l'Angleterre, du nord de la France et de la vallée du Rhin sont exposées aux inondations fluviales. L'identification des risques naturels pertinents pour la RAE est effectuée sur trois critères principaux : (i) la fréquence d'occurrence, (ii) la pertinence spatiale (localisation), (iii) le potentiel d'impact sur les infrastructures énergétiques (production, distribution). Pour chaque critère, chaque aléa naturel est évalué par une note semi-quantitative à trois niveaux : (-) non mentionné, (*) mentionné, (**) mentionné et impor-

tant. Ces informations sont issues de différentes sources (Emergency Events Database EM-DAT, Spatial Effects and Management of Natural and Technological Hazards in Europe et Energy Technologies Institute) et de cartes d'aléas. En combinant les scores de pertinence sur chacun de ces trois critères, 16 aléas naturels avec un score de pertinence globale d'au moins *** ont été sélectionnés pour caractériser le paysage multi-aléas de la RAE (Tableau 1).

Création des réseaux multi-aléas

Les 16 aléas naturels (Tableau 1) sont groupés en réseaux multi-aléas. Un réseau multi-aléas est un ensemble d'aléas interdépendants susceptibles d'être déclenchés par les mêmes processus et se produisant dans un espace-temps donné. Ils peuvent être liés à des concepts développés au cours des deux dernières décennies pour comprendre les événements à multiples aléas : les prédicteurs (processus météorologiques influençant l'intensité et les dynamiques des événements composés), facteurs déclencheurs (facteurs déterminant la fréquence et l'intensité des aléas); scénarios (événement conceptuel utilisé pour la conception d'infrastructures), événements physiques (processus physiques déterminant les aléas); événements génériques (classification de groupes d'aléas).

À partir du rapport sur la classification des aléas naturels de l'Integrated Research on Disaster Risk (IRDR) et de la revue de littérature de Tilloy et al.^[7], il est possible d'élaborer les réseaux multi-aléas suivants :

1. Cyclone extratropical (hydrométéorologique)
2. Orage convectif (hydrométéorologique)
3. Mouvement de terrain (géophysique)
4. Aléas secs composés (hydrométéorologiques)

5. Aléas froids composés (hydrométéorologiques)

Chaque aléa répertorié dans le Tableau 1 appartient à un (ou plusieurs) des cinq réseaux définis précédemment. Les cinq réseaux multi-aléas utilisés dans cette thèse et les aléas naturels qu'ils incluent sont résumés dans la Figure 2.

RÉSULTATS

Les dynamiques spatio-temporelles et les interactions qui définissent les cinq réseaux multi-aléas sont présentées dans cette partie. Les hypothèses concernant les interrelations des aléas au sein de chaque réseau multi-aléas sont principalement basées sur des travaux antérieurs^[2-7]. Les descriptions de chaque réseau et interrelation d'aléas sont étayées à l'aide de la littérature et d'un catalogue de 50 événements à multiple aléas historiques en Europe occidentale.

Catalogue d'événements multi-aléas historiques (MH)

Le catalogue contient un total de 50 événements historiques qui se sont produits dans les pays de la RAE (10 événements pour chacun des cinq réseaux multi-aléas). Il est basé sur 32 sources traitant des aléas présentés dans le Tableau 1 (catalogues d'aléas uniques et d'événements hydrométéorologiques, de bases de données sur les catastrophes naturelles et d'une revue complète de la littérature). Les aléas, les interrelations, l'étendue spatiale et la durée de chaque événement multi-aléas sont identifiés. L'échelle spatiale correspond à l'empreinte totale de l'événement ayant provoqué des dommages selon les sources examinées. La durée des événements est également extraite de la littérature, elle est exprimée en jours et associée à la durée des

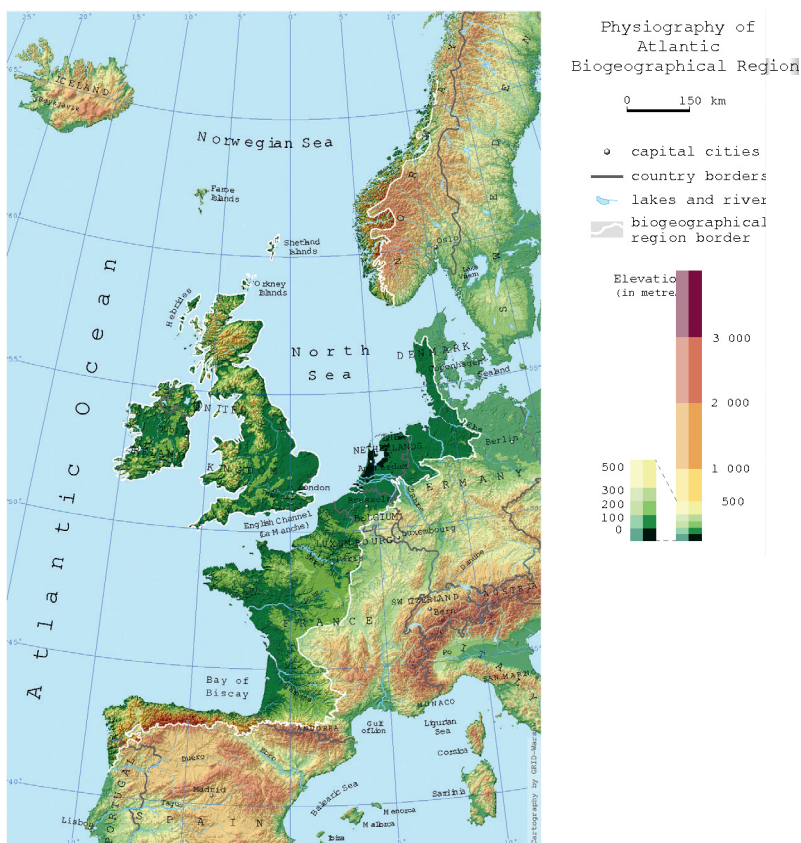


Figure 1 – Carte physiographique de l'Europe occidentale. La région biogéographique atlantique européenne est surlignée en blanc (EEA, 2002)

Catégories d'aléas	Aléas	Abbréviation	(i)	(ii)	(iii)	Pertinence globale
Géophysique	1.1 Tremblement de terre	EQ	*	*	**	****
	1.2 Glissement de terrain	LS	*	**	-	***
Atmosphérique	2.1 Foudre	LI	**	*	*	****
	2.2 Pluie extrême	RA	**	**	**	*****
	2.3 Vent extrême	WI	**	**	*	*****
	2.4 Chaleur extrême	EH	**	*	**	****
	2.5 Froid extrême	EC	**	*	**	****
	2.6 Grêle	HA	**	*	*	****
	2.7 Neige extrême	SN	*	*	*	***
Hydrologie	3.1 Surcote marine	SS	*	**	**	*****
	3.2 Vagues extrêmes	WA	**	*	*	***
	3.3 Inondation de rivière	FL	*	**	**	*****
	3.4 Tsunami	TS	*	**	**	*****
	3.5 Sécheresse	DR	*	**	*	****
	3.6 Excès d'humidité du sol	SO	*	**	-	***
Biophysique	4.1 Feu de forêt	WF	**	**	*	*****

Tableau 1 – Les 16 aléas pertinents pour la RAE répartis en quatre catégories d'aléas naturels : (1) géophysiques, (2) atmosphériques, (3) hydrologiques, (4) biophysiques. Les scores de pertinence sont affichés pour (i) la fréquence d'occurrence ; (ii) pertinence spatiale ; (iii) impact sur les infrastructures énergétiques. La pertinence globale est la somme des 3 scores de pertinence. Les abréviations utilisées pour les aléas naturels correspondent à leurs appellations en anglais.

