

RAPPORT SCIENTIFIQUE CCR 2021



CCR au cœur de l'écosystème scientifique

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

CCR développe des modèles d'impact des catastrophes naturelles en partenariat avec les organismes scientifiques les plus en pointe en France et en Europe.



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



RÉASSUREUR
PUBLIC

« CCR POURSUIT SES EFFORTS EN MATIÈRE DE MODÉLISATION AU SERVICE DE LA GESTION DES RISQUES DE L'ÉTAT. »

Maillon essentiel de la gestion des risques de l'État, CCR s'est dotée depuis de nombreuses années, afin de remplir sa mission, d'une chaîne de modélisation permettant de traduire le croisement d'un aléa, qu'il soit naturel ou anthropique, avec des enjeux économiques, en impact financier.

Cette plateforme est indispensable pour l'efficience des dispositifs d'indemnisation ou de prévention des risques 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 recherche, d'universités ou de grandes écoles. Grâce à ces partenariats et aux retours d'expérience suite aux événements survenus, les équipes de recherche et développement de CCR contribuent à une amélioration continue des modèles et à renforcer leur pertinence.

Compte tenu du rôle central de CCR en matière de couverture des risques de catastrophes naturelles, nos efforts se

portent prioritairement sur ces derniers. Ceci est d'autant plus nécessaire dans un contexte de changement climatique, dont les premiers effets se font sentir, afin de quantifier et si possible de réduire les nombreuses incertitudes.

2020 a ainsi été marquée par de nombreuses avancées en matière de modélisation des catastrophes naturelles, avec en particulier la soumission de deux thèses de doctorat, brillamment soutenues début 2021. Au-delà de la France, CCR a également développé un modèle d'impact des inondations au Maroc pour le compte du FSEC (Fonds de solidarité contre les événements catastrophiques) dans le cadre d'un appel à projet soumis par la Banque Mondiale, montrant l'implication de CCR en matière de coopération internationale.

Mais la plateforme développée par CCR a montré son intérêt bien au-delà des seules catastrophes naturelles. Dans le contexte pandémique que l'on connaît, CCR s'est fortement impliquée dans la réalisation de modélisation des impacts économiques d'une pandémie, afin d'ac-



ANTOINE QUANTIN,
Directeur des Réassurances
& Fonds Publics

compagner les réflexions des pouvoirs publics sur l'éventuelle mise en place d'un régime de couverture des pertes d'exploitation sans dommages. De nombreux travaux ont également été menés pour améliorer la connaissance des impacts des risques climatiques sur les récoltes à climat actuel et à climat futur. Là encore, les résultats obtenus sont précieux pour accompagner les réflexions des pouvoirs publics autour du sujet majeur pour notre pays que constitue la gestion des risques en agriculture.

Cette capacité à innover sera indispensable pour relever les défis qui se posent à l'action publique et pour saisir les opportunités nouvelles qui s'offrent à son champ d'action. L'enjeu est donc de poursuivre et d'approfondir les activités de recherche de CCR pour éclairer les pouvoirs publics, nos partenaires et les sociétés d'assurance./

SOMMAIRE

01 Éditorial par **Antoine Quantin**,
Directeur des Réassurances
et des Fonds Publics

03 Perspectives 2021/2022
par **David Moncoulon**, Directeur
du Département R&D
Modélisation Cat & Agriculture

04 RISQUES INONDATION ET SUBMERSION MARINE

07 Prévission immédiate des impacts
des crues soudaines

11 Modélisation du ruissellement pluvial

17 Modélisation des pertes financières
dues au risque d'inondation au Maroc

22 Cartographie de synthèse de
l'impact des inondations en France
métropolitaine

30 Analyse des incertitudes dans le
modèle d'aléa submersion marine

34 RISQUES SÉCHERESSE

36 Modélisation de la sécheresse
géotechnique

40 *Super Learning* séquentiel
pour anticiper les dommages liés
à la sécheresse géotechnique

44 RISQUES GÉOLOGIQUES

46 Générateur stochastique de séismes

50 Réévaluer l'aléa volcanique en
Martinique

54 CHANGEMENT CLIMATIQUE

57 Changement climatique : une
approche multi-périls

62 Modélisation de l'impact des
sécheresses et excès d'eau sur les
productions végétales à horizon 2050

67 Comprendre les conséquences du
changement climatique : l'exemple de
l'exercice pilote de l'ACPR

70 EXPOSITION AUX CAT NAT

72 Estimation géolocalisée de la surface
des logements individuels par Krigeage
Monte-Carlo

76 Les apprentissages scientifiques
d'un RETEX multidimensionnel
sur le cyclone IRMA (projet ANR TIREX)

82 AUTOMATISATION DES PROCESSUS

84 Traitements de données pour
l'assurance multirisques climatique
en agriculture

88 RISQUES SANITAIRES

90 Modélisation des pertes d'exploitation
suite à une fermeture administrative
liée à une pandémie

94 **Prix CCR Cat Nat**

96 Citations et Publications

« LE PLAN STRATÉGIQUE DE CCR VIENT RENFORCER LE RÔLE ESSENTIEL DE LA MODÉLISATION. »

Pour la période 2020-2025, CCR s'est récemment dotée d'un nouveau plan stratégique. Ce plan vient consacrer le rôle essentiel de la modélisation tant pour les besoins de pilotage du régime d'indemnisation des catastrophes naturelles que pour l'appui des pouvoirs publics dans la gestion des grands risques, qu'il s'agisse de leur indemnisation ou de leur prévention.

CCR renforce ainsi son rôle d'expert de l'évaluation des conséquences économiques des catastrophes et de contributeur au risk management de l'État français. Afin de remplir ces missions, CCR se fixe deux objectifs majeurs concernant sa plateforme de modélisation :

- d'une part, industrialiser et automatiser les processus de développement de modèles, afin de faciliter l'intégration de nouveaux risques ou de nouvelles applications ;
- le maintien de la pertinence scientifique des modèles, grâce à des actions de recherche-développement, en particulier le co-encadrement de thèses de Doctorat en partenariat avec des laboratoires

prestigieux, assurant ainsi la formation des experts de demain.

L'année 2022 sera ainsi marquée par un démarrage d'une thèse portant sur le risque sécheresse géotechnique – retrait gonflement des argiles, en partenariat avec Météo-France et le BRGM. Les trois aspects de la survenance d'un sinistre RGA seront traités : la composante météo, la composante sol et la composante vulnérabilité du bâti. Cette thèse se poursuivra jusqu'en 2024.

Dans le domaine de la modélisation du risque sismique, une nouvelle thèse va être mise en place, avec l'École nationale supérieure de géologie de Nancy. Elle s'inscrit dans la continuité des travaux précédents de conception d'un générateur stochastique de tremblements de terre sur l'ensemble du territoire français. Elle va se focaliser sur la dynamique de propagation des ondes sismiques sur le territoire après un séisme, notamment par une modélisation physique.

Dans le domaine de la modélisation du risque dans les Outre-mer, CCR souhaite se doter d'une chaîne de traitement au-



DAVID MONCOULON,
Directeur du Département R&D
Modélisation Cat & Agriculture

tomatisée, pour effectuer une évaluation anticipée des dommages en cas d'événements cycloniques dont les trajectoires peuvent atteindre les îles.

Par ailleurs, en partenariat avec RTE (Réseau de transport électricité), CCR va produire une étude sur l'exposition du réseau français au risque d'inondation à climat actuel et à horizon 2050. Ces travaux vont apporter de nouveaux éléments sur l'exposition économique en cas d'événement majeur.

Enfin, CCR poursuivra son appui aux réflexions des pouvoirs publics sur la gestion des risques en agriculture, dans le prolongement des travaux menés lors du Varenne de l'eau. La troisième année de thèse sur le sujet en partenariat avec Agrocampus Ouest et Météo-France se termine et les travaux se poursuivront en 2022 notamment sur le risque gel./

RISQUES INONDATION ET SUBMERSION MARINE

Le 3 octobre 2020, les eaux des crues déferlent sur Saint-Martin-Vésubie dans le sud-est de la France, après les fortes pluies et les inondations qui viennent frapper les Alpes-Maritimes.





Prévision immédiate des impacts des crues soudaines . p.07

Les phénomènes de crues soudaines sont des événements difficiles à anticiper qui engendrent très régulièrement de lourds dommages et des pertes de vies humaines, notamment dans le sud-est de la France. Dans ce contexte, le projet de recherche PICS vise à concevoir et à expérimenter des systèmes de prévision capables de représenter les impacts des crues avec jusqu'à 6h d'anticipation.

Flash floods are difficult to anticipate events that causes heavy damage and human life losses, especially in south-eastern France. In this context, the PICS research project aims to design and test forecasting systems designed to estimate flood impacts with up to 6 hours of anticipation.

Jean-Philippe Naulin et Olivier Payrastrre



Modélisation du ruissellement pluvial . p.11

L'expérience de CCR en termes d'analyse des dommages et de modélisation des inondations, a démontré que les sinistres n'étaient pas uniquement dus aux débordements de cours d'eau. L'hypothèse soulevée ici est donc celle de dommages consécutifs au ruissellement pluvial.

CCR's experience in damage analysis and flood modeling has demonstrated that flood claims were not only due to river overflows. The hypothesis raised here is that a significant amount of damage is actually resulting from rainfall runoff.

Thomas Onfroy et David Moncoulon

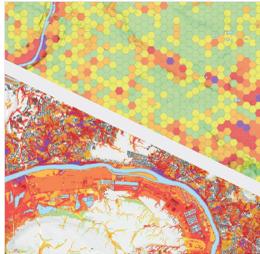


Modélisation des pertes financières dues au risque d'inondation au Maroc . p.17

En 2020, un consortium composé de CCR, Risk Weather Tech et Atmoterra s'est formé afin de modéliser le risque d'inondation au Maroc, dans le cadre d'un projet financé par la Banque Mondiale.

In 2020, a consortium composed of CCR, Risk Weather Tech and Atmoterra has been developed to model the flood risk exposure of Morocco, in the frame of a project funded by the World Bank.

David Moncoulon, Jean-Philippe Naulin, Thomas Onfroy, Roxane Marchal, Thomas Guedez
Avec la contribution d'Abderrahim Chaffai et Abderrahim Oulidi



Cartographie de synthèse de l'impact des inondations en France métropolitaine . p.22

CCR a produit en 2020 une cartographie de synthèse, homogène sur le territoire métropolitain, représentant l'impact des phénomènes d'inondation par débordement, ruissellement pluvial et submersion marine. Résultat d'une analyse multicritères issue de traitements géomatiques, elle a été obtenue à partir du croisement d'un indicateur de sinistralité historique et d'un indicateur de sinistralité potentielle, basé sur la modélisation probabiliste de l'aléa inondation et sur une analyse de la vulnérabilité.

In 2020, CCR produced a summary map, homogeneous on the metropolitan territory, representing the impact of flooding phenomena by overflow, storm runoff and marine submersion. The map is based on a multicriteria analysis result of geomatics process, has been obtained from the intersection of a historical loss indicator based on both CCR probabilistic flood hazard modeling and on an analysis of the territories vulnerability to flooding.

Thomas Onfroy et Nathalie Orhac



Analyse des incertitudes dans le modèle d'aléa submersion marine . p.30

Ce travail de thèse repose sur le développement d'une méthode basée sur la métamodélisation afin d'analyser l'incertitude et la sensibilité de modèles d'estimation des zones inondées lors de submersions marines. Le métamodèle repose sur une méthode de krigeage couplée avec une ACP fonctionnelle. Il a été appliqué sur deux modèles d'impact mis en œuvre dans la zone des Bouchouleurs, inondée par Xynthia en 2010. Cette méthode peut être appliquée sur d'autres périls tels que les inondations.

This PhD research is based on the development of a method based on metamodelling in order to analyse the uncertainty and sensitivity of models for estimating flooded areas during marine submersions. The metamodel is based on a kriging method coupled with a functional PCA. It was applied to two impact models implemented in the Bouchouleurs area, flooded by Xynthia in 2010. This method can be applied to other hazards such as floods.

Élodie Perrin Tran Vi-vi et Jean-Philippe Naulin



Prévision immédiate des impacts des crues soudaines

Jean-Philippe Naulin¹, Olivier Payrastré²

(1) Département R&D Modélisation Risques Cat & Agriculture, CCR

(2) Université Gustave Eiffel

INTRODUCTION

La France est régulièrement frappée par des crues soudaines qui engendrent d'importants dégâts et peuvent faire des victimes. Les inondations ont coûté en moyenne 554 M€ par an de dommages assurés entre 1982 et 2020^[1] dont plus de la moitié concernent des crues soudaines d'après les données de sinistralité CCR. Compte tenu du changement climatique, ces catastrophes pourraient être amenées à s'intensifier dans les décennies à venir^[2]. Pour faire face à ces phénomènes, il est important de mettre en place des dispo-

sitifs d'alerte et de gestion de crise, capables d'anticiper les conséquences des événements. Cependant, ces systèmes sont particulièrement difficiles à mettre en œuvre car ils se heurtent à plusieurs contraintes opérationnelles. La première est l'évolution rapide des événements météorologiques générateurs des crues qui limite le temps disponible pour l'anticipation. La seconde contrainte est la multiplicité des petits cours d'eau susceptibles de répondre très rapidement à des pluies intenses (avec des temps de ré-

ponse souvent limités à quelques dizaines de minutes). Enfin, la troisième problématique est causée par le caractère diffus des enjeux exposés, répartis sur un très large territoire. Des premiers systèmes, tels que les APIC (Avertissement pluie intense à l'échelle de la commune) ou Vigicrues Flash sont actuellement opérationnels, bien qu'ils n'offrent pas encore une couverture complète du territoire français.

Le projet PICS, financé par l'Agence nationale de la recherche (ANR), vise à concevoir des chaînes de prévision et de modélisation des impacts innovantes et adaptées aux phénomènes de crues soudaines. Ces chaînes se déclinent en 4 composants (figure 1). Le premier est la prévision immédiate des précipitations avec un délai d'anticipation allant jusqu'à six heures. Cette prévision alimente des modèles hydrologiques permettant

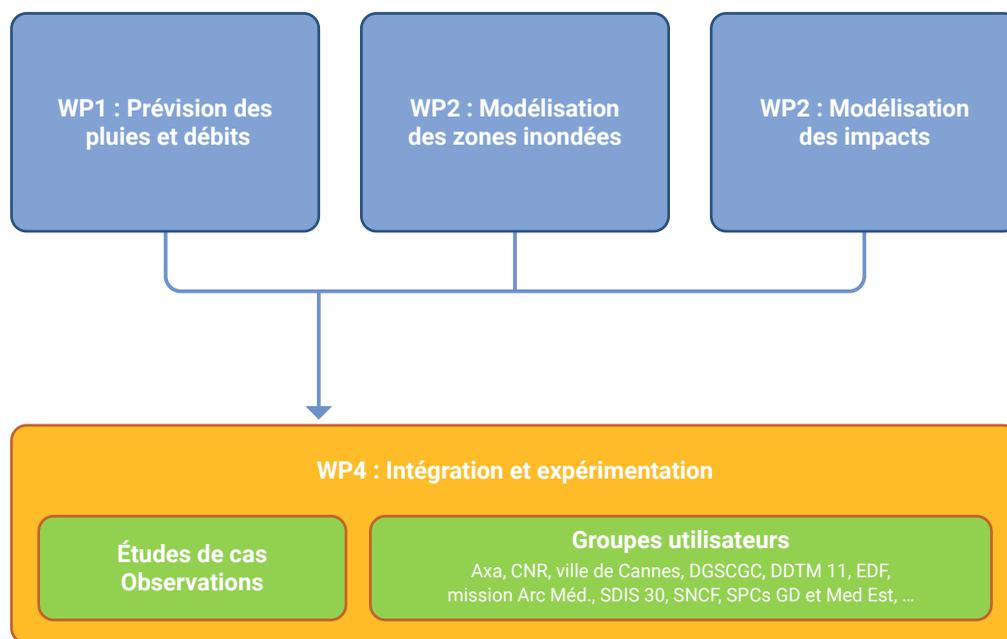


Figure 1 – Figure synthétique illustrant le contenu du projet PICS.

crues soudaines

prévision

impacts

anticipation

> d'anticiper les débits sur les petits cours d'eau, drainant un bassin versant inférieur à 500 km². La troisième dimension est la modélisation des zones inondées de manière fine sur un grand nombre de petits cours d'eau. Enfin, ces sorties de modèle sont croisées avec des données d'exposition pour évaluer les impacts des crues. Les partenaires de ce projet sont l'Université Gustave Eiffel, le Cerema, l'INRAE, Geosciences Rennes, Météo-France, le CNRS, le SHAPI, l'IGE et CCR. Chacun contribue au projet en apportant sa connaissance ainsi que ses outils sur un des quatre volets mentionnés précédemment : la pluie, la modélisation pluie-débit, la modélisation de l'inondation ou des impacts. Différents acteurs opérationnels sont également impliqués dans le projet au sein d'un groupe utilisateur. Ce groupe est composé de services de prévision des crues, de gestionnaires de crise, de services de secours, d'assureurs ou encore de gestionnaires d'infrastructure. Il a pour objectif d'orienter les décisions relatives à la constitution des chaînes de modélisation, en fonction des besoins opérationnels exprimés.

LA PRÉVISION DES PRÉCIPITATIONS ET DES DÉBITS

Compte tenu du caractère soudain et de la faible prévisibilité des événements de pluies intenses, le projet se focalise sur la prévision à très courte échéance (0 – 6h). Pour ce faire, les derniers modèles opérationnels de Météo-France sont utilisés. Il s'agit de modèles météorologiques tels qu'AROME-PE et AROME-PI (prévision immédiate), et également le produit PIAF, qui combine les observations radars aux sorties du modèle AROME-PI. Ces produits peuvent être déterministes,

en proposant un scénario de pluie future unique, ou bien ensembliste, c'est-à-dire proposant un ensemble de scénarios pour prendre en compte l'incertitude de la prévision. Les observations de précipitations issues des radars météorologiques sont également exploitées dans le projet. Plusieurs modèles hydrologiques pluie-débit, permettant de simuler les débits de crue en fonction de la pluie prévue et de l'état d'humidité du sol, sont mis en œuvre dans le cadre du projet. Ces modèles sont adaptés aux petits cours d'eau, la plupart du temps dépourvus de stations hydrométriques permettant de valider ou de corriger le débit prévu. Il s'agit des modèles suivants : GRDSI ^[3], SMASH ^[4], Cinecar ^[5] et ISBATOP ^[6].

L'ESTIMATION DES ZONES INONDÉES

Plusieurs méthodes permettant d'estimer le débordement sont déployées dans le projet. Elles utilisent toutes le MNT RGE Alti à 5m de l'IGN, ce qui permet d'avoir une résolution spatiale très fine. Ces méthodes sont automatisées de manière à pouvoir s'appliquer sur un très grand nombre de cours d'eau, tout en conservant un temps de calcul raisonnable. Trois méthodes ont notamment été comparées : Flodoos, Cartino et Hand-MS ^[7]. Il s'est avéré que les deux premiers modèles étaient particulièrement performants pour estimer les zones impactées par du débordement lors d'une crue soudaine (figure 2). Ces modèles sont également utilisés pour simuler différents scénarios d'inondation associés à des périodes de retour fixes.

LA MODÉLISATION DES IMPACTS

La prise en compte des enjeux est importante pour aider les gestionnaires de crise et orienter la prise de décision. Plusieurs grands enjeux sont considérés et font l'objet d'une modélisation. Enfin, des indicateurs synthétiques sont également étudiés de manière à représenter l'intensité de la crise en fonction du type d'enjeux.

La population : Le simulateur Debrief, mis en œuvre par l'IGE ^[8], est un outil permettant de reproduire à l'échelle d'une commune les comportements et les dynamiques de populations lors d'une crue. Cet outil se base sur le rôle des personnes avant la crise (par exemple les personnes mobiles, au travail, isolées chez elles, etc.) pour en déduire un comportement pendant la crise. Le simulateur peut être particulièrement utile pour analyser les conséquences potentielles d'une crue soudaine sur une agglomération.

Les biens assurés : Depuis plusieurs années, CCR met en œuvre des modèles d'estimation des pertes assurantielles engendrées par une catastrophe naturelle. Ces outils sont appliqués sur la France entière et présentent une résolution spatiale moindre que celle des modèles utilisés dans PICS. L'objectif de CCR est de développer un modèle de dommages adapté aux crues soudaines s'appuyant sur les données d'aléa très fines simulées dans le projet. Le modèle permet également de modéliser les dommages causés par du ruissellement, hors des zones de débordement des cours d'eau principaux (figure 3).

Les réseaux : La méthode RoadIno développée par l'Université Gustave Eiffel ^[5, 9] est également mise en œuvre dans le projet PICS. Elle permet d'identifier les risques de coupures du réseau routier au niveau des intersections entre les routes et le réseau hydrographique en fonction de l'aléa.

CONCLUSION

Les différents outils développés dans le projet peuvent être associés afin de former de véritables chaînes de prévision, permettant de répondre aux besoins spécifiques des utilisateurs. D'un point de vue scientifique, ce projet permet de faire progresser les méthodes de prévision des crues soudaines et de leurs impacts, notamment dans des territoires non jaugeés. D'un point de vue opérationnel, le projet aidera les différents acteurs impliqués dans la gestion de ces crues à se doter d'outils d'anticipation plus efficaces. Les outils développés dans le projet PICS pourront par exemple : faciliter des évolutions futures du service Vigicrues Flash dédié aux crues soudaines ; aider à promouvoir l'utilisation de prévisions hydro-météorologiques par les gestionnaires de crise ; aider les gestionnaires d'ouvrages et d'infrastructures à produire des prévisions adaptées à leurs problématiques ou encore améliorer la capacité des sociétés d'assurance et de réassurance à agir efficacement après chaque événement, en anticipant les pertes attendues./

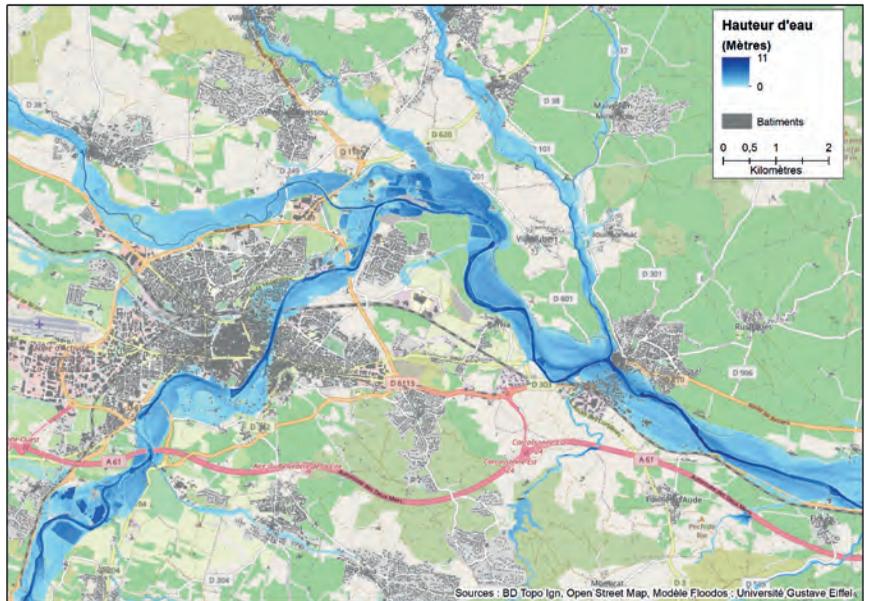


Figure 2 – Inondation estimée par le modèle Floodos pour la crue de l'Aude (2018).

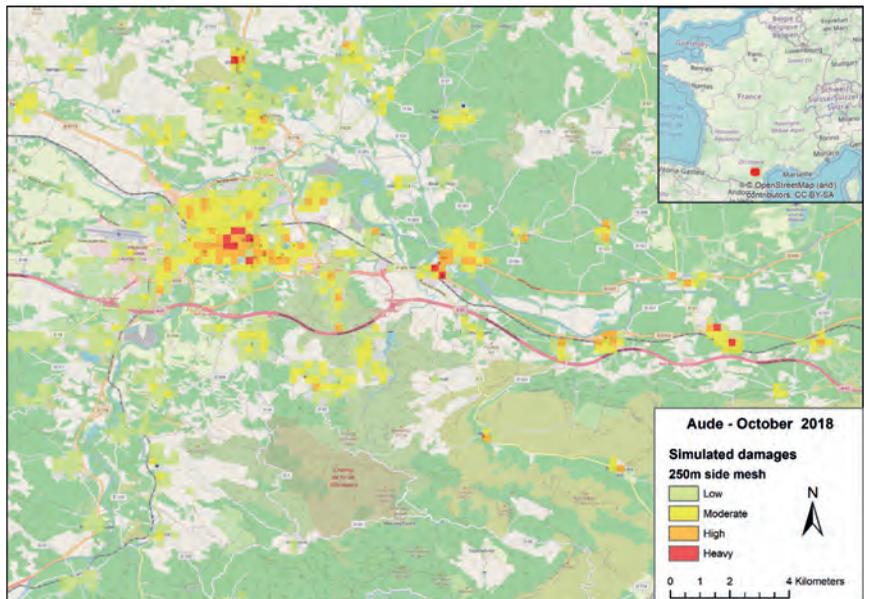


Figure 3 – Exemple de simulation des dommages aux biens assurés pour les crues de l'Aude du 15 octobre 2018.

LES PARTENAIRES

La réalisation du projet PICS est rendue possible grâce à une subvention de l'ANR (n°ANR-17- CE03-0011). Le projet est intégré au programme HyMeX (www.hymex.org) sur le cycle de l'eau et les phénomènes climatiques extrêmes en Méditerranée. Il s'insère dans la thématique de prévision hydrologique d'ensemble de l'initiative internationale HEPEX (www.hepex.org). Nous adressons également nos remerciements aux membres du projet PICS et du groupe utilisateurs qui ont accepté de s'impliquer dans ce projet.

RÉFÉRENCES

1. CCR (2020) Les catastrophes naturelles en France, Bilan 1982-2020, 116p.
2. CCR (2018) Conséquences du changement climatique sur le coût des catastrophes naturelles en France à l'horizon 2050. 32p.
3. Peredo D. et al., 2021 (submitted), Investigating hydrological model versatility to simulate extreme flood events, Hydrological Sciences Journal
4. Jay-Allemand M., Javelle P., Gejadze I., Arnaud P., Malaterre P.-O., Fine J.-A., and Organde D., 2020. On the potential of variational calibration for a fully distributed hydrological model: application on a Mediterranean catchment. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 24, 5519–5538, <https://doi.org/10.5194/hess-24-5519-2020>
5. Naulin J.P., Payrastre O., Gaume E., 2013. Spatially distributed flood forecasting in flash flood prone areas: Application to road network supervision in Southern France. *Journal of Hydrology*, 486, 88-99, doi:10.1016/j.jhydrol.2013.01.044
6. Lovat A., Vincendon B., and Ducrocq V., 2019. Assessing the impact of resolution and soil datasets on flash-flood modelling, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 23, 1801-1818, <https://doi.org/10.5194/hess-23-1801-2019>
7. Hocini et al., (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.*, <https://doi.org/10.5194/hess-25-2979-2021>
8. Terti G, Ruin I, Gourley JJ, Kirstetter P, Flamig Z, Blanchet J, Arthur A, Anquetin S. Toward Probabilistic Prediction of Flash Flood Human Impacts. *Risk Anal.* 2019 Jan;39(1):140-161. doi: 10.1111/risa.12921. Epub 2017 Oct 23. PMID: 29059704.
9. Payrastre O., Lebourg L. (2020). Evaluation de la sensibilité des réseaux routiers aux inondations : application de la méthode RoadIno dans le département du Gard, Convention DGPR-Ifsttar 2019 n°2201189104 du 4 Juin 2019, Action 8 : appui au SCHAPI, 18 p. (hal-02942166)

CITATION

Naulin J-P, Payrastre O.,
Prévision immédiate des
impacts des crues soudaines.
In Rapport Scientifique CCR
2021 ; CCR, Paris, France,
2021, pp. 07-10



Modélisation du ruissellement pluvial

Thomas Onfroy¹, David Moncoulon¹
(1) Département R&D Modélisation Cat & Agriculture, CCR

INTRODUCTION

L'expérience de CCR en termes de modélisation des inondations, au cœur des activités de R&D, a démontré qu'une part significative des sinistres consécutifs aux inondations n'était pas uniquement due aux débordements se produisant dans le lit majeur des cours d'eau mais à imputer au ruissellement pluvial. CCR dispose d'un modèle d'estimation des impacts financiers, mis à jour régulièrement et utilisé pour estimer les dommages aux biens assurés lors de la survenance d'inondations en France. Ce modèle opérationnel est calibré sur une sélection d'événements historiques survenus en France depuis 1999. Pour la détermination du coût d'un événement réel, les données de précipitation et d'évapotranspiration sont acquises depuis la Publiothèque de Météo-France. Pour la modélisation probabiliste, les événements sont tirés dans un catalogue d'un millier d'événements fictifs répartis sur 400 années de précipitations du modèle ARPEGE-Climat de Météo-France. Le modèle inondation, incluant la modélisation du débordement et des hauteurs d'eau au sein du lit majeur des principaux cours d'eau, associé à un module de vulnérabilité et un module de dommages, permet d'effectuer une estimation du coût des événements et de mesurer l'exposition de l'État, de CCR et des sociétés d'assurance au risque d'inondation. Le modèle est également utilisé dans le cadre d'études portant sur l'impact du changement climatique, telle que l'étude réalisée en partenariat avec Météo-France en 2018 pour la France métropolitaine et sur les Antilles et la Réunion en 2019. Afin de renforcer les

mesures de prévention et la connaissance du risque de ruissellement, des études spécifiques ont été menées, comme celle réalisée sur le bassin versant de la Bièvre en partenariat avec l'Institut Paris Région ou pour le compte de collectivités territoriales telles que l'EPTB Seine Grands Lacs et l'Entente Oise-Aisne. Le modèle est également régulièrement mis en application en cas d'études sur l'exposition au risque des assureurs ou au cours de projets de recherche tels que l'ANR (PICS) et H2020 (NAIAD). Des travaux restent à mener pour modéliser, à l'échelle du territoire français, les inondations dues à la saturation du réseau pluvial et aux remontées des réseaux d'assainissements se produisant lors d'intempéries intenses dans les secteurs les plus imperméabilisés.

MÉTHODOLOGIE

D'un point de vue méthodologique, le modèle de ruissellement permet de simuler les écoulements des eaux de surface en tout point du territoire lorsque l'intensité des précipitations dépasse l'infiltration et la capacité de rétention en eau des sols, en prenant en compte les différents modes d'occupation du sol. Ceci est effectué pour tous les bassins versants incluant par conséquent les cours d'eau non jaugés. Les bassins versants hydrologiques sont reconstitués à partir d'un Modèle Numérique de Terrain (MNT de l'IGN) à 25 mètres de résolution et de traitements géomatiques dédiés à l'hydrologie tels que les outils ArcGIS

ArcHydro^[2]. Ainsi, les écoulements de surface sont distribués sur les pentes du MNT. Pour la simulation des événements réels, les précipitations sont acquises depuis la Publiothèque de Météo-France en fonction des données disponibles au lendemain de l'événement (pluies journalières, horaires et évapotranspiration potentielle). Quant au modèle de ruissellement probabiliste, celui-ci est constitué d'un catalogue d'un millier d'événements fictifs simulés à partir de 400 années de précipitations issues du modèle climatique ARPEGE-Climat de Météo-France^[3].

Les écoulements de surface sont distribués sur les pentes du MNT en fonction des différentes directions empruntées par les écoulements préférentiels. Ce routage des débits au sein de chaque sous bassin est facilité par un algorithme de direction des flux intégré dans le modèle en addition du MNT. Outre les données météorologiques et topographiques, des données d'entrée telles que les différents modes d'occupation du sol alimentent le modèle de ruissellement (Figure1).

Les modes d'occupation du sol de la couche Corine Land Cover à 250 mètres de résolution sont utilisés dans la production de l'aléa puisque ces derniers permettent d'appliquer un coefficient de rugosité de surface fonction des différents types d'occupation des sols (selon la formule de Manning-Strickler d'estimation de la vitesse moyenne d'un liquide) Les pluies efficaces sont alors distinguées des pluies infiltrées en fonction des types d'occupation du sol.

Au-delà de son utilisation lors de la survenance d'événements, le modèle de ruissellement peut être adapté pour la réalisation d'études et d'analyses d'exposition aux risques hydrologiques à échelles plus fines, sur le territoire d'une

- # ruissellement
- # précipitations
- # inondations
- # sinistralité

> commune ou de petits bassins versants, avec une utilisation de données d'entrée plus précises lorsque celles-ci sont disponibles.

Cela a été le cas pour l'étude expérimentale sur le risque inondation dans le bassin versant de la Bièvre (Val-de-Marne et Hauts-de-Seine) menée en partenariat avec l'Institut Paris Région (IPR). Dans le cadre de ce projet, des données d'occupation du sol détaillées de l'Institut Paris Région et des données sur les réseaux d'assainissement (tracé du réseau et dimensionnement des conduites d'évacuation des eaux pluviales) fournies par la Direction des Services de l'Environnement et de l'Assainissement du Val-de-Marne ont été intégrées dans le modèle inondation et utilisées pour simuler l'aléa sur le bassin versant de la Bièvre ^[4]. Un indicateur d'exposition aux risques hydrologiques, résultat du croisement de l'aléa ruissellement, dû aux remontées des réseaux et basé sur les sinistres géolocalisés de l'orage de juillet 2001 en Île-de-France a été produit dans le cadre de l'étude (Figure 2)

Le modèle pluie-débits de CCR est également valorisé dans des projets de recherche appliquée, à l'exemple de l'étude portant sur l'impact du changement climatique en France réalisée en 2018 pour la France métropolitaine et en 2019 sur les DOM en partenariat avec Météo-France et la société Risk Weather Tech. À l'occasion de cette étude, le modèle de ruissellement a été transposé aux Outre-mer pour pouvoir être utilisé d'une manière analogue à son application sur le territoire métropolitain. L'intensité des débits du ruissellement à différentes périodes de retour a été cartographiée sur les Antilles françaises et pour l'île de la Réunion (Figure 3).

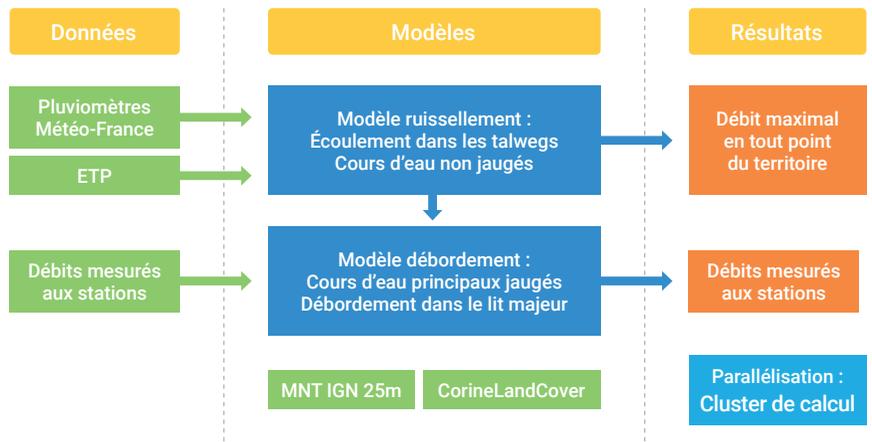


Figure 1 – Schéma fonctionnel du modèle inondation CCR (CCR, 2019)

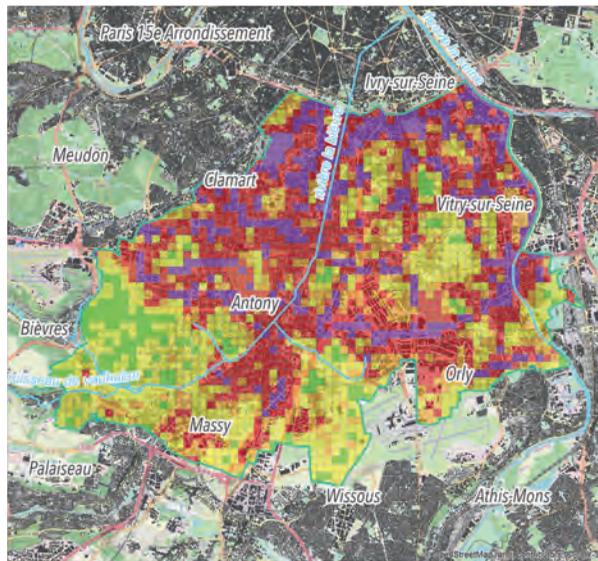


Figure 2 – Indicateur d'exposition aux risques hydrologiques agrégé à la maille 250m (CCR, 2018).