- # multi-aléa
- # Europe
- # aléas composés
- # typologie
- # évènements extrêmes

impacts rapportés. La Figure 3 souligne les variations d'échelles spatiales et temporelles inter-réseaux (tempête convectives localisée et courtes vs. aléas secs vastes et persistants) mais aussi intra-réseaux (aléas froids brefs ou durables).

Réseaux multi-aléas

Les cinq réseaux multi-aléas sont associés à un nombre variable d'aléas, allant de trois pour les mouvements de terrain à sept pour les orages convectifs. Il est important de noter que certains aléas naturels se retrouvent dans plusieurs réseaux multi-aléas. Par exemple, les précipitations extrêmes et les vents extrêmes, font tous deux parties des tempêtes extratropicales et des tempêtes convectives. La relation entre ces deux aléas diffère selon les réseaux multi-aléas auxquels ils appartiennent.

Chaque réseau d'aléa se voit attribuer un aléa dominant dérivé du catalogue d'événements multi-aléas historiques. L'aléa dominant est celui le plus susceptible de se produire et le plus interconnecté au sein d'un réseau (Tableau 2). Une fois les réseaux multi-aléas et leurs aléas associés définis, on peut se concentrer sur la nature des interrelations entre les aléas et leurs réseaux d'interrelations. La classification réalisée par Tilloy et al.^[7], est utilisée pour développer les réseaux d'interrelations. Trois types d'interrelations sont considérés :

- 1) "Déclenchement (ou cascade)" : un aléa en déclenche un autre ;
- 2) "Changement de condition" : Un aléa modifie la probabilité d'un deuxième aléa en modifiant les conditions environnementales ;
- 3) "Aléas composés" : Différents aléas découlent d'un même phénomène.

Les interrelations "déclenchement" et "changement de condition" impliquent une causalité et sont donc représentées

Aléas	Réseaux d'aléas	Tempête convective	Aléas secs composés	Mouvements de terrain	Cyclone extratropical	Aléas froids composés
1.1 Tremblement de terre						
1.2 Glissement de terrain						
2.1 Foudre						
2.2 Pluie extrême						
2.3 Vent extrême						
2.4 Chaleur extrême						
2.5 Froid extrême						
2.6 Grêle						
2.7 Neige extrême						
3.1 Surcote marine						
3.2 Vagues extrêmes						
3.3 Inondation de rivière						
3.4 Tsunami						
3.5 Sécheresse						
3.6 Excès d'humidité du sol						
4.1 Incendie de forêt						

Figure 2 – Les cinq réseaux multi-aléas évoqués et les aléas associés répartis en quatre catégories d'aléas naturels : (1) géophysiques, (2) atmosphériques, (3) hydrologiques, (4) biophysiques

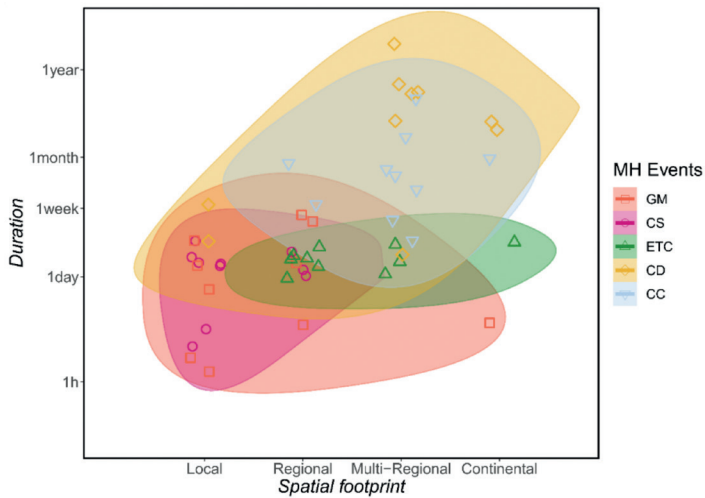


Figure 3 – Échelles spatiales (spatial footprint) et temporelles (durée) de 50 événements multi-aléas divisés en 5 réseaux. Mouvements de terrain (GM), Tempête convective (CS), Cyclone extratropical (ETC), Aléas combinés secs (CD) et Aléas combinés froids (CC).

Réseau multi-aléas	Définition	Aléas associés	Interrelations répertoriées
Mouvement de terrain	Événements au cours desquels des quantités substantielles de matière (sol ou plans d'eau) sont déplacés par un phénomène géomorphologique	EQ , LS, TS	5
Tempête extratropicale	Événements météorologiques à basse pression qui se produisent dans les latitudes moyennes de la terre	WI , RA, LS, WA, SS, FL, SO	13
Orage convectif	Événement météorologique, principalement contrôlé par l'humidité, la température et le vent ascendant	LI , RA, WI, HA, LS, FL, WF	14
Aléas composés sec	Événement hydrométéorologique qui implique plusieurs aléas secs	DR , EH, WF, WI	5
Aléas composés froids	Événement hydrométéorologique qui implique plusieurs aléas hivernaux	EC , SN, FL, WI	3

Tableau 2 – Définition des cinq réseaux multi-aléas, des aléas qui les composent, de leur aléa dominant (en gras) et de leur nombre d'interrelations. Les abréviations utilisées pour la dénomination des aléas naturels correspondent à celles introduites dans le Tableau 1.



LES PARTENAIRES

Ces recherches ont été effectuées dans le cadre de la thèse de doctorat d'Aloïs Tilloy au sein du département de Géographie du King's College de Londres. Les travaux ont été financés par EDF R&D et effectués en collaboration avec l'équipe Natural Hazards du EDF UK R&D Centre. L'auteur travaille à présent au centre commun de recherche de la Commission Européenne.

par des flèches alors que les "aléas composés" dénotent une dépendance non causale (Figure 4). Dans la Figure 4, chacun des cinq réseaux multi-aléas définis dans le Tableau 2 est représenté graphiquement avec les aléas qui le compose et les interrelations entre ces aléas. Lorsque deux aléas peuvent avoir deux types d'interrelations, les deux types sont représentés. Par exemple, une sécheresse déjà existante peut accentuer une vague de chaleur (changement de condition) ou former un aléa composé avec cette dernière.

CONCLUSION

Les réseaux multi-aléas sont des événements génériques ayant pour objectif de fournir un cadre initial pour modéliser les interrelations entre plusieurs aléas. Ceux-ci représentent une avancée par rapport aux matrices d'interrelations en associant plus de deux aléas. Cependant, la transition

vers une approche quantitative requiert plus de bases de données répertoriant des aléas multiples et des méthodes de modélisation multivariées tels que les réseaux bayésiens ou les grappes de copule. Le concept d'aléa dominant développé dans cet article crée de nouvelles possibilités d'analyses multivariées. L'étude de l'évolution d'aléas « satellites » et de leurs interrelations par rapport à un aléa dominant « central » permettrait de réduire la complexité de la modélisation. La typologie développée synthétise les connaissances interdisciplinaires sur les interrelations entre aléas, rassemblant les aléas atmosphériques, hydrologiques, géophysiques et biophysiques d'une région donnée. Enfin, cet article fournit une vision claire des interrelations entre aléas susceptibles de provoquer des dégâts dans la RAE. Le catalogue d'événements multi-aléas historiques ainsi que l'ensemble des références sont disponibles dans la thèse de Aloïs Tilloy^[8].