RÉSULTATS

Le modèle de ruissellement permet ainsi de simuler les écoulements des eaux de surface pour chaque sous-bassin versant en tout point du territoire en cas de survenance d'un événement pluvieux et pour la simulation d'un millier d'événements fictifs pour l'alimentation d'un catalogue d'aléa probabiliste. Lorsqu'un événement pluvieux intense se produit sur un territoire donné, le modèle de ruissellement reproduit les écoulements en surface à partir des données de précipitation avec en sortie, pour chaque maille du MNT et pour tous les cours d'eau non jaugés, une valeur correspondant au débit maximal atteint au cours de l'événement. Le routage des débits implémenté dans le modèle permet aux écoulements distribués sur les pentes du MNT de converger en aval, vers les talwegs.

Ces résultats opérationnels issus du suivi des événements climatiques sont présentés sous forme de cartographie de l'aléa modélisé à 25 mètres de résolution. La simulation des crues torrentielles survenues en décembre 2019 dans le Sud-Ouest de la France dans la commune de Bielle (Pyrénées-Atlantiques) illustre ce type de carte d'aléa (Figure 4). Afin de fournir sous 5 à 7 jours une estimation des dommages aux biens assurés aux assureurs et à l'État, cet aléa est validé en fonction des remontées de la presse et du terrain, puis croisé avec les données de vulnérabilité disponibles dans les bases de données de CCR. Il s'agit notamment de données relatives aux risques de particuliers et de professionnels géolocalisés fournies par les assureurs et régulièrement mises à jour par CCR.

En ce qui concerne la simulation probabiliste, le catalogue d'événements produit une distribution du débit maximum de ruissellement pour chaque maille de

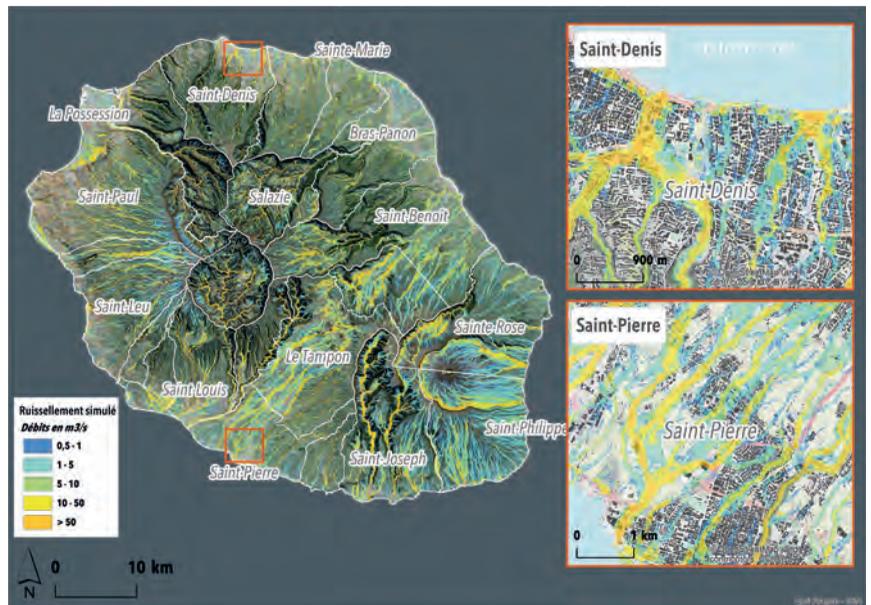


Figure 3 – Débits de ruissellement modélisés pour un événement fictif sur l'île de la Réunion (CCR, 2019).

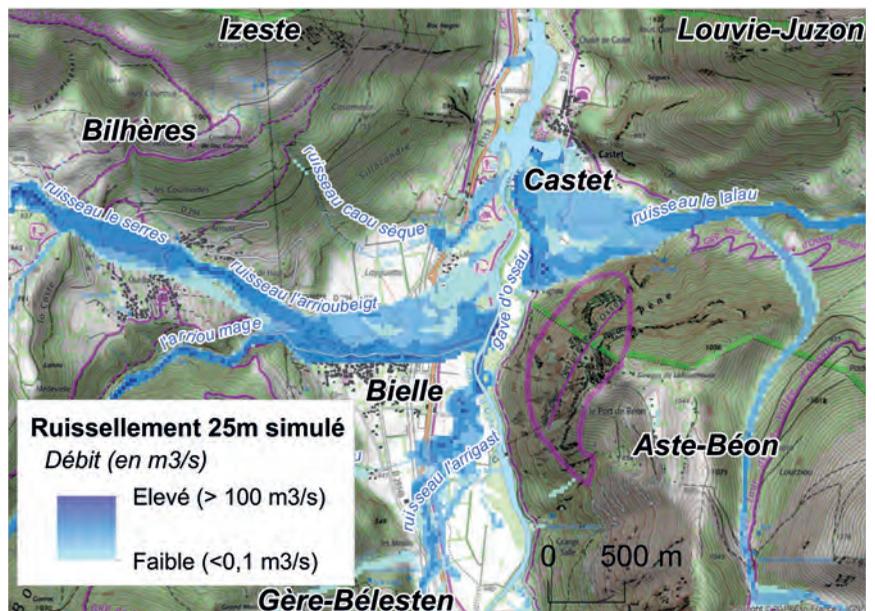


Figure 4 – Crue torrentielle survenue en décembre 2019 à Bielle - Pyrénées-Atlantiques (CCR, 2019).

- # ruissellement
- # précipitations
- # inondations
- # sinistralité

> 25 mètres sur l'ensemble du pays pour cinq périodes de retour de l'aléa (d'inférieure à 10 ans jusqu'à supérieure à 200 ans). L'intensité de l'aléa est ainsi estimée en tout point du territoire pour une période de retour donnée. Du fait de la fonction d'infiltration et de la prise en compte des modes d'occupation du sol, l'étalement des phénomènes de ruissellement pluvial apparaît plus prononcé sur les secteurs imperméabilisés que dans les zones végétalisées (Figure 5 (a), (b)). Les résultats de l'aléa ruissellement probabiliste, sont partagés sous forme de classes d'intensité des débits simulés pour chaque période de retour et sont fournis aux assureurs ou en cas de demandes spécifiques de collectivités locales telles que des EPTB, afin qu'ils puissent bénéficier d'une cartographie de l'exposition de leurs portefeuilles de risques ou de leur territoire aux phénomènes de ruissellement pluvial (Figure 6). Les pertes moyennes annuelles modélisées pour le péril inondation (phénomènes de débordement et de ruissellement) au titre du régime Cat Nat et agrégées à l'échelle communale sont également transmises aux assureurs et aux collectivités dans le cadre de conventions.

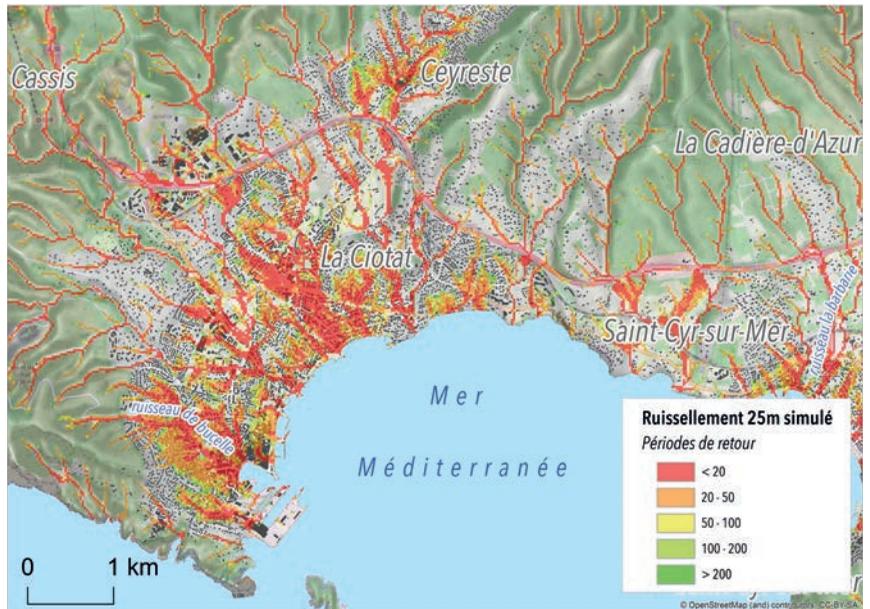


Figure 5 – (a) Aléa ruissellement probabiliste dans le secteur de la Ciotat (Bouches-du-Rhône).

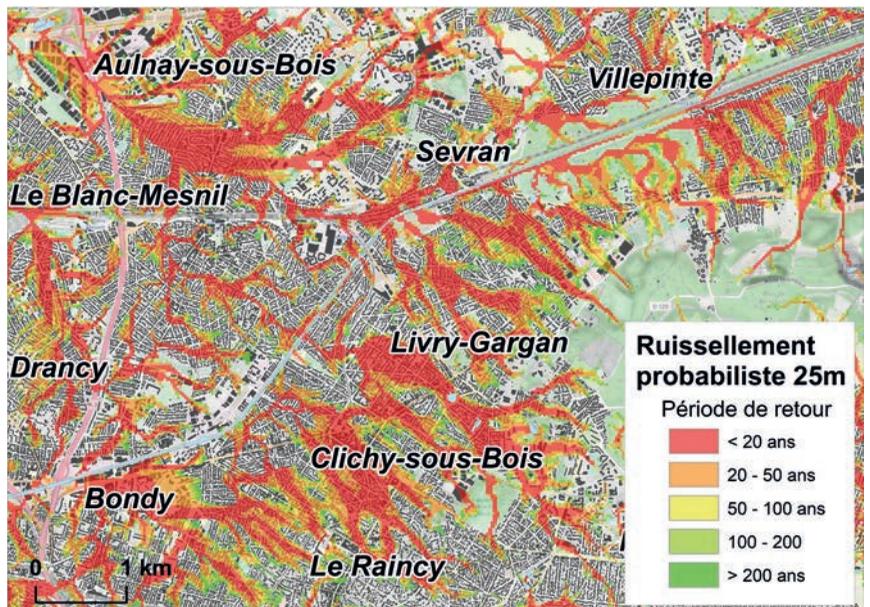


Figure 5 – (b) Aléa ruissellement probabiliste en Seine-Saint-Denis (CCR, 2019).

Les données des bases CCR (sinistralité et polices d'assurance géolocalisées à l'adresse), croisées à l'aléa ruissellement en termes de débits ou de périodes de retour permettent de calibrer les courbes d'endommagement. Ceci permet d'effectuer une estimation du coût des événements et de mesurer l'exposition de l'État, de CCR et des sociétés d'assurance au risque d'inondation. Aussi, ces courbes peuvent être calibrées à l'échelle locale et peuvent-elles être appliquées pour évaluer les performances de stratégies de prévention réduisant l'aléa sur les pertes assurées et d'estimer les pertes à horizon 2050. Pour un événement du même type que celui survenu dans le bassin versant de la Brague en octobre 2015, une réduction de 20 % des ruissellements réduirait les dommages subis (pour des biens de particuliers, propriétaires de maisons individuelles) de 3,3 M€ à 2,8 M€ [5].

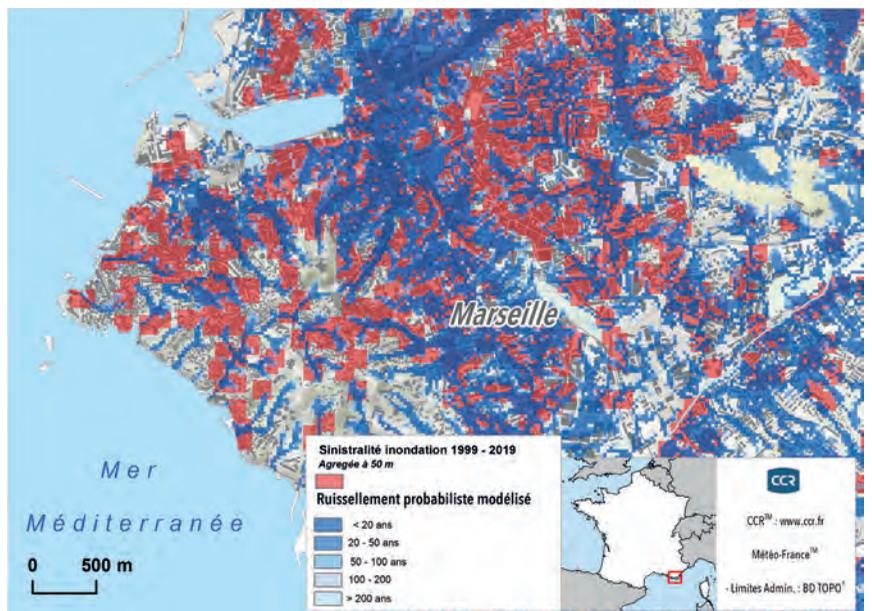


Figure 6 – Superposition du ruissellement probabiliste simulé et des données de la sinistralité inondation (1999 - 2019) dans le centre de ville de Marseille (CCR, 2020).

> CONCLUSION

Le modèle inondation de CCR permet de simuler les événements survenus et probabilistes afin d'estimer le montant des dommages assurantiels dus aux inondations par débordement et ruissellement. Le modèle est utilisé de façon opérationnelle lors de la survenance d'une inondation sur un territoire donné et ses résultats sont fournis lors d'études réalisées dans le cadre de projets de recherche ou en cas de demandes de collectivités territoriales de bassin. À terme, des données d'entrée à plus fine échelle pourront être intégrées dans la chaîne de modélisation afin de réduire les incertitudes liées à la précision des données relatives à la topographie ou à l'occupation des sols par exemple. Enfin, il est important de pouvoir pérenniser les partenariats déjà constitués avec les collectivités locales et les établissements publics de bassins (tels que les EPTB par exemple) mais également d'en constituer de nouveaux afin d'accéder à des données locales et modéliser l'aléa inondation à l'échelle la plus fine possible sur le territoire français./

RÉFÉRENCES

1. Moncoulon, D., Labat, D., Ardon, J., Leblois, E., Onfroy, T., Poulard, C., Aji, S., Rémy, A., and Quantin, A. (2014). Analysis of the French insurance market exposure to floods: a stochastic model combining river overflow and surface runoff. *Natural Hazards and Earth System Science* 14:2469–2485.
2. Zhong L. (2014). - Watershed modeling using arc hydro based on DEMs: a case study in Jackpine watershed. *Environmental Systems Research*; 3, 11
3. Moncoulon, D. Veysseire, M (2018). - Conséquences du changement climatique sur le coût
4. Onfroy, T. Moncoulon, D. Faytre, L (2019). - Etude expérimentale sur le risque inondation dans le bassin versant de la Bièvre. *Cahiers de l'ONRN; Le partage des données pour une meilleure connaissance des risques naturels; ONRN, 2019; Vol. 3, pp. 35–47 des catastrophes naturelles en France à horizon 2050. CCR*
5. Gnonlonfin, A., Piton, G., Marchal, R., Munir, M. B., Wang, Z.X., Moncoulon, D., Mas, A., Arnaud, P., Tacnet JM. & Douai, A. (2019). *DELIVERABLE 6.3 DEMO Insurance Value Assessment - Part 7: France: Brague, NAIAD H2020 project (Grant Agreement n° 730497), 267-428*

CITATION

Onfroy T., Moncoulon D., La modélisation du ruissellement pluvial : Aléa CCR à 25 mètres de résolution. In *Rapport Scientifique CCR 2020* ; CCR, Paris, France, 2021, pp. 11-16



Modélisation des pertes financières dues au risque d'inondation au Maroc

David Moncoulon¹, Jean-Philippe Naulin¹, Thomas Onfroy¹,
Roxane Marchal¹, Thomas Guedez¹,
avec la contribution d'Abderrahim Chaffai², Abderrahim Oulidi²
(1) Département R&D Modélisation Cat & Agriculture, CCR
(2) FSEC, Maroc

INTRODUCTION

Le Maroc est exposé de façon significative aux catastrophes naturelles, telles que les tremblements de terre et les inondations, causant de graves pertes humaines et économiques. Récemment, le Maroc a mis en place un nouveau régime d'indemnisation des catastrophes naturelles ou d'origine anthropique en créant le Fonds de solidarité contre les événements catastrophiques (FSEC). Les missions de cet organisme sont définies par les dispositions de la loi n°110-14 dès lors qu'un événement catastrophique est déclaré comme tel par le Chef du gouvernement. Ce régime dispose d'un volet allocataire, permettant d'indemniser les particuliers qui ne disposent pas d'une couverture d'assurance. Dans ce contexte, les Organismes publics spécialisés dans la gestion des risques, et notamment le FSEC, ont besoin de disposer d'une plateforme de modélisation à jour permettant d'estimer les pertes relatives aux inondations. Soutenu par la Banque Mondiale, le FSEC a proposé un appel à projet pour développer un modèle Cat complet pour le péril inondation. En 2020, un consortium s'est formé, composé de Risk Weather Tech pour la partie modélisation météorologique, Atmoterra pour la partie collecte des données et d'informations sur les systèmes d'alerte, et CCR pour le développement du modèle Cat, allant de l'aléa jusqu'aux dommages. Le projet a duré sept mois. Ce projet a été découpé en 5 parties thématiques :

(1) état des lieux des modèles inondations existant spécifiques au Maroc ; **(2)** collecte des données géographiques et création de bases de données portant aussi sur les événements historiques ; analyse des systèmes d'alerte ; **(3)** formation des utilisateurs au modèle Cat ; **(4)** développement du modèle Cat ; **(5)** maintenance du modèle et collaborations futures.

Cet article se focalise spécifiquement sur les méthodes mises en place pour l'élaboration d'un modèle Cat complet sur le risque d'inondation pour l'ensemble du territoire marocain. L'état des lieux des modèles préexistant, la collecte des données et le modèle météorologique ont été utilisés comme éléments d'entrées permettant d'alimenter le modèle Cat.

MÉTHODOLOGIE

La collecte d'informations et de données géographiques au format SIG ont été utilisées en entrée du modèle Cat d'inondation qui repose sur trois modèles distincts : l'aléa, la vulnérabilité et les dommages.

Durant les premiers mois du projet, les bases de données suivantes ont été constituées :

- une base de données des événements inondations historiques survenus au Maroc ;
- une base de données géographiques (météorologique, hydrologique, vulnérabilité des enjeux, données assuran-

tielles, évaluation de l'aléa glissement de terrain, ...)

- des fiches synthétiques ont été fournies au FSEC pour chaque jeu de données géographiques utilisées dans le projet ;
- le suivi de la collecte, le contrôle et l'évaluation de la qualité des données ont été menés par le consortium durant les premiers mois du projet.

Une géodatabase au format SIG a été constituée et une solution de partage des données avec le FSEC a été mise en place. Enfin, une interface Web SIG hébergée sur un Portal Esri a permis de partager, à partir d'une application cartographique en ligne, les données utilisées dans la modélisation et les résultats de simulation des inondations.

Le modèle d'inondation développé peut fonctionner de deux manières distinctes. La première est la modélisation déterministe. Celle-ci permet d'estimer l'impact d'un événement réel lorsqu'il survient. Ce qui peut être utile notamment pour anticiper les pertes occasionnées suite à une inondation réelle et pour réaliser des études de provisionnement. Le modèle d'aléa sera donc basé sur des données physiques relatives à un événement réel. Le deuxième mode de fonctionnement est la modélisation probabiliste. Il s'agit d'étudier cette fois-ci des événements fictifs mais probables, représentatifs d'une très longue période de simulation (par exemple 1000 ans). Cette modélisation a de nombreuses utilités. Elle peut être utilisée pour mesurer l'exposition financière et ainsi réaliser des études de tarification, pour analyser l'exposition globale d'un territoire et effectuer des actions de prévention dans les zones les plus exposées.

Le modèle d'aléa

Le premier modèle est le modèle d'aléa. Son objectif est de caractériser de manière physique l'impact d'un événement. >

- # inondations
- # modélisation Cat
- # pertes financières
- # Maroc
- # Banque Mondiale

> Dans le cas des inondations, cela peut être en estimant les débordements de cours d'eau, les précipitations et le ruissellement responsables des dommages. On distingue les aléas déterministes, calculés pour des événements réels, des aléas probabilistes, basés sur un grand nombre d'événements fictifs.

Modélisation de l'aléa déterministe

Cette modélisation procède en trois étapes successives. La première consiste à estimer les précipitations des événements passés les plus significatifs. Pour ce faire, une sélection des événements dans la base de données météorologiques ERA5 a été réalisée puis une simulation fine des précipitations a été effectuée grâce au modèle météorologique WRF. Cette descente d'échelle a permis d'avoir une estimation des précipitations à une maille de 1 km² et à un pas de temps d'une heure (figure 1). Les données de précipitations ont été ensuite injectées dans un modèle pluie débit afin de générer des cartes de débits maximum. Pour ce faire, le modèle pluie débit SCS Curve Number^[1] a été utilisé à une résolution de 100 m.

Dans un troisième temps, les données de débit sont utilisées par un modèle de débordement basé sur la méthode Hand^[2], pour estimer les hauteurs d'eau maximales atteintes lors d'un événement. La résolution spatiale de ce modèle de débordement est de 30 m.

Modélisation de l'aléa probabiliste

La différence principale entre l'aléa probabiliste et déterministe vient du scénario de précipitations retenu. Une méthode stochastique, basée sur l'analyse fréquentielle des données de précipitations ERA5 a été mise au point. Cette méthode permet in fine de générer les précipitations de 795 événements sur 1 000 années de simulations.

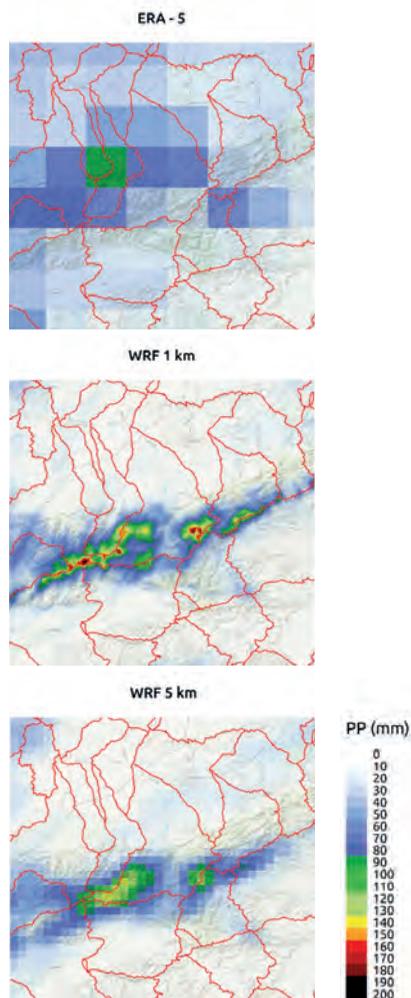


Figure 1 – Cumul de précipitations au cours de l'événement du 16 au 29 octobre 1999 dans la réanalyse ERA-5 (~ 30 km de résolution), la boîte WRF à 5 km de résolution et la boîte WRF à 1 km de résolution.

Une fois les précipitations simulées, une estimation des débits et des débordements est réalisée de la même manière que pour le modèle déterministe.

Le modèle de vulnérabilité

Le second modèle est le modèle de vulnérabilité. Celui-ci permet de localiser les biens exposés et de les estimer en termes de valeur, de caractéristiques telles que la nature du bien (maison, appartement, industrie, etc.), son occupation (locataire, propriétaire) et bien d'autres éléments décrivant le bien (âge, type de construction, nombre d'étages, etc.). Ce modèle de vulnérabilité a été construit à partir de trois sources de données :

1. Le site de la direction générale des Impôts, qui contient un référentiel des prix de l'immobilier ville par ville (on entend par ville le milieu urbain d'une province). Des données sur les coûts à la construction sont également disponibles.
2. Les données démographiques et socio-économiques de la population du Maroc selon le recensement général de la population et de l'habitat de 2014. Cette donnée est partagée par le Haut-Commissariat au Plan (HCP) qui a publié en 2019 un échantillon de 10 % des données issues du recensement général de 2014^[3]. Il s'agit d'un recensement réalisé sur les ménages marocains et qui contient un certain nombre de variables pertinentes pour construire le portefeuille.
3. Enfin, la troisième source de données est une enquête du ministère de l'Habitat et de la Politique de la Ville (MHPV) de 2016^[4]. Cette enquête contient de nombreuses informations sur l'habitat marocain et notamment sur la superficie des bâtiments.

Le modèle de dommages

Le modèle de dommages a pour objectif de calculer le montant des pertes à partir de l'aléa et de la vulnérabilité. Pour chaque bien, le montant des dommages D est estimé en faisant le produit entre la valeur du bien V et le taux de destruction TD. Ce taux de destruction est dérivé des courbes d'endommagement du modèle MnhPRA (Morocco natural hazards Probabilistic Risk Analysis). Le modèle précité est un modèle Cat probabiliste et multipérils développé par RMSI Pvt. Ltd en collaboration avec le HCP entre 2009 et 2013 [5]. La partie financière du modèle, XCat, a été développée en 2017. Ce modèle permet d'informer le gouvernement des incidences financières et fiscales pour les réflexions autour du projet de loi instituant le régime de couverture des catastrophes naturelles. Il est bien documenté avec une interface QGIS permettant de lancer les simulations et de visualiser les résultats. Le tableau 1 synthétise les avantages et les inconvénients de la partie inondation de MnhPRA par rapport au modèle développé par le consortium en 2020.

RÉSULTATS

Modèle d'aléa

Les résultats du modèle d'aléa permettent de visualiser sous format cartographique SIG les débordements et les débits calculés pour chaque événement (figure 2). L'inondation est alors modélisée en termes de hauteurs d'eau et de débits de ruissellement sur les bassins versants touchés par l'inondation.

En ce qui concerne le modèle d'aléa probabiliste, les cartes d'aléa simulé sont analysées de manière à estimer, pour chaque pixel la période de retour de l'inondation comme le montre la figure 3 sur l'agglomération de Marrakech.

	Module Aléa	Module Vulnérabilité	Module de dommage
Avantages	Multi-périls	Types de risques détaillés (29 types de risques)	Possibilité d'avoir une multitude de graphiques Réponds aux besoins du volet assurantiel
Inconvénients	Focus sur certaines zones (ou bassins versants) Pas de temps journalier Résolution de 90 m Catalogue d'événements historiques limité	Données socio-économiques relativement anciennes (années 2000 pour les plus anciennes) Valeurs des biens est la même par province indépendamment du type de risque Fonctionne sur des systèmes d'exploitations anciens (sous W-XP et W7) Problématique de maintenabilité de l'interface QGIS	Manque d'interaction entre la partie aléa et dommage Modélisation probabiliste des pertes uniquement
Approche du Consortium	Modélisation monopéril du risque inondation sur tout le Maroc : intégration de petits bassins versants et d'un pas de temps fin permettant de modéliser les crues éclair Modèle météorologique robuste permettant d'affiner les données Résolution 30 m à 10 m Modélisation déterministe d'un événement à partir des conditions météorologiques de celui-ci (et non pas d'un catalogue d'événement) Modèle probabiliste basé sur la génération d'un catalogue d'événements fictifs	Prise en compte des spécificités du volet allocataire du FSEC : portefeuille développé uniquement sur les risques couverts par le régime. C'est-à-dire les risques de particuliers non assurés pour la perte de résidence principale (indemnisation du propriétaire pour la réhabilitation du bâtiment) ou pour la privation de jouissance (pour les propriétaires et locataires) Valeurs des biens évaluées par type de risque et par province Pour le volet assurantiel les bâtiments et contenus sont assurés, les compensations sont plafonnées à 3,3 milliards de MAD.	Transparence et formation continue et spécifique à l'utilisation du modèle développé Interface <i>user-friendly</i> , avec codes sources disponibles (R ou autres logiciels à définir lors de la partie industrialisation du modèle)

Tableau 1 – Avantages et inconvénients de la partie inondation de MnhPRA par rapport au modèle développé par le consortium en 2020.

- # inondations
- # modélisation Cat
- # pertes financières
- # Maroc
- # Banque Mondiale

> Modèle de dommages

Le modèle de dommages intègre les conditions des couvertures d'assurance/réassurance telles que les seuils ou les franchises. Dans le cadre de la mise en place du régime d'allocations aux victimes des inondations, le schéma d'indemnisation suivant a été mis en place :

- lorsqu'un propriétaire voit sa maison touchée, le montant de l'indemnité est calculé selon l'article 40 de la loi n°110-14, et correspond à la somme de la perte de résidence et de la perte de jouissance. La perte de résidence correspond au minimum entre la valeur des dommages D, 70 % coût de reconstruction à neuf et une limite de 250 000 MAD. La perte de jouissance est calculée comme étant 6 fois la valeur locative du bien (comprise entre 1 000 et 4 000 MAD);

- pour les locataires, le montant de l'indemnité est fixé à 3 fois la valeur locative, qui doit également être comprise entre 1 000 et 4 000 MAD.

Enfin, il faut noter que pour que le bien soit indemnisé, il faut qu'il soit considéré comme inhabitable.

Le résultat du modèle de dommages est une estimation des pertes à l'échelle du bien, d'une entité administrative (commune, province, etc.) ou encore du pays.

Interface de calcul

Afin de permettre aux utilisateurs de lancer des analyses et de simuler les dommages, une interface de modélisation a été développée grâce au package Shiny de R. Cette interface permet notamment :

- d'estimer les pertes sur un événement réel ;
- de réaliser des analyses d'exposition ;
- d'estimer les pertes moyennes annuelles et les distributions de pertes probabilistes (EP-curve) ;
- de cartographier ces pertes probables par commune ou par province.

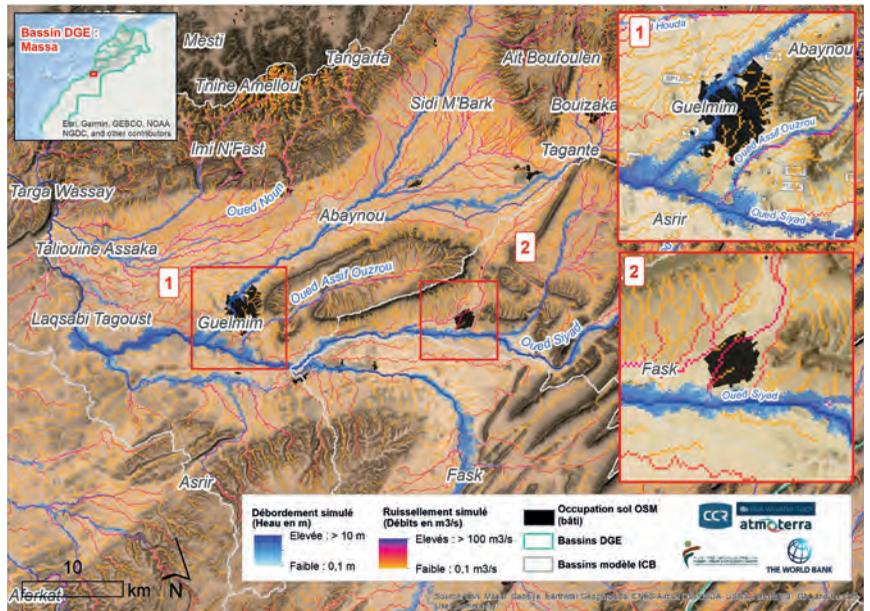


Figure 2 – Exemple de hauteurs d'eau et de débits simulés pour l'événement de novembre 2014.

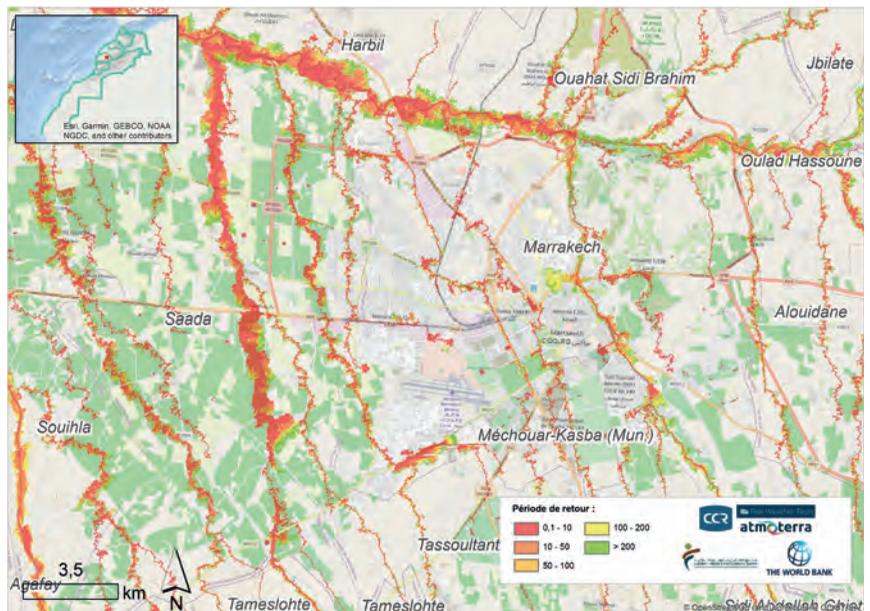


Figure 3 – Représentation de l'aléa probabiliste pour l'agglomération de Marrakech.

LES PARTENAIRES

Risk Weather Tech 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.

Elle laisse également à l'utilisateur la possibilité d'actualiser ses données de vulnérabilité, de modifier les courbes d'endommagement utilisées, de modifier les taux de pénétration de l'assurance, etc. La figure 4 montre une illustration des pertes probabilistes obtenues par l'interface.

CONCLUSION

Le modèle développé dans le cadre de cette étude a permis aux pouvoirs publics marocains ainsi qu'au FSEC de disposer d'un modèle Cat permettant de mieux comprendre et d'estimer l'exposition du territoire national au risque d'inondation. Les expériences de consortium en matière de collecte de données, modèles météorologiques et modélisation de l'impact économique des risques naturels

ont également fait l'objet d'échanges avec les acteurs marocains de la gestion des risques.

L'étude des systèmes d'alerte pourra fournir des éléments d'aide à la décision pour sélectionner les systèmes les plus adaptés aux bassins versants et d'intégrer ces éléments en matière de prévention.

Des améliorations du modèle pourront être effectuées à l'avenir, telles que l'intégration de nouvelles données sur l'exposition des biens, la constitution d'une base de données de sinistralité avec la prise en compte du changement climatique. Un nouveau modèle de vulnérabilité efficient et adéquat pourra être élaboré.

Ces travaux se poursuivent dans le cadre d'une collaboration de long-terme avec la Banque Mondiale, l'OCDE et le FSEC, portant notamment sur l'analyse des risques extrêmes en termes financiers./

RÉFÉRENCES

1. United States Department of Agriculture (1986). Urban hydrology for small watersheds (PDF). Technical Release 55 (TR-55) (Second ed.). Natural Resources Conservation Service, Conservation Engineering Division
2. Zheng X., Tarboton D.G., Maidment D.R., Liu Y.Y., and Passalacqua P. 2018. " River Channel Geometry and Rating Curve Estimation Using Height above the Nearest Drainage." Journal of the American Water Resources Association 54(4): 785– 806. <https://doi.org/10.1111/1752-1688.12661>.
3. Haut-Commissariat au Plan, 2014. Recensement général de la population et de l'habitat 2015. Résultats disponibles par région. Exemple sur la région de l'Oriental. 36p. Oujda, Maroc. https://www.hcp.ma/region-oriental/docs/RGPH2014/Premiers%20Resultats%20du%20RGPH%202014final_29_04_2015.pdf
4. Ministère de l'Habitat et de la Politique de la Ville, 2016. Etude relative à l'enquête nationale sur la demande en habitat. Phase 3, exploitation et analyse des résultats de l'enquête nationale. Rapport de synthèse. 185p. <http://www.mhvp.gov.ma/wp-content/uploads/2016/07/ENDH-Synthese.pdf>
5. RMSI, 2012. Morocco Natural Hazards Probabilistic Risk Analysis and National Strategy Development. Serie of reports. Project funded by the World Bank-GFDRR and the Swiss government.