RÉFÉRENCES

- Hewitt, K. & Burton, I. Hazardousness of a place: A regional ecology of damaging events. (University of Toronto Press, 1971).
- Gill, J. C. & Malamud, B. D. Reviewing and visualizing the interactions of natural hazards. *Rev. Geophys.* 52, 680–722 (2014).
- Terzi, S. et al. Multi-risk assessment in mountain regions: A review of modelling approaches for climate change adaptation. *J. Environ. Manage.* 232, 759–771 (2019).
- Zscheischler, J. et al. A typology of compound weather and climate events. *Nat. Rev. Earth Environ.* 1, 333–347 (2020).
- Schauwecker, S. et al. Anticipating cascading effects of extreme precipitation with pathway schemes - Three case studies from Europe. *Environ. Int.* 127, 291–304 (2019).
- Gill, J. C., Malamud, B. D., Barillas, E. M. & Noriega, A. G. Construction of regional multi-hazard interaction frameworks, with an application to Guatemala. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 20, 149–180 (2020).
- Tilloy, A., Malamud, B. D., Winter, H. & Joly-Laugel, A. A review of quantification methodologies for multi-hazard interrelationships. *Earth-Science Rev.* 196, 102881 (2019).
- Tilloy, A., Understanding and modelling extreme multi-hazard events, Phd theses, 2021, [https://kclpure.kcl.ac.uk/portal/en/theses/understanding-and-modelling-extreme-multihazard-events\(3fe54436-4375-4530-a4fe-24c6992c09bf\).html](https://kclpure.kcl.ac.uk/portal/en/theses/understanding-and-modelling-extreme-multihazard-events(3fe54436-4375-4530-a4fe-24c6992c09bf).html)

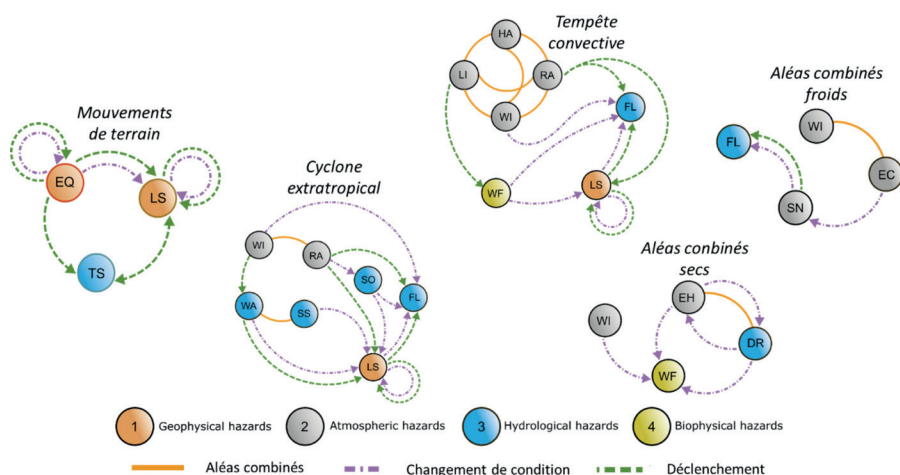


Figure 4 – Les cinq réseaux multi-aléas schématisés avec les trois types d'interrelations entre aléas à l'intérieur des réseaux représentés. Les abréviations utilisées pour la dénomination des aléas naturels correspondent à celles introduites dans le Tableau 1.

CITATION

Tilloy et al., Typologie d'événements à aléas multiples pour l'Europe occidentale. In *Rapport Scientifique CCR 2022* ; CCR, Paris, France, 2022, pp. 60-63

Amélioration de la connaissance de l'exposition du bâti marocain aux inondations



Thomas Esch¹, Mattia Marconcini¹, Miguel A. Belenguer-Plomer², Alberto Lorenzo², Abderrahim Chaffai³, Abderrahim Oulidi³, Noureddine Filali³, Ahmed Reda Hadji³, Reda Aboutajdine⁴, Fabio Cian⁴, Jean-Philippe Naulin⁵, Roxane Marchal⁵, Thomas Onfroy⁵, David Moncoulon⁵

(1) German Remote Sensing Data Center (DFD) of the German Aerospace Center (DLR), Oberpfaffenhofen, D-82234 Weßling, Germany

(2) Indra Sistemas S.A., Ctra. Loeches, 9, 28850, Torrejón de Ardoz, Madrid, Spain

(3) Fonds de solidarité contre les événements catastrophiques (FSEC), RDC, Immeuble D, Résidence Sun City, rue Al Bourtoukal, Rabat, Morocco

(4) The World Bank, Washington, DC, USA

(5) Département R&D Modélisation, CCR

INTRODUCTION

Le territoire marocain est particulièrement exposé aux risques de séisme et d'inondation. Dans ce contexte, le Royaume du Maroc a mis en place, avec l'appui de la Banque mondiale (BM), un système dual de couverture contre ces aléas, mobilisant d'une part les capitaux privés pour développer le marché de l'assurance privée, complété par un mécanisme de solidarité indemnisant les populations vulnérables dans l'incapacité de s'assurer. Ce mécanisme de solidarité est porté par le Fonds de solidarité contre les événements catastrophiques (FSEC), mis en place et opérationnel depuis 2020.

Étant donné son mandat, le FSEC doit s'appuyer sur une compréhension fine et granulaire du risque d'inondation et de sa répartition sur le territoire marocain. Un premier modèle de dommages inondation a été développé dans le cadre d'un appel d'offre lancé par la Banque mondiale en 2020, confié au consortium formé par Atmoterra, RWT et CCR. Depuis la livraison du modèle, les échanges

continus entre les partenaires ont souligné la robustesse du module d'aléa, tout en mettant en exergue les limitations dues à un module d'exposition insuffisamment granulaire et à des courbes de vulnérabilité insuffisamment spécifiques au Maroc.

Un nouveau projet portant sur la mise à jour des données du bâti marocain a débuté en partenariat avec le FSEC (Fonds de solidarité contre les événements catastrophiques), l'Agence spatiale européenne (ESA), la Banque mondiale et CCR. Les travaux ont pour objectifs de mieux estimer l'exposition (ESA) et de développer des courbes de vulnérabilité spécifiques au Maroc (CCR). Ces améliorations permettront d'augmenter la fiabilité de l'évaluation des dommages dus aux inondations en vue du placement d'un outil de transfert du risque sur les marchés internationaux.

Cet article présente la méthode et les résultats portant sur la cartographie par télédétection des bâtiments à l'échelle nationale.

MÉTHODOLOGIE

Le modèle d'impact des inondations repose sur 3 modules. Un module d'aléa pour caractériser de manière physique les inondations, un module d'exposition pour identifier les types de biens ainsi que leur nature (particulier, professionnel, maison, appartement, etc.) et leur valeur. Un module de vulnérabilité établit le lien entre la nature et la valeur de l'entité exposée et le niveau de sévérité de chaque scénario d'aléa. La combinaison de ces trois modules dans le modèle d'impact permet d'estimer les montants de dommages associés.

Module d'exposition

Le module d'exposition permet de définir la répartition spatiale des différents types de bâti afin de distribuer de façon adéquate la valeur totale exposée estimée. Le module d'exposition développé initialement avait été construit à partir de multiples sources de données et notamment du recensement de 2014 effectué par le Haut-commissariat au Plan sur les ménages Marocain. Afin de

localiser les ménages, une méthode de tirage aléatoire avait été mise en place pour déterminer la distribution spatiale du bâti. Cette méthode reposait sur les bâtiments Open Street Map ainsi que les données issues de traitement satellite qui identifiaient le nombre d'habitants à une certaine résolution.

Pour améliorer le module d'exposition et mieux comprendre la distribution spatiale des bâtiments au Maroc, l'ESA a mobilisé ses capacités innovantes d'observation de la Terre pour la cartographie de l'exposition dans le cadre du projet GDA Disaster Resilience^[1]. Les images satellites Sentinel-1 et Sentinel-2 de l'ASE ont été analysées pour une évaluation spatiale granulaire des bâtiments exposés aux risques d'inondation. Une cartographie des types de bâtiments a été réalisée sur le secteur de Rabat-Salé-Kenitra sélectionné comme site d'étude. Les zones d'habitation délimitées au format shapefile visualisable sous SIG sont basées sur le réseau de rues OSM+Facebook et le produit World Settlement Footprint 2019^[2]. Un ensemble d'échantillons collectés manuellement sur les typologies de bâtiments a servi de données d'entrée pour l'entraînement d'un algorithme d'apprentissage automatique Random Forest (RF) (Tableau 1). Sur la base du modèle RF résultant, l'ensemble du pays du Maroc a été classé selon la typologie de bâtiment suivante (Tableau 1) : villa, appartement, maison marocaine, zones rurales, établissements informels, maisons rurales et autres. Ces typologies et leur répartition spatiale seront utilisées pour distribuer adéquatement la valeur exposée du bâtiment dans l'espace.

Module de vulnérabilité

Le module de vulnérabilité permet de mieux comprendre les effets adverses des inondations sur le bâti exposé, en

Numéro	Typologie
1	Villas
2	Appartements
3	Maisons marocaines
4	Établissements informels
5	Maisons rurales
6	Autres

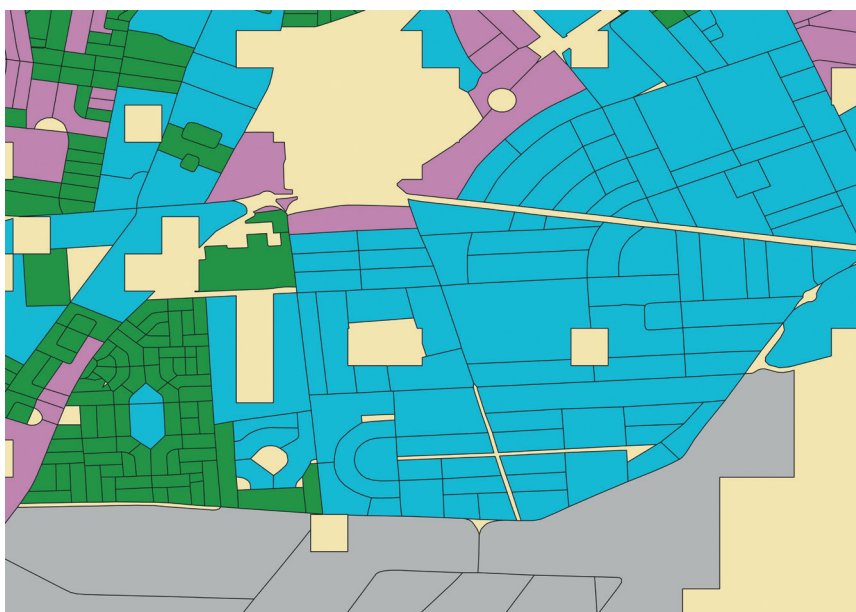
Tableau 1 – Typologie des bâtiments retenue pour le modèle de dommages inondation

fonction de sa typologie et de la sévérité d'une inondation donnée. Le module de vulnérabilité utilisé dans la première étude lancée en 2020 mobilisait des courbes de vulnérabilité construites à dire d'expert et issues du modèle MnhPRA (Morocco Natural Hazards Probabilistic Risk Analysis), premier outil de modélisation multirisques déployé au Maroc. Afin d'enrichir et d'affiner le module de vulnérabilité et l'adapter aux spécificités des constructions du Maroc, CCR développera une approche empirique statistique pour calibrer de nouvelles courbes de vulnérabilité sur la base de données à collecter. Les résultats de cette collecte permettront de recalibrer des courbes de dommages spécifiques à chaque type de risque et pertinentes pour le territoire marocain et les besoins du FSEC. Une attention particulière sera portée au seuil de dommages à partir duquel un bien devient inhabitable. En effet, le régime du Fonds de solidarité aux victimes des inondations indemnise à l'heure actuelle les victimes dont la résidence principale devient inhabitable. Ce seuil est donc important pour ne pas prendre en compte les multiples habitations qui peuvent être légèrement endommagées par une inondation.

exposition
vulnérabilité
bâtiment
inondation
Maroc
télédétection

RÉSULTATS

Le produit de classification des bâtiments permet de connaître la typologie des établissements sur la base d'une exigence personnalisée, en considérant des classes très spécifiques telles que les maisons marocaines (Figure 1). Ce nouveau développement basé sur l'observation de la Terre démontre, une fois de plus, l'énorme potentiel des données acquises par les satellites, qui permettent de cartographier de manière rapide, synoptique et peu coûteuse les typologies de bâtiments à l'échelle d'un pays et, par conséquent, d'estimer non seulement la valeur financière de chaque bien mais aussi la vulnérabilité aux risques naturels. Le produit est destiné à devenir un outil efficace pour soutenir l'allocation de fonds de récupération rapide dans le cas d'inondations, où les coûts varient en fonction de la typologie spécifique des bâtiments touchés par l'événement donné. La précision de la classification finale peut varier en fonction de la quantité, de la distribution spatiale et de la fiabilité des informations de référence pour les différentes classes ciblées. De plus, les performances pourraient être partiellement affectées par les différentes résolutions spatiales et l'horodatage des différents ensembles de données utilisés. Ces résultats seront utilisés dans le cadre du calibrage de courbes de dommages spécifiques à chaque type de risque et répondant aux besoins du FSEC. Une attention sera portée au seuil de dommages à partir duquel un bâtiment devient inhabitable, qui est un élément central du régime marocain d'indemnisation des inondations.



Urban Clusters
Villas
Apartments
Moroccan Houses
Informal Settlements
Rural Housing
Others

Figure 1 – Exemple de résultat des travaux de télédétection sur une zone urbaine et la classification correspondante

LES PARTENAIRES

Dans la continuité du projet financé en 2020 par la Banque mondiale, CCR et le FSEC souhaitent poursuivre leur collaboration sur le long terme pour le développement du modèle Cat. L'intégration de ces différents partenaires participe à l'amélioration des données et des outils utilisés dans le modèle.