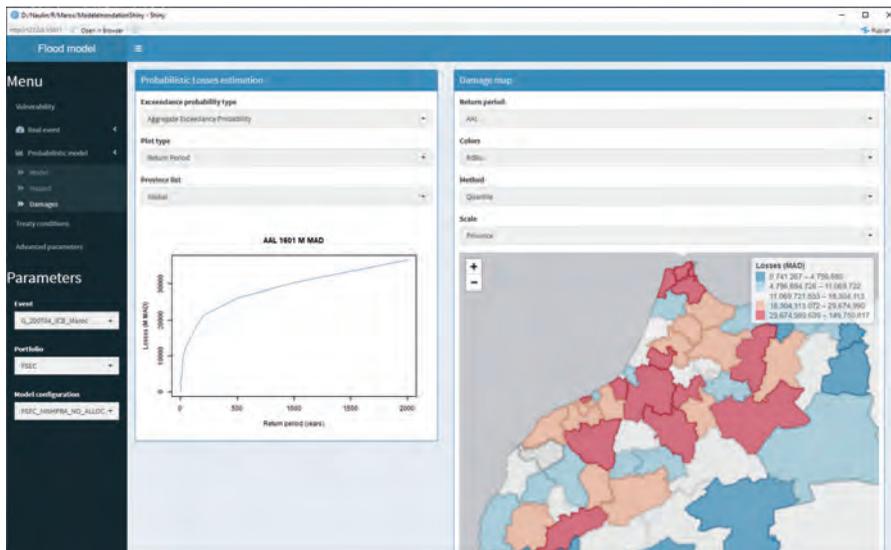


Figure 4 – Interface de calcul et exemple de pertes probabilistes simulées pour le Maroc.

CITATION

Moncoulon D., et al., Modélisation des pertes financières dues au risque d'inondation au Maroc. In Rapport Scientifique CCR 2020 ; CCR, Paris, France, 2021, pp. 17-21

Cartographie de synthèse de l'impact des inondations en France métropolitaine



Thomas Onfroy¹, Nathalie Orlhac²

(1) Département R&D Modélisation Cat & Agriculture, CCR

(2) Département Data Science et Actuariat, CCR

INTRODUCTION

En 2020, CCR a réalisé une cartographie de synthèse de l'impact des inondations en France. Cette cartographie a été élaborée à partir des résultats du modèle probabiliste inondation CCR, des données géolocalisées de sinistralité historique liées aux inondations et d'une analyse de la vulnérabilité des territoires face aux inondations, basées sur la carte d'occupation du sol OSO Théia à 10 m de résolution ^[1]. Ce travail a pour objectif

de rendre accessible à différents types de publics (particuliers, entreprises, collectivités territoriales, assureurs, services de l'État,...) une carte synthétique de l'impact potentiel des inondations en France métropolitaine, basée sur le croisement d'indicateurs pertinents de mesure du risque.

La carte de synthèse de l'impact des inondations (figure 1), a été mise en ligne sur le portail Cat Nat CCR tout public :

catastrophes-naturelles.ccr.fr. Cette cartographie propose une mesure qualitative de l'impact des phénomènes d'inondation : débordement des principaux cours d'eau ^[2], ruissellement pluvial sur l'ensemble du réseau hydrographique ^[2], submersion marine sur le littoral et zones de sinistralités historiques. Cette nouvelle cartographie, utilisable et compréhensible par tous repose sur des données numérisées

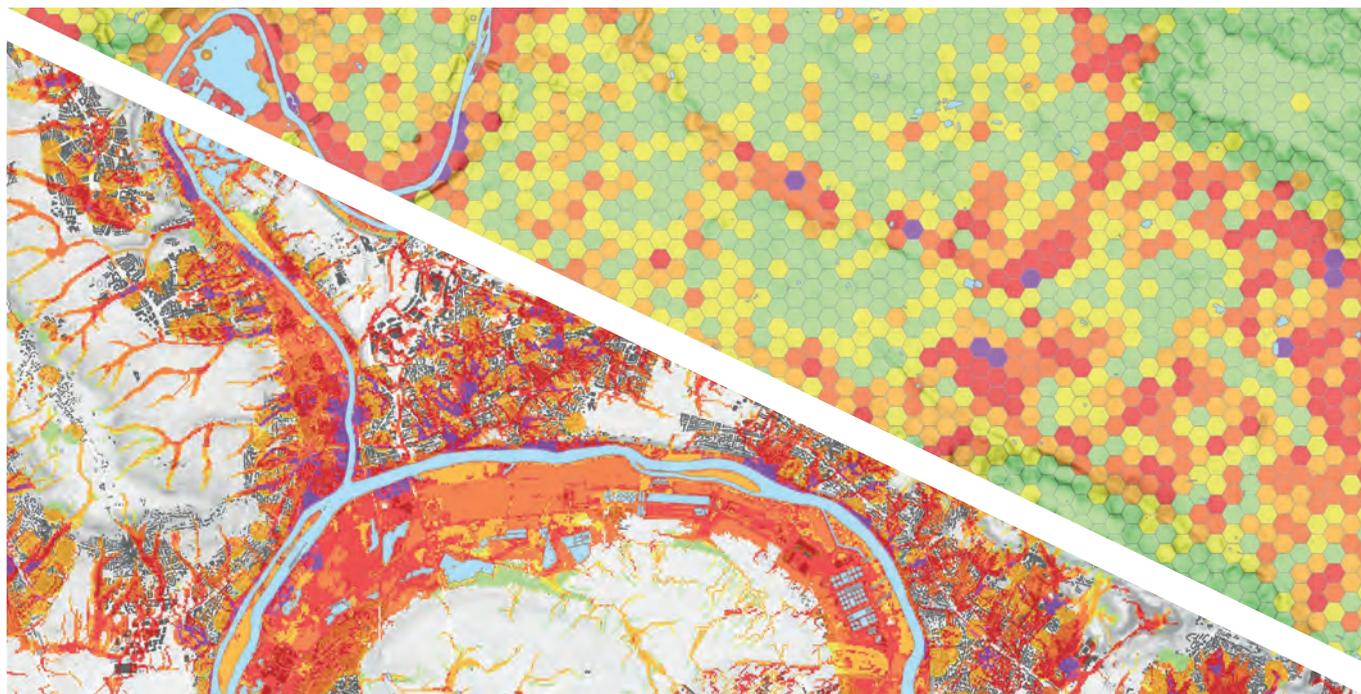


Figure 1 – Carte de l'impact des inondations CCR. Résultats à 25 m et ré-échantillonnage des résultats dans des hexagones à 250 m de résolution (CCR, 2020).

consultables en ligne à une échelle infracommunale, participant ainsi aux politiques de prévention et au renforcement de la culture du risque inondation. Cet article décrit la méthode adoptée pour produire la carte de synthèse, basée sur la superposition de données de modélisation et assurantielles, paramétrées et cartographiées sous SIG (Système d'Information Géographique). L'analyse multicritères conduite par CCR renseigne sur le niveau d'impact des inondations sur l'ensemble du territoire métropolitain de façon homogène.

MÉTHODOLOGIE

Une analyse multicritères permet de croiser les deux indicateurs suivants pour réaliser la carte de synthèse de l'impact des inondations :

1. Un indicateur de sinistralité réelle utilisant les sinistres historiques issus de la base de données CCR.

2. Un indicateur de sinistralité potentielle calculé par le croisement des informations suivantes :

- la fréquence de l'aléa inondation basée sur la modélisation probabiliste CCR ;
- la vulnérabilité des territoires face aux inondations basée sur les données d'occupation du sol de « OSO Théia ».

La superposition spatiale de scores propres à chaque indicateur, a permis d'obtenir une somme correspondante au niveau de l'impact des inondations en tout point du territoire et de façon homogène (figure 2).

Indicateur de sinistralité réelle

Les sinistres des bases de données CCR correspondent aux adresses impactées par un ou plusieurs événements inondation sur la période 1995 – 2019 pour des biens de particuliers et de professionnels assurés dans le cadre du régime des catastrophes naturelles. Le nombre d'événements survenus et le coût des dommages subis par le bien sont également connus pour chaque adresse sinistrée.

Cet indicateur a ainsi pu être paramétré sous SIG à partir de la localisation des adresses sinistrées, du nombre d'événements inondation survenus sur chaque adresse et du coût total du ou des sinistres (une adresse ayant pu être impactée une ou plusieurs fois par une inondation). Un score de 1 à 6 est ensuite affecté en fonction du coût total et du nombre

d'événements inondation survenus pour chaque bien sinistré, comme schématisé sur la matrice de pondération.

Pour des raisons de confidentialité et afin de pouvoir être superposables aux autres indicateurs de l'analyse, les sinistres représentés sous forme de points géolocalisés ont été agrégés par une méthode d'analyse spatiale d'accumulation par voisinage de type statistiques de points^[3]. Cet outil permet d'effectuer une opération de voisinage qui calcule une grille dans laquelle la valeur de chaque cellule en sortie est fonction des valeurs des entités ponctuelles en entrée qui se trouvent dans le voisinage spécifié d'une fenêtre glissante. La moyenne de toutes les valeurs présentes dans ce voisinage a été sélectionnée comme indicateur (figure 3).

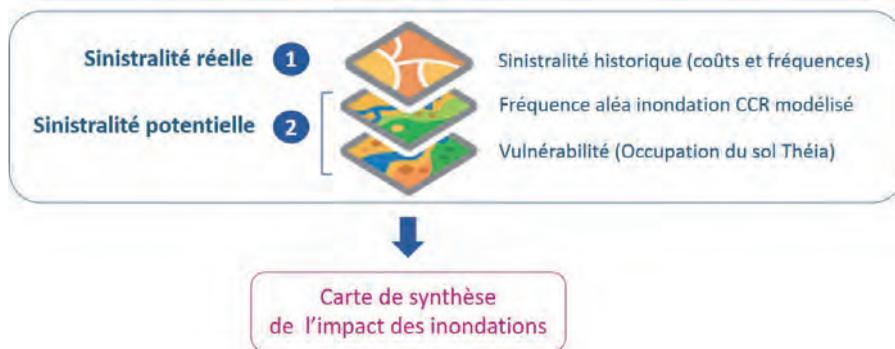


Figure 2 – Méthodologie d'élaboration de la carte de synthèse de l'impact des inondations

- # inondation
- # carte d'impact
- # indicateur
- # sinistralité
- # aléa
- # occupation du sol

> **Indicateur de sinistralité potentielle**

a. Fréquence de l'aléa inondation probabiliste CCR

Une modélisation probabiliste est mise en place par CCR afin de mesurer l'exposition financière du marché de l'assurance et de l'État au péril inondation. La fréquence de survenance des inondations est cartographiée en périodes de retour (PDR) de l'aléa, sur des mailles de 25 m x 25 m pour l'ensemble du territoire métropolitain (figure 4). Pour constituer cet indicateur, un score lié à la PDR de l'aléa a été affecté (figure 5).

b. Vulnérabilité des territoires face aux inondations basé sur les données d'occupation du sol « OSO Théia ».

Cet indicateur est basé sur les données d'occupation du sol OSO (Centre d'expertise scientifique « Occupation des sols ») produites par le pôle Théia (CNES/CESBIO) en 2018. Élaborée à partir de données d'imagerie satellitaires optiques Sentinel-2 de l'ESA à 10 m de résolution, cette donnée d'occupation des sols est la plus précise disponible à ce jour à l'échelle de la France métropolitaine.

Sur chacune des 25 classes de la couche OSO Théia, un score prenant en compte la sensibilité des différents types d'occupation du sol aux inondations a été affecté ^[4].

La superposition des scores de l'indicateur OSO Théia avec les scores de l'indicateur basé sur la fréquence de l'aléa inondation CCR permet d'atténuer ou d'amplifier l'impact de l'aléa en fonction des différents types d'occupation du sol (figure 6).

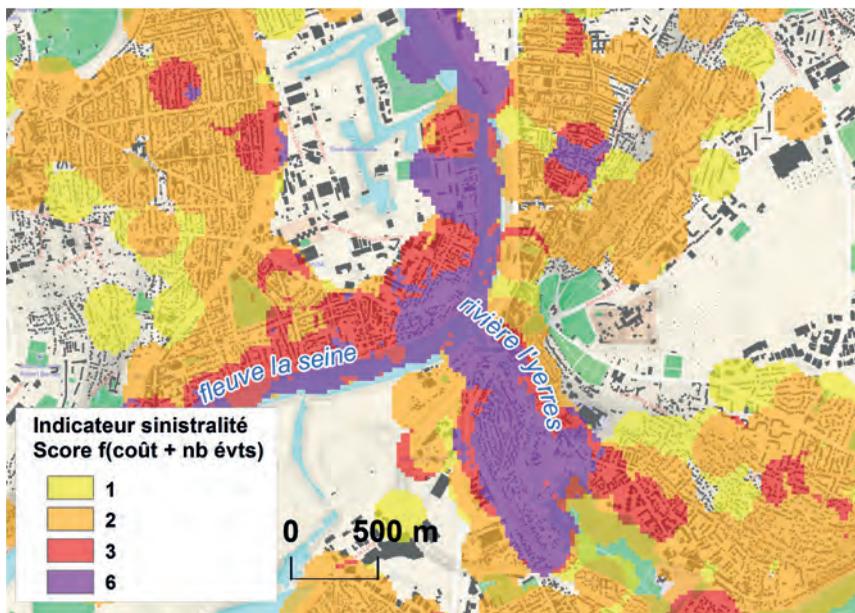


Figure 3 – Données agrégées pour la mise au point du second indicateur.

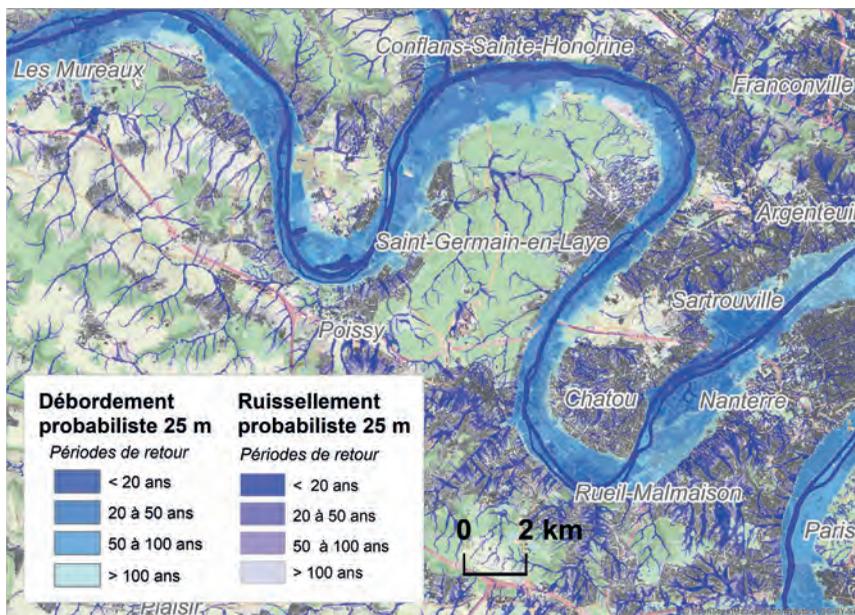


Figure 4 – Débordement et ruissellement probabiliste simulé dans le bassin de la Seine en aval de Paris.

Priode de retour de l'aléa	Score
PDR 200 ans	2
PDR 100 à 200 ans	3
PDR 20 à 100 ans	4
PDR < à 20 ans	5

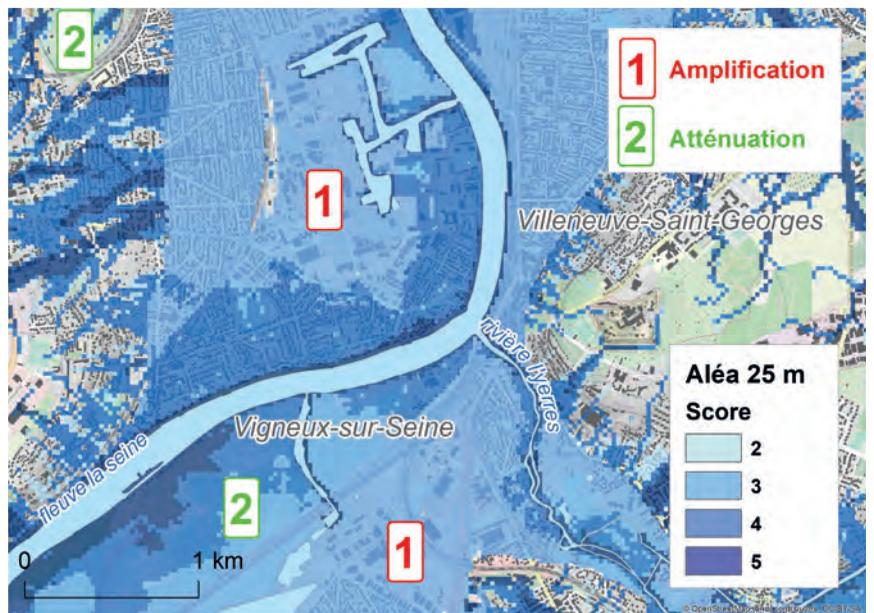


Figure 5 – Attribution du score basé sur la fréquence de l'aléa inondation.

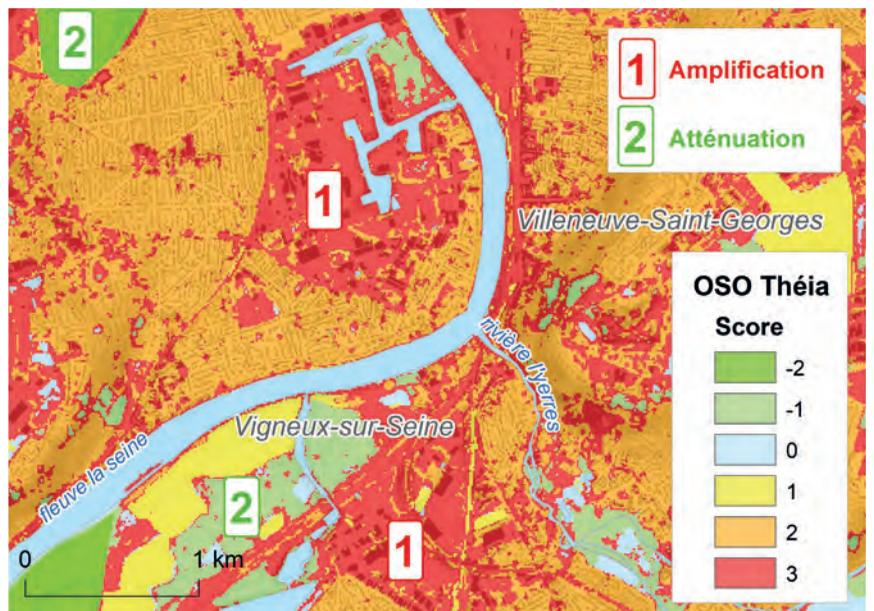


Figure 6 – Effet de l'indicateur OSO Théia sur l'amplification ou l'atténuation de l'aléa inondation.

- # inondation
- # carte d'impact
- # indicateur
- # sinistralité
- # aléa
- # occupation du sol

> RÉSULTATS

La carte de synthèse résulte de la superposition des deux indicateurs présentés précédemment. L'analyse multicritères réalisée consiste à sommer les scores de chaque indicateur en tout point du territoire (pour chaque maille de 25 m). Cela permet d'obtenir une information sur l'impact des inondations sur l'ensemble du territoire métropolitain.

Ce résultat correspond à une reclassification du score « brut » (somme des scores des deux indicateurs). En sortie, six classes apparaissent. L'impact des inondations est caractérisé de très faible (1) à majeur (6) (table 1). Les surfaces en eau (eaux permanentes de la BD TOPO de l'IGN) apparaissent sur la carte mais n'ont pas été prises en compte dans l'analyse multicritères.

La superficie totale de la carte d'impact des inondations est de 105 691 km², soit 19 % du territoire métropolitain. L'essentiel étant impacté pour des niveaux « mo-

déré » et « fort » avec 88 117 km², soit 16 % du territoire. Quant au niveau d'impact « majeur », il représente 0,2 % du territoire (1012 km²). 0,2 % du territoire soumis à un impact majeur des phénomènes d'inondation et peut paraître faible, cependant ce sont les espaces densément urbanisés et industrialisés qui restent les plus impactés par ce péril en métropole. Si l'on se réfère aux données d'occupation du sol OSO Théia 2018 pour connaître la superficie des centres urbains et des zones industrielles et commerciales de métropole, on en relève 20 566 km² sur l'ensemble du territoire. En fin de compte, selon l'analyse multicritères à 25 m de résolution, 5 % (1012 sur 20 566 km²) des espaces occupés par un tissu urbain dense et par des sites industriels et commerciaux sont soumis à l'impact d'inondations majeures. La figure 7 présente le résultat de l'analyse sur l'une des boucles de la Seine en aval de Paris.

Score brut	Score reclassé	Carte d'impact des inondations	Superficie en km ²	% du territoire
-2 à 1	1	très faible	3074	0,6 %
1 à 2	2	faible	5358	1,0 %
2 à 4	3	modéré	45740	8,3 %
4 à 6	4	fort	42377	7,7 %
6 à 8	5	très fort	8130	1,5 %
8 à 14	6	majeur	1012	0,2 %
-	-	surfaces en eau	8010	1,5 %
Superficie totale carte d'impact			105 691 km²	19 %
Superficie totale France			548 499 km²	

Table 1 – Reclassification des scores sommés et légende de la carte d'impact à 25 m de résolution.

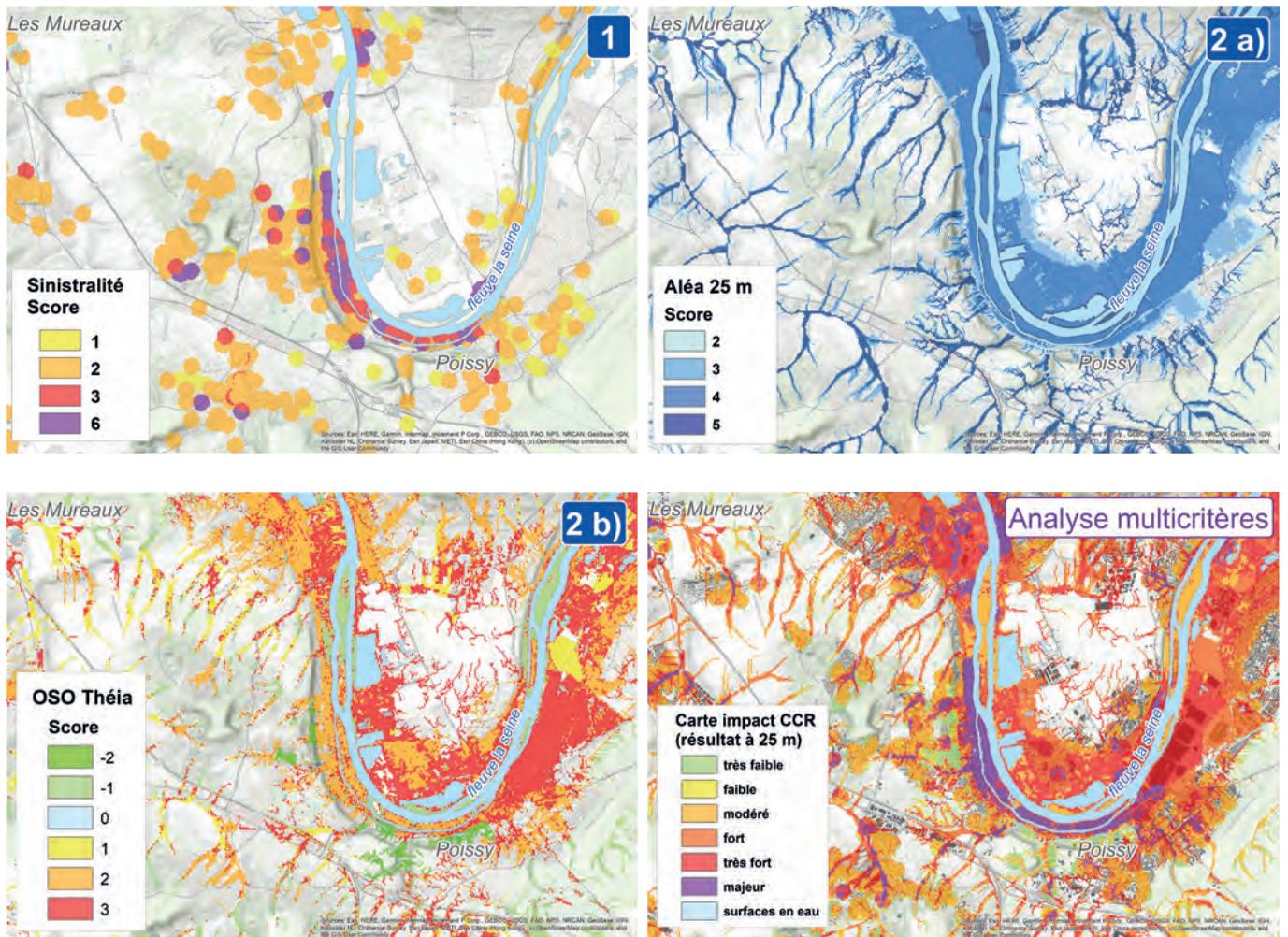


Figure 7 – Carte de synthèse de l'impact des inondations

- # inondation
 - # carte d'impact
 - # indicateur
 - # sinistralité
 - # aléa
 - # occupation du sol
-

- > Le résultat de l'analyse multicritères cartographié est ensuite ré-échantillonné (principe de la tessellation) dans une grille à mailles hexagonales 62 500 m² (surface équivalente à un carré de 250 m x 250 m) pour des raisons de confidentialité et afin de pouvoir être diffusée à un large public. Le maillage carré est le type de forme le plus couramment utilisé pour la représentation de divers phénomènes sous SIG, cependant les hexagones sont mieux adaptés à des analyses de ré-échantillonnage^[4]. En effet, les hexagones réduisent les déformations provoquées par les effets de bord inhérents à la forme d'une grille carrée, le rapport périmètre-surface de l'hexagone étant inférieur à celui d'un carré. Par rapport à des mailles carrées, les hexagones bénéficient donc d'une meilleure prise en compte des dynamiques spatiales existantes avant ré-échantillonnage. Pour chaque maille de 25 m de la carte d'impact contenant un score de 1 à 6, chaque hexagone en sortie contient désormais la moyenne des scores des mailles de 25 m qui se trouvent dans l'emprise de l'hexagone. Pour tous les hexagones au sein desquels les mailles de 25 m sont en majorité des valeurs nulles (score de 0), la moyenne produira le score le plus faible (score de 1). À noter que les surfaces en eau figurent uniquement à des fins d'habillage cartographique. Ces dernières n'ont pas été prises en compte dans le ré-échantillonnage, ni dans l'analyse multicritères.

CONCLUSION

L'analyse multicritères réalisée sur la base de deux indicateurs CCR de sinistralité observée et potentielle, permet de caractériser le risque inondation, de façon homogène sur le territoire métropolitain à partir de cette cartographie de synthèse. L'utilisation de l'occupation du sol à 10 m de résolution (OSO Théia) permet l'atténuation ou l'amplification du risque en distinguant notamment les secteurs urbanisés des secteurs naturels ou agricoles. Pour contribuer aux politiques de prévention et partager sa connaissance du risque inondation, CCR diffuse ces résultats à une résolution de 25 m, pour les professionnels, sur sa plateforme web sécurisé Espace Pro CCR. Une version ré-échantillonnée à 250 m est disponible sur son portail tout public : catastrophes-naturelles.ccr.fr.

Ces indicateurs seront mis à jour régulièrement avec les nouveaux sinistres enregistrés et suivront l'amélioration continue du modèle inondation CCR afin de proposer une information actualisée. Il est envisagé de prendre en compte dans cette cartographie de synthèse un scénario d'aléa issu des travaux de CCR sur le changement climatique à horizon 2050 et d'étendre l'analyse aux territoires ultra-marins./

RÉFÉRENCES

1. J. Inglada, 2018. Carte d'occupation des sols de la France métropolitaine. Pôle Théia (CNES/CESBIO). <https://www.theia-land.fr/product/carte-doccupation-des-sols-de-la-france-metropolitaine/>
2. D. Moncoulon et al, 2014. Analysis of the French insurance market exposure to floods: a stochastic model combining river overflow and surface runoff. NHESS, <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01070525>
3. Esri, 2016. Statistiques de points (Spatial Analyst)
- 4 J. Bailey Smith, 2015. North Atlantic Coast Comprehensive Study: Resilient adaptation to increasing risk: Main report IV. RISK MANAGEMENT FRAMEWORK FOR VULNERABLE POPULATIONS. (USACE). <https://usace.contentdm.oclc.org/digital/collection/p266001coll1/id/2793/>
- 5 Birch et al, 2007. Rectangular and hexagonal grids used for observation, experiment, and simulation in ecology. Ecological Modelling

CITATION

Onfroy T., Orlhac N.,
Cartographie de synthèse de
l'impact des inondations en
France Métropolitaine.
In Rapport Scientifique CCR
2020 ; CCR, Paris, France,
2021, pp. 22-29

Analyse des incertitudes dans le modèle d'aléa submersion marine



Élodie Perrin Tran Vi-vi¹, Jean-Philippe Naulin²

(1) ONERA – Centre de Toulouse

(2) Département R&D Modélisation Risques Cat & Agriculture, CCR

INTRODUCTION

La modélisation des zones submergées lors d'une inondation côtière est un exercice difficile, entaché d'incertitudes. Ces incertitudes proviennent des données qui alimentent le modèle, tels que les forçages marins au large (vagues et niveau d'eau) ou l'altitude du modèle numérique de terrain (MNT). D'autres proviennent des paramètres du modèle tels que la rugosité du sol. C'est pourquoi une thèse en mathématiques appliquées, portant sur l'analyse des incertitudes dans le modèle submersion marine, a été soutenue en 2021, en partenariat avec le BRGM et l'École des mines de Saint-Étienne^[1]. L'objectif est d'identifier et de hiérarchiser les sources d'incertitudes afin de prioriser les fonctionnalités qui peuvent être améliorées dans le modèle.

Les méthodes d'analyse de sensibilité (AS) permettent d'effectuer cette identification et cette hiérarchisation, notamment par la définition d'indices de sensibilité mesurant l'influence d'une ou plusieurs entrées du modèle sur la variabilité des sorties. Un des indices le plus utilisé est l'indice de Sobol^[2] qui est basé sur la décomposition de la variance de la sortie. Cet article présente la démarche utilisée lors de la thèse et les résultats issus de la métamodélisation.

MÉTHODOLOGIE

Deux problèmes se posent pour le calcul de l'indice de Sobol. Le premier est que son estimation nécessite un très grand nombre de simulations du modèle pour prendre plusieurs jours, voire plusieurs semaines. Le second problème est que la sortie du modèle, constituée des hauteurs d'eau maximales simulées lors d'un événement, est une donnée spatiale avec de fortes discontinuités.

Pour pallier le premier problème, il est possible de construire un modèle de substitution, appelé métamodèle. Des méthodes existent comme par exemple la régression linéaire, la régression par processus Gaussien (RPG), etc. Cependant, quelles que soient les méthodes de métamodélisation, le second problème subsiste. Ainsi, une méthode a été mise au point pour construire un métamodèle tout en tenant compte des propriétés spatiales des cartes observées. Une fois le métamodèle construit, il est possible d'obtenir un nombre suffisant de simulations pour estimer les indices de Sobol. Cependant, la problématique des données spatialisées se pose aussi pour l'AS. Comme pour le métamodèle, traiter chaque localisation de la carte une à une serait long en temps de calcul et peu pertinent. De plus, il est intéressant de synthétiser l'influence d'une ou de plusieurs entrées sur l'ensemble de la carte de hauteurs d'eau prédite en un seul indice. Un indice spécifique a donc été mis au point pour ce cas d'étude.

Deux modèles d'aléa permettant d'estimer les hauteurs d'eau maximales

atteintes lors de l'inondation dans les terres, sont analysés : le modèle utilisé par CCR, basé sur Lisflood-FP^[3, 4] et celui du BRGM qui repose sur les travaux de Lazure et Dumas, 2008^[5]. Les entrées de ces deux modèles ont des sources d'incertitudes similaires :

- le forçage marin, correspondant au niveau d'eau en mer variant au cours du temps ;
- le Modèle Numérique de Terrain ;
- les connexions hydrauliques et la rugosité du sol.

Certaines de ces variables peuvent être considérées comme des variables continues, par exemple la rugosité, alors que d'autres sont des variables catégorielles comme les conduites hydrauliques qui peuvent être activées ou non. Le modèle de dommages présente également d'autres sources d'incertitudes telles que la valeur estimée du bien ou sa position. L'objectif de ce travail est d'estimer l'influence de chacune de ces variables ainsi que l'incertitude associée sur le modèle d'impact.

Construction du métamodèle et analyse de sensibilité sur des variables continues

Afin de développer la méthode d'estimation des incertitudes, les premiers développements ont porté sur le cas de variables continues, correspondant au forçage marin. L'objectif est de mesurer l'impact des paramètres de forçages marins tels que la marée et la surcote, sur l'emprise de l'inondation et des hauteurs d'eau associées.

L'objectif de la métamodélisation est de remplacer un modèle physique par un modèle mathématique, beaucoup plus rapide, afin de tester un grand nombre de variations possibles du modèle initial. Le métamodèle est une fonction mathématique qui va estimer les sorties du modèle d'impact pour un jeu de données

d'entrée, en se basant sur l'observation d'un nombre limité de simulations. Dans le cas des sorties spatiales, une approche classique consiste en :

- **{1}** résumer les cartes de calibration en un nombre restreint de variables (entre 1 ou 10 variables) par analyse en composantes principales (ACP) ;
- **{2}** construire un méta-modèle (régression linéaire, RPG, réseau de neurones etc.) pour chacune des variables ;
- **{3}** pour un nouveau jeu d'entrées, prédire ces variables grâce aux méta-modèles construits dans l'étape **{2}** ;
- **{4}** construire la carte associée à ces variables prédites, ce qui correspond à l'estimation des hauteurs d'eau maximales lors d'un événement.

En pratique, cependant, l'étape **{1}** est difficilement applicable au vu de la taille de la carte. De plus, l'ACP ne prend pas en compte la dépendance spatiale entre les différentes localisations et la régularité des cartes. Pour pallier ces inconvénients, une modification de l'étape **{1}** a été effectuée en réalisant une ACP fonctionnelle sur base d'ondelettes. L'ACP fonctionnelle revient ici à effectuer une ACP classique, non pas sur les localisations, mais sur les coefficients d'ondelettes. La décomposition sur base d'ondelettes permet de considérer la structure spatiale des cartes en étudiant les fréquences des hauteurs d'eau et leurs localisations.

Analyse de sensibilité sur des variables mixtes

Une fois la méthodologie testée sur le cas simple des variables continues, les travaux ont porté sur l'ensemble des variables du modèle d'aléa, comprenant à la fois des variables continues et des variables catégorielles. Les variables retenues sont les suivantes :

- Le forçage marin, correspondant à une variable catégorielle binaire. Les deux

possibilités sont le forçage BRGM et le forçage CCR ;

- les coefficients de rugosité : on distingue 12 types d'occupation du sol dans la zone d'étude. Pour chacun de ces types, un coefficient de rugosité différent peut être attribué. Ces coefficients correspondant à des variables continues ;
- les connexions hydrauliques : on distingue sept connexions hydrauliques que l'on considère comme des variables catégorielles binaires ; ces connexions peuvent être activées ou non.

a. Localisation du site



b. Paramétrisation des forçages temporels

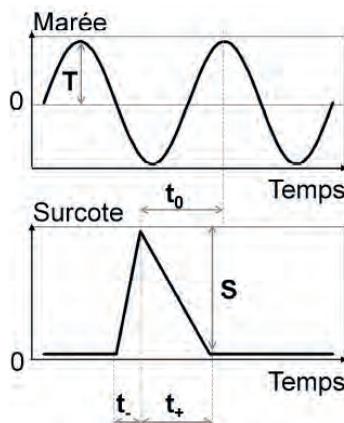


Figure 1 – Localisation du site d'étude (a) et représentation schématique des paramètres testés (b).