CONCLUSION

La modélisation précise des dommages est un élément clé pour identifier les montants en jeu dans le processus d'indemnisation, pour les anticiper de manière adéquate et pour réduire les coûts de placement de la réassurance. Plus généralement, les travaux présentés dans cet article contribueront à améliorer cette chaîne de modélisation, dans la dynamique du processus d'amélioration continue, initié dès les premiers travaux de modélisation. D'autres perspectives d'amélioration pourront être envisagées ultérieurement, comme l'amélioration de la simulation de l'aléa grâce à l'apport d'un modèle numérique de terrain (MNT) plus détaillé, la prise en compte du ruissellement et l'incorporation d'infrastructures de réduction du risque (digues, barrages, etc.). La conception de courbes de vulnérabilité sur mesure pour le Maroc pourrait également bénéficier d'une approche d'ingénierie structurelle, complémentaire à l'approche statistique présentée dans cet article./

RÉFÉRENCES

1. GDA Disaster Resilience, <https://gda.esa.int/thematic-area/disaster-resilience/>
2. German Aerospace Center (DLR) World Settlement Footprint & Evolution, <https://gee-community-catalog.org/projects/wsf/>

CITATION

Esch et al., Amélioration de la connaissance de l'exposition et de la vulnérabilité aux inondations du bâti au Maroc. In Rapport Scientifique CCR 2022 ; CCR, Paris, France, 2022, pp. 64-67

PRIX CCR CAT NAT

Inauguré en 2015, le Prix CCR Cat Nat récompense une thèse de doctorat innovante et originale consacrée à la connaissance des catastrophes naturelles et son application aux métiers de l'assurance et de la prévention des risques.

Le Prix CCR Cat Nat est ouvert au niveau européen et aux thématiques de recherche dans le domaine des géosciences, ainsi que des sciences économiques et sociales. Pour candidater au Prix CCR Cat Nat 2023, les jeunes chercheurs doivent avoir présenté ou soutenu une thèse entre le 1^{er} juillet 2021 et le 31 décembre 2022. Le lauréat est désigné par un jury composé d'universitaires, d'experts du secteur de la recherche et de l'assurance, et de représentants de CCR.

Lors de la Journée CCR CAT, le rendez-vous annuel du marché français de l'assurance, le lauréat présente ses travaux et se voit remettre le prix doté d'une récompense de 5 000 €./



Lauréate 2021
Accédez à la vidéo

Pour plus d'information
prixccrcat@ccr.fr



Lauréat 2022
Accédez à la vidéo

Lauréat 2022

Aloïs TILLOY, « Comprendre et modéliser les événements extrêmes à multiples aléas naturels ».

Lauréate 2021

Odile PLATTARD, « Repenser l'évacuation d'une population littorale en milieu urbain en contexte multi-risques : le modèle STEP ».

Lauréate 2020

Audrey MICHAUD-DUBUY, « Dynamique des éruptions pliniennes : réévaluation de l'aléa volcanique en Martinique ».

Lauréate 2019

Fanny BENITEZ, « Faire face ou vivre avec les catastrophes ? Capacités d'adaptation et capacités dans les trajectoires de résilience individuelles et territoriales au sein de l'espace Caraïbe ».

Lauréat 2018

Kenji FUJIKI, « Etude prospective des impacts sociaux d'une inondation majeure en région Ile-de-France. Disparités socio-spatiales dans la prise en charge des populations franciliennes en situation de crise et post-crise : une analyse cartographiée et quantifiée des besoins des ménages, de l'évacuation à la reconstruction ».

Lauréat 2017

Elif ORAL, « Modélisation multi-dimensionnelle de la propagation des ondes sismiques dans les milieux linéaires et non-linéaires ».

Lauréate 2016

Vanessa MULOT, « Les submersions marines : Nouveaux Enjeux, nouvelles pratiques juridiques ».

Lauréat 2015

Camille ANDRÉ, « Analyse des dommages liés aux submersions marines et évaluation des coûts induits aux habitations à partir de données d'assurance ».



Conférences en ligne



Conférences sur site



22 JANVIER

— Colloque « Contribution du spatial face aux enjeux de l'eau », SHF et CNES

Ce colloque propose de faire un bilan sur les nouveaux services basés sur des systèmes d'observation et de mesure dans le domaine de l'eau. CCR a présenté « L'estimation des débits et suivi des inondations ».

RENNES

10 MARS

— Qualifications rennaises au concours « Ma thèse en 180 secondes », École doctorale de Rennes-Bretagne

Ce concours a pour objectif de promouvoir la vulgarisation scientifique. Dorothee Kapsambelis a présenté sa thèse « La modélisation à horizon 2050 des risques extrêmes de sécheresse et d'excès d'eau liés au dérèglement climatique sur les productions végétales en France. Impact sur l'évolution du modèle assurantiel » et a reçu le 3^e prix du Jury.

SAINT-ETIENNE

12 MAI

— Soutenance de thèse de Tran Vivi Elodie Perrin

Cette thèse ARMINES en collaboration avec le BRGM, CCR et l'école des Mines de Saint-Etienne s'intitule « Méta-modélisation et analyse de sensibilité pour les modèles avec sortie spatiale. Application aux modèles de submersion marine ».

PARIS 6^E

21 MAI

— 13th International Workshop on Rare-Event Simulation, ReSIM

Lors de ce congrès international qui réunit des chercheurs académiques et du monde de l'entreprise travaillant dans le domaine de la simulation d'événements rares, CCR a présenté « Modelling flood and drought insured losses at current and future climate conditions in France » et a participé à la table ronde « Climate Risks ».

PARIS 16^E

27 MAI

— Ateliers de travail « Les points forts et les limites du système français de gouvernance des risques d'inondation », AFPCN, Université Paris-Dauphine

Ce colloque a pour objectif de rassembler les différents acteurs sur le sujet. CCR a fait une intervention intitulée « Peut-on objectiver les orientations prises en matière de prévention des risques d'inondation ? ».



7 JUIN

— JDS 2021 : 52^e journées de Statistique, SFdS

Lors de ce webinaire autour des méthodes statistiques, CCR a fait une présentation sur le « Krigeage Monte-Carlo : prise en compte de données localisées aux mêmes points ».

▶ **8** JUIN

— **5th European Climate Change Adaptation Conference, European Commission**

Cette conférence organisée par la Commission européenne a pour objectif de présenter les mesures d'adaptation pour accroître la résilience des territoires en Europe dans un contexte d'augmentation des risques climatiques. CCR est intervenue pour présenter « Climate knowledge and information as enablers of climate action ».

▶ **25** JUIN

— **Webinaire « Journée d'échanges techniques sur la gestion du risque inondation sur le bassin Rhône-Méditerranée », DREAL de bassin Rhône-Méditerranée**

Ce webinaire a pour objectif de présenter les principales évolutions au projet de PGRI 2022-2027 sur la thématique du changement climatique et son impact sur les risques naturels. CCR a présenté « Les conséquences du changement climatique en France avec un zoom sur le bassin RMC ».

▶ **16** SEPTEMBRE

— **Webinaire « Changement climatique et inondations sur l'arc Méditerranéen : quels niveaux de connaissance et d'anticipation des effets ? », AFPCN**

Lors de ce webinaire, CCR a fait une présentation intitulée « Conséquences du changement climatique sur le coût des catastrophes naturelles à l'horizon 2050 sur l'ArcMed et investissements publics en matière de prévention ».

• **9** JUIN

PARIS 8^E — **Conférence Spatial Data Science, Université de Lausanne**

Au cours de cette conférence, CCR a présenté ses travaux portant sur « Monte-Carlo Kriging: An application to insurance data ».