RÉSULTATS

Le site d'étude choisi est celui des Boucholeurs. Ce site, situé sur la côte Atlantique française à proximité de La Rochelle, a été fortement touché lors de la tempête Xynthia en 2010. Comme l'illustre la figure 1, cinq variables ont été considérées : l'amplitude de la marée (T), la surcote atmosphérique (S), le phasage entre la surcote et la marée (t_0), la durée de montée de la surcote (t) et la durée de descente de la surcote (t_+). Au final, le forçage du modèle est composé de la somme de la marée et de la surcote. Ce forçage a été utilisé pour alimenter les modèles de débordement de CCR et de BRGM. 500 événements de calibration ont été simulés par modèle en faisant varier ces 5 paramètres. Une fois ces événements simulés, un méta-modèle a été calibré sur chacun des modèles et une analyse de sensibilité a été réalisée.

Une fois le métamodèle en place, il est possible d'obtenir autant de simulations que nécessaire afin d'estimer les indices de Sobol et donc réaliser l'AS. L'indice de Sobol est un des indices de sensibilité le plus souvent utilisé, permettant d'assigner un indicateur

submersion marine
 # inondation
 # métamodèle
 # analyse de sensibilité

> de l'influence d'une ou des entrées du modèle sur la variabilité du résultat du modèle. Plus l'indice est proche de 1, plus le paramètre a une influence. On peut ainsi classer l'influence des paramètres selon l'ordre décroissant des valeurs des indices. Dans la thèse, une adaptation de cet indice a été réalisée sur la base des travaux de Lamboni et al., 2011 [6].

La figure 2 montre les indices calculés pour chaque variable. Les indices du premier ordre sont la valeur de l'influence seule de l'entrée alors que les indices totaux sont la valeur de l'influence de l'entrée en interaction avec les autres entrées du modèle. L'amplitude de la marée semble être le paramètre le plus influent avec environ 70 % d'influence seul. Puis le second paramètre influent est celui du phasage entre la surcote et la marée (t0). Celui-ci semble avoir plus d'influence en interaction avec les autres entrées (environ 25 % d'influence totale). Enfin les paramètres moins importants, dans l'ordre décroissant d'influence, semblent être la durée de montée et de descente de la surcote (influence équivalente), et la surcote. Ce résultat peut s'expliquer par le fait qu'une surcote peut être importante, si elle est en déphasage avec la marée, elle n'induit pas de risque de submersion. La variable correspondant au MNT n'a pas été retenue, malgré son importance certaine sur la sensibilité des résultats. En effet, le MNT est une carte avec une intervalle d'erreur à chaque localisation de la carte et il serait coûteux de faire varier cette erreur à chaque localisation.

Des indices de sensibilité sont obtenus avec les modèles CCR et BRGM sur ces variables mixtes. Il ressort de ce résultat des différences significatives entre les modèles. Le modèle CCR est essentiel-

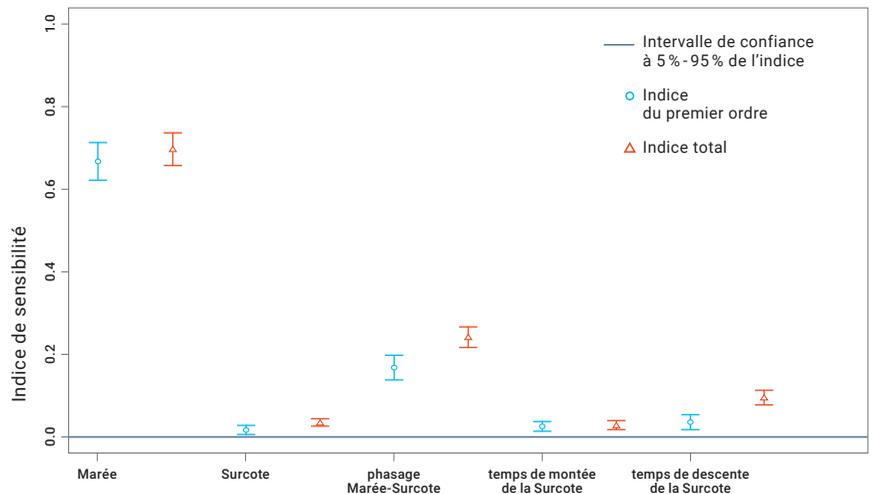


Figure 2 – Indices de sensibilité obtenus pour chaque entrée du modèle BRGM.

lement influencé par le forçage marin et, dans une moindre mesure, par la rugosité dans les zones urbaines (rugosité A). Le modèle BRGM est pour sa part très influencé par le forçage marin et par deux connexions hydrauliques.

CONCLUSION

Les travaux réalisés ont porté sur l'analyse de sensibilité d'un modèle d'inondation, générant des sorties spatialisées. Afin d'obtenir le nombre de simulations nécessaires pour effectuer l'analyse de sensibilité, un métamodèle basé sur l'ACP fonctionnelle sur base d'ondelettes a été construit puis un indice de sensibilité adapté aux données spatiales a été défini. Il a été montré que la méthode de métamodélisation développée dans la thèse a une capacité prédictive non seulement meilleure, mais aussi cinq fois plus rapide que la méthode standard par ACP. L'indice

de sensibilité obtenu au final a permis de hiérarchiser les paramètres des modèles d'impacts du BRGM et de CCR sur deux cas test situés dans la zone des Boucholeurs : l'un étudiant la sensibilité du forçage marin sur la détection d'une inondation et son ampleur, l'autre étudiant la sensibilité de différents paramètres du modèle d'impacts (forçage, rugosité du sol, connexions hydrauliques) sur l'étendue estimée de l'inondation lors de la tempête Xynthia en 2010. Ces travaux ont permis de mettre au point un package pour le logiciel R : GpOutput2D. Enfin, il est possible de réaliser plusieurs configurations des modèles d'inondation, en changeant de MNT par exemple au sein du métamodèle./

LES PARTENAIRES

La thèse a été cofinancée et encadrée par le BRGM, ARMINES Saint-Étienne et CCR. ARMINES est une association de recherche contractuelle et liée par conventions approuvées par l'État à ses écoles partenaires, tel que MINES ParisTech et le réseau des Écoles des Mines. Le BRGM est un établissement public à caractère industriel et commercial. Une de ses spécialités concerne le domaine des géosciences appliquées à l'océanographie côtière et à la submersion marine.

RÉFÉRENCES

1. Perrin E. (2021) Méta-modélisation et analyse de sensibilité pour les modèles avec sortie spatiale. Application aux modèles de submersion marine, Thèse de doctorat de l'université de Lyon, Ecole des mines de Saint Etienne, 158p.
2. M Sobol, « Global sensitivity indices for nonlinear mathematical models and their Monte Carlo estimates », Mathematics and Computers in Simulation, the Second IMACS Seminar on Monte Carlo Methods, vol. 55, 15 février 2001, p. 271–280
3. Bates P. D., Dawson R. J., Hall J. W., Horritt M. S., Nicholls R.J., Wicks J., and Mohamed Ahmed Ali Mohamed Hassan: Simplified two-dimensional numerical modelling of coastal flooding and example applications, Coast. Eng., 52, 793–810, 2005.
4. Naulin J. P., Moncoulon D., Le Roy S., Pedreros R., Idier D., and Oliveros C.: Estimation of insurance-related losses resulting from coastal flooding in France, Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 16, 195–207, <https://doi.org/10.5194/nhess-16-195-2016>, 2016.
5. Lazure P. and Dumas F. (2008). An external-internal mode coupling for a 3D hydrodynamical model for applications at regional scale (MARS). Advances in water resources, 31(2) :233-250.
6. Lamboni M., Monod H., and Makowski D. (2011). Multivariate sensitivity analysis to measure global contribution of input factors in dynamic models. Reliability Engineering & System Safety, 96(4) :450459.

CITATION

Perrin E., Naulin J-P, Analyse des incertitudes dans le modèle d'aléa submersion marine. In Rapport Scientifique CCR 2021 ; CCR, Paris, France, 2021, pp. 30-33

RISQUES SÉCHERESSE

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



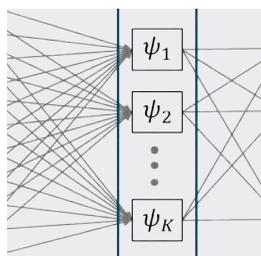


Modélisation de la sécheresse géotechnique . p.36

Durant l'année 2020, les travaux de modélisation de la sécheresse ont été structurés autour de trois axes forts comprenant i) un retour d'expérience sur la sécheresse 2020, cinquième événement marquant d'une séquence débutée en 2016, ii) un travail de caractérisation de la sinistralité sur la base de méthodes relevant des datasciences et iii) la structuration d'un projet de recherche pluriannuel avec Météo-France et le BRGM pour apporter une nouvelle compréhension du phénomène liant l'atmosphère, le sol et les bâtis.

During the year 2020, work on swelling and shrinking clay soils modelling was structured around three main areas, including i) a feedback on the 2020 event, the fifth major event in a sequence that began in 2016, ii) a specific project on characterizing the claims on the basis of data science methods, and iii) the structuring of a multi-year research project with Météo-France and BRGM to provide a new understanding of the phenomenon linking the atmosphere, the soil and buildings.

Pierre Tinard et David Moncoulon



Super Learning séquentiel pour anticiper les dommages liés à la sécheresse géotechnique . p.40

L'objet de ces travaux est l'estimation des dommages liés à une sécheresse géotechnique. Elle est menée en développant un algorithme de *super learning* séquentiel dédié, qui est adapté à la structure de dépendance spatio-temporelle présente dans les données. Une analyse théorique de cette procédure de machine learning offre des garanties intéressantes quant aux performances du *super learner* séquentiel. L'exploitation de l'algorithme sur les données dont CCR dispose fournit des résultats très pertinents.

The purpose of this study is to estimate the damage due to a geotechnical drought. It is conducted by developing a dedicated sequential super-learning algorithm, which is adapted to the spatio-temporal dependency structure available in the data. A theoretical analysis of this machine learning procedure provides interesting guarantees for the performance of the sequential super learner. The exploitation of the algorithm on the data available to CCR provides very relevant results.

Geoffrey Ecoto, Thierry Cohignac, Antoine Chambaz



Modélisation de la sécheresse géotechnique

Pierre Tinard¹ et David Moncoulon¹
(1) Département R&D Modélisation Cat & Agriculture, CCR

INTRODUCTION

L'année 2020 s'inscrit dans un cycle de sécheresses géotechniques intenses débuté en 2016 et qui s'est poursuivi jusqu'en 2021. Le nord de la France a été touché en 2020 pour la première fois de façon aussi intense depuis 2016. À contrario, les régions centrales du territoire ont connu des reconnaissances continues sur cette même période. De fait, les travaux d'estimation de cet événement nous ont conduit à estimer l'impact sur les coûts moyens de reconnaissances successives ou d'absence de reconnaissance depuis plusieurs années alors même que des demandes communales de reconnaissance de l'état de catastrophe naturelle avait été formulées. Conjointement à la prise en compte des spécificités de cet événement, des travaux de datascience, menés dans le cadre d'un stage de master 2 de l'université Gustave Eiffel, ont visé à caractériser notre base d'environ 270 000 sinistres collectés auprès des assureurs en essayant de mettre en lumière des contextes types de sinistralité liés aux caractéristiques de construction et de l'environnement des maisons¹. L'enchaînement d'événements majeurs depuis 2016 et les intensités toujours plus sévères des événements comme en témoignent les années 2018 et 2019 ont motivé la réalisation d'un projet de recherches pluriannuel entre Météo-France, le BRGM et CCR dans le cadre d'une thèse de doctorat. Ces travaux

débuteront fin 2021 et se positionneront à la convergence des trois champs d'expertise de chacun des partenaires, respectivement, l'atmosphère, le sol et les dommages liés aux interactions des deux premiers.

ÉVOLUTION DES COÛTS MOYENS D'UNE RECONNAISSANCE

Les séquences répétées d'événements touchant au fil des années les mêmes communes nous ont amené à nous interroger sur l'évolution dans le temps des coûts moyens des sinistres par commune reconnue. Les principaux facteurs qui influencent ce coût moyen sont selon nous :

- le stock de maisons sinistrables : c'est-à-dire de maisons individuelles qui n'ont pas été l'objet de reprises en sous-œuvre dans le passé ;
- l'évolution du sinistre subissant un autre épisode de sécheresse avant sa reprise effective ;
- l'effet de tassement continu qu'il soit dû à un unique épisode de sécheresse ou à une succession d'épisodes.

À l'inverse, des épisodes de sécheresse qui n'ont pas fait l'objet d'une reconnaissance Cat Nat sur la commune (car d'intensité inférieure aux seuils d'éligibilité) ont pu survenir, provoquant des dégâts sur le bâti qui ne font pas l'objet d'indemnisation. Du fait de la difficulté de dater précisément un sinistre, lorsque la commune est reconnue, il existe un risque de prise en compte de dommages antérieurs à l'année de reconnaissance.

Sur la période 1989 – 2015, les données disponibles pour réaliser l'étude des deux effets antagonistes mentionnés ci-dessus se répartissent comme indiqué dans la table 1 (voir ci-dessous).

Les données de sinistralité collectées auprès des assureurs ainsi que les travaux actuariels CCR permettent d'estimer par exercice et par commune le coût moyen d'une reconnaissance. À titre d'exemple, de façon agrégée par exercice, la figure ci-dessous présente l'évolution du coût moyen par commune reconnue sur la période 1989 – 2015 (en € 2020).

Sur la base de ces données (figure 1), la caractérisation des reconnaissances multiples s'enchaînant sur une même commune a mis en évidence une baisse de 14 % du coût moyen d'une reconnaissance.

À contrario, lorsqu'une reconnaissance est prononcée après qu'une commune a formulé pendant plusieurs années une demande de reconnaissance sans pour autant être éligible, notre étude a mis en évidence une hausse de 35 % du coût moyen de la reconnaissance par

Nombre de demandes communales	Nombre de reconnaissances Cat Nat	Nombre de sinistres recensés par CCR
56 878	41 662	174 759

Table 1 – État des demandes, reconnaissances et sinistres Cat Nat recensés à date.

(1) 4958 demandes communales connues à début septembre 2021

rapport aux coûts moyens précédemment constatés.

Ces résultats ont été appliqués lors de l'estimation par CCR de la sinistralité liée à l'événement de 2020 et communiqués au marché en décembre 2020. La répartition sur la base des demandes communales connues à ce jour pour l'exercice 2020 se décompose comme indiqué dans les tables 2 et 3 (voir ci-contre).

L'enchaînement des reconnaissances conduit à abaisser le coût en sortie du modèle CCR de l'ordre de 13 % sur les communes concernées ; l'absence de reconnaissance sur une ou plusieurs années conduit quant à lui à rehausser le coût en sortie du modèle CCR de l'ordre de 4 % sur les communes concernées. Au final, sur la base de ces travaux, le coût marché est estimé à ce jour entre 1 et 1,2 milliard €.

CARACTÉRISATION DE LA SINISTRALITÉ PAR MACHINE ET DEEP-LEARNING

Au fil des années, CCR a pu collecter auprès de ses clients, environ 270 000 sinistres sécheresse rattachés à un arrêté communal de reconnaissance Cat Nat.

Afin de caractériser la sinistralité au-delà de son seul coût, nous avons enrichi les données à l'aide d'indices portant sur le bâtiment ou son environnement. À titre d'exemple et sans que cette liste soit exhaustive, les paramètres suivants sont venus enrichir les données initiales:

- hauteur du bâtiment et/ou nombre de niveaux hors-sol,
- superficie au sol du bâtiment,
- altitude,
- pente locale,
- âge du bâtiment,
- nature des matériaux constituant les murs et le toit,

en k€

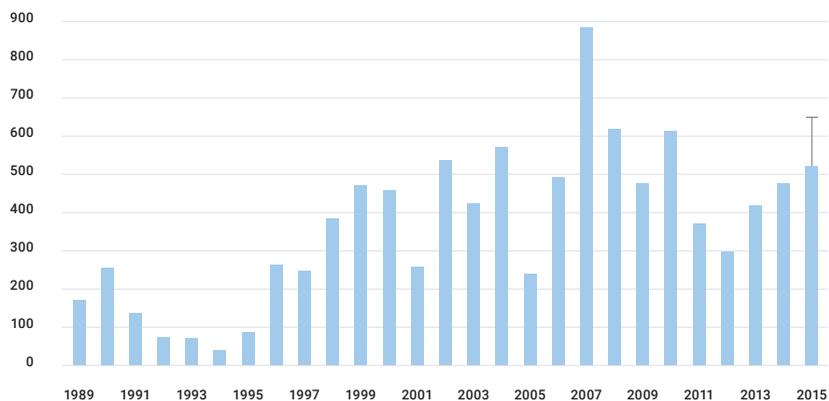


Figure 1 – Évolution du coût moyen, en €2020 d'une reconnaissance communale au titre de la sécheresse géotechnique sur la période 1989 – 2015.

Nombre de reconnaissances Cat Nat depuis 2016	Nombre de communes concernées France entière	Nombre de communes ayant formulé une demande en 2020 et éligibles
1	5 443	1 961
2	1 651	845
3	96	35
Total	7 190	2 841

Table 2 – État des reconnaissances antérieures (2016 – 2019) des communes reconnues en 2020.

Nombre de demandes formulées sans reconnaissance depuis 2016	Nombre de communes concernées France entière	Nombre de communes reconnues au titre de la sécheresse 2020
1	1 366	183
2	369	27
3	82	6
4	20	2
Total	1 837	218

Table 3 – État des demandes sans reconnaissance (2016 – 2019) des communes reconnues en 2020.

sécheresse RGA
 # deeplearning
 # sinistres
 # modélisation

- > - zonage thermique (réglementation constructive) auquel appartient le bâtiment,
- ratio entre la superficie au sol occupée par le bâtiment et la superficie totale de la parcelle,
- densité urbaine (maison de ville, quartier résidentiel, maison isolée, etc.),
- indicateur d'exposition aux remontées de nappes témoignant de la nature du sol
- zonage de susceptibilité au retrait gonflement des sols telle que définie par le BRGM.

Seul les sinistres géolocalisés pouvant être rattachés de façon certaine à un bâtiment de type maison ont été retenus.

Au final, après nettoyage et enrichissement de la donnée initiale, près de 100 000 sinistres ont servi de base aux travaux reposant sur des méthodes de datascience.

Afin de compléter cette vision centrée sur la vulnérabilité du bâti, des informations liées à l'indice d'humidité des sols (SWI : Soil Wetness Index) uniforme produit par Météo France² ont été rattachées à chaque sinistre afin de quantifier l'intensité de l'événement.

Nos premiers travaux ont utilisé des méthodologies classiques et éprouvées de machine learning telles que des arbres de décisions (*decision tree*) et leur combinaison sous forme de forêts aléatoires (*random forest*). L'avantage de ces méthodes est que tant la compréhension de l'algorithme mis en œuvre que l'interprétation des résultats sont aisées (figure 2).

D'autres méthodes relevant du *deep-learning* ont été employées. Elles font appel à des réseaux de neurones afin, dans notre cas, de mettre en œuvre des algorithmes plus récents et plus performants permettant une vision plus fine de la classification des sinistres.

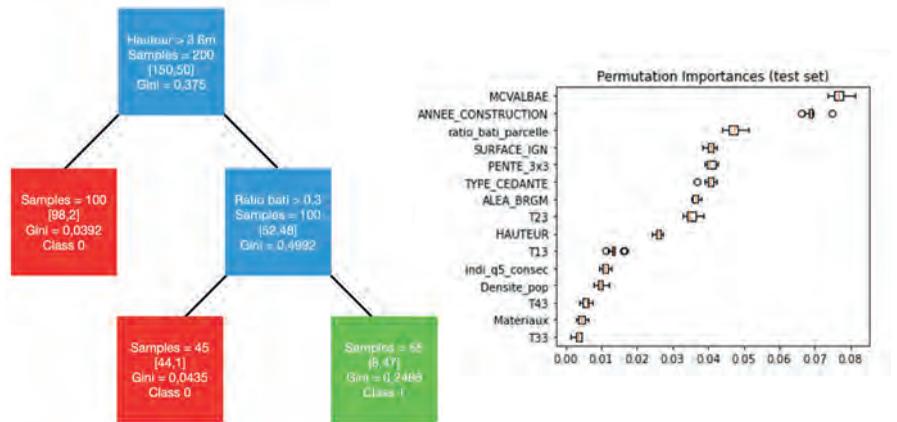


Figure 2 – À gauche, exemple d'un arbre de décision et de la distribution des données selon des variables portant sur la hauteur du bâtiment et le ratio de superficie bâti/parcelle. À droite, visualisation de la nature et du poids des variables dans la décision de classification d'une forêt aléatoire.

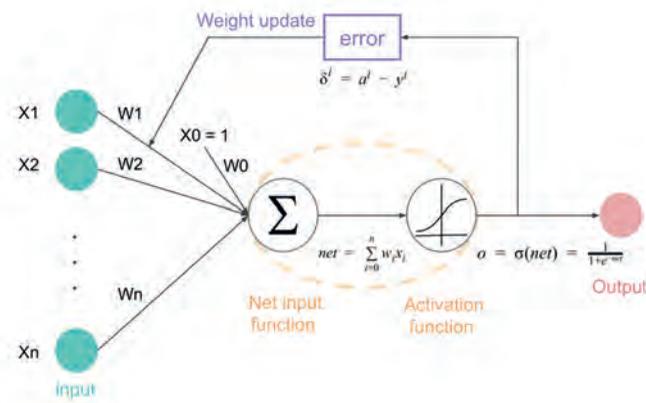


Figure 3 – Fonctionnement général du réseau avec les entrées et la sortie. Des fonctions d'activation dans la couche elle-même et entre les couches sont implémentées.

(2) Données disponibles lors de l'étude en 2020.

Le modèle utilisé est basé sur la mise en œuvre de réseaux de milliers de neurones en couches denses dont les informations communiquent entre elles par des fonctions d'activation de type ReLU dans notre cas ^[3] (figure 3). La perte est évaluée via l'utilisation d'une *cross-entropy* et une fonction d'activation dite *softmax* permet en sortie de récupérer une distribution de probabilités. Enfin chaque neurone se voit attribuer une probabilité p (loi de Bernoulli) d'être abandonné à chaque étape du calcul, rendant ponctuellement le réseau moins stable mais évitant les biais de sur-apprentissage, écueil principal de ces méthodes.

À ce stade des travaux, des variables se dégagent nettement pour caractériser la sinistralité :

- l'année de construction avec une sur-représentation de sinistres coûteux (reprise en sous-œuvre) pour des maisons construites du milieu des années 1970 au milieu des années 1980,

- la hauteur du bâtiment notamment pour des maisons de plain-pied ou à étage si le matériau de construction est de type briques ou meulière,

- la superficie qu'occupe le bâtiment relativement à la superficie de la parcelle sur lequel il est édifié.

L'exploration des rapports détaillés d'expertises sécheresse permettraient d'étayer ou non ces résultats.

Ces premiers travaux basés sur des méthodes de datascience ont permis de caractériser la sinistralité sur la base de paramètres liés à la nature des bâtiments, à leur environnement ou à l'intensité de l'événement. Si les données météorologiques semblent les mieux maîtrisées à ce jour, un travail de fond doit être mené sur l'enrichissement de l'information sur la sinistralité ainsi que sur le couplage atmosphère-sol-bâti.

VERS UNE MEILLEURE COMPRÉHENSION DU PHÉNOMÈNE

Dans le cadre d'un projet de recherche pluriannuel s'articulant autour d'une thèse de doctorat débutant en 2021, Météo-France, le BRGM et CCR souhaitent développer de nouveaux outils d'estimation de la sinistralité liée au phénomène en s'appuyant sur une revisite de la caractérisation physique des interactions atmosphère / sol / bâti.

Au-delà d'une meilleure caractérisation de la sinistralité, les travaux permettront de préciser l'exposition du territoire français à des sécheresses non-survenues à ce jour mais physiquement possibles notamment dans le cadre d'un réchauffement climatique avéré. Elle apportera aussi un soutien aux politiques publiques de prévention du risque.

Dans la pratique, un nouveau modèle d'interaction atmosphère/sol sera construit sur la base du modèle ISBA de Météo-France, des modèles géotechniques du BRGM et sera évalué localement au regard des interactions sol/bâti sur les sites instrumentés du BRGM. La chaîne opérationnelle actuelle de suivi du phénomène sera améliorée en intégrant par exemple un indice portant sur la variabilité interannuelle de la végétation.

Une validation à une échelle régionale sera déclinée en s'assurant notamment de la cohérence France entière des évolutions en lien avec la sinistralité collectée et enrichie par CCR de toutes informations pertinentes telles celles liées à la vulnérabilité physique du bâti.

À terme, c'est un nouvel outil global de caractérisation du phénomène couvrant aussi bien les aspects météorologiques, géologiques et de vulnérabilité qui verra le jour./

RÉFÉRENCES

1. Fanet, G., Caractérisation de la sinistralité sécheresse, apport des datasciences, Rapport de stage de master 2, Université Gustave Eiffel, 2020.
2. Tinard et al., Modéliser la sécheresse géotechnique. In Rapport Scientifique CCR 2019 ; CCR, Paris, France, 2020, pp. 28-32.
3. Bharat Ramsundar and Reza Bosagh Zadeh. TensorFlow pour le deep learning. 1st edition, 2018.

CITATION

Tinard P., Moncoulon D., Modélisation de la sécheresse géotechnique. In Rapport Scientifique CCR 2020 ; CCR, Paris, France, 2021, pp. 36-39

Super Learning séquentiel pour anticiper les dommages liés à la sécheresse géotechnique



Geoffrey Ecoto^{1,2}, Thierry Cohignac³, Antoine Chambaz²
(1) Département Data Science, Actuariat & Provisionnement, CCR
(2) MAP5 (UMR CNRS 8145), Université de Paris
(3) Direction des Réassurances et Fonds Publics, CCR

INTRODUCTION

L'objet de ces travaux (faisant l'objet d'une thèse en cours) est l'estimation des dommages liés à une sécheresse géotechnique. Elle est menée en développant des techniques de machine learning. Si ce péril a marqué ces dernières années par le caractère inhabituel des régions impactées, il a surtout surpris par l'intensité consécutive de ses survenances. En complément des dépendances spatiales notamment induites par le caractère météorologique du phénomène étudié, il apparaît ainsi nécessaire de considérer la dynamique temporelle du processus sous-jacent. Il convient donc d'adapter les méthodes de machine learning afin de prendre en compte les dépendances spatio-temporelles du péril sécheresse. Nous proposons une extension originale de la méthode de *super learning*⁽¹⁾ qui se distingue du *super learning* original tant par sa structure que par le schéma de validation qui préside à l'apprentissage. Des garanties théoriques en illustrent la pertinence. Les résultats obtenus sur la sécheresse géotechnique sont présentés et commentés.

MÉTHODOLOGIE

Super learning

Le *super learning* est une méthode d'apprentissage ensembliste, c'est-à-dire une méthode d'agrégation d'algorithmes d'apprentissage. Etant donné une collection d'algorithmes d'apprentissage fondamentaux (appelés *base learners*),

l'entraînement de l'algorithme *super learner* lui permet d'apprendre quelle est la meilleure combinaison convexe des prédictions faites par les *base learners* une fois ceux-ci entraînés. L'entraînement du *super learner* s'appuie sur un schéma de validation croisée qui consiste génériquement à alterner répétitivement apprentissage et validation sur des sous-ensembles disjoints de données. Une analyse théorique du *super learner* garantit que ses performances sont essentiellement aussi bonnes que celles du meilleur *base learner*.

L'entraînement de l'algorithme *super learner* peut également lui permettre d'apprendre quelle est la meilleure prédiction possible obtenue à partir des prédictions faites par les *base learners* une fois ceux-ci entraînés et de covariables à travers un algorithme (appelé *meta learner*) dédié à les combiner. Par exemple, un algorithme d'arbre de régression peut être entraîné pour faire des prédictions à partir des prédictions des *base learners* une fois ceux-ci entraînés et de descriptions des communes françaises (incluant notamment valeurs assurées et conditions météorologiques locales). Dans l'esprit du *super learning*, étant donnée une collection de *meta learners*, le meilleur *meta learner* peut être appris par un *super learner* (appelé dans ce contexte *overarching super learner*). La figure 1 illustre l'architecture du *super learner* à deux couches que nous proposons.

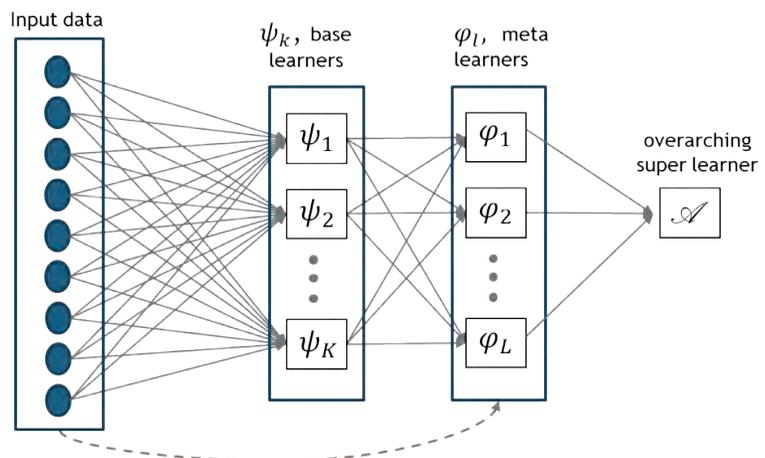


Figure 1 – Super learner à deux couches.

La sécheresse sous l'angle d'un processus spatio-temporel : la validation séquentielle

La dimension temporelle du phénomène étudié provient principalement de la dépendance constatée entre le coût d'une commune reconnue deux années consécutives au titre de la sécheresse. Par ailleurs, les conditions climatiques de l'exercice suivant la survenance d'un sinistre sécheresse peuvent l'aggraver. La dimension spatiale du péril sécheresse provient principalement du caractère météorologique du phénomène, qui induit une dépendance spatiale entre les communes. Cette dépendance spatiale est aussi due à la vulnérabilité, dans la mesure où il existe des clusters de valeurs assurées sur le territoire français. En vertu de ces dépendances, nous adoptons un schéma de validation croisée séquentielle [2]. Itérativement, toutes les données antérieures à un exercice t sont utilisées comme données d'apprentissage, les données liées à l'exercice t sont utilisées comme données de validation, puis t est incrémenté. Dans la mesure où aucun algorithme n'a accès aux données postérieures à l'exercice de validation, la validation séquentielle permet de prendre en compte la dépendance temporelle contenue dans notre jeu de données. La dimension spatiale, elle, est contrôlée dans le cadre des développements théoriques.

Étude du super learner séquentiel

Une analyse théorique originale offre des garanties quant aux performances de notre algorithme de *super learning* séquentiel. Soit ψ_1, \dots, ψ_K les K bases learners, ψ_k l'algorithme oracle (optimal), ψ_k l'algorithme identifié par le *super learner* séquentiel. Soit \mathcal{A} l'ensemble des communes et \mathcal{G} un graphe de dépendance des communes françaises (qui incorpore en particulier la mitoyenneté entre communes). Le degré $\text{deg}(\mathcal{G})$ de \mathcal{G} (1 plus le nombre maximum d'arêtes partant d'un nœud de \mathcal{G}) quantifie la prégnance de la dépendance. Sous des hypothèses typiques des analyses du *super learning*, grâce à l'utilisation d'une inégalité de concentration de Janson [3], nous obtenons le résultat (simplifié) suivant : pour un coefficient $\beta \in (0, 1]$ (dont l'existence est supposée), pour $\mathcal{J} = |\mathcal{A}| / t^\beta \cdot \text{deg}(\mathcal{G})$ (une quantité d'information), pour tout $\varepsilon > 0$ éventuellement petit,

$$\text{Risque}(\psi_k) < (1 + \varepsilon) \cdot \text{Risque}(\psi_k) + \text{constante}(\varepsilon) \cdot \left(\log(\mathcal{J} \cdot \log(\mathcal{J}^2)) / \mathcal{J}^2 \right)^{\frac{1}{2-\beta}}$$

Cette inégalité s'interprète comme une garantie de ce que les performances du *super learner* séquentiel sont essentiellement aussi bonnes que celles du meilleur base learner. En comparaison avec le résultat similaire de Benkeser et al., [4], notre analyse (i) repose sur un jeu d'hypothèses moins contraignant et (ii) tire profit du fait que les communes sont certes dépendantes les unes des autres mais que le quotient $\mathcal{J} = |\mathcal{A}| / \text{deg}(\mathcal{G})$ est potentiellement grand.

IMPLÉMENTATION ET RÉSULTATS

L'implémentation du *super learner* séquentiel à deux couches a été réalisée à l'aide du langage de programmation R [5]. Elle s'inscrit dans la continuité de l'implémentation du package SuperLearner [6] qui fait référence. Ce dernier a été adapté afin de prendre en compte le schéma de validation original proposé, et d'ajouter les couches « meta » et « overarching ». Par ailleurs, une collection de 27 base learners a été constituée. Elle se compose notamment d'algorithmes de régressions ridge, lasso et elastic net [7], d'algorithmes fondés sur des modèles MARS (Multivariate Adaptive Regression Splines, [8]), sur des

support vector regression [9] et des random forests [10] et de réseaux de neurones [11]. De la même manière, une collection de 48 meta learners a été constituée. Les données d'apprentissage ont été collectées en provenance des bases de données à l'adresse renseignant les portefeuilles et les sinistres des cédantes de CCR, pour la période 1990 – 2017. Ces données ont été enrichies principalement du SWI (Soil Wetness Index) calculé par Météo-France et quantifiant l'humidité des sols sur le territoire pour chaque exercice, et de la contenance en argile des sols renseignée par le BRGM (Bureau de

- # catastrophes naturelles
- # dépendances spatio-temporelles
- # machine learning
- # sécheresse
- # super learning

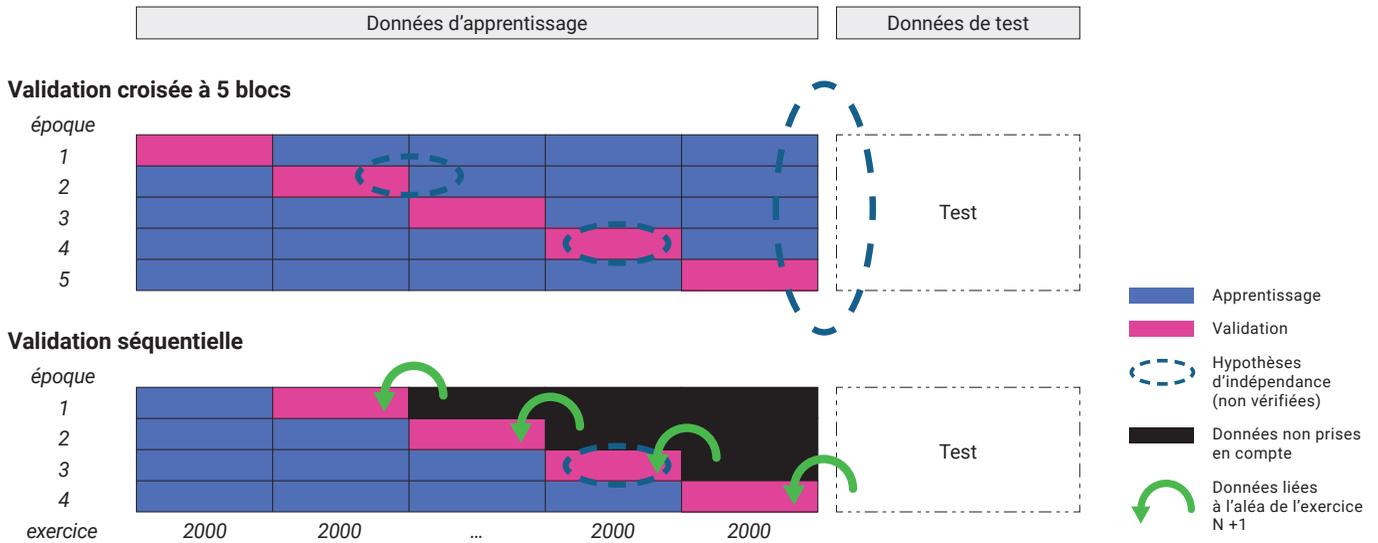


Figure 2 - Validation croisée et validation séquentielle.