• **25** JUIN

NANCY — **Soutenance de thèse de Corentin Gouache**

Cette thèse en partenariat avec l'Université de Lorraine, et CCR s'intitule « Générateur stochastique de séismes en contexte de sismicité faible à modérée : des données à l'aléa. Cas de la France métropolitaine ».

• **2**
3 SEPTEMBRE

PARIS 5^E — **Conférence « Convergences vers risques climatiques à l'horizon 2050 » organisée au Cercle Lebrun, IXI-Groupe**

Cette journée réunit des intervenants de différents milieux professionnels pour aborder la question de la fréquence des risques climatiques dans le futur, le rôle des assureurs en matière de prévention et la gestion des sinistres. CCR est intervenue dans une table ronde portant sur « Les enjeux structurels liés aux risques climatiques ».

▶ **16** JUIN

— **Journée CCR CAT « Le régime CAT NAT : Enjeux et Adaptations », CCR**

Cette journée est considérée comme l'un des rendez-vous annuels du marché français de l'assurance. La journée s'est articulée autour de tables rondes permettant des moments d'échange sur la gestion des sinistres, les risques climatiques, la prévention et des ateliers de R&D présentant les différents travaux de CCR avec ses partenaires.

▶ **29** JUIN

— **Conférence « Le retour d'expérience au service de l'amélioration continue de la prévention des risques », CEREMA**

Au cours de ce webinaire consacré au retour d'expérience après la survenance de catastrophes naturelles sur les territoires français, CCR a présenté « Quel est l'impact du retour d'expérience pour l'estimation anticipée des dommages des catastrophes naturelles ».

▶ **30** SEPTEMBRE

— **Commission « Hydrologie et les inondations », Commission fluviale et internationale pour la protection de la Moselle et de la Sarre**

CCR a été sollicitée pour présenter « Le régime Cat Nat français et la politique de prévention des inondations en France » afin d'alimenter les réflexions en cours sur l'indemnisation des sinistrés dans les pays touchés par l'inondation de juillet 2021.

▶ 5 OCTOBRE

— Journée Scientifique « Quelles transitions pour l'eau face au changement climatique », Météo & Climat Toulouse-Occitanie

Cette journée est dédiée au décodage des trois derniers rapports du GIEC avec un focus sur la ressource en eau. CCR a participé à une table ronde intitulée « Changement climatique : quelles menaces pour l'eau ? ».

▶ 17 NOVEMBRE

— Webinaire Chaire PARI, ENSAE, Sciences Po

Lors de ce webinaire, CCR a présenté « Application du machine learning à la modélisation de la sécheresse ».

• 2 DÉCEMBRE

PARIS 2^E

— Conférence « Changement climatique : à quel point les assureurs vont-ils devoir réviser leurs modèles ? », Seabird

Cette conférence a pour objectif d'aborder les conséquences du changement climatique en termes d'évolution des modèles climatiques pour l'assurance. CCR a participé à une table ronde sur « La modélisation climatique : après le premier exercice pilote de l'ACPR ».

▶ 15 OCTOBRE

— Conférence « SIG 2021 », ESRI France

Pour la conférence 2021, CCR est intervenue deux fois sur les thématiques suivantes : « Comment le changement climatique modifie-t-il l'analyse et la gestion du risque sur les biens et les personnes » et « La couche de synthèse de l'impact des inondations en France métropolitaine ».

▶ 18 NOVEMBRE

— 8^e édition du Forum national de la gestion durable des eaux pluviales, Réseau Eau IdealCo et ADOPTA

Ce forum a pour objectif de former les collectivités et les professionnels sur la gestion durable de l'eau de pluie et de promouvoir les techniques alternatives existantes. CCR a dans ce cadre été conviée à présenter une introduction sur « Les grands enjeux du moments ».

• 19 OCTOBRE

PARIS 2^E Conférence « Défis des assureurs entre crise et opportunités », AGEFI

Lors de cette journée autour des nouveaux défis auxquels doivent faire face les assureurs, CCR a fait une présentation intitulée « Comment le secteur de l'assurance se prépare-t-il à l'intégration des risques climatiques dans Solvabilité 2 et les scénarios ORSA ? ».

• 1^{ER} DÉCEMBRE

PARIS 8^E — Conférence débat ESG, Lazard Frères

Lors de cette journée de conférence, CCR a réalisé une présentation intitulée « Les problématiques que soulève l'ESG pour l'investisseur : enjeux, éthique professionnelle, solutions ».



Conférences en ligne



Conférences sur site

▶ 27 JANVIER

— Séminaire « Geolearning », Mines Paris Tech

Lors de ce séminaire, CCR a présenté « Modélisation des conséquences économiques des risques naturels ».

▶ 18 FÉVRIER

— Groupe de travail ARC, AXA et ENSAE

Lors de ce groupe de travail, CCR a présenté « Application du machine learning à la modélisation de la sécheresse ».

● 1^{ER} FÉVRIER

PARIS 7^E — Remise du Prix des Sciences du Risque, Fondation Optimind

Cet événement récompense des travaux de fin d'études permettant de faire avancer notre connaissance sur les risques assurantiels. Corentin Gouache a reçu une mention spéciale du jury pour sa thèse « Générateur stochastique de séismes en contexte de sismicité faible à modérée : des données à l'aléa. Cas de la France métropolitaine ».

▶ 25 FÉVRIER

— Journée IARD 2022, Institut des Actuaire

Cette matinée scientifique est organisée en trois thématiques : le risque cyber, le changement climatique et les méthodes de Machine Learning. CCR a participé à la table ronde « Machine Learning : de la promesse à la réalité ».

▶ 9 FÉVRIER

— 15^e rendez-vous de Carthage de l'assurance « Cyberattaques, Pandémies, Changement climatique... Quelles solutions assurantielles ? », Carthage 2022

Lors de cette journée de conférence, CCR a présenté « le GAP assurantiel face à la volonté du risque climatique ».

▶ 31 MARS

— Table ronde « Insurance an NBS », Merlin Project

CCR a participé à cette table ronde portant sur le projet européen Merlin qui a pour objectif de mettre en avant les bonnes pratiques sur la restauration de l'eau douce pour mettre en œuvre des solutions telles que les solutions fondées sur la nature (NBS Solutions).

▶ **1^{ER}** AVRIL

— Colloque annuel « Nouveau quinquennat : les grands enjeux de l'assurance », **AJAR**

Ce colloque s'articule autour de trois tables rondes sur trois thématiques : le climat, l'épargne et la santé. CCR a participé à la table ronde sur le climat.

• **18** MAI

— Journée de restitution du projet de recherche ANR PICS, **CEREMA Aix**.

Au cours de cette journée de restitution, trois thématiques ont été abordées : l'anticipation et la modélisation des crues, la représentation des zones inondées, l'estimation des impacts des inondations. CCR a présenté « Mise en œuvre d'une chaîne de modélisation de la sinistralité assurantielle ».

• AIX-EN PROVENCE

• **23** JUIN

— Congrès des actuaires « Éclairer l'avenir dans un monde en transition », **Institut des Actuaires**

Au cours de cette journée scientifique, CCR a présenté « Identification d'une structure de réseau au service de l'évaluation et l'anticipation des risques : exemple en catastrophes naturelles et en risque cyber ».

• PARIS 8^E

• **7** AVRIL

— Matinale OESTV « Tourisme et littoral vendéen », **OESTV**

Lors de cet événement consacré à l'étude de l'évolution du territoire vendéen, CCR a participé à la table ronde « Quel littoral en Vendée dans quelques décennies ? La mer monte... ».