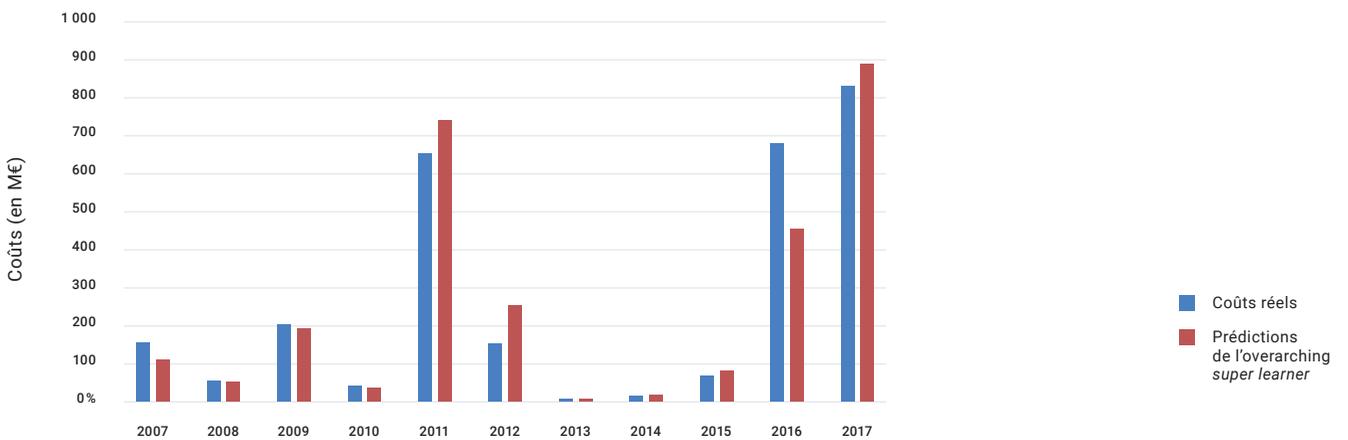


Figure 3 - Prédictions de l'overarching super learner et coûts réels.

LES PARTENAIRES

Courant 2018, une thèse a été initiée par CCR en partenariat avec l'Université de Paris. Cette thèse, intitulée « Modélisation et apprentissage machine learning ciblé appliqués aux catastrophes naturelles ». Cette thèse a pour objectif de mettre à profit les avancées en terme d'apprentissage statistique pour améliorer les prédictions des dommages consécutifs à la survenance d'une catastrophe naturelle.

> recherches géologiques et minières). Ces informations ont ensuite été agrégées par commune et une nouvelle fois enrichies (valeurs assurées, zones climatiques, végétation, âge moyen des bâtiments, pente au sol, pour ne citer qu'elles).

Les prédictions de l'overarching super learner sont représentées dans la figure 3 pour les exercices 2007 à 2017. Il apparaît que l'algorithme proposé est en mesure de fournir des prédictions globalement pertinentes des coûts d'un épisode sécheresse. Cependant, la prédiction de l'exercice 2016 (et, dans une moindre mesure, celle de 2012) est en décalage avec les coûts réels. Il convient ainsi d'analyser ces disparités, qui peuvent provenir par exemple de la politique de gestion des cédantes impactées, ou bien de l'estimation des valeurs assurées sur ces mêmes zones.

CONCLUSION

Ces travaux présentent une méthode de *super learning* séquentiel à deux couches pour l'anticipation des dommages consécutifs à la survenance d'un épisode de sécheresse géotechnique. Les performances théoriques de cet algorithme ont été étudiées. Cet algorithme ensembliste permet de prendre en compte les dépendances à la fois spatiales et temporelles du phénomène étudié. Une fois implémentée, cette extension du *super learner* a été exploitée afin de prédire les dommages liés à une sécheresse, avec des performances intéressantes./

RÉFÉRENCES

1. M. J. van der Laan, E. C. Polley, and A. E. Hubbard. Super learner. *Stat. Appl. Genet. Mol. Biol.*, 6:Art. 25, 23, 2007.
2. Cerqueira, V. et al., A Comparative Study of Performance Estimation Methods for Time Series Forecasting, IEEE International Conference on Data Science and Advanced Analytics, Tokyo, 2017.
3. S. Janson. Large deviations for sums of partly dependent random variables. *Random Structures Algorithms*, 24(3):234–248, 2004.
4. D. Benkeser, C. Ju, S. Lendle, and M. J. van der Laan. Online cross-validation-based ensemble learning. *Stat. Med.*, 37(2):249–260, 2018.
5. R Core Team. R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, 2021. URL <https://www.R-project.org/>.
6. E. Polley, E. LeDell, C. Kennedy, and M. J. van der Laan. SuperLearner: Super Learner Prediction, 2019. URL <https://CRAN.R-project.org/package=SuperLearner>. R package version 2.0-26.
7. N. Simon, J. Friedman, T. Hastie, and R. Tibshirani. Regularization paths for cox's proportional hazards model via coordinate descent. *Journal of Statistical Software*, 39(5):1–13, 2011. URL <https://www.jstatsoft.org/v39/i05/>.
8. S. Milborrow. earth: Multivariate Adaptive Regression Splines, 2020. URL <https://CRAN.R-project.org/package=earth>. R package version 5.3.0.
9. Karatzoglou, A.; Smola, A.; Hornik, K.; Zeileis, A. Kernlab - An S4 Package for Kernel Methods in R. *Journal of Statistical Software*, Articles 2004, 11, 1–20, doi:10.18637/jss.v011.i09.
10. M. N. Wright and A. Ziegler. ranger: A fast implementation of random forests for high dimensional data in C++ and R. *Journal of Statistical Software*, 77(1):1–17, 2017. doi: 10.18637/jss.v077.i01.
11. J. J. Allaire and F. Chollet. keras: R Interface to 'Keras', 2021. URL <https://CRAN.R-project.org/package=keras>. R package version 2.4.0.

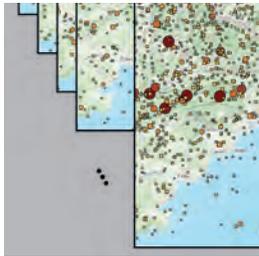
CITATION

Ecoto G., et al., Super Learning séquentiel pour anticiper les dommages consécutifs à la survenance d'un épisode de sécheresse géotechnique. In *Rapport Scientifique CCR 2020* ; CCR, Paris, France, 2021, pp. 40-43

RISQUES GÉOLOGIQUES

Le 11 novembre 2019, un séisme de magnitude locale de 5,2 a été ressenti dans la vallée du Rhône à proximité de Montélimar. L'épicentre a été localisé sur la commune du Teil (Ardèche) et a provoqué d'importants dégâts.



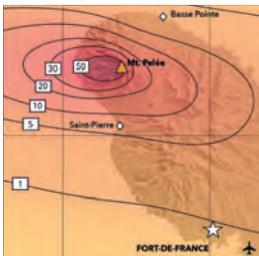


Générateur stochastique de séismes • p.46

Une des façons d'estimer l'aléa sismique tout en définissant clairement les séismes impliqués est de produire des séismes synthétiques sur de longues périodes temporelles et d'observer leur impact sur un site donné. Pour ce faire, la sismicité passée ainsi que les incertitudes associées sont analysées. Cet article propose d'adapter la méthode du générateur de séismes synthétiques au contexte de sismicité faible à modérée en implémentant un modèle de calcul de la récurrence des séismes et une nouvelle approche de génération des séismes synthétiques dans le temps et dans l'espace.

In order to estimate seismic hazard and precisely characterize involved earthquakes, one can generate synthetic earthquakes over large period of time and observe their impact on a given site. This approach takes into account past seismicity and its uncertainties. This paper proposes to adapt the generator methodology for application in low-to-moderate seismic areas by implementing a recurrence model for earthquakes and a new way to localize synthetic earthquakes in space and time.

Corentin Gouache, Jean-Marc Montel, Pierre Tinard, François Bonneau



Réévaluer l'aléa volcanique en Martinique • p.50

Caractériser l'aléa volcanique nécessite une connaissance approfondie des éruptions susceptibles de se produire sur un territoire. Cette étude permet de reconstruire l'histoire éruptive de la montagne Pelée, seul volcan actif de la Martinique, ainsi que de modéliser expérimentalement et numériquement les éruptions pliniennes. Cette approche intégrée débouche sur une nouvelle carte d'aléa volcanique prenant en compte pour la première fois les éruptions pliniennes de la montagne Pelée.

Assessing volcanic hazard requires an extensive knowledge of the eruptions likely to happen in the considered area. This study allows reconstructing of the eruptive history of the Mount Pelée, the only active volcano in Martinique, and experimental and numerical modeling of Plinian eruptions. This combined approach leads to a new volcanic hazard map, including for the first time the Plinian eruptions of Mount Pelée.

Audrey Michaud-Dubuy

Générateur stochastique de séismes



Corentin Gouache¹, Jean-Marc Montel², Pierre Tinard³, François Bonneau¹

(1) RING, GeoRessources / ENSG, Université de Lorraine / CNRS, 54000 Nancy

(2) Université de Lorraine, CRPG/CNRS, 54500 Vandœuvre-lès-Nancy

(3) Département R&D Modélisation Risques Cat & Agriculture, CCR

INTRODUCTION

En France métropolitaine, les séismes sont peu fréquents et depuis la mise en place du régime Cat Nat en 1982, ils ne représentent guère qu'un pourcent de la sismicité cumulée. Cependant, des séismes, parfois situés au-delà des frontières, ont eu des impacts dévastateurs sur le territoire métropolitain. Citons notamment ceux de Bâle (1356), Bagnères-de-Bigorre (1660), Ligure (1887) ou encore Lambesc (1909). De plus, le récent séisme du Teil (2019) nous rappelle les caractères soudains et imprévisibles de la sismicité. Il démontre également que la sismicité concerne l'ensemble du territoire français.

À défaut de prédire la survenance des séismes, tâche impossible à l'heure actuelle, la communauté scientifique a pris l'habitude de calculer des probabilités annuelles, d'atteindre ou de dépasser un certain niveau d'aléa sismique. Pour autant, certains domaines tels que les assurances ont besoin de caractériser plus précisément les séismes qui produisent cet aléa afin de provisionner des montants suffisants pour indemniser les éventuels sinistrés. Une des façons d'estimer l'aléa sismique tout en définissant clairement les séismes impliqués est de produire des séismes synthétiques sur de longues périodes temporelles et d'observer leur impact sur un site donné ^[1, 2]. Pour se faire, la sismicité passée ainsi que les incertitudes associées sont analysées. La France métropolitaine est éloignée

des principales limites de plaques tectoniques. De ce fait, l'origine de la sismicité est plus difficile à comprendre que dans les régions actives localisées le long des limites de plaques. De plus, les données sismiques disponibles (séismes, accumulation des contraintes dans le sol, failles, mécanismes au foyer etc.) sont moins nombreuses. Ces observations sont deux des principaux freins rencontrés pour caractériser l'aléa sismique sur un territoire à sismicité faible à modérée.

Cet article présente un générateur de séismes adapté à la sismicité faible à modérée. Il se base sur une description de la sismicité passée en utilisant la méthode des temps de latence caractérisant la distribution temporelle des événements ^[3, 4]. Le générateur s'organise ensuite autour de trois étapes : (i) la génération des séismes principaux en temps et en magnitude, (ii) la localisation dans l'espace de ces séismes principaux et (iii) la génération des répliques produites par les séismes principaux. Enfin, l'aléa sismique est calculé à l'aide d'un ensemble de modèles pondérés de prédiction des mouvements du sol. Les probabilités annuelles de dépassement sont finalement estimées en observant les aléas que les séismes synthétiques produisent sur un million d'années, période de temps jugée suffisante pour explorer au mieux la distribution {fréquence – magnitude} (DFM) et la répartition spatiale des séismes synthétiques.

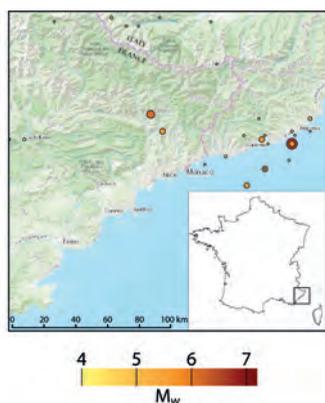
MÉTHODOLOGIE

Le catalogue historique (1310 – 1964, figure 1a) français FCAT[5] est analysé afin de définir le comportement temporel de la sismicité française. Ce comportement est exprimé sous la forme d'une DFM de séismes principaux. Ces derniers sont indépendants les uns des autres et sont donc à différencier des répliques qui leur sont dépendantes. Il est admis que l'occurrence des séismes principaux suivent une loi de Poisson.

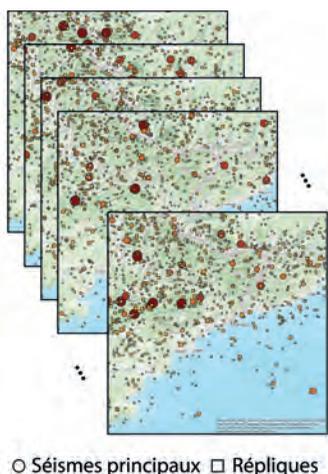
Dans nos travaux, la DFM de séismes principaux est calculée à l'aide de la méthode des temps de latence. Celle-ci définit la DFM en quantifiant, pour chaque magnitude, la proportion de séismes principaux d'un catalogue donné et en écartant de fait les répliques sismiques qui ne suivent pas une loi de Poisson. Ainsi c'est une distribution {proportion de séismes principaux – magnitude} (DPM) qui est établie. Pour pallier le manque de données observées aux plus fortes magnitudes, la DFM est estimée à l'échelle de la France entière. De plus, une implémentation de la méthode originelle des temps de latence est proposée afin de stabiliser les résultats lorsque peu de données sont disponibles (moins de 50). Au final, cette étape fournit une DPM et un DFM de séismes principaux au générateur de séismes.

Le générateur de séismes s'articule autour de trois étapes principales. Tout d'abord, les séismes principaux sont générés en temps (année) et en magnitude sur un million d'années. Pour ce faire, une loi de Poisson de paramètre dépendant de la magnitude est utilisée. Ce paramètre provient de la DFM de séismes principaux. Ensuite, une fois que les séismes principaux synthétiques sont associés à leur année d'occurrence et leur magnitude, ils sont localisés dans l'espace. Pour cela, une carte de densité spatiale est

Catalogue expérimental FCAT (1310 - 1964) 655 ans



Catalogue stochastiques 100 x 10 000 ans



Calcul de l'aléa autour de Nice

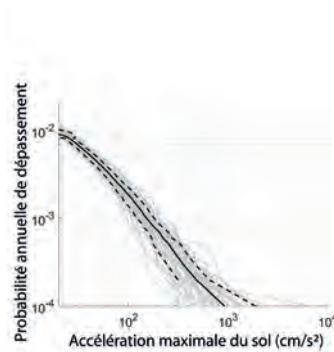


Figure 1 – Schéma général d'estimation des probabilités annuelles de dépassement autour de Nice. a : Le catalogue expérimental FCAT est analysé à l'aide de la méthode des temps de latence adaptée aux régions à sismicité faible à modérée. Cette analyse fournit les distributions proportion – magnitude et fréquence – magnitude de séismes principaux au générateur de séismes. b : Un ensemble de 100 catalogues stochastiques de 10 000 ans de séismes principaux et de répliques synthétiques est ensuite produit. c : L'aléa sismique est calculé à l'aide des modèles pondérés de prédiction des mouvements du sol. L'observation des aléas produits par l'ensemble des séismes générés donne les probabilités annuelles de dépassement.

utilisée. Les failles des régions stables (éloignées des limites de plaques tectoniques) comme la France métropolitaine peuvent rester inactives sur de très longues périodes comme l'atteste le séisme du Teil (07) [6, 7, 8]. Or, étant donné que le réseau de failles est plus ou moins bien réparti dans les régions stables, Calais et al., 2016 [9] proposent que les forts séismes sont mieux répartis dans l'espace que ce que le laisse penser la sismicité actuelle. Ainsi, nous avons décidé de choisir la carte des tracés de failles (BD Charm) pour produire la carte de densité spatiale. Afin d'assurer la cohérence de la localisation des séismes aux magnitudes les plus élevées, une régionalisation est appliquée. Chaque région est caractérisée à partir de la sismicité passée (FCAT).

La localisation d'un séisme principal de magnitude M ne peut se faire que dans les régions où la magnitude maximale est supérieure ou égale à M . Enfin, une possibilité de produire des répliques est laissée à chaque séisme principal. Cette possibilité dépend de la magnitude du séisme principal d'après la loi de Bath [10] ainsi que de la DPM de séismes principaux. Dans cette optique, la proportion de répliques (complémentaire de celle de séismes principaux) est assimilée à la probabilité de tirer une réplique. Si des répliques sont produites, elles sont simulées la même année que le séisme principal et dans le voisinage de ce dernier. Finalement, des modèles de prédiction des mouvements du sol sont appliqués sur l'ensemble des séismes générés afin de calculer les aléas sismiques (accéléra-

tions maximales du sol) que ces derniers produisent. Ces modèles sont pondérés à l'aide d'accélérations contenues dans la base de données européennes RESORCE [11]. Les poids dépendent de la magnitude du séisme et de la distance séisme – site. Pour chaque année simulée, l'aléa maximal produit par l'ensemble des séismes synthétiques sur le site d'étude est répertorié dans une liste. Cette liste d'aléas maximaux annuels est ensuite triée par ordre décroissant. L'aléa qui a une probabilité annuelle d'être dépassé égale à 1/10 000 correspond au 100^e aléa de la liste d'aléas maximums annuels. Autrement dit, cet aléa a été dépassé au moins 100 fois sur le million d'années d'observation, soit une probabilité annuelle d'être dépassé égale à 10^{-4} (figure 1c). >

sismicité faible à modérée
 # générateur de séismes
 # stochastique
 # aléa
 # France

> RÉSULTATS

L'application de la méthode des temps de latence à l'échelle de la France entière a mis en évidence une DFM définie par deux lois de puissance au lieu d'une comme le préconise la loi Gutenberg et Richter (1944) (GR). Cette dernière stipule que le log10 du nombre cumulé de séismes est proportionnel à la magnitude avec un coefficient environ égal à 1. Nos résultats attestent d'une première loi de puissance de coefficient 0,75 pour $M \leq 5,5$ et d'une deuxième loi de puissance de coefficient 1,25 pour $M \geq 5,6$. Cela implique que les séismes principaux les plus forts sont moins fréquents que ce que préconise une loi GR de coefficient 1. La table 1 résume les périodes de retour associées à ces séismes en fonction de leur magnitude M .

En ce qui concerne le générateur de séismes, il parvient à reproduire la densité spatiale donnée en entrée et est en accord avec la régionalisation utilisée. De plus, malgré l'utilisation de peu de paramètres, le générateur reproduit la loi de production des répliques classiquement utilisée en sismicité. Cette dernière lie le nombre de répliques que produit un séisme principal à la magnitude de ce dernier. En revanche, le générateur ne parvient pas à reproduire à l'identique la DPM de séismes principaux fournie en entrée. La figure 1b présente des

exemples de catalogues synthétiques de 10 000 ans autour de Nice.

Les modèles de prédiction des mouvements du sol utilisés dans cette étude sont les mêmes que ceux appliqués dans l'étude de Martin et al., 2018^[12], Ak14^[13], Am14^[14], Bi14^[15], Bo14^[16] et DC15^[17]. Les modèles de DC15 et d'Am14 ont été élaborés à partir de données françaises et sont les plus représentés dans notre modèle de pondération avec respectivement 29 et 23 % du contrôle du calcul de l'aléa. Viennent ensuite les modèles européens d'Ak14 (22 %) et le modèle mondial de Bo14 (20 %). Le modèle européen de Bi14, qui a pourtant été formulé à l'aide des données contenues dans RESORCE, ne représente que 6 % du contrôle du calcul de l'aléa selon notre modèle de pondération. L'aléa résultant de notre modèle de pondération est en moyenne 10 % plus élevé que l'aléa calculé avec le modèle de pondération de Martin et al., 2018^[12].

Enfin, une fois les séismes générés et les aléas qu'ils produisent calculés, les courbes probabilités {annuelles – aléa} sont estimées (figure 1c). Ces courbes sont en cohérence avec de récentes études françaises^[12, 18, 19]. Ces résultats s'insèrent dans la tendance qui tend à diminuer l'estimation de l'aléa sismique depuis une vingtaine d'années. La prise

en compte des répliques n'impacte pas fortement l'estimation de l'aléa (< 10 %). En revanche, le choix du modèle de pondération, des modèles de prédiction des mouvements du sol ainsi que celui de la régionalisation peuvent impacter l'estimation de l'aléa jusqu'à 30 %.

CONCLUSION

L'approche proposée dans cette étude permet de produire des catalogues synthétiques de séismes en se basant sur des distributions {proportion – magnitude} et {fréquence – magnitude} de séismes principaux, une carte de densité spatiale de tracés de failles et une régionalisation. De plus, des modèles de prédiction des mouvements du sol sont pondérés en fonction de la distance séisme à site et de la magnitude du séisme à l'aide de données d'accélération. La procédure entière aboutit à des courbes probabilité {annuelle – aléa}, cohérentes avec les données d'entrée et de récentes études. Les principaux résultats de cette étude sont (i) l'obtention de fréquences de séismes principaux plus faibles qu'avec l'application de la loi GR mais en meilleure cohérence avec l'état de connaissance de la sismicité en France métropolitaine et (ii) un calcul de l'aléa en moyenne 10 % plus élevé avec notre modèle de prédiction qu'avec celui de référence^[12]. Au vue des résultats finaux, la sous-estimation impliquée par les faibles fréquences est probablement compensée par la surestimation du calcul de l'aléa sismique./

$M \geq$	4	4,5	5	5,5	6	6,5	7
Période de retour	0,5 ± 0,04	1,2 ± 0,18	3 ± 0,4	7,2 ± 0,73	40 ± 6	168 ± 98	2 510 ± 1 855

Table 1 – Périodes de retour moyennes et écart-types des séismes principaux en fonction de leur magnitude M .

LES PARTENAIRES

L'ASGA est une association loi 1901. Créée le 24 mai 1955, elle a pour objet le développement de l'enseignement et de la recherche dans les domaines des Sciences de la Terre. L'ASGA soutient et gère le projet RING depuis 1989.

Ce projet est soutenu par un consortium international regroupant 14 sponsors industriels dont CCR depuis 2018 et plus de 140 académiques. Ce consortium géré par l'ASGA est rattaché au laboratoire GeoRessources et adossé à l'ENSG Nancy au sein de l'Université de Lorraine.

RÉFÉRENCES

- Musson RMW. On the use of Monte Carlo simulations for seismic hazard assessment. In 1998. p. 12.
- Musson RMW. Determination of Design Earthquakes in Seismic Hazard Analysis Through Monte Carlo Simulation. *Journal of Earthquake Engineering*. 1999;3(4):463-74.
- Molchan G. Intervent time distribution in seismicity: a theoretical approach. *Pure and Applied Geophysics*. 2004;162(6-7):1135-50.
- Hainzl S, Scherbaum F, Beauval C. Estimating Background Activity Based on Intervent-Time Distribution. *Bulletin of the Seismological Society of America*. 2006;96(1):313-20.
- Manchuel K, Traversa P, Baumont D, Cara M, Nayman E, Durouchoux C. The French seismic CATalogue (FCAT-17). *Bulletin of Earthquake Engineering*. 2017;16:2227-51.
- Liu M, Stein S, Wang H. 2000 years of migrating earthquakes in North China: How earthquakes in midcontinents differ from those at plate boundaries. *Lithosphere*. 2011;3(2):128-32.
- Stein S, Liu M, Camelbeeck T, Merino M, Landgraf A, Hintersberger E, et al. Challenges in assessing seismic hazard in intraplate Europe. *Geological Society, London, Special Publications*. 2015;432(1):13-28.
- Ritz J-F, Baize S, Ferry M, Larroque C, Audin L, Delouis B, et al. Surface rupture and shallow fault reactivation during the 2019 Mw 4.9 Le Teil earthquake, France. *Commun Earth Environ*. 2020;1(1):10.
- Calais E, Camelbeeck T, Stein S, Liu M, Craig T.J. A new paradigm for large earthquakes in stable continental plate interiors: LARGE EARTHQUAKES IN SCRs. *Geophys Res Lett*. 2016;43(20):10,621-10,637.
- Båth M. Lateral inhomogeneities of the upper mantle. *Tectonophysics*. 1965;2(6):483-514.
- Akkar S, Sandikkaya MA, enyurt M, Azari Sisi A, Ay BÖ, Traversa P, et al. Reference database for seismic ground-motion in Europe (RESORCE). *Bull Earthquake Eng*. 2014b;12(1):311-39.
- Martin C, Ameri G, Baumont D, Carbon D, Senfaute G, Thiry J-M, et al. Probabilistic seismic hazard assessment for South-Eastern France. *Bull Earthquake Eng*. 2018;16(6):2477-511.
- Akkar S, Sandikkaya MA, Bommer JJ. Empirical ground-motion models for point- and extended-source crustal earthquake scenarios in Europe and the Middle East. *Bull Earthquake Eng*. févr 2014a;12(1):359-87.
- Ameri G. Empirical ground motion model adapted to the French context. Deliverable SIGMA-2014-D2-131. 2014;
- Bindi D, Massa M, Luzi L, Ameri G, Pacor F, Puglia R, et al. Pan-European ground-motion prediction equations for the average horizontal component of PGA, PGV, and 5 %-damped PSA at spectral periods up to 3.0 s using the RESORCE dataset. *Bulletin of Earthquake Engineering*. 2014;12(1):391-430.
- Boore DM, Stewart JP, Seyhan E, Atkinson GM. NGA-West2 equations for predicting PGA, PGV, and 5% damped PSA for shallow crustal earthquakes. *Earthquake Spectra*. 2014;30(3):1057-85.
- Drouet S, Cotton F. Regional stochastic GMPEs in low-seismicity areas: Scaling and aleatory variability analysis—Application to the French Alps. *Bulletin of the Seismological Society of America*. 2015;105(4):1883-902.
- Beauval C, Bard P-Y, Danciu L. The influence of source-and ground-motion model choices on probabilistic seismic hazard levels at 6 sites in France. *Bulletin of Earthquake Engineering*. 2020;18(10):4551-80.
- Drouet S, Ameri G, Le Dortz K, Secanell R, Senfaute G. A probabilistic seismic hazard map for the metropolitan France. *Bull Earthquake Eng*. 2020;18(5):1865-98.

CITATION

Gouache C., et al., Générateur stochastique de séismes en contexte de sismicité faible à modérée : des données à l'aléa. Cas de la France métropolitaine. In *Rapport Scientifique CCR 2020* ; CCR, Paris, France, 2021, pp. 46-49

Réévaluer l'aléa volcanique en Martinique



Audrey Michaud-Dubuy¹

(1) Université de Paris, Institut de Physique du Globe de Paris, CNRS, 1, rue Jussieu, F-75005 Paris, France

INTRODUCTION

Dans le cadre du plan d'Organisation de la réponse de sécurité civile (ORSEC), des cartes d'aléa à l'échelle départementale sont dressées afin de visualiser les zones menacées par des phénomènes naturels tels que les inondations, séismes, inondations ou éruptions volcaniques. En Martinique, le risque volcanique vient principalement de la montagne Pelée, seul volcan actif sur cette île depuis 127 000 ans. Contrairement aux volcans qualifiés d'effusifs, comme le Piton de la Fournaise sur l'île de la Réunion qui produit régulièrement des coulées de lave n'impactant que faiblement les populations, les volcans explosifs tels que la montagne Pelée ont une activité sporadique, souvent inférieure à une éruption par siècle. Le type d'éruption des volcans explosifs est également variable : ils peuvent produire des dômes de lave, dont la destruction est généralement associée à des nuées ardentes (comme en 1902 en Martinique), mais également des colonnes de cendres pliniennes et/ou des coulées pyroclastiques. Ces caractéristiques – leur faible fréquence, leur variabilité phénoménologique, leur potentiel destructeur – rendent particulièrement difficile la caractérisation de l'aléa et également la prévention et la gestion des risques associés.

La réévaluation de l'aléa volcanique en Martinique est aujourd'hui d'un intérêt crucial puisque la carte d'aléa actuelle, construite par le BRGM en 1998 ^[1], ne prend pas en compte la dynamique des éruptions volcaniques explosives les plus puissantes, appelées « éruptions

plinienne ». Les éruptions de ce type produites par la montagne Pelée restent en effet encore largement inconnues. Ces éruptions représentent pourtant un danger majeur puisqu'elles sont caractérisées par la projection dans l'atmosphère d'une colonne de gaz et de cendres de plusieurs dizaines de kilomètres de haut pouvant changer de dynamique en cours d'éruption. La colonne peut en effet soit disperser ses fragments volcaniques dans la direction principale des vents, pouvant ainsi menacer les nombreuses îles des Petites Antilles, soit s'effondrer sous son propre poids, formant des coulées pyroclastiques dévastatrices et potentiellement meurtrières pour les populations vivant proche du volcan.

L'amélioration à la fois de notre connaissance des éruptions passées de la montagne Pelée et de notre compréhension de la dynamique de ces éruptions est donc primordiale pour anticiper une future éruption et estimer l'aléa volcanique en Martinique.

MÉTHODOLOGIE

Afin d'appréhender le potentiel destructeur de la montagne Pelée dans le futur, il est nécessaire d'améliorer notre connaissance des éruptions passées du volcan et de leur fréquence temporelle. Pour cela, deux campagnes de terrain ont été effectuées en 2017 et en 2019 (axe 1 sur figure 1). L'étude des dépôts des éruptions passées nécessite plusieurs étapes :

l'identification des dépôts sur les flancs du volcan, leur description (épaisseurs, lithologies, présence de figures de courant ou d'érosion...), la corrélation des différents dépôts les uns par rapport aux autres, et enfin leur datation par la méthode du carbone 14. Ces différentes étapes, souvent compliquées par la difficulté du terrain en contexte tropical, permettent d'aboutir à une chronologie des différents événements volcaniques s'étant produit dans le passé, mais il est également crucial de connaître les caractéristiques de chacune de ces éruptions. L'utilisation de modèles physiques de colonnes volcaniques combinée aux descriptions et échantillonnages de roches réalisés sur le terrain permet ainsi de déterminer les volumes éjectés, les hauteurs de colonnes, les débits éruptifs, les durées des phases, ou encore les granulométries des différentes éruptions. Il est ainsi possible de dresser un portrait du scénario éruptif le plus susceptible de se produire dans le futur.

Ce scénario pouvant inclure un effondrement de la colonne éruptive et la production de coulées de densité pyroclastiques, il est nécessaire d'étudier les conditions contrôlant le passage d'un régime à l'autre. La modification du modèle physique 1-D de panache volcanique PPM permet d'étudier dans un premier temps l'impact de la granulométrie des fragments volcaniques sur la transition d'une colonne plinienne stable à une fontaine en effondrement (axe 2). L'effet du vent est ensuite pris en compte grâce à des expériences en laboratoire inédites permettant de simuler des jets turbulents se formant dans un environnement soumis au vent (axe 3). En effet, le mélange entre air atmosphérique et colonne volcanique dû au vent est aujourd'hui encore mal compris. Pourtant, de l'efficacité de ce mélange dépend la densité de la colonne et donc sa stabilité. En laboratoire, des

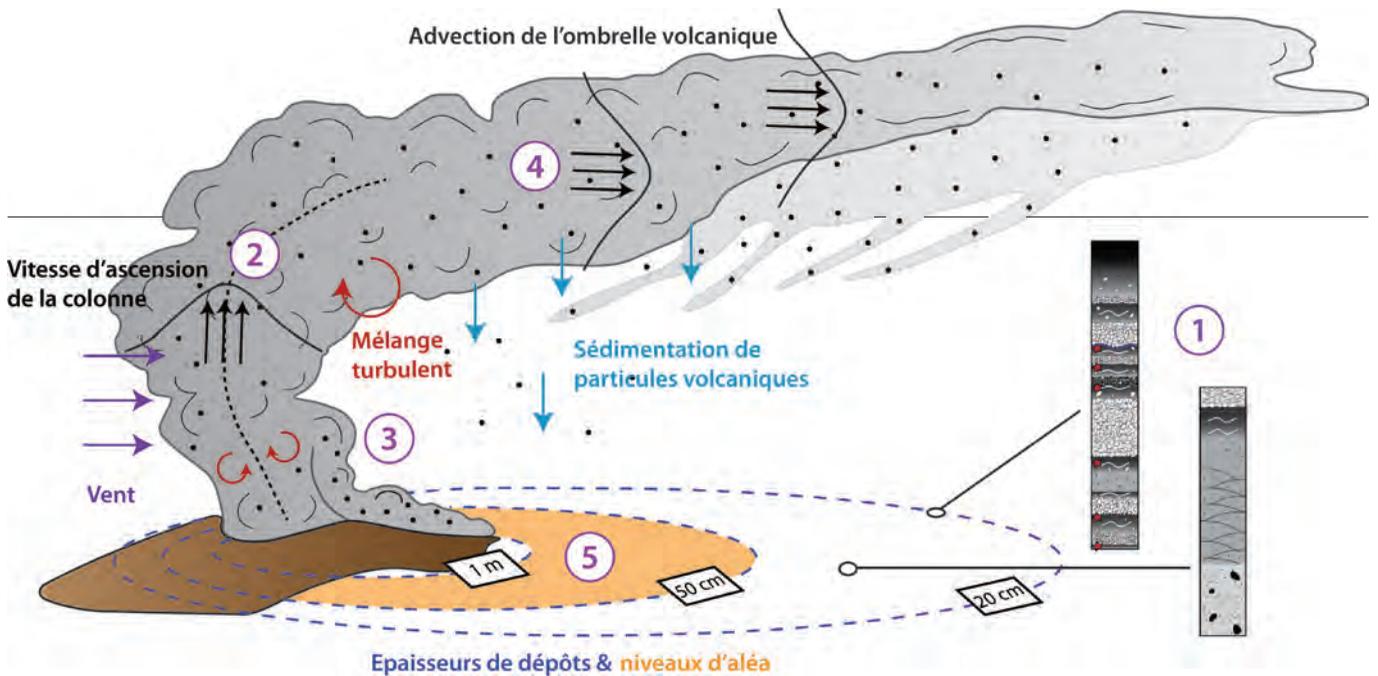


Figure 1 – Schéma résumant les différents axes de cette étude autour du dynamisme plinien, avec pour volcan cible la montagne Pelée : 1) étude de terrain en Martinique, 2) modélisation physique de colonne volcanique via le modèle 1-D PPM, 3) modélisation expérimentale de jets turbulents soumis au vent, 4) modélisation de dispersion de cendres par le modèle 2-D HAZMAP, et 5) caractérisation de l'aléa volcanique plinien « retombées de cendres ».

analogues d'éruptions à petite échelle sont produites en injectant un mélange composé d'éthanol et d'éthylène glycol (analogue de la colonne volcanique) dans une cuve remplie d'eau douce (représentant l'atmosphère). Le dispositif permet de contrôler le débit injecté, la vitesse du « vent » (modélisé par un rail déplaçant la source), et les différences de densité entre le jet et l'eau contenue dans la cuve. Quarante expériences sont réalisées, et les trajectoires du jet tracées d'après les films peuvent ensuite être directement reliées à la qualité du mélange entre la colonne et l'air atmosphérique. Ce paramètre empirique est ensuite implémenté au modèle PPM afin d'aboutir à un nouveau diagramme de régime.

La dernière étape consiste à construire la carte d'aléa volcanique plinien (c'est-à-dire l'aléa « retombées de cendres »). Des profils de vent mensuels issus de quarante ans de données de vent en Martinique (ERA-Interim), combinés à seize scénarios d'éruptions basés sur les prédictions théoriques issus du modèle 1-D, sont implémentés dans le modèle 2-D de disper-

sion de cendres volcaniques HAZMAP^[2] (axe 4). Chaque scénario éruptif a une probabilité d'occurrence en fonction de l'histoire éruptive passée de la montagne Pelée. En combinant les zones touchées par chaque scénario d'éruption, la nouvelle carte d'aléa volcanique « retombées de cendres » est obtenue (axe 5).

RÉSULTATS

La reconnaissance et l'analyse des dépôts des éruptions passées de la montagne Pelée ont permis de reconstruire son histoire éruptive pour les 24 000 dernières années (alors qu'elle n'était auparavant connue que pour les 5 000 dernières années). Cette nouvelle chronologie, comportant 6 éruptions explosives majeures jusqu'ici inconnues, permet d'estimer qu'une éruption plinienne se produit tous les 1800 ans en moyenne en Martinique^[3]. Les calculs de reconstruction des paramètres éruptifs des éruptions nouvellement découvertes révèlent qu'elles sont très

semblables les unes aux autres, à la fois en volume et en puissance (hauteurs de colonnes, débits, durée), ce qui suggère que la montagne Pelée reproduit un schéma très similaire à chaque éruption. Une future éruption plinienne de la montagne Pelée sera donc très probablement classée 4 sur 8 sur l'échelle d'explosivité volcanique (VEI), ce qui correspond à un volume éjecté d'environ 1 km³. Cette éruption produirait une colonne volcanique d'une vingtaine de kilomètres de haut pendant quelques heures, avec très probablement des phases alternant entre colonne stable dispersant des cendres sur de grandes distances, et colonne en effondrement produisant des coulées pyroclastiques. Il s'agirait donc d'une éruption de puissance moyenne mais dont l'impact serait déjà important à l'échelle de l'île de la Martinique ou même de l'arc des Petites Antilles en fonction de la direction des vents dominants.

L'une des nouvelles éruptions découvertes dans cette étude, l'éruption de

- # aléa volcanique
- # montagne Pelée
- # éruptions pliniennes
- # modélisation
- # téphrostratigraphie

> Bellefontaine il y a 14 000 ans, est une bonne illustration de l'importance des vents pour l'étude de l'aléa volcanique [4]. Lors de cette éruption, les cendres ont été dispersées non pas dans la direction habituelle des alizés (vers le sud-ouest) ou des contre-alizés (vers le nord-est), mais plein sud, en direction de l'actuelle Fort-de-France. Une étude détaillée des vents sur les quarante dernières années a permis de démontrer que cette direction inhabituelle des vents provient d'une modification du trajet du « jet-stream » tropical, qui se produit régulièrement dans l'année avec 5 % de probabilité maximale aux intersaisons (en mai et en novembre).

Parallèlement à ces travaux de terrain approfondis, l'amélioration du modèle 1-D de panache volcanique PPM a permis de quantifier l'impact de la granulométrie des fragments volcaniques sur la stabilité du panache [5]. Les résultats de cette étude montrent que la porosité importante des fragments volcaniques ponceux contenus dans la colonne contribue à stabiliser la colonne éruptive et limite la formation de coulées pyroclastiques. Les expériences en laboratoire simulant des jets turbulents dans un environnement soumis au vent ont permis de démontrer que le vent comporte également un effet stabilisateur [6]. Il favorise en effet le mélange turbulent entre l'atmosphère et la colonne volcanique et augmente le champ de stabilité de la colonne. Le nouveau diagramme de régime proposé suite à ces résultats de modélisation pourra être utilisé pour une évaluation rapide de l'aléa plinien en cas d'éruption.

Le résultat final de cette étude est la nouvelle carte d'aléa volcanique plinien construite à partir des 192 simulations de dispersion de cendres (16 scénarios éruptifs x 12 profils de vent mensuels

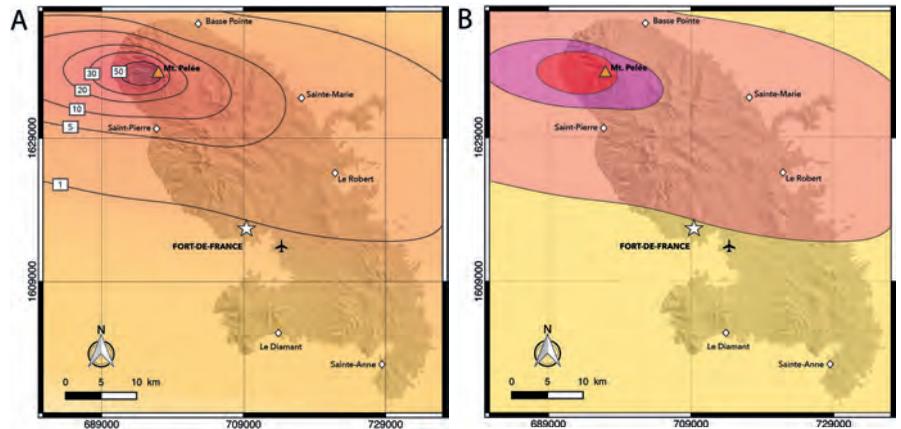


Figure 2 – Nouvelle carte d'aléa volcanique « retombées de cendres », obtenue en combinant les résultats des 192 simulations de dispersion de cendres. Le niveau d'aléa est basé sur A l'épaisseur simulée du dépôt en centimètres, et B en montrant 4 niveaux d'intensité allant de rouge (très élevé, I4), rose (élevé, I3), orange (moyen, I2), à jaune (faible, I1). Ces niveaux dépendent de seuils d'épaisseurs critiques au-delà desquels les infrastructures sont endommagées (cf Table 1).

I0	Nul	Th < 1mm	Pas de dommages
I1	Faible	1 mm < Th < 1 cm	Maintenance requise sur les réseaux (électricité, eau...), fermeture de l'aéroport
I2	Moyen	1 cm < Th < 15 cm	Réparations importantes sur les réseaux
I3	Élevé	15 cm < Th < 30 cm	Les réseaux doivent être entièrement reconstruits, sévères effondrements de toits de mauvaise qualité
I4	Très élevé	Th > 30 cm	Sévères effondrements de tous les types de toits

Table 1 – Niveaux d'intensité (I0 à I4) utilisés pour construire la carte d'aléa « retombées de cendres » de la Figure 2, ainsi que les degrés d'exposition, seuils d'épaisseurs de cendres (Th) et dommages sur les infrastructures correspondants.

réalisées avec le modèle HAZMAP (figure 2a). De la même manière que la carte actuellement en vigueur dans le plan ORSEC, cette nouvelle carte indique que le nord de l'île (où est localisé le volcan) est la zone d'exposition maximale à l'aléa « retombées de cendres ». Cependant, la nouvelle carte prévoit aussi des épaisseurs de cendres supérieures au millimètre tout au sud de l'île, sur la péninsule de Sainte-Anne, pourtant considérée comme sécurisée sur l'ancienne carte. Afin de faciliter la lecture de cette nouvelle carte, celle-ci est combinée à des seuils critiques d'épaisseur associés aux destructions

possibles publiés dans la littérature [7,8] (table 1, figure 2b). On remarque ainsi que même si l'épaisseur modélisée dans le sud de l'île peut sembler dérisoire, elle entraîne tout de même une nécessité de maintenance des réseaux d'électricité et d'eaux potable et usées. De même, l'aéroport international de Fort-de-France, structure clé dans la gestion de crise, pourrait être fermé rapidement après le début d'une éruption majeure de la montagne Pelée. Enfin, la zone la plus proche du volcan, d'où est acheminée l'immense majorité de l'eau potable en Martinique, pourrait être totalement détruite.

LES PARTENAIRES

Cette étude a été menée par A. Michaud-Dubuy dans le cadre de sa thèse intitulée « Dynamique des éruptions pliniennes : réévaluation de l'aléa volcanique en Martinique » et supervisée par Pr E. Kaminski et Dr G. Carazzo à l'Institut de Physique du Globe de Paris (IPGP, Université de Paris). L'IPGP a la charge de services d'observations labellisés en volcanologie à travers ses observatoires permanents en Guadeloupe, Martinique, et à la Réunion.

Ces résultats, bien que portant uniquement sur les retombées de cendres, soulignent la nécessité de poursuivre ce travail de réévaluation de l'aléa volcanique en Martinique. En effet, ces simulations démontrent d'ores-et-déjà que même l'extrême sud de la Martinique ne serait pas épargné en cas de future éruption de la montagne Pelée. Aujourd'hui, la préfecture de la Martinique travaille en accord avec plusieurs acteurs locaux et nationaux à la réécriture du plan ORSEC Volcan pour la Martinique. Ces nouvelles simulations de dispersion de cendres y seront intégrées.

CONCLUSION

L'étude des dépôts volcaniques de la montagne Pelée révèle que ses éruptions pliniennes ne se différencient que par leur axe de dispersion des produits. Inclure le vent dans les modèles d'éruption volcanique est donc une priorité. Des expériences de laboratoire reproduisant une éruption explosive ont ainsi été développées afin de quantifier le forçage du vent sur le mélange entre l'air atmosphérique et la colonne volcanique. Ces résultats, combinés à l'étude de l'impact de la granulométrie sur la stabilité des colonnes volcaniques, permettent d'établir une nouvelle loi de transition entre les deux régimes éruptifs validée par les données de terrain en Martinique. Cette approche intégrée permet finalement de dresser une nouvelle carte d'aléa volcanique pour la Martinique, prenant en compte pour la première fois les éruptions pliniennes de la montagne Pelée. Cette carte sera intégrée au nouveau plan ORSEC Volcan actuellement en rédaction, à la demande de la Préfecture de la Martinique./

RÉFÉRENCES

1. Stieltjes L. & Mirgon C. 1998 Approche méthodologique de la vulnérabilité aux phénomènes volcaniques : Test d'application sur les réseaux de la Martinique. Unpublished Internal Report No. R40098. Bureau de Recherches Géologiques et Minières, Marseille.
2. Macedonio G., Costa A. & Folch A. 2008 Ash fallout scenarios at Vesuvius: Numerical simulations and implications for hazard assessment. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 178(3), 366–377. Doi : 10.1016/j.jvolgeores.2008.08.014.
3. Michaud-Dubuy A. Dynamique des éruptions pliniennes : réévaluation de l'aléa volcanique en Martinique. PhD thesis, Université de Paris, 2019. 221 p.
4. Michaud-Dubuy A., Carazzo G., Tait S., Le Hir G., Fluteau, F. & Kaminski E. 2019 Impact of wind direction variability on hazard assessment in Martinique (Lesser Antilles): The example of the 13.5 ka cal BP Bellefontaine Plinian eruption of Mount Pelée volcano. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 381, 193–208. Doi : 10.1016/j.jvolgeores.2019.06.004.
5. Michaud-Dubuy A., Carazzo G., Kaminski E. & Girault F. 2018 A revisit of the role of gas entrapment on the stability conditions of explosive volcanic columns. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 357, 349–361. Doi : 10.1016/j.jvolgeores.2018.05.005.
6. Michaud-Dubuy A., Carazzo G., Kaminski E. 2020 Wind Entrainment in Jets with Reversing Buoyancy: Implications for Volcanic Plumes. *J. Geophys. Res. Solid Earth.* 125, e2020JB020136. Doi : 10.1029/2020JB020136.
7. Wilson G., Wilson T. W., Deligne N. I. & Cole J. W. 2014 Volcanic hazard impacts to critical infrastructure: A review. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 286, 148–182.
8. Komorowski J. C., Legendre Y., Caron B. & Boudon G. 2008 Reconstruction and analysis of sub-plinian tephra dispersal during the 1530 A.D. Soufriere (Guadeloupe) eruption: Implications for scenario definition and hazards assessment. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 178, 491–515.

CITATION

Michaud-Dubuy A. Réévaluer l'aléa volcanique en Martinique. In Rapport Scientifique CCR 2020 ; CCR, Paris, France, 2021, pp. 50-53



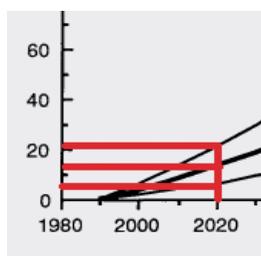
Lauréate 2020

CHANGEMENT CLIMATIQUE

Champ de maïs sec avec jeunes plants de maïs.



Inondations à Carcassonne (Aude) touchée par la tempête Gloria le 23 janvier 2020.

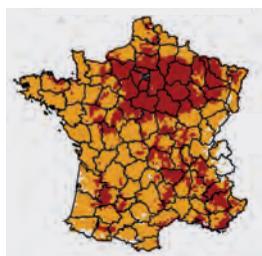


Changement climatique : une approche multi-périls . p.57

Cet article effectue une synthèse des résultats des deux études CCR portant sur les conséquences du changement climatique sur les catastrophes naturelles selon les scénarios RCP 4.5 et 8.5 du GIEC. Ces résultats peuvent être mis en regard avec les publications internationales sur le sujet, depuis le premier rapport du GIEC de 1990.

This article summarises the results of two CCR studies on the consequences of climate change on natural disasters under the IPCC RCP 4.5 and 8.5 scenarios. These results can be compared with the international literature on the topic, since the first IPCC's report in 1990.

David Moncoulon, Roxane Marchal, Jean-Philippe Naulin et Dorothée Kapsambelis

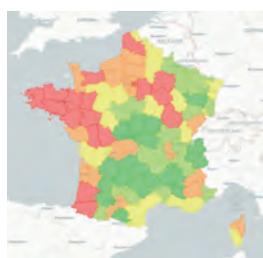
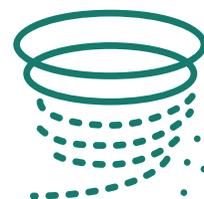


Modélisation de l'impact des sécheresses et excès d'eau sur les productions végétales à horizon 2050 . p.62

Les aléas climatiques extrêmes engendrent de fortes pertes de récoltes sur les productions végétales et fragilisent l'économie des exploitations agricoles. Cet article présente la modélisation des risques extrêmes de sécheresses et d'excès d'eau et leurs conséquences sur les pertes de récoltes des prairies, blé tendre d'hiver et orge d'hiver. Cette étude apporte ainsi des éléments chiffrés sur la vulnérabilité des cultures face à ces risques ainsi que l'exposition du territoire aujourd'hui et à horizon 2050.

Extreme climatic hazards lead to high crop losses in crop production and weaken the economy of farms. This article presents the modelling of extreme risks of droughts and excess water and their consequences on crop losses for grasslands, soft winter wheat and winter barley. This study provides key figures on the vulnerability of crops to these risks as well as the exposure of the territory today and by 2050.

Dorothée Kapsambelis, David Moncoulon et Jean Cordier



Comprendre les conséquences du changement climatique : l'exemple de l'exercice pilote de l'ACPR • p.67

En 2020, CCR a participé à l'exercice pilote climatique dirigé par l'ACPR. Cet exercice novateur, inédit et ambitieux a rassemblé le secteur bancaire et assurantiel autour de l'évaluation des conséquences du changement climatique à horizon 2050. Les risques physique et de transition sont analysés afin de comprendre l'exposition de ces secteurs. Ce travail s'inscrit dans le contexte des politiques de la Loi sur la transition énergétique et la croissance verte et l'Accord de Paris de 2015.

In 2020, CCR participated in the pilot climate exercise led by the ACPR. This innovative, novel and ambitious exercise brought together the banking and insurance sectors to assess the consequences of climate change up to 2050. Physical and transition risks are analysed in order to understand the exposure of these sectors. This work is in line with the policies of the Law on Energy Transition and Green Growth and the 2015 Paris Agreement.

Thierry Cohignac



Changement climatique : une approche multi-périls

David Moncoulon¹, Roxane Marchal¹, Jean-Philippe Naulin¹, Dorothée Kapsambelis¹
(1) Département R&D Modélisation Risques Cat & Agriculture, CCR

INTRODUCTION

Le changement climatique est au cœur des préoccupations actuelles de la société. Les événements qui se sont produits au cours des dernières années, sécheresses récurrentes, inondations exceptionnelles, cyclones de très grande ampleur, nous alertent sur le risque d'un accroissement continu de l'exposition de nos territoires à ces périls. En effet, le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) fait état dans son dernier rapport (IPCC, 2021) d'une augmentation significative du nombre de vagues de chaleurs notamment en zone urbaine dans les prochaines décennies. De plus, le GIEC alerte sur l'augmentation des précipitations extrêmes dans le futur et des inondations consécutives. Malgré une diminution (dans le Sud de la France) ou une légère hausse (sur le reste du territoire) des cumuls annuels, de pluie, l'augmentation des précipitation maximales journalières est estimée à environ 20 % sur l'ensemble du territoire (RCP 8.5). L'élévation du niveau de la mer va accroître avec un haut degré de confiance le risque de submersion marine, et par conséquent le risque d'inondation dans les villes côtières.

En 2015, à l'occasion de la COP 21, CCR a réalisé une étude sur l'estimation des conséquences du changement climatique selon le scénario RCP 4.5 du GIEC [3] sur les dommages assurés en France métropolitaine. Les *Representative Concentration Pathways* (RCP) ou profils d'évolution des concentrations des gaz à effet de serre (GES) sont les quatre scénarios de

trajectoire d'évolution des émissions de GES. Le scénario RCP 4.5 correspond à une concentration de GES de ~500ppm en 2050 et de ~660 ppm en 2100 ; avec une augmentation des températures comprises entre 1,6-2,5° C en 2050 et entre 2,1-3,5° C en 2100. Il correspond à un scénario dit optimiste, avec une stabilisation des émissions de GES à un niveau faible jusqu'en 2050 puis une diminution jusqu'en 2100.

En 2018, une deuxième étude de CCR a été réalisée sur l'estimation des dommages assurés dus au changement climatique selon le scénario RCP 8.5 [4], soit une évolution de la concentration de GES d'environ 600 ppm en 2050 et supérieure à 1370 ppm en 2100, et une augmentation de température globale comprise entre 1,9 et 3,0° C en 2050 et entre 3,3 et 5,7° C en 2100 [5]. Ce scénario est toujours considéré comme le plus pessimiste et correspond à une poursuite de l'augmentation des émissions de GES au rythme actuel.

La comparaison entre ces deux scénarios et leurs conséquences est nécessaire afin d'orienter les politiques de gestion des risques pour des actions de prévention.

La chaîne de modélisation mise en place chez CCR simule les aléas de sécheresse, inondations, submersions marines et cyclones (Outre-mer) et leurs conséquences sur les biens assurés. Au lieu d'utiliser en entrée des données d'observations post-événements, comme c'est le cas pour estimer l'impact d'événements survenus, CCR a utilisé pour ces travaux les sor-

ties du modèle ARPEGE-Climat de Météo-France selon les scénarios 4.5 et 8.5 du GIEC. CCR a également étendu son expertise de modélisation en étudiant les conséquences du changement climatique sur les pertes de récoltes liées aux sécheresses et excès d'eau. Cette modélisation innovante permet alors de simuler l'évolution des dommages assurés selon une approche multi-périls des événements extrêmes climatiques liés au dérèglement climatique à horizon 2050.

MÉTHODOLOGIE

Le modèle ARPEGE-Climat de Météo-France

Dès 1990, Météo-France a élaboré un modèle de prévision et d'évolution du climat à l'échelle mondiale : le modèle ARPEGE-Climat. Ce modèle a ensuite été amélioré pour intégrer notamment les différents scénarios du GIEC. Dans un premier temps, sur l'Europe, le modèle a une résolution spatiale de 20 km et la stabilité du climat est assurée grâce au forçage climatique par des séries de températures de surface de la mer et par le maintien des concentrations de GES aux valeurs définies selon le scénario choisi. Le pas de temps du modèle est de 10 mn, les données sont enregistrées au pas de temps 1 h pour la plupart des paramètres météorologiques. Le modèle ARPEGE-Climat simule 400 répétitions du climat 2000 et 400 répétitions du climat 2050 pour les deux scénarios 4.5 et 8.5. Cette méthodologie permet de prendre en compte la variabilité climatique. La répétition des événements permet l'analyse des scénarios extrêmes en termes de fréquence et d'intensité. Les données de précipitations issues d'ARPEGE-Climat alimentent le modèle inondation développé chez CCR et les composantes horizontales

- # changement climatique
- # multi-périls
- # dommages économiques
- # exposition
- # aléas

> de la vitesse du vent à 10 m et la pression atmosphérique alimentent le modèle de submersion marine.

De plus, Météo-France a mis en œuvre le modèle SAFRAN-ISBA-MODCOU (SIM2). Ce modèle est alimenté par une dizaine de paramètres météorologiques issus des simulations climatiques, et calculés sur une maille de 8x8 km sur la France métropolitaine. Les sorties de ce modèle comprennent l'indice d'humidité des sols (SWI) qui alimente le modèle de sécheresse géotechnique développé chez CCR.

La chaîne de modélisation développée par CCR

Les données météorologiques issues du modèle ARPEGE-Climat de Météo-France viennent alimenter les modèles d'impact développés chez CCR. Ces modèles comprennent tous un module d'aléa qui simule l'événement climatique, un module de vulnérabilité qui intègre la localisation et la caractérisation des biens assurés et un module de dommages permettant d'évaluer le coût des catastrophes naturelles à l'échelle du bien, de la commune ou du territoire dans son ensemble.

Le modèle agro-climatique développé à CCR utilise quant à lui les données publiques de rendement des productions végétales fournies par le ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation.

L'approche multi-périls permet de prendre en compte la dépendance des aléas climatiques et de leurs conséquences par l'utilisation d'ARPEGE-Climat pour produire des années climatiques (au pas de temps horaire sur l'ensemble du territoire à une maille de 8 km) qui comportent des précipitations extrêmes, des sécheresses et des tempêtes.

LES DOMMAGES ASSURÉS EN FRANCE MÉTROPOLITAINE ET EN OUTRE-MER

Effet du climat seul

Les conséquences du changement climatique sur les dommages assurés peuvent être analysées par péril et ou selon une approche multi-périls. L'analyse de l'évolution des dommages assurés selon les scénarios 4.5 et 8.5 est présentée en tableau 1. L'impact du changement climatique est plus important sur les phénomènes de submersions marines quel que soit le scénario RCP étudié. Les dommages sur les biens assurés augmentent pour chaque péril, selon le scénario 8.5 du GIEC. Cette augmentation est particulièrement marquée pour les sécheresses géotechniques.

Effet combiné de l'évolution de l'aléa et de la vulnérabilité

Le calcul d'un ratio « sinistres à primes », intégrant l'évolution de la concentration des enjeux assurés dans les zones à risque, montre que la sinistralité augmenterait de 50 % à horizon 2050 selon le scénario RCP 8.5. Ce chiffre est dû pour 35 % à l'évolution de la fréquence et de l'intensité des aléas climatiques et pour 15 % à la concentration des biens assurés dans les zones à risques. La sinistralité

augmenterait de 35 % à horizon 2050 selon le RCP 4.5, avec 20 % dû à l'évolution de la fréquence des aléas et 15 % dû à la vulnérabilité.

Ces chiffres globaux cachent des disparités régionales sur l'évolution des dommages assurés à horizon 2050. En effet, les travaux réalisés montrent une augmentation accrue des dommages assurés sur le littoral atlantique (>60 %) et l'Île-de-France (>40 %). En revanche, l'évolution des dommages assurés seraient de 30 % sur le pourtour méditerranéen, tout les périls confondus.

L'étude par aléa climatique montre des territoires particulièrement exposés à certains périls. En effet, les inondations engendrent une évolution des dommages assurés de +60 % sur la façade atlantique et l'Île-de-France et une diminution des pertes jusqu'à 25 % dans le Massif Central. Les submersions marines impactent particulièrement les départements de Vendée et de Charente-Maritime et de manière moins importante le littoral méditerranéen. Les sécheresses géotechniques impactent l'ensemble du territoire de manière relativement homogène.

Les territoires d'Outre-mer sont également fortement exposés aux risques climatiques et notamment aux cyclones. Ces événements peuvent être conséquents et engendrer des pertes humaines et éco-

Score brut	Inondations		Submersions marines		Sécheresse géotechnique		Tous périls	
	RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 4.5	RCP 8.5
Évolution des dommages assurés annuels moyens en 2050	+ 20 %	+ 38 %	+ 60 %	+ 82 %	+ 3 %	+ 23 %	+ 20 %	+ 35 %

Tableau 1 – Évolution des pertes annuelles moyennes par péril liées aux évolutions du climat sur les valeurs assurées actuelles.

Catégorie 4



Catégorie 5 / 5+

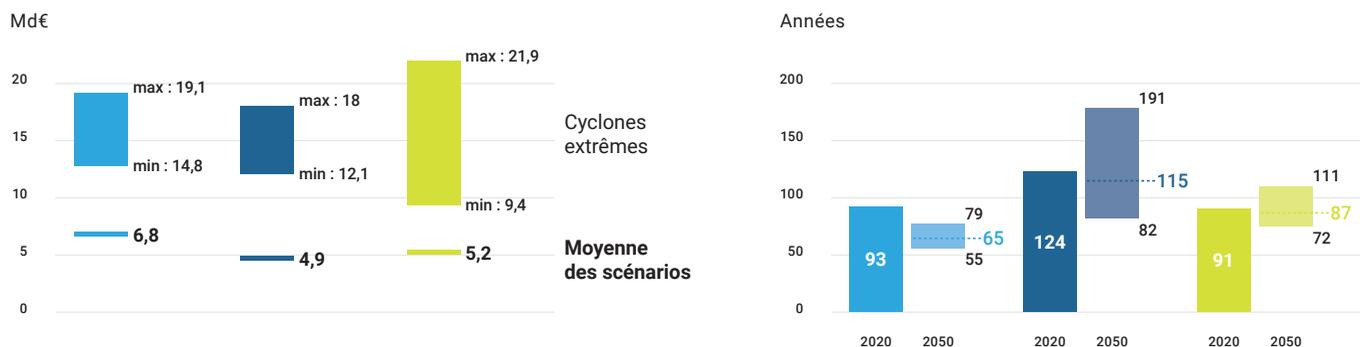


Figure 1 – Dommages potentiels et périodes de retour associées par catégorie de cyclone et par île

nomiques majeures. Cela a été le cas en 2017, avec le passage de l'ouragan Irma sur les îles de Saint-Martin et Saint-Barthélemy, causant 2 milliards d'euros de dommages assurés. Depuis l'intégration du péril vents cycloniques dans le régime Cat Nat en 2000, aucun événement de cette ampleur ne s'était produit. CCR a mené en 2020 [7] une étude spécifique au risque cyclonique dans les Outre-mer. Elle a permis d'apporter des éléments de réflexion sur l'exposition de ces territoires aux événements extrêmes, à climat actuel et climat futur. Les projections en 2050 d'événements rares comme les cyclones comprennent de nombreuses incertitudes. L'interprétation des résultats

d'ARPEGE à l'échelle de territoires comme les Antilles ou la Réunion n'a pas permis de conclure sur une évolution de fréquences. En revanche, il a été possible de reconstruire des événements majeurs à partir des trajectoires simulées et de mesurer l'exposition des territoires à des événements non survenus à ce jour. Par exemple, pour la Guadeloupe les pertes assurées pour des cyclones de catégories 5/5+ se situent entre 12,1 et 18 Mds €. La moyenne des scénarios est de 4,9 Mds € (figure 1).

Résultats sur l'agriculture et les forêts

Les productions végétales sont particulièrement impactées par les risques climatiques dus au changement climatique. Les résultats obtenus indiquent que des sécheresses d'une intensité égale, en moyenne, à celles de 2003 et 2011 (soit en moyenne, environ 27 % de pertes de rendement en prairies et 11 % de pertes en blé tendre d'hiver) vont doubler en fréquence à horizon 2050.

En 2020, CCR et des élèves de l'EURIA à Brest ont travaillé sur le développement d'un modèle Cat du risque de feux de forêts en France métropolitaine. L'étude basée sur le RCP 4.5 et reposant sur l'uti-

- # changement climatique
- # multi-périls
- # dommages économiques
- # exposition
- # aléas

> lisation de modèles de machine learning a démontré une augmentation de l'exposition de l'arc méditerranéen à ce risque. À horizon 2050, l'exposition des territoires plus au nord, tels que la Bretagne, Pays de la Loire, Centre-Val de Loire et la côte Atlantique (forêt des Landes), tend à augmenter.

Discussion

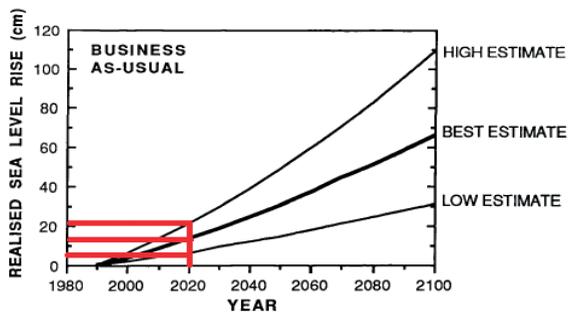
Les résultats de ces études peuvent être mis en regard d'une revue de la littérature effectuée sur le sujet. Un bilan historique des différents rapports du GIEC et une comparaison aux observations réelles a été effectuée. Le premier rapport du GIEC [8] avait particulièrement bien anticipé l'élévation de la température mondiale. En effet, en termes de taux de concentration en CO₂, le scénario business-as-usual A de 1990 est atteint en 2020. Il en est de même concernant l'estimation de l'élévation du niveau de la mer (figure 2).

CONCLUSION

Comprendre l'exposition d'aujourd'hui et de demain aux risques naturels permet de tester la soutenabilité du régime Cat Nat et de proposer d'éventuelles mesures d'adaptation pour maintenir son équilibre financier basé sur la solidarité. L'amélioration de la connaissance de l'exposition de tous les territoires aux enjeux climatiques permet d'apporter des éléments essentiels pour la prévention des risques. Poursuivre le développement des modélisations sur les autres périls tels que les feux de forêts ou les risques en montagne (vidange subite de glaciers, nouveaux couloirs d'avalanches, fonte du permafrost etc.) nous permettra de mieux anticiper les risques sur l'ensemble des territoires./

Période de référence	Nombre d'événements	Coûts des dommages
1980 - 1990	4,212	1.63\$ trillion
2000 - 2019	7,348	2.97\$ trillion

Table 1 – Augmentation significative du nombre de catastrophes naturelles enregistrés et leurs coûts du fait du changement climatique entre deux périodes de référence. Source : UNDRR, 2021.



Évolution du niveau moyen des océans depuis 1800, projection 2100

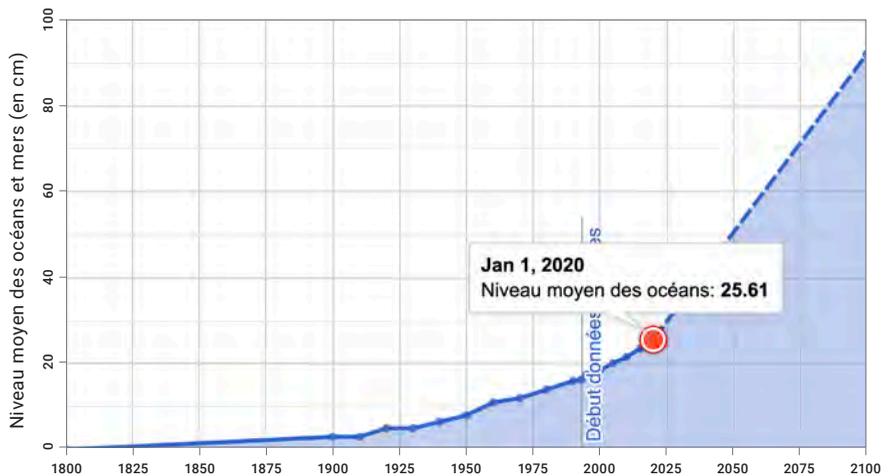


Figure 2 – Dommages potentiels et périodes de retour associées par catégorie de cyclone et par île (figure du haut) Estimation de l'élévation du niveau de la mer en 1990 par le GIEC ; (figure du bas) L'élévation actuelle relevée par notre-planète.info d'après les données CSIRO Marine and Atmospheric Research.

RÉFÉRENCES

1. ESA Copernicus, 2021. Copernicus: 2020 warmest year on record for Europe; globally, 2020 ties with 2016 for warmest year recorded. <https://climate.copernicus.eu/2020-warmest-year-record-europe-globally-2020-ties-2016-warmest-year-recorded>
2. WMO, 2021. 2020 closes a decade of exceptional heat. <https://public.wmo.int/en/media/news/2020-closes-decade-of-exceptional-heat>
3. Caisse Centrale de Réassurance Modélisation de l'impact du changement climatique sur les dommages assurés dans le cadre du régime Catastrophes Naturelles; Caisse Centrale de Réassurance: Paris, France, 2015; p. 35
4. Moncoulon D.; Desarthe J.; Naulin J.-P., Onfroy T., Tinard P., Wang Z.-X., Hajji C., Veysseire M., Dequé M., Régimbeau F. Conséquences du changement climatique sur le coût des catastrophes naturelles en France à l'horizon 2050; Caisse Centrale de Réassurance & Météo France: Paris, 2018; p. 31;
5. IPCC, 2021: Summary for Policymakers. In: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [MassonDelmotte V., Zhai P., Pirani A., Connors S. L., Péan C., Berger S., Caud N., Chen Y., Goldfarb L., Gomis M. I., Huang M., Leitzell K., Lonnoy E., Matthews J. B. R., Maycock T.K., Waterfield T., Yelekçi O., Yu R. and Zhou B. (eds.)]. Cambridge University Press. In Press.
6. Boucher O., Dufresne J.-L., Vial J., Brun E., Cattiaux J. et alii (2015), « Projection des changements climatiques futurs », *La Météorologie*, n°88, p. 56-68, DOI : <https://doi.org/10.4267/2042/56362> ;
7. Caisse Centrale de Réassurance; Météo-France; RiskWeatherTech Évolution du risque cyclonique en Outre-Mer à horizon 2050; Caisse Centrale de Réassurance, Météo-France et RiskWeatherTech: Paris, France, 2020; p. 20;.
8. IPCC, 1992. Climate Change: The IPCC 1990 and 1992 Assessments, 178pp. <https://www.ipcc.ch/report/climate-change-the-ipcc-1990-and-1992-assessments/>
9. NOAA, 2021. Global Climate Report - Annual 2020, <https://www.ncdc.noaa.gov/sotc/global/202013>
10. Hébert R.; Lovejoy S.; Tremblay B. An Observation-Based Scaling Model for Climate Sensitivity Estimates and Global Projections to 2100. *Clim Dyn* 2021, 56, 1105–1129, doi:10.1007/s00382-020-05521-x.
11. UNDRR, 2021. Human cost of disasters, an overview of the last 20 years 2000-2019, https://www.preventionweb.net/files/74124_humancostofdisasters20002019reportu.pdf
12. IPCC 2018. Special report: Global warming of 1.5°C, Chapter 3: Impacts of 1.5°C global warming on natural and human systems <https://www.ipcc.ch/sr15/chapter/chapter-3/>

CITATION

Moncoulon D., et al.,
Changement climatique :
une approche multi-périls.
In Rapport Scientifique CCR
2020 ; CCR, Paris, France,
2021, pp. 57-61

Modélisation de l'impact des sécheresses et excès d'eau sur les productions végétales à horizon 2050



Dorothee Kapsambelis¹, David Moncoulon¹, Jean Cordier²

(1) Département R&D Modélisation Risques Cat & Agriculture, CCR

(2) Agrocampus Ouest, Economie et Gestion, SMART-LERECO

INTRODUCTION

En France, de nombreux événements climatiques ont, par le passé, très fortement impacté les productions agricoles à l'échelle nationale. Les sécheresses et les excès d'eau ont engendré les plus importantes pertes sur les grandes cultures et les prairies au cours des vingt dernières années. La sécheresse de 2003 a engendré des pertes de 15 % pour le blé tendre d'hiver et de plus de 30 % pour les prairies. L'excès d'eau de 2016 a enregistré un record de pertes pour le blé tendre d'hiver qui s'élève à 28 %. Ces risques sont considérés par l'OCDE comme « catastrophiques », c'est-à-dire d'une amplitude et d'une intensité extrêmes avec une fréquence relativement faible^[1]. Or, les experts du climat alertent sur l'exposition accrue des territoires face à ces extrêmes liés au dérèglement climatique. Plusieurs études indiquent que la fréquence, l'intensité et la longueur des vagues de chaleur augmenteront au XXI^e siècle^[2-4]. Le pourtour méditerranéen serait particulièrement exposé aux sécheresses extrêmes^[2].