• LA ROCHE-SUR-YON

• **15** JUIN

— Journée CCR CAT « Quelles adaptations au changement climatique ? », **CCR**

La journée CCR CAT réunit scientifiques, assureurs, urbanistes et acteurs institutionnels pour débattre des enjeux assurantiels associés aux risques catastrophiques. Plusieurs thèmes ont été abordés dont la prévention des risques climatiques, l'adaptation des systèmes d'indemnisation et la gestion de crise.

• PARIS 8^E

• **26** JUIN

— Ateliers Previrisq 2022 « Inondations, mieux anticiper les événements extrêmes et leurs conséquences », **ANEB**

Cet événement construit autour de tables rondes, d'ateliers et de présentations réunit les acteurs du territoire pour un partage de connaissances et l'élaboration de recommandations en matière de prévention. CCR a présenté « Phénomènes extrêmes : vers une meilleure connaissance des impacts du niveau national au local ».

• GRAND BORNAND

▶ **17** MAI

— Journée scientifique « Géorisques 2022 », **MEET**

Lors de cet événement, CCR a présenté « Une histoire des cyclones aux Antilles ».

• **16** JUIN

— Congrès « Adaptation au changement climatique : quelles anticipations et actions dans les territoires ? », **ASTEE**

Au cours de ce congrès consacré aux questions d'adaptations de nos territoires au changement climatique, CCR a participé à la table ronde « Les littoraux face au changement climatique ».

• DUNKERQUE

• **29** JUIN

— Conférence « RING Meeting 2022 », **RING Team**

Lors de cette conférence consacrée au développement d'outils numériques appliqués aux sciences géologiques, CCR a présenté « Quadrangular adaptive meshing for wave simulation in homogenized media ».

• NANCY

• **7** JUILLET

DIJON

— **Journée régionale sur « L'adaptation au changement climatique », ALTERRE Bourgogne-Franche-Comté**
Au cours de cette journée consacrée aux actions mises en œuvre sur les territoires par les acteurs pour faire face au changement climatique, CCR a fait une présentation sur « Financer l'adaptation, des modalités à inventer ? ».

• **12** JUILLET

RENNES

— **Soutenance de thèse de Dorothée Kapsambelis**
Cette thèse en partenariat avec l'Institut Agro-Rennes, Météo-France et CCR s'intitule « Modélisation d'événements climatiques extrêmes sur les productions agricoles à horizon 2050. Application à la gestion économique du risque ».

• **31** AOÛT

NANCY

— **Congrès « IAMG 2022 », IAMG**
Ce congrès est le rendez-vous scientifique des chercheurs pour échanger sur les thématiques de géosciences mathématiques. CCR a présenté « Quadrangular adaptive meshing for wave simulation in homogenized media ».

• **6** SEPTEMBRE

CAEN

— **Colloque « Impôts et catastrophes : approches environnementales de la fiscalité », Université de Caen**
Ce colloque a pour objectif de croiser deux thématiques de recherche : l'histoire de la fiscalité et l'histoire de l'environnement. CCR a présenté « Le régime Cat Nat à l'épreuve du temps ».

▶ **10** OCTOBRE

— **Conférence « SIG 2022 », ESRI France**
Pour la conférence 2022, CCR a fait une présentation sur « L'exposition de l'arc méditerranéen français aux feux de forêt ».

• **13**
14 OCTOBRE

STRASBOURG

— **Assises Nationales des Risques Naturels, MEET**
Cet événement est un moment d'échanges entre les acteurs de la prévention pour renforcer une culture commune du risque. CCR a participé à la table ronde « Dans le contexte du changement climatique, comment anticiper et se préparer aux évolutions des risques naturels ? » et a organisé un side event sur l'efficacité de la prévention.

• **20** OCTOBRE

FONTENAY-AUX-ROSES

— **Séminaire « conjonction d'événements extrêmes », IRSN**
Lors de ce séminaire, CCR a été invitée à participer à une table ronde portant sur « Les verrous méthodologiques et les pistes de recherches pour améliorer la prédiction des événements extrêmes ».

• **7** NOVEMBRE

PARIS 6^E

— **Colloque sur « Observation du système Terre : Les enjeux des observations des milieux naturels et anthropisés », CNRS**
Lors de ce colloque, CCR a participé à une table ronde sur « De l'observation à la création de valeur par la société ».

— **Séminaire « Geolearning », Mines Paris Tech**
Lors de ce séminaire proposé aux étudiants des Mines Paris Tech, CCR a présenté « Modèle d'estimation des pertes assurantielles liées aux séismes ».

• **13** DÉCEMBRE

PARIS 6^E

— **Journée scientifique « Comprendre et s'approprier les messages-clés du 6^e rapport du GIEC », Météo & Climat**
Après une introduction sur les conclusions du 6^e rapport du GIEC, la journée se concentre sur l'état des lieux des impacts et leur évolution à court terme, les solutions d'atténuation et l'adaptation. CCR a participé à la table ronde « S'adapter à un climat qui change ».

Mayor, B.; Zorrilla-Miras, P.; Coent, P.L.; Biffin, T.; Dartée, K.; Peña, K.; Graveline, N.; Marchal, R.; Nanu, F.; Scricciu, A.; Calatrava, J.; Manzano, M.; López Gunn, E. Natural Assurance Schemes Canvas: A Framework to Develop Business Models for Nature-Based Solutions Aimed at Disaster Risk Reduction. *Sustainability* 2021, 13, 1291. <https://doi.org/10.3390/su13031291>

Moncoulon, D.; Marchal, R.; Onfroy, T.; Les risques liés au ruissellement, l'apport des données de sinistralité, LHB, 6 (2020) 56-65, DOI: <https://doi.org/10.1051/lhb/2020058>

Perrin, T.V.E.; Roustant, O.; Rohmer, J.; Alata, O.; Naulin, J.P.; Idier, D.; Pedreros, R.; Moncoulon, D.; Tinard, P. Functional principal component analysis for global sensitivity analysis of model with spatial output, *Reliability Engineering & System Safety*, Volume 211, 2021, 107522, ISSN 0951-8320, <https://doi.org/10.1016/j.res.2021.107522>.

Gouache, C.; Bonneau, F.; Tinard, P. et al. Estimation of main shock frequency-magnitude distributions by adapting the inter-event time method for low-to-moderate seismicity areas: application to French mainland. *J Seismol* 25, 771-782 (2021). <https://doi.org/10.1007/s10950-021-10001-8>

Kapsambelis, D.; Moncoulon, D. Gestion des risques en agriculture : répondre au défi du changement climatique. *Revue Risques* (2021) Risques N° 126 - *Revue Risques* (revue-risques.fr)

K.E. Duvat, V.; Volto, N.; Stahl, L.; Moatty, A.; Defossez, S.; Desarthe, J.; Grancher, D.; Pillet, V.; Understanding interlinkages between long-term trajectory of exposure and vulnerability, path dependency and cascading impacts of disasters in Saint-Martin (Caribbean), *Global Environmental Change*, Volume 67, 2021, 102236, ISSN 0959-3780, <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2021.102236>.

Desarthe, J.; L'histoire des ouragans dans les Antilles Françaises in Leone, F.; Moatty, A.; Les connaissances et apprentissages de territoires cyclonés (Petites Antilles, saison cyclonique 2017) : fiches de synthèse des principaux résultats du projet ANR TIREX à l'attention des décideurs. [Rapport de recherche] Université Paul Valéry Montpellier 3 / LAGAM. 2021.