En France, les mesures de gestion des risques en agriculture sont particulièrement étudiées afin de stabiliser le revenu des exploitations agricoles et d'augmenter leur résilience pour le prochain programme de la politique agricole commune (2023-2027). Une meilleure connaissance de ces aléas extrêmes ainsi que leurs impacts en termes de pertes de récoltes est nécessaire pour alimenter la réflexion sur la gestion des risques en agriculture.

Cet article fournit des éléments chiffrés sur l'évolution de la fréquence et de l'intensité des événements extrêmes précités et leurs conséquences sur les pertes de récoltes du blé tendre d'hiver, de l'orge d'hiver et des prairies à horizon 2050. Ces trois cultures ont été retenues car elles représentent 63 % de la surface agricole utile, la France étant le premier producteur de céréales (26 % de la production totale) et le 2^e producteur de bovins lait (24,5 MT de lait) en Europe. Ce travail de recherche s'inscrit dans une thèse de doctorat en partenariat avec Météo-France, CCR et l'Institut Agrocampus Ouest dont l'objet est la modélisation à horizon 2050 des aléas climatiques extrêmes de sécheresses et d'excès d'eau liés au dérèglement climatique sur les productions végétales en France.

MÉTHODOLOGIE

Données utilisées

Les données sur les récoltes sont issues de la base de données publique AGRESTE qui référence par culture et par département les rendements et les surfaces depuis 1989 jusqu'en 2020 pour le blé tendre d'hiver et l'orge d'hiver et à partir de 2000 pour les prairies. Les pertes de récoltes (%) sont calculées en utilisant la moyenne olympique glissante sur 5 ans comme rendement de référence.

Les données climatiques de précipitations et d'évapotranspiration sur l'historique sont issues de la base de données

SAFRAN sur l'historique 1989-2018 et sur une grille de 8 x 8 km sur toute la France. L'ETP est calculé selon l'équation de Penman-Monteith.

Liens entre le climat et les pertes de récoltes

Pour étudier l'impact du changement climatique sur les productions végétales il est nécessaire de faire le lien entre les données climatiques et les pertes de récoltes. Pour ce faire, un nouvel indice climatique a été créé, basé sur l'anomalie décennale cumulée du bilan hydrique qui représente les événements extrêmes de sécheresse et d'excès d'eau et qui est corrélé aux pertes de récoltes du blé tendre d'hiver, de l'orge d'hiver et des prairies^[5]. L'indice est calculé sur la maille de 8 x 8 km pour toute la France. Cette grille est croisée avec le référentiel parcellaire graphique (RPG) pour prendre en compte l'occupation du sol. Pour chaque culture étudiée, l'indice est calculé sur les mailles contenant les parcelles agricoles concernées et la moyenne de l'indice est réalisée pour obtenir une valeur de l'indice annuelle et départementale.

Ensuite, la modélisation mise en place chez CCR permet pour chaque valeur de l'indice (en mm) de faire correspondre une valeur de pertes de récoltes (en %). En effet, le modèle de dommages est calibré sur l'historique en ajustant deux courbes de dommages permettant de prédire la survenance des sinistres et le montant des pertes en cas de sinistre. Ainsi, plus les valeurs de l'indice climatique sont ex-

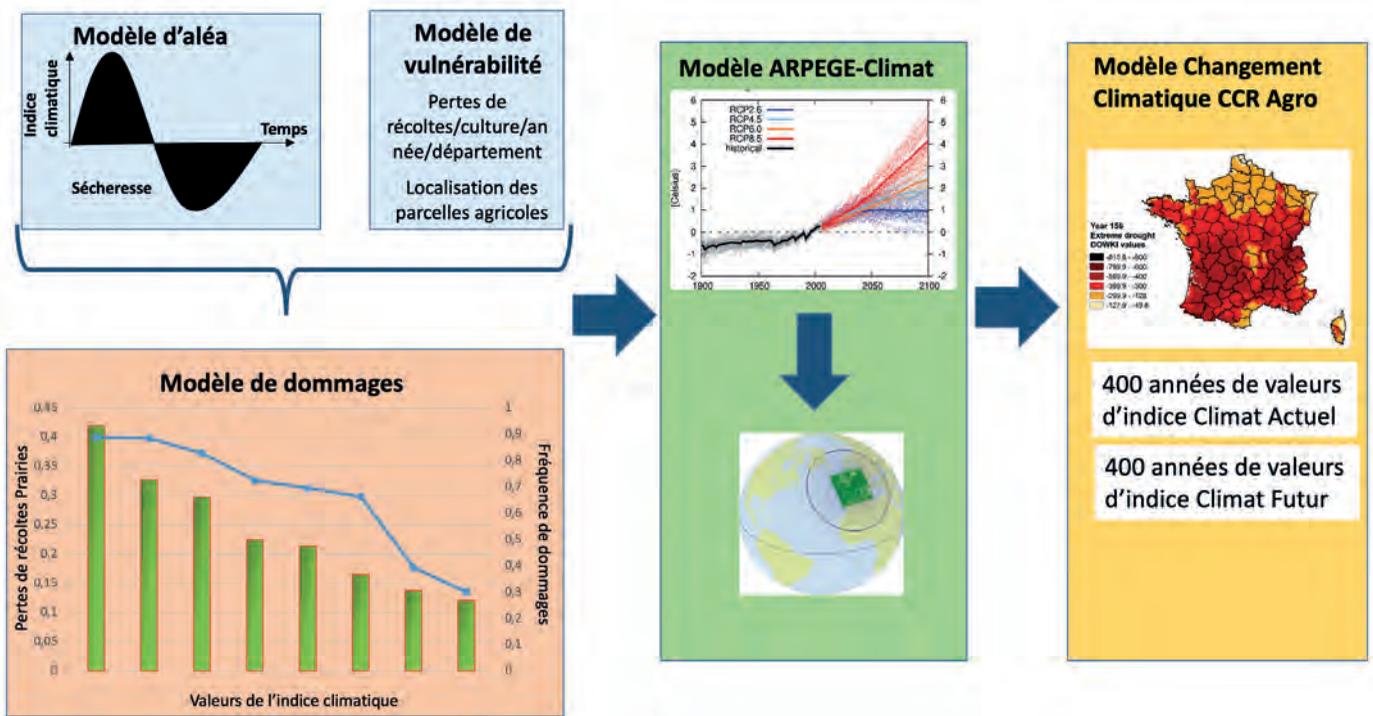


Figure 1 – D’après Kapsambelis D., Moncoulon D, Risques n°126, 2021 Chaîne de modélisation mise en place : de la modélisation du climat aux pertes de récoltes à horizon 2050.

trêmes, plus les pertes de récoltes sont importantes et plus la probabilité de survenance d’un sinistre augmente. Le modèle est validé en comparant les pertes de récoltes calculées à partir de la base AGRESTE et celles simulées grâce aux valeurs de l’indice climatique pour chaque année et chaque département, sur l’historique 1989-2018. Un plan d’expérience est réalisé, permettant de sélectionner les paramètres qui minimisent les erreurs entre les pertes de récoltes réelles et simulées. Une fois les meilleurs résultats obtenus par culture sur l’historique, il est alors possible de passer à la modélisation à horizon 2050.

Modélisation de l’impact du changement climatique

Pour modéliser le changement climatique, le modèle ARPEGE-Climat de Météo-France est utilisé. Celui-ci simule à climat constant 400 répétitions de climat 2000 et 400 répétitions de climat 2050 selon le scénario 8.5 du GIEC. Cette méthode permet d’envisager un large spectre de scénarios possibles sur le climat 2000 et futur avec tous types de profils (extrêmes et non extrêmes) et de prendre en compte une grande part de la variabilité climatique annuelle. Les simulations du modèle ARPEGE-Climat permettent d’obtenir 400 valeurs de pré-

cipitations et 400 valeurs d’évapotranspiration sur une maille de 8 x 8 km sur toute la France et à partir desquelles est recalculé l’indice climatique.

Une fois l’indice climatique calculé, il est possible de simuler les pertes de récoltes (%) par département et d’en déduire la fréquence et l’intensité des événements extrêmes de sécheresse et d’excès d’eau et leurs conséquences sur l’agriculture. La chaîne de modélisation est résumée en figure 1.

- # événements extrêmes
- # agriculture
- # modélisation
- # changement climatique
- # pertes de récoltes

> RÉSULTATS

Les aléas climatiques sur la période historique

L'étude des pertes de récoltes sur l'historique montre que le blé tendre d'hiver et l'orge d'hiver sont sensibles aux événements extrêmes de sécheresse et d'excès d'eau et les prairies uniquement aux risques de sécheresses extrêmes. Les sécheresses ayant engendré le plus de pertes sont celles de 2003 et de 2011. La sécheresse de 2003 a occasionné à l'échelle nationale plus de 30 % de pertes pour les prairies et plus de 10 % pour le blé tendre d'hiver et l'orge d'hiver. L'excès d'eau de 2016 a causé un record de pertes de récoltes sur le blé tendre, s'élevant à 28 % à l'échelle nationale. Les résultats sur ces 3 années sont présentés en figure 2.

Les sécheresses extrêmes en 2050

La comparaison des valeurs moyennes annuelles de l'indice climatique entre le climat 2000 et le climat futur montre une aggravation de l'anomalie de bilan hydrique de 40 %. L'étude des sécheresses décennales montre une augmentation de leur fréquence et de leur intensité. En effet, les sécheresses extrêmes ayant une période de retour de 10 ans à climat 2000 auraient une période de retour de 6 ans à climat futur. Leur fréquence doublerait donc à horizon 2050. De plus, le déficit hydrique augmente sur tout le territoire français métropolitain comme montré en figure 3. Cette augmentation de déficit hydrique s'accompagne d'une augmen-

tation des pertes de récoltes décennales de 35 % pour les prairies, 75 % pour le blé tendre d'hiver et 79 % pour l'orge d'hiver à l'échelle nationale. D'après la figure présentée, la moitié nord de la France voit une augmentation plus importante de l'intensité des sécheresses extrêmes par rapport au Sud de la France. Cependant, le pourtour méditerranéen enregistre les intensités de sécheresses les plus élevées.

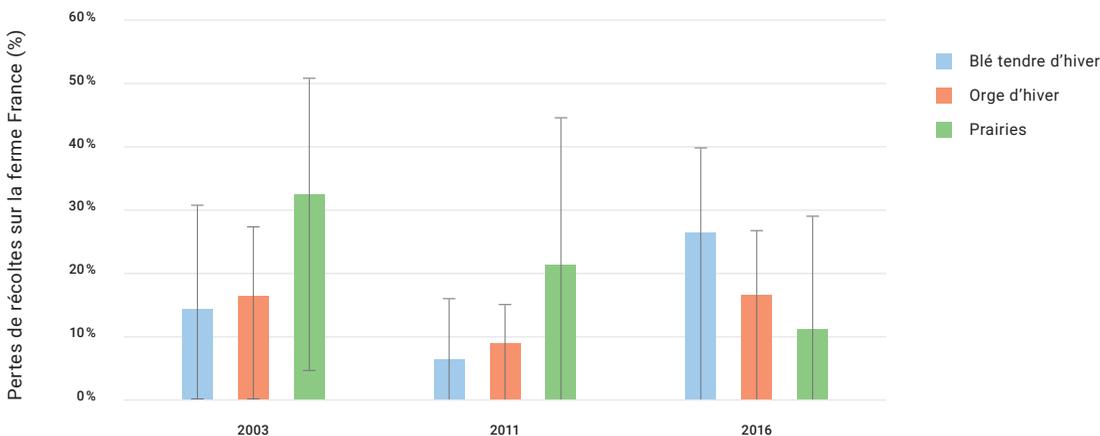


Figure 2 – Pertes de récoltes sur la ferme France pour les années 2003, 2011 et 2016 et les cultures de blé tendre d'hiver, orge d'hiver et prairies.

Les excès d'eau extrêmes en 2050

La comparaison des valeurs moyennes annuelles de l'indice climatique entre le climat 2000 et le climat futur ne montre pas d'évolution significative, le bilan hydrique n'augmentant que de 5 % sur l'ensemble de territoire métropolitain. Cependant, cette valeur cache des disparités régionales importantes. En effet, l'indice climatique d'excès d'eau montre une diminution de ses valeurs entre 25 % et 50 % sur le pourtour Méditerranéen alors que les valeurs augmentent dans la moitié nord de la France.

L'excès d'eau de 2016, événement catastrophique, aurait une période de retour de 50 ans à climat 2000 et la même période de retour en 2050. La figure 4 présente l'évolution des excès d'eau décennaux et leurs conséquences sur le blé tendre d'hiver et l'orge d'hiver. La ferme France ne semble pas voir son exposition à ce risque extrême augmenter à horizon 2050 ce qui entraîne une stagnation des pertes de récoltes.

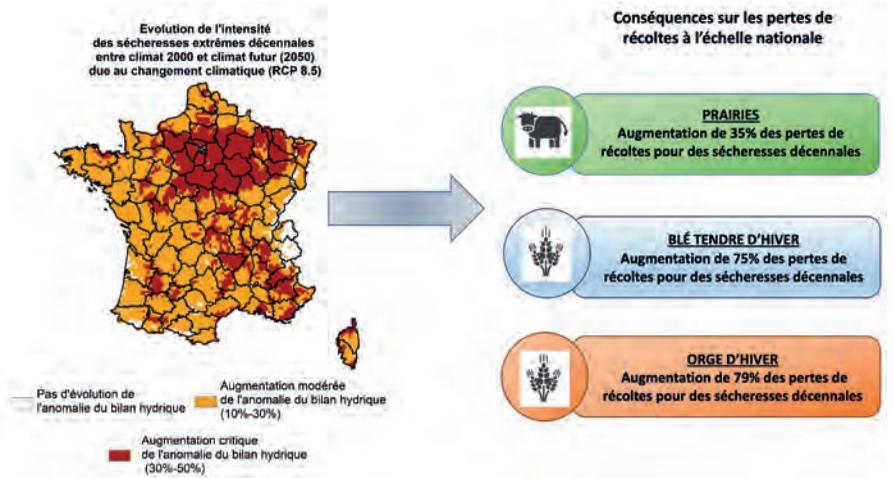


Figure 3 – Évolution de l'intensité des sécheresses extrêmes décennales mesurée par l'augmentation de l'anomalie de bilan hydrique (%) entre climat actuel et climat futur (2050) due au changement climatique selon le scénario 8.5 du GIEC et conséquences sur les pertes de récoltes de prairies, blé tendre d'hiver et orge d'hiver.

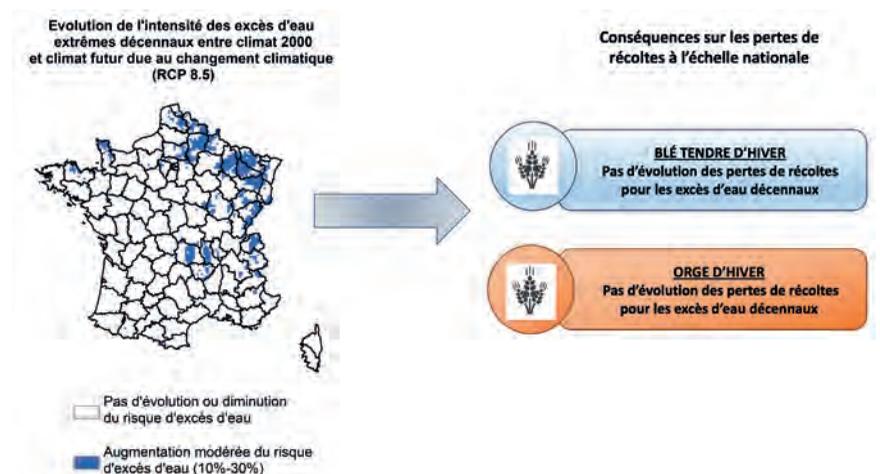


Figure 4 – Évolution de l'intensité des excès d'eau extrêmes décennaux mesurée par l'augmentation de l'anomalie de bilan hydrique (%) entre climat actuel et climat futur (2050) due au changement climatique selon le scénario 8.5 du GIEC et conséquences sur les pertes de récoltes de blé tendre d'hiver et orge d'hiver.



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 rassemble aujourd'hui une soixante de personnes (dont une trentaine de chercheurs et enseignants-chercheurs) issues du département EcoSocio d'INRAE et d'Agrocampus Ouest.

> CONCLUSION

La chaîne de modélisation mise en place chez CCR modélise le climat à horizon 2050 ainsi que ses conséquences sur les pertes de récoltes. Cette méthodologie innovante permet d'anticiper les risques et de proposer des mesures adaptées pour protéger financièrement les agriculteurs dans le futur. Les travaux de recherche montrent une augmentation de l'exposition des céréales et des prairies au risque de sécheresses extrêmes. Leur fréquence doublerait en 2050. L'augmentation du déficit hydrique est particulièrement marquée dans la moitié nord de la France, le risque tend à s'homogénéiser sur tout le territoire. Cependant, le pourtour méditerranéen reste le territoire le plus exposé aux sécheresses de très forte intensité et enregistre le plus de pertes de récoltes sur les céréales et les prairies. Pour l'excès d'eau, on observe une augmentation du risque décennal dans la moitié nord de la France mais beaucoup moins marquée que pour les risques de sécheresses. Ces travaux fournissent des éléments chiffrés pouvant éclairer les réflexions actuelles sur l'évolution des politiques de gestion des risques en agriculture./

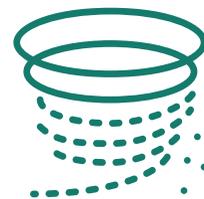
RÉFÉRENCES

1. OCDE Gestion des risques en agriculture: Évaluation et conception des politiques; OECD, 2012; ISBN 978-92-64-05909-2.
2. IPCC Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation; Cambridge University Press; Cambridge, UK, and New-York, NY, USA, 2012; p. 582;.
3. Beniston M., Stephenson D.B., Christensen O.B., Ferro C.A., Frei C., Goyette S., Halsnaes K., Holt T., Jylhä K., Koffi B. Future Extreme Events in European Climate: An Exploration of Regional Climate Model Projections. *Climatic change* 2007, 81, 71–95.
4. Déqué, M. Frequency of Precipitation and Temperature Extremes over France in an Anthropogenic Scenario : Models Results and Statistical Correction According to Observed Values. *Global and Planetary Change* 2007, 57, 16–26.
5. Kapsambelis D., Moncoulon D., Cordier J. An Innovative Damage Model for Crop Insurance, Combining Two Hazards into a Single Climatic Index. *Climate* 2019, 7, 125, doi:10.3390/cli7110125.

CITATION

Kapsambelis D., et al.,
Modélisation de l'impact des sécheresses et excès d'eau sur les productions végétales à horizon 2050. In *Rapport Scientifique CCR 2020* ; CCR, Paris, France, 2021, pp. 62-66

Comprendre les conséquences du changement climatique : l'exemple de l'exercice pilote de l'ACPR



Thierry Cohignac¹

(1) Direction des Réassurances & des Fonds Publics, CCR

INTRODUCTION

L'exercice pilote climatique conduit par l'Autorité de contrôle prudentiel et de résolution (ACPR) en 2020 est inédit et ambitieux. C'est en effet la première fois qu'un superviseur organise avec les groupes bancaires et organismes d'assurance placés sous sa responsabilité un exercice d'évaluation des risques associés au changement climatique aussi complet et exigeant. Son caractère inédit et ambitieux réside dans l'horizon sur lequel les risques sont évalués (30 ans), les méthodologies employées (analyse de scénarios déclinés au niveau des secteurs économiques), ses hypothèses novatrices (notamment de bilan dynamique), sa couverture des risques physiques et de transitions, enfin, le fait que les institutions participantes évaluent directement leurs risques sur la base d'hypothèses communes. Le risque physique est défini par l'augmentation des catastrophes naturelles ; le risque de transition quant à lui est lié aux évolutions des politiques en matière d'énergie ou de réduction des risques pouvant affecter brutalement les logiques de marchés^[1]. Cet exercice a été conduit entre juillet 2020 et avril 2021, découpé par une phase de préparation et une phase de travaux.

L'exercice avait pour but de mobiliser et de sensibiliser le plus largement possible les instituts financiers sur cette thématique du changement climatique. Il a regroupé neuf groupes bancaires et quinze groupes d'assurance, afin de permettre aux participants de se comparer sur des bases d'hypothèses communes.

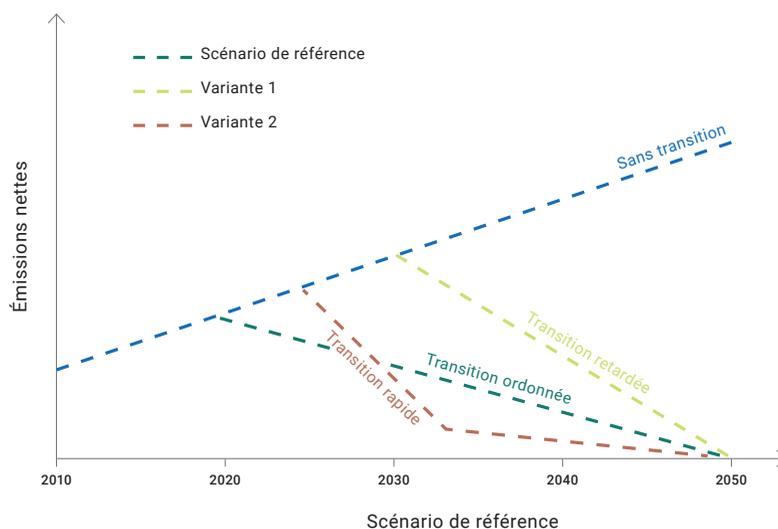


Figure 1 – Scénarios économiques

Au-delà de ces objectifs pédagogiques, il était question de mesurer la vulnérabilité des instituts financiers au risque de changement climatique en s'appuyant sur des scénarios économiques inspirés des travaux du Network for Greening the Financial System (NGFS) de la Banque de France (figure 1). Pour ce qui concerne le risque physique, l'ACPR a considéré le scénario 8.5 du GIEC (scénario dit « du laisser-faire » correspondant à une augmentation de +4° C en 2100).

IMPLICATION DE CCR

En tant qu'expert de la modélisation des risques physiques (catastrophes naturelles), l'ACPR a demandé à CCR de mesurer l'impact du changement climatique

sur les portefeuilles d'assurance des assureurs participant à l'exercice.

Pour ce faire, CCR a mis en place une chaîne de modélisation spécifique pour l'exercice pilote, s'appuyant sur les résultats de travaux de modélisation du changement climatique initiés de longue date^[2,3]. La chaîne de modélisation a été intégrée dans l'outil Daitaku (DSS) afin d'automatiser les processus pour chaque portefeuille d'assurance et type d'aléa. Les cartes d'évolution de l'exposition à horizon 2050 à l'échelle communale, ainsi que d'autres indicateurs ont été générés automatiquement via la plateforme.

CCR a ainsi fourni aux assureurs une estimation de l'impact du changement climatique en termes de dommages assurés sur leur portefeuille pour les périls concernés par le changement climatique (inonda-

changement climatique

assurance

exercice pilote

ACPR

> tions, submersions marines, sécheresse et cyclones) en prenant en compte l'évolution de l'aléa ainsi que la répartition de la population et des entreprises à horizon 2050.

De plus, CCR a apporté une assistance technique auprès des assureurs pour interpréter des résultats de modélisation parfois complexes.

RÉSULTATS DE L'EXERCICE PILOTE

L'exercice pilote révèle une exposition globalement « modérée » des banques et des assurances françaises au risque de changement climatique [4]. Cette conclusion doit être cependant relativisée compte tenu des incertitudes portant à la fois sur la vitesse et l'impact du changement climatique [5, 6]. Elle est également dépendante des hypothèses, des scénarios analysés et des difficultés méthodologiques soulevées par l'exercice. Cette exposition modérée est également à considérer en relatif par rapport à d'autres pays plus exposés que la France et que l'Europe (lieux des principales expositions des instituts financiers français). Concernant plus spécifiquement les catastrophes naturelles, les conclusions sont sans appel puisque CCR prévoit une augmentation globale de 50 % des S/P d'ici 2050 [2, 7]. Cette augmentation de la sinistralité doit être prise en compte dans le financement d'un régime déjà sous tension depuis plusieurs années. Les disparités régionales d'évolution de la sinistralité posent également le problème de l'assurabilité de certains territoires à plus ou moins long terme. C'est ce que souligne la figure 2 montrant l'évolution des pertes multi-périls (Non-Auto) consécutives à l'évolution de l'aléa et de la vulnérabilité à l'échelle communale pour un porte-

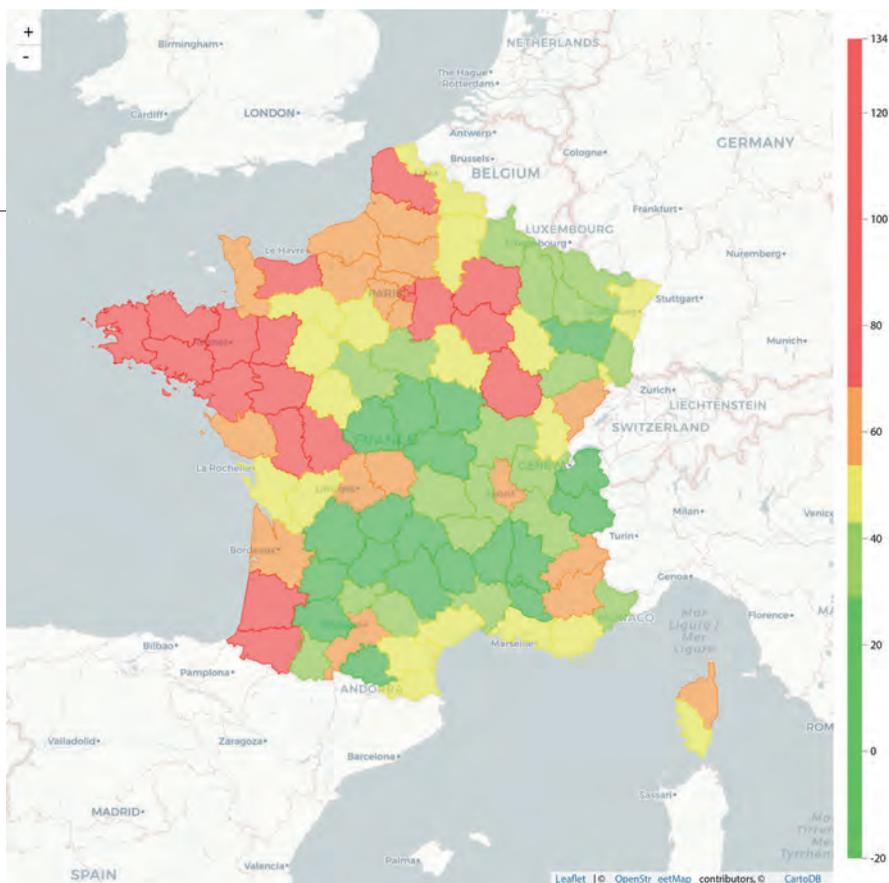


Figure 2 – Évolution des pertes multi-périls (Non-Auto) due à l'aléa et à l'évolution de la répartition géographique de la population (%) en 2050. Exemple de résultat sur le portefeuille d'un assureur.

feuille spécifique à un assureur. Pour cet exemple, les communes situées sur le littoral atlantique sont les plus exposées à ces évolutions (entre +60 et +120 %).

CONCLUSION

La forte mobilisation de la part des assureurs et des banques a permis à l'ACPR de valider l'objectif pédagogique initialement visé. L'ACPR envisage de reconduire ce type d'exercice selon une périodicité non encore définie tout en participant à d'autres initiatives du même type au niveau européen. Le régime des catastrophes naturelles devra relever ce défi afin de préserver le principe de solidarité sur lequel il repose notamment en accentuant les efforts de prévention de chacune des parties prenantes.

RÉFÉRENCES

1. ACPR Les assureurs français face au risque de changement climatique; ACPR: Paris, France, 2019; p. 39;.
2. Moncoulon D., Desarthe J., Naulin J.-P., Onfroy T., Tinarid P., Wang Z.-X., Hajji C., Veyssière M., Dequé M., Régimbeau F. Conséquences du changement climatique sur le coût des catastrophes naturelles en France à l'horizon 2050; Caisse Centrale de Réassurance & Météo France: Paris, 2018; p. 31;.
3. Caisse Centrale de Réassurance Modélisation de l'impact du changement climatique sur les dommages assurés dans le cadre du régime Catastrophes Naturelles; Caisse Centrale de Réassurance: Paris, France, 2015; p. 32;.
4. ACPR Une première évaluation des risques financiers dus au changement climatique Les principaux résultats de l'exercice pilote climatique 2020; ACPR: Paris, France, 2020; p. 65;.
5. IPCC, 2021: Summary for Policymakers. In: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [MassonDelmotte V., Zhai P., Pirani A., Connors S. L., Péan C., Berger S., Caud N., Chen Y., Goldfarb L., Gomis M. I., Huang M., Leitzell K., Lonnoy E., Matthews J. B. R., Maycock T.K., Waterfield T., Yelekçi O., Yu R. and Zhou B. (eds.)]. Cambridge University Press. In Press.
6. Seneviratne S. I., Zhang X., Adnan M., Badi W., Dereczynski C., Di Luca A., Ghosh S., Iskandar I., Kossin J., Lewis S., Otto F., Pinto I., Satoh M., Vicente-Serrano S. M., M. Wehner, B. Zhou, 2021, Weather and Climate Extreme Events in a Changing Climate. In: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [MassonDelmotte V., Zhai P., Pirani A., Connors S. L., Péan C., Berger S., Caud N., Chen Y., Goldfarb L., Gomis M. I., Huang M., Leitzell K., Lonnoy E., Matthews J. B. R., Maycock T.K., Waterfield T., Yelekçi O., Yu R. and Zhou B. (eds.)]. Cambridge University Press. In Press.
7. Caisse Centrale de Réassurance; Météo-France; RiskWeatherTech Évolution du risque cyclonique en Outre-Mer à horizon 2050; Caisse Centrale de Réassurance, Météo-France et RiskWeatherTech: Paris, France, 2020; p. 20;.

CITATION

Cohignac T., Comprendre les conséquences du changement climatique : l'exemple de l'exercice pilote de l'ACPR. In Rapport Scientifique CCR 2020 ; CCR, Paris, France, 2021, pp. 67-69

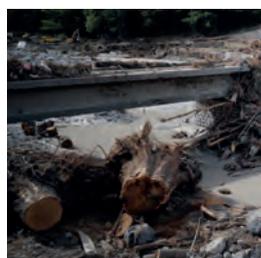
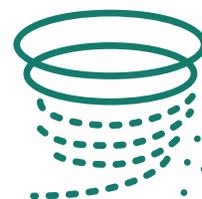
EXPOSITION AUX CAT NAT

Hôtel Mercure à Marigot entouré d'eau et de débris à Saint-Martin
le 6 septembre 2017 après le passage de l'ouragan Irma.



Hôtel Mercure en partie reconstruit le 27 février 2018.





Estimation géolocalisée de la surface des logements individuels par Krigeage Monte-Carlo • p.72

La surface d'un bien immobilier est un élément clé dans l'estimation de sa valeur assurée. Elle n'est cependant pas systématiquement disponible. L'objectif ici est d'utiliser l'information fournie pour chaque individu dans une zone afin d'estimer la surface des biens pour lesquels celle-ci n'est pas renseignée. Pour cela, des méthodes géostatistiques sont suggérées. Les biens pouvant être localisés parfois au même point, la méthode de Krigeage Monte-Carlo est développée pour estimer la surface.

The surface of a real estate good is a key ingredient in the process of estimating its insurable value. However, this variable might not be systematically available. The main objective here is to provide a method using the available information for each individual in a spatial area to estimate the surface of housings when not available. To do so, the theory of geostatistics and Kriging is applied. Since the real estate good can be located to the same reference point, the method of Monte-Carlo Kriging is developed to estimate the surface.

Luc Rongiéras et Émilie Chautru



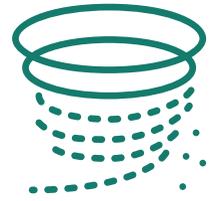
Les apprentissages scientifiques d'un RETEX multidimensionnel sur le cyclone IRMA (projet ANR TIREX) • p.76

Le projet TIREX s'inscrit dans la continuité de premières missions collectives réalisées en octobre 2017 aux Antilles suite aux trois ouragans : Irma, José et Maria. L'objectif est de compléter l'analyse des impacts et de renforcer le suivi de la reconstruction territoriale. Ceci est effectué en favorisant l'analyse comparative entre territoires du nord des Antilles et en formalisant des méthodes de RETEX. Il se propose de participer à l'amélioration de l'alerte cyclonique, à l'identification des facteurs de vulnérabilité et au renforcement des capacités d'adaptation des territoires et des sociétés dans un contexte de changement climatique.

The TIREX project is a continuation of the first collective missions carried out in October 2017 in the West Indies following the three hurricanes, Irma, José and Maria. The objective is to complete the analysis of impacts and strengthen the monitoring of territorial reconstruction, by promoting comparative analysis between territories of the Northern Caribbean, and formalizing RETEX methods. It proposes to participate in the improvement of hurricane warning, to identify vulnerability factors, to strengthen the adaptation capacities of territories and societies in a context of climate change.

Frédéric Leone et Jérémy Desarthe

Estimation géolocalisée de la surface des logements individuels par Krigeage Monte-Carlo



Luc Rongiéras¹, Emilie Chautru²

(1) MINES ParisTech, CCR

(2) MINES ParisTech

INTRODUCTION

Dans l'optique d'estimation des valeurs assurées des logements individuels du portefeuille de CCR, l'importance de connaître la surface des logements se fait ressentir. En effet, la surface est bien souvent utilisée dans les estimations des différents assureurs des coûts de reconstruction.

Toutefois, la surface n'est pas systématiquement renseignée pour chaque individu de la base de données. Il est donc suggéré de proposer une méthode permettant d'estimer cette quantité à l'aide des informations disponibles. Pour cela, la nature du logement, à savoir si c'est une maison, un appartement ou encore un immeuble, est souvent renseignée. L'usage du bien, c'est-à-dire s'il est loué par un propriétaire, loué par un locataire, habité par son propriétaire, ou une copropriété, est également parfois disponible. Le nombre de pièces est une donnée également souvent disponible pour les maisons et les appartements, pour laquelle on perçoit une corrélation linéaire significative avec la surface. Enfin, la localisation en deux dimensions est systématiquement fournie. La méthode proposée consiste à construire un estimateur de la surface en utilisant la théorie de la géostatistique^[1] et le Krigeage, prenant en considération les individus spatialement proches et leur localisation. Toutefois, les localisations disponibles font parfois référence aux mêmes points. Cette particularité entraîne des problèmes computationnels quant à l'estimation de la surface par Krigeage.

Pour parer à ce problème, on introduit le Krigeage Monte-Carlo, consistant à simuler les localisations aléatoirement dans un rayon proche de leur référence, calculer les poids de Krigeage pour chacune des simulations, et effectuer une moyenne des résultats.

Cette méthode est appliquée ensuite pour chaque nature : appartement, maison, immeuble. Afin d'utiliser l'information sur le nombre de pièces lorsqu'elle est disponible, un modèle linéaire est calculé entre la surface et le nombre de pièces. Le Krigeage Monte-Carlo est ensuite appliqué sur les résidus en question si le nombre de pièces est renseigné, ou directement sur la surface dans le cas contraire.