Lopez-Gunn, E., Altamirano, M.A.; Ebeltoft, M.; Graveline, N.; Marchal, R.; Moncoulon, D.; et al, Mainstreaming nature-based solutions through insurance; the five «hats» of the insurance sector in Nature-Based Solutions and Water Security, An Action Agenda for the 21st Century. 2021. *Nature-Based Solutions and Water Security - 1st Edition* (elsevier.com)

Le Coent, P.; Graveline, N.; Altamirano, M.A.; Arfaoui, N.; Benitez-Avila, C.; Biffin, T.; Calatrava, J.; Dartee, K.; Douai, A.; Gnonlonfin, A.; Hérivaux, C.; Marchal, R.; Moncoulon, D.; Piton, G. Is-it worth investing in NBS aiming at reducing water risks? Insights from the economic assessment of three European case studies, *Nature-Based Solutions*, Volume 1, 2021, 100002, ISSN 2772-4115, <https://doi.org/10.1016/j.nbsj.2021.100002>.

Desarthe, J.; Gonnetan, L.; Bauduceau, N. La politique de prévention à travers la mobilisation du fonds Barnier (1995-2019), *Risques Infos* numéro 42, 2021, http://www.irma-grenoble.com/06publications/01publications_risquesinfos_sommaire.php?id_risquesinfos=42

Ecoto, G.; Bidaut, A.; Chambaz, A. One-step ahead sequential Super Learning from short times series of many slightly dependent data, and anticipating the cost of natural disasters, Cornell University, 2021, <https://arxiv.org/abs/2107.13291#>

Onfroy et al., Amélioration de la chaîne de modélisation de l'aléa débordement probabiliste en France métropolitaine. In *Rapport Scientifique CCR 2022* ; CCR, Paris, France, 2022, pp. 06-09

Gouache et al., Premier modèle probabiliste d'exposition aux séismes en France métropolitaine. In *Rapport Scientifique CCR 2022* ; CCR, Paris, France, 2022, pp. 10-13

Boittin et al., Développement d'une plateforme de dommages multipéril. In *Rapport Scientifique CCR 2022* ; CCR, Paris, France, 2022, pp. 14-17

Barthelemy et al., Comprendre le phénomène de retrait-gonflement des argiles par le biais d'un indicateur agrégé à la commune : la magnitude des sécheresses. In *Rapport Scientifique CCR 2022* ; CCR, Paris, France, 2022, pp. 20-22

Onfroy et al., Détection des arbres à partir de données d'imagerie à Très Haute Résolution dans les zones exposées au péril Retrait Gonflement des Argiles In *Rapport Scientifique CCR 2022* ; CCR, Paris, France, 2022, pp. 23-27

Kapsambelis, D., et al., Estimation des dommages sur les pertes de récolte de la ferme France dans un contexte de changement climatique. In *Rapport Scientifique CCR 2022* ; CCR, Paris, France, 2022, pp. 30-33

Kapsambelis D. et al., Comparaison des simulations à climat constant et des simulations continues pour la modélisation des événements extrêmes de sécheresse. In *Rapport Scientifique CCR 2022* ; CCR, Paris, France, 2022, pp. 34-37

Naulin et al., Modélisation anticipée des pertes assurantielles, une application du projet PICS. In *Rapport Scientifique CCR 2022* ; CCR, Paris, France, 2022, pp. 40-43

Desarthe et al., Mise en œuvre des modèles de CCR pour mesurer l'efficacité des mesures de prévention sur les dommages assurés. In *Rapport Scientifique CCR 2022* ; CCR, Paris, France, 2022, pp. 44 - 47

Jolivet et al., Modéliser les feux de forêts. In *Rapport Scientifique CCR 2022* ; CCR, Paris, France, 2022, pp. 50-53

L'Hévéder, B., et al., Alertes cycloniques et prévision des dommages assurés. In *Rapport Scientifique CCR 2022* ; CCR, Paris, France, 2022, pp. 54-57

Tilloy et al., Typologie d'événements à aléas multiples pour l'Europe occidentale. In *Rapport Scientifique CCR 2022* ; CCR, Paris, France, 2022, pp. 60-63

Esch et al., Amélioration de la connaissance de l'exposition et de la vulnérabilité aux inondations du bâti au Maroc. In *Rapport Scientifique CCR 2022* ; CCR, Paris, France, 2022, pp. 64-67

Rapport Scientifique édité par CCR - Décembre 2022

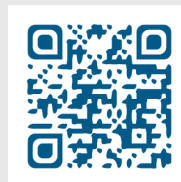
En couverture : Le pont de Montjean-sur-Loire enjambe une rive asséchée de la Loire le 16 juin 2022.

Le Rapport Scientifique 2022 de CCR et tous les éléments scientifiques qu'il contient (notamment les textes, publications, images, schémas, tableaux ou éléments cartographiques) sont la propriété exclusive de CCR ou de tiers l'ayant expressément autorisée à les utiliser, et sont protégés par les dispositions du Code de la propriété intellectuelle et les traités internationaux sur le copyright.
Copyright © 2022 Caisse Centrale de Réassurance, Paris, France.

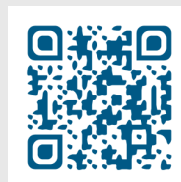
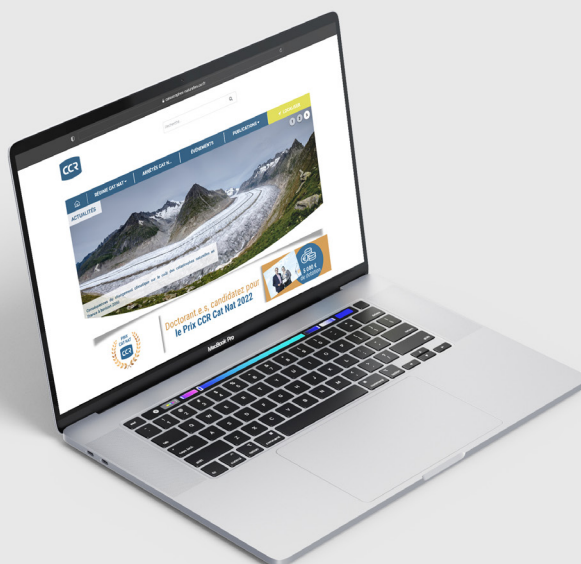
Crédits photos : AFP/ Richard Bouhet (32), Olivier Chassignole (08), Thibaud Moritz (52), Frank Perry (46), STR (66), Loic VENANCE (Couverture) - Photothèque CCR.

Conception et réalisation : story-building.fr

Ce rapport scientifique a été imprimé en France par HandiPRINT, une entreprise adaptée, filiale du Groupe Lecaux imprimeries, imprimeur certifié PEFC et FSC détenteur du label Imprim'vert et signataire de la Charte de la diversité.



Groupe Public et Réassureur International [ccr.fr](https://www.ccr.fr)



Plus d'informations sur [catastrophes-naturelles.ccr.fr](https://www.catastrophes-naturelles.ccr.fr)

Contacts presse : Vincent Gros, vgros@ccr.fr et Agathe Le Bars, agathe.lebars@taddeo.fr

Contact scientifique : David Moncoulon, dmoncoulon@ccr.fr