MÉTHODOLOGIE

La géostatistique et en particulier le Krigeage consistent à étudier la dépendance spatiale d'un objet appelé fonction aléatoire^[2] sur une zone prédéfinie, afin de proposer une estimation en un point comme une combinaison linéaire des données en d'autres localisations. Les poids de la combinaison linéaire, aussi appelés poids de Krigeage, sont calculés afin d'assurer une condition de non biais et une variance d'estimation minimale. Pour cela, il est nécessaire de connaître le variogramme de la fonction aléatoire, un outil défini en deux points x, y comme étant la moitié de la variance de l'écart de la fonction aléatoire entre

ces deux points. Sous l'hypothèse de stationnarité^[1], que l'on suppose localement ici, le variogramme^[2] devient une fonction de la distance entre les deux points. Il est alors aisé de calculer les poids de Krigeage.

Seulement, les localisations ne sont pas connues exactement et parfois rassemblées aux mêmes points, entraînant des complications algorithmiques. Cette complication se traduit d'une part dans l'estimation du variogramme, et d'autre part dans le calcul direct des poids de Krigeage. En ce qui concerne l'estimation du variogramme, deux substituts sont calculés. Le premier est obtenu en moyennant les données localisées au même point, c'est le variogramme agrégé. Le second est la moyenne des variogrammes calculés en simulant les localisations autour de leurs positions de référence, c'est le variogramme simulé. Une méthode d'ajustement est ensuite proposée pour obtenir un variogramme fournissant de meilleurs résultats de Krigeage. On le nomme variogramme corrigé.

Une fois le variogramme obtenu, il nous est nécessaire afin d'obtenir des poids de Krigeage, de disposer de localisations différentes. Pour cela, on effectue p simulations de jeux de positions autour de leur référence, dans un disque de rayon ρ . Pour chaque simulation les poids de Krigeage sont calculés, et l'estimateur de Krigeage Monte-Carlo est obtenu en moyennant les poids de Krigeage sur l'aléa de localisation. L'estimateur de Krigeage Monte-Carlo converge théori-

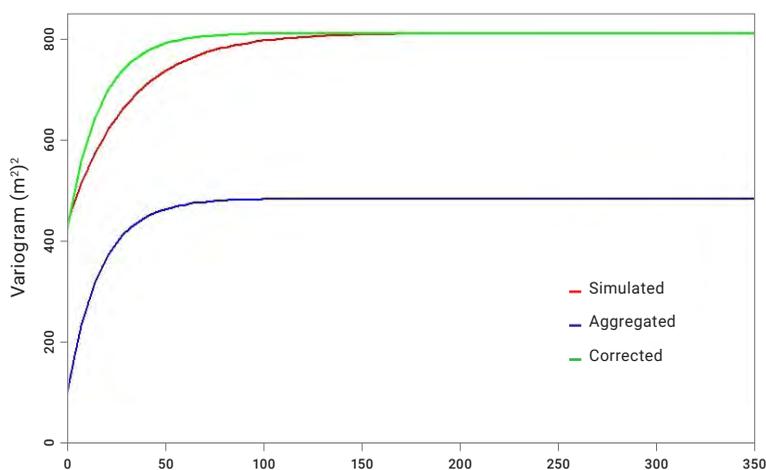


Figure 1 – Variogrammes substitut de la surface des appartements à Lyon.

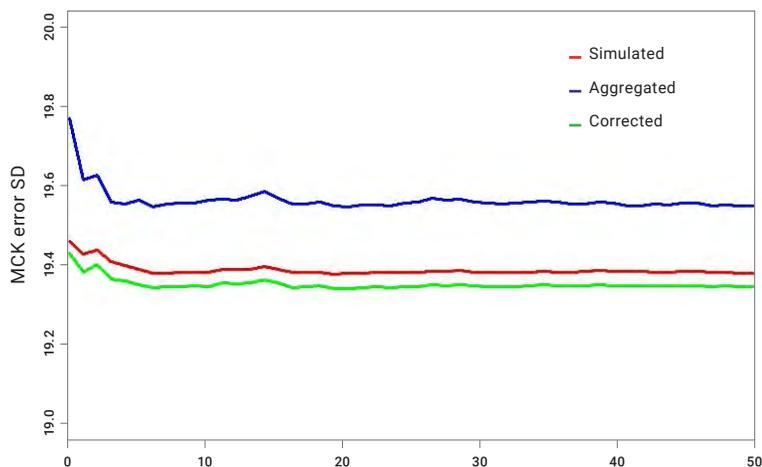


Figure 2 – Écart-type d'estimation par Krigeage Monte-Carlo par nombre de simulation et variogramme.

quement presque sûrement vers la combinaison linéaire minimisant la variance d'estimation liée à l'incertitude de localisation. La fonction aléatoire considérée ici prend différentes formes. En particulier, si le nombre de pièces est disponible pour une localisation ciblée, la fonction aléatoire modélise les résidus de la modélisation linéaire de la surface sur le nombre de pièces, afin d'utiliser séparément l'information liée au nombre de pièces et la corrélation spatiale de l'aléa restant. Le Krigeage Monte-Carlo est donc appliqué aux résidus. Si toutefois le nombre de pièces n'est pas renseigné, la méthode d'estimation s'applique directement sur la surface. Chaque nature de logement est considérée de manière séparée.

RÉSULTATS

La méthode de Krigeage Monte-Carlo est appliquée localement sur différentes zones pour l'estimation de la surface : la ville de Lyon, le département de l'Oise (60), et en Corse (2A et 2B). On choisit d'effectuer les calculs sur la surface et également sur les résidus du modèle linéaire de la surface sur le nombre de pièces. Notons également que si la ville de Lyon est considérée comme un territoire suffisamment homogène pour supposer le caractère local de la stationnarité sur l'ensemble du territoire, ce n'est pas le cas des autres territoires considérés. C'est pourquoi, les communes de Corse et d'Oise ont été séparées en 3 catégories, en fonction de leur population à partir des quantiles de population par commune. Cette classification permet d'homogénéiser des sous-territoires sur lesquels le caractère de stationnarité est plus facilement identifiable. La classe A rassemble les communes à faible population, la classe B celles à population

valeurs assurées

surface

géostatistique

Krigeage

Monte-Carlo

> moyenne, la classe C celles à plus forte population. Enfin, pour cette étude, il a été choisi, lorsque le nombre de données le permettait, de séparer les cas par usage. Ensuite il est possible de calculer l'écart type d'estimation pour chaque cas. Le Krigeage Monte-Carlo est comparé via cet indicateur à la méthode renvoyant la moyenne sur chaque échantillon considéré. Le variogramme corrigé est utilisé pour obtenir les résultats qui suivent.

Le tableau montre l'efficacité de la méthode de Krigeage Monte-Carlo, que ce soit pour l'estimation de la surface directement ou des résidus, notamment à Lyon et dans l'Oise. En Corse, il a été plus difficile de capturer la corrélation spatiale adéquate et d'extraire un variogramme satisfaisant. Les raisons peuvent être multiples. L'hétérogénéité de la Corse est possiblement encore trop présente, et il conviendrait de subdiviser les territoires en domaines spatialement plus restreints et plus homogènes. Notons qu'une telle action nécessite de disposer de suffisamment de données pour pouvoir estimer le variogramme dans chaque domaine local. Il est également possible que la distribution de la localisation des logements majoritairement proche du littoral biaise les estimations des variogrammes.

La méthode de Krigeage Monte-Carlo dépend d'un certain nombre de paramètres, notamment le choix du variogramme considéré pour l'estimation. Une étude a été menée sur les appartements dans la ville de Lyon et fait apparaître les substituts de variogramme proposés. La figure 1 compare les variogrammes paramétriques agrégés, simulés et corrigés de la surface. Le variogramme corrigé s'obtient par ajustement des paramètres du variogramme simulé. En particulier, l'effet de pépité, c'est-à-dire la valeur du variogramme

Territoire	Nature	Classe	Usage	Variable	SD MCK (m ²)	SD Moyen (m ²)
Lyon	Appartement	C	Locataire	Résidus	7,92	12,05
Lyon	Appartement	C	Locataire	Surface	13,54	24,59
Lyon	Appartement	C	Habitant	Résidus	10,89	15,35
Lyon	Appartement	C	Habitant	Surface	18,57	31,41
Lyon	Appartement	C	Propriétaire	Résidus	6,45	10,29
Lyon	Appartement	C	Propriétaire	Surface	10,25	21,34
Lyon	Maison	C		Résidus	22,30	30,11
Lyon	Maison	C		Surface	34,25	131,28
Oise	Appartement	C		Résidus	8,72	12,87
Oise	Appartement	C		Surface	14,94	23,88
Oise	Appartement	B		Résidus	9,95	12,16
Oise	Appartement	B		Surface	13,04	22,37
Oise	Maison	C		Résidus	16,09	31,33
Oise	Maison	C		Surface	21,89	51,58
Oise	Maison	B		Résidus	16,54	34,40
Oise	Maison	B		Surface	22,42	50,75
Oise	Maison	A		Résidus	20,85	39,94
Oise	Maison	A		Surface	20,51	57,40
Corse	Appartement	C		Résidus	10,53	12,75
Corse	Appartement	C		Surface	22,99	27,96
Corse	Appartement	B		Résidus	11,23	13,75
Corse	Appartement	B		Surface	28,66	30,35
Corse	Maison	C		Résidus	24,79	29,20
Corse	Maison	C		Surface	49,32	54,76
Corse	Maison	B		Résidus	24,22	27,86
Corse	Maison	B		Surface	45,60	54,56

Tableau – Résultats de la méthode de Krigeage Monte-Carlo à Lyon, dans l'Oise et en Corse.

pour des écarts faibles de localisations nécessite un ajustement car la dispersion aléatoire autour du point de référence introduit un biais dans son estimation : l'effet de pépité est surestimé. La figure 2 représente l'évolution de l'écart-type de la surface en fonction du nombre de simulations considérées et du variogramme choisi pour l'estimation. Il apparaît que l'estimateur avec variogramme corrigé converge le plus rapidement, quand bien même la différence avec les autres substituts est particulièrement faible.

LES PARTENAIRES

L'estimation des valeurs assurées fait l'objet d'une thèse en collaboration avec CCR et le centre de Géosciences de MINES ParisTech, dirigée par Hans Wackernagel et encadrée par Emilie Chautru au sein de MINES ParisTech et Georges Farah au sein de CCR. La thèse est affiliée à l'école doctorale ISMME (DS 621).

CONCLUSION

La méthode de Krigeage Monte-Carlo semble être un bon compromis pour proposer une estimation locale de la surface des logements. Son application peut être effectuée sur différents territoires, pourvu que les hypothèses de départ soient respectées. Le cas de la Corse fait apparaître les limites de la méthode, dont l'extension au cadre non-stationnaire pourra s'avérer utile par la suite.

La méthode est également sensible à un certain nombre de paramètres, en particulier le nombre de simulations, le rayon de simulation, et le choix du variogramme. L'étude de la sensibilité par rapport au paramétrage permet d'optimiser l'estimation de la surface./

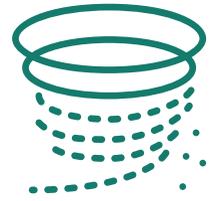
RÉFÉRENCES

1. Jean-Paul Chilès, P. D. (1999). *Geostatistics: Modelling Spatial Uncertainty*. Wiley. Matheron, G. (1963). *Principle of Geostatistics*.
2. Matheron, G. (1963) *Principles of Geostatistics*. *Economic Geology*, 58, 1246-1266. <http://dx.doi.org/10.2113/gsecongeo.58.8.1246>

CITATION

Rongiéras L., Chautru E. Estimation géolocalisée de la surface des logements individuels par Krigeage Monte-Carlo. In *Rapport Scientifique CCR 2020* ; CCR, Paris, France, 2021, pp. 72-75

Les apprentissages scientifiques d'un RETEX multidimensionnel sur le cyclone IRMA (projet ANR TIREX)



Frédéric Leone¹, Jérémy Desarthe²

(1) Laboratoire de Géographie et d'Aménagement de Montpellier (LAGAM), Université Montpellier 3.

(2) Direction des Réassurances & Fonds Publics, CCR

INTRODUCTION

Dans la nuit du 5 au 6 septembre 2017, l'ouragan Irma a touché les Antilles françaises, et plus particulièrement les îles du Nord de Saint-Martin et de Saint-Barthélemy. Ouragan de classe 5 sur l'échelle Saffir-Simpson, Irma s'est caractérisé par des rafales de vent supérieures à 300 km/h et une submersion du littoral et des zones basses de l'île de Saint-Martin.

Les îles de Saint-Martin et de Saint-Barthélemy ont été durement éprouvées. Au total, onze personnes sont décédées et les dommages ont été considérables^[1]. Les réseaux de communication et d'énergies ont été en grande partie endommagés. Les dommages sur les biens assurés s'élèvent à plus de 2 Md€ pour des territoires où seulement 40 % des habitants disposent d'une assurance habitation. Irma est l'événement le plus important depuis la mise en place du régime d'indemnisation des catastrophes naturelles en 1982.

À la suite de la saison cyclonique marquée par des ouragans de forte intensité (Harvey, José, Irma, Maria), l'Agence nationale de la recherche a lancé le programme OURAGAN pour lequel le projet TIREX a été retenu. Coordonné par le professeur Frédéric Leone, ce projet regroupe plusieurs établissements de recherche et organismes afin de construire un retour d'expérience multidimensionnel destiné aux acteurs locaux afin de leur permettre d'anticiper l'adaptation aux effets de futurs épisodes climatiques extrêmes.

MÉTHODOLOGIE

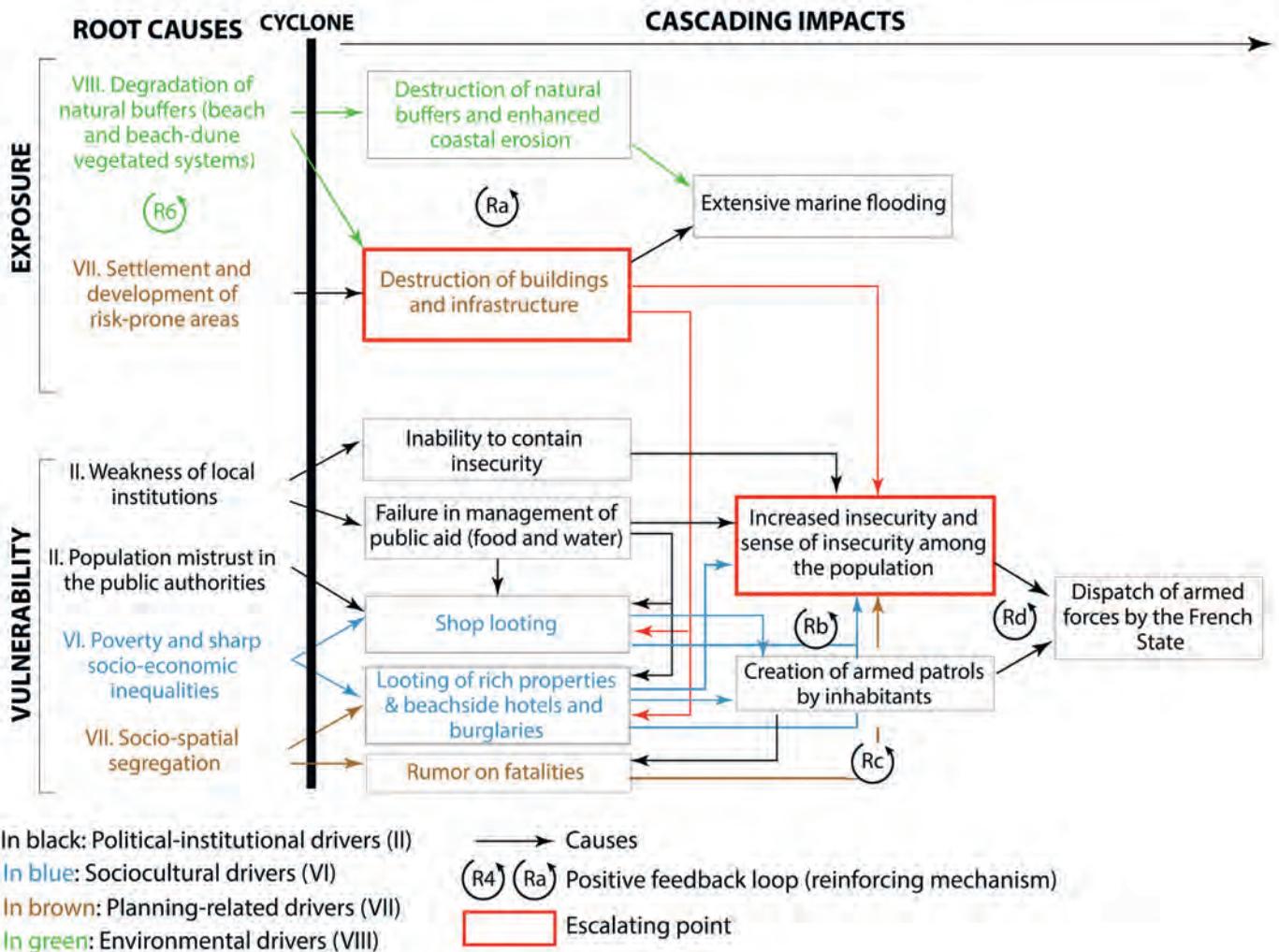
TIREX est organisé en tâches complémentaires croisant les compétences de tous les membres du groupement (histoire et géographie des risques, analyse spatiale, géomorphologie, sciences politiques, médiation scientifique, physique de l'atmosphère, modélisation, climatologie). TIREX porte une dimension pré-opérationnelle d'accompagnement des acteurs de la gestion des risques et de la reconstruction, populations comprises, via le transfert et la mise en pratique des résultats. La consolidation, dissémination et valorisation des résultats du projet sont adaptées au contexte culturel et géographique des territoires ciblés. Elles mobilisent des outils de transfert des savoirs et d'éducation non-vateurs, fondés sur des approches participatives, des mises en situation, des outils numériques en ligne et interactifs, des story-maps, des guides de bonnes pratiques, des ateliers réguliers... Le projet intègre les dernières connaissances sur les évolutions futures du climat aux Antilles apportées par le programme en cours C3AF sur le changement climatique et ses conséquences aux Antilles (<https://c3af.univ-montp3.fr/>).

Tâche 1 (Trajectoires de vulnérabilités territoriales 1950-2017) : l'analyse des archives a permis de répertorier les cyclones historiques et de caractériser leurs impacts. Une analyse documentaire ainsi que trois campagnes d'entretiens (en lien avec la tâche 3) ont été réalisées auprès des populations (suivi d'une cohorte)

apportant des éléments sur les facteurs de production du risque ainsi que l'évaluation des vulnérabilités et capacités de résilience ante catastrophe.

Tâche 2 (Impacts et résilience des environnements côtiers) : des modèles numériques ont été implémentés afin de reproduire le vent, les précipitations, les vagues, et les submersions marines du cyclone Irma. Une campagne bathymétrique a été réalisée sur plusieurs sites afin de combler l'absence de données actuelles sur les petits fonds. Les modèles ont permis de réaliser une cartographie des hauteurs de vagues, et de mieux comprendre les forts contrastes d'impacts du cyclone sur certaines anses. Nous étudions en parallèle les impacts et réajustements sur Anguilla et sur Tortola et Anegada. L'analyse des dommages sur le bâti au moyen de drones a pu être confrontée aux données fournies par les agences de cartographie rapide (Copernicus, Sertit) afin d'apprécier le niveau de fiabilité spatiale et attributaire de ces données acquises par photo-interprétation d'images satellitaires.

Tâche 3 (Gestion de crise et suivi de la reconstruction territoriale) : l'analyse de la gestion de crise et le suivi de la reconstruction se poursuivent grâce à des missions régulières aux Antilles (six missions depuis le cyclone). Des contacts privilégiés ont été établis avec des institutions, des associations et des habitants. Les premiers résultats ont permis de caractériser l'influence des réseaux sociaux dans la diffusion de la rumeur sur le nombre de morts ce qui a ajouté des difficultés à la gestion de la crise quelques jours après le cyclone. Une étude ciblée sur les adolescents de Saint-Martin, à travers des séances en classe, a permis de suivre le rôle de cette classe d'âge particulièrement vulnérable, lors de la phase de relèvement.



Tâche 4 (Consolidation des outils de transfert des apprentissages du RETEX) : les premiers produits cartographiques interactifs sont disponibles via une plateforme en ligne et sont enrichis de storymaps, le tout est implémenté dans un site web dédié au transfert des résultats et permettant de revisiter en ligne la saison cyclonique 2017 ([https://tirex.](https://tirex.univ-montp3.fr/)

[univ-montp3.fr/](https://tirex.univ-montp3.fr/)). D'autres actions de transfert sont programmées au moyen d'un jeu sérieux destiné aux autorités locales simulant une crise cyclonique virtuelle. Un guide pour la reconstruction territoriale préventive est disponible sous forme d'un classeur de fiches présentant les différentes méthodes du RETEX et ses apprentissages. A ce titre, une démarche

réflexive amène à s'interroger sur la définition du RETEX et sur ce qu'il peut apporter aux connaissances sur les risques et aux politiques de prévention. Ce faisant la réflexion porte aussi sur les limites du RETEX, ce qui est un attendu majeur du projet TIREX notamment au regard de RETEX conduits antérieurement dans la région (ex. cyclone Lenny en 1999).

cyclone
 # impacts
 # reconstruction
 # RETEX
 # Petites-Antilles

RÉSULTATS

En mobilisant des chercheurs d'horizons différents, il est possible d'appréhender l'événement dans toutes ces dimensions et d'enrichir les connaissances des risques et des vulnérabilités dans un territoire insulaire éloigné de sa métropole. Les principaux apprentissages et résultats s'articulent autour des principaux axes suivants :

1/ Trajectoires de vulnérabilités territoriales 1950 – 2017

L'analyse de l'exposition des territoires sur le temps long a permis la reconstruction des trajectoires de vulnérabilités et de comprendre les mécanismes et les facteurs de production des risques [2]. Saint-Martin se caractérise par son insularité mais également par sa distance à l'égard de la métropole et des autres territoires français des Antilles que sont la Guadeloupe – à laquelle elle fut jusqu'en 2007 rattachée administrativement – et la Martinique. Ce double éloignement a construit la spécificité économique et politique du territoire saint-martinois. Le développement du tourisme à partir des années 1960 a participé à rendre le territoire plus vulnérable sous l'effet d'une urbanisation massive du trait de côte. Ce développement s'est également accompagné par de fortes disparités socio-spatiales qui se traduisent par des vulnérabilités en terme de constructions de logements [3].

2/ Impacts et résilience des environnements côtiers

L'étude minutieuse des impacts et conséquences du cyclone a constitué une étape fondamentale. Il est essentiel de poser un diagnostic le plus exhaustif possible pour reconstruire un territoire plus résilient et adapté au changement climatique. Ainsi,

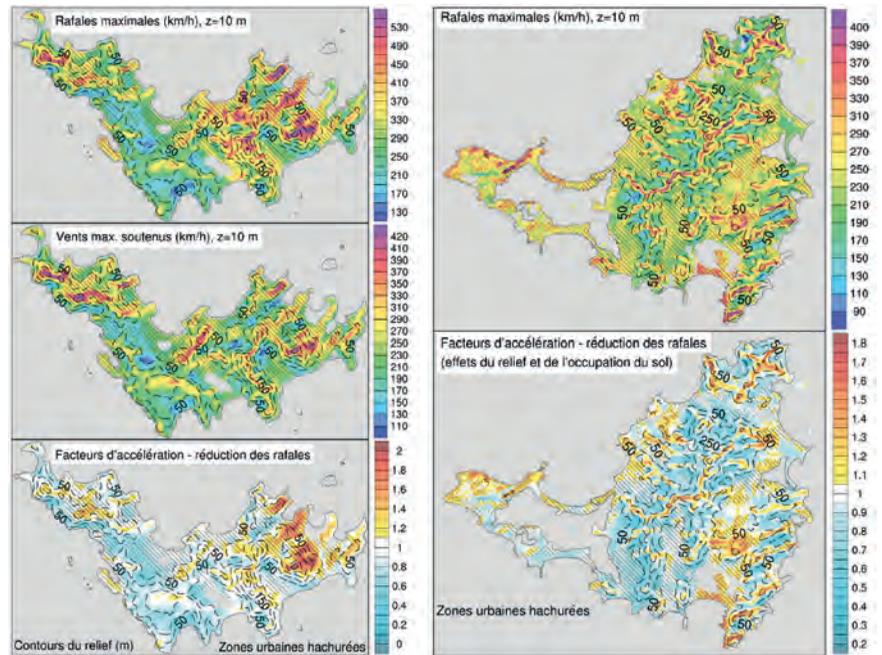


Figure 2 - Simulations WRF à 30 m de résolution : rafales max. (km/h) vents max. soutenus 1 min (km/h), facteurs d'accélération, réduction des rafales à Saint-Barthélemy (à gauche) et Saint-Martin (à droite) (Cécé et al., 2020)

un travail de modélisation numérique à haute résolution des phénomènes cycloniques a permis de reconstituer les conditions météorologiques cycloniques et les aléas météo-marins associés, en lien avec les dommages produits [4, 5].

Les différents résultats montrent que les inondations (débordement des étangs, ruissellement pluvial et submersions marines) ont eu une cinétique complexe. Si l'urbanisation des fronts de mer a limité la submersion marine, l'imperméabilisation des sols a accru les inondations par ruissellement pluvial [6]. Par ailleurs, les vents modélisés à une résolution inédite de 30 m ont montré des effets d'amplification le long des lignes de crêtes et des rafales ayant pu atteindre les 400 km/h. Les corrélations avec les intensités de dommages sur les bâtiments ont montré un seuil de dommage critique atteint autour de 200 km/h [4]. Ces dommages ont été beaucoup plus marqués sur Saint-Martin qu'à Saint-Barthélemy du fait

d'un bâti beaucoup plus vulnérable. En effet, les données fournies par le Service Européen Satellitaire Copernicus (2018) montrent que seulement 16 % du patrimoine bâti de Saint-Barthélemy a subi des dommages significatifs (contre 54 % à Saint-Martin), tandis que les dommages les plus graves ont concerné seulement 5 % des bâtiments de Saint-Barthélemy (contre 30 % à Saint-Martin). Cependant, nos propres relevés par drone et sur le terrain ont montré un manque de fiabilité de ces données de dommages obtenues par photo-interprétation d'images satellitaires au lendemain de la catastrophe [7].

Une analyse diachronique de la géomorphologie des différents sites retenus a permis de mettre en avant également les conséquences sur le trait de côte. De manière générale, les plages de Saint-Martin ont connu une diminution importante de leur surface. La présence de végétation ou encore de récifs coralliens ont permis localement de réduire les dommages

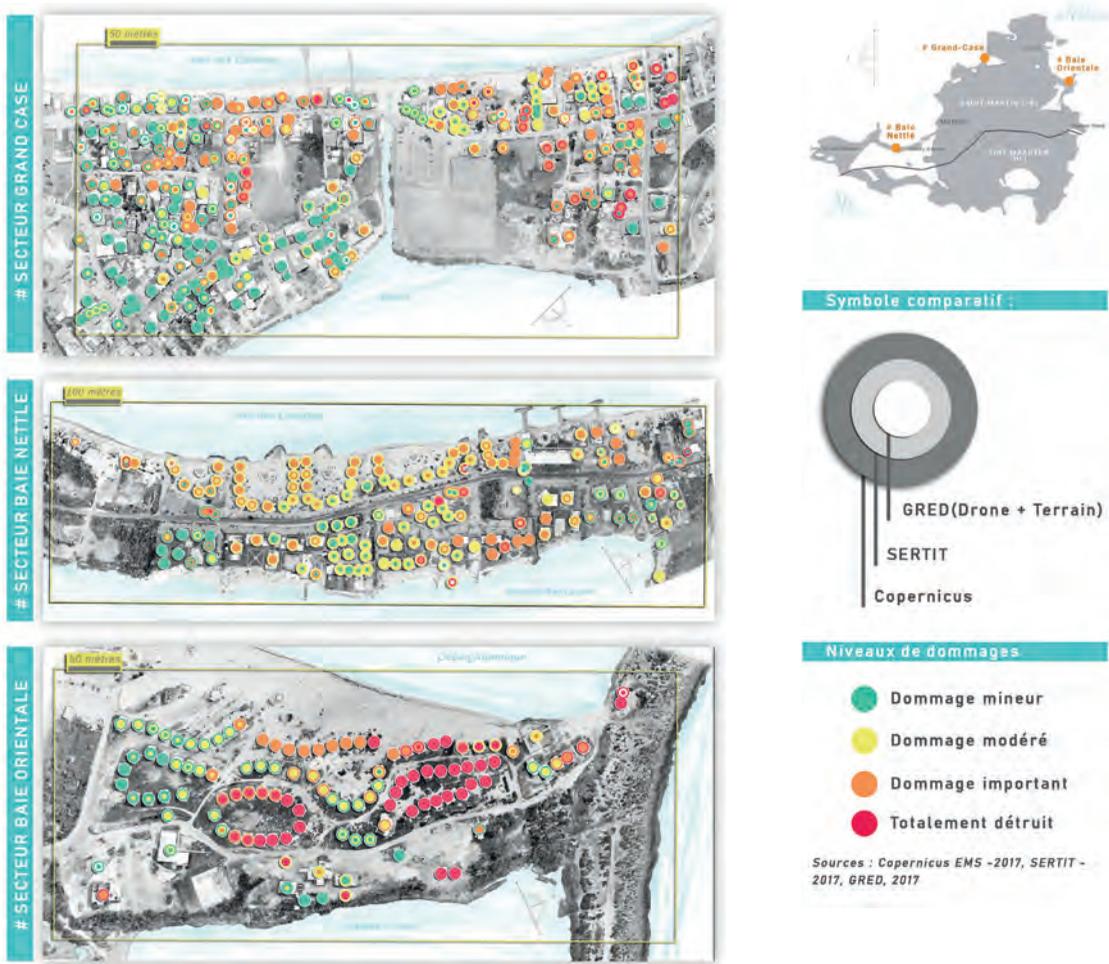


Figure 3 - Comparaison des trois sources de diagnostics de dommages (satellitaires pour Copernicus et SERTIT, drone et terrain pour GRED) (Saint-Martin) montrant les incertitudes sur l'estimation des dommages par voie satellitaire (Léone et al., 2021).

soit en bloquant les débris ou en réduisant la hauteur des vagues à la côte ^[5]. Dans d'autres territoires, comme l'île de la Dominique, la crue des cours d'eau a participé à l'engraissement des plages et à la formation de delta de crue.

3/ Gestion de crise et suivi de la reconstruction territoriale

L'analyse de la gestion de crise et du relèvement post-catastrophe des cyclones Irma, José et Maria permet d'alimenter les réflexions sur les processus d'apprentissage. Le thème de la production des

déchets post-Irma et de leur gestion a été particulièrement investi car c'est un enjeu fort du processus de reconstruction. Ainsi les cubages obtenus par drone et les traitements statistiques des données disponibles nous ont permis d'évaluer le poids total de débris produits par Irma sur Saint-Martin à 1,7 tonnes par habitants ^[6]. Par ailleurs, dans le cadre du projet, un géo-indicateur de suivi de la reconstruction a été établi à une échelle assez fine pour comprendre certaines logiques spatiales et révéler certains contrastes. Ce faisant, en juillet 2019 (22 mois après Irma),

40 % du bâti fortement endommagé de Saint-Barthélemy était totalement reconstruit, contre 22 % seulement à Saint-Martin. L'effort de reconstruction a par ailleurs été plus rapide à Saint-Barthélemy avec 19 % de ce bâti reconstruit (contre 11,5 % à Saint-Martin) en mars 2018, soit sept mois après le passage d'Irma [3]. Ces contrastes s'expliquent bien entendu par un volume total de dommages bien plus faible à Saint-Barthélemy, mais aussi par une plus grande capacité de relèvement. Par ailleurs, les enquêtes systématiques menés auprès des lieux d'activité écono-

- # cyclone
- # impacts
- # reconstruction
- # RETEX
- # Petites-Antilles

> mique ont montré une reprise d'activité globale et moyenne 1,5 fois plus rapide à Saint-Barthélemy avec 81 jours de fermeture contre 123 à Saint-Martin. Les activités d'hébergement et de restauration ont été les premières à se relever, suivies des activités de transport. D'après ces mêmes enquêtes, les retards accumulés à Saint-Martin sont principalement dus à l'intensité des dommages sur les bâtiments associés, mais sont également le fait des pillages massifs qu'a connu cette île au lendemain du passage d'Irma (41 entreprises ou commerces pillés soit 24,7 %). Ces pillages ont parfois provoqué davantage de pertes que l'ouragan lui-même, sans compter les traumatismes induits [3].

CONCLUSION

Afin de consolider les apprentissages du RETEX et d'en assurer la transmission vers les populations et les décideurs locaux, les principaux résultats utiles du projet TIREX ont été mis en forme au moyen de différents supports cartographiques interactifs et de story-maps (récits cartographiques), donnant la possibilité de revisiter cette catastrophe. Un des enjeux du RETEX est en effet de préserver la mémoire des cyclones passés, d'en tirer les enseignements pour la prévention, la gestion de crise et la reconstruction durable des territoires impactés. Le site internet qui permet de conserver cette expérience est en ligne, ouvert au grand public, à vertu pédagogique, et rend également hommage à tous les habitants qui ont témoigné sur leur propre expérience de cette catastrophe <https://tirex.univ-montp3.fr/index2.html>. Qu'ils en soient remerciés./

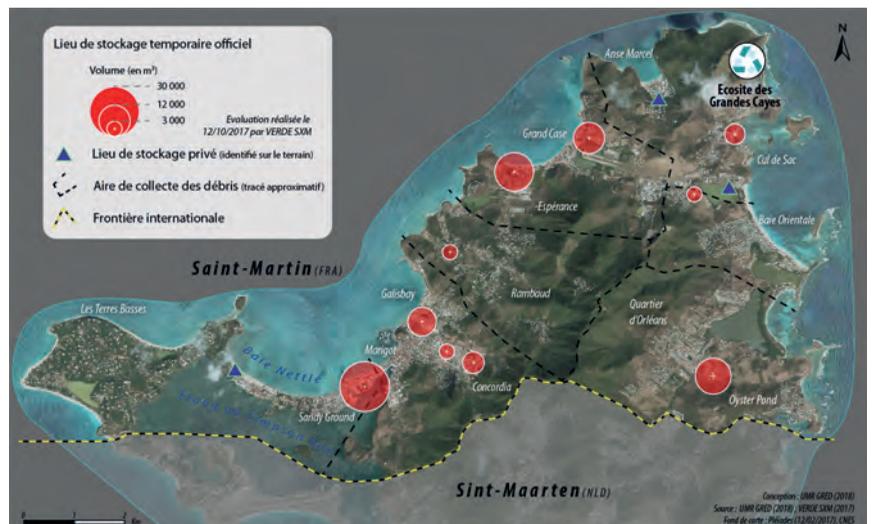


Figure 4 - Évaluation des dépôts et volumes de débris générés par l'ouragan Irma sur Saint-Martin (Vinet et al., 2020).



LES PARTENAIRES

Le projet ANR TIREX (2018-2022) : Transfert des apprentissages de Retours d'Expériences scientifiques pour le renforcement des capacités de réponse et d'adaptation individuelles et collectives dans un contexte de changement climatique (Petites Antilles du Nord - saison cyclonique 2017)

Lien vers le site du projet : <https://tirex.univ-montp3.fr/>

Lien vers les storymaps du projet : <https://arcg.is/1KXmn1>

Les partenaires du projet TIREX :

- Laboratoire Gouvernance, Risque, Environnement, Développement (GRED)
- Laboratoire de Recherche en Géosciences et Énergies (LARGE)
- LC2S Laboratoire Caraïbéen de Sciences Sociales (LC2S)
- Laboratoire de Géographie Physique : Environnements Quaternaires et Actuels (LGP)
- Laboratoire Littoral, Environnement et Sociétés (LIENSs)
- Météo-France Direction interrégionale Antilles Guyane (DIRAG)
- Caisse Centrale de Réassurance (CCR)

RÉFÉRENCES

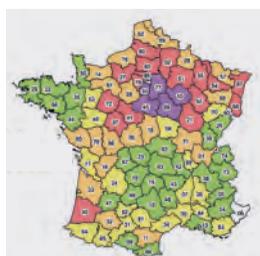
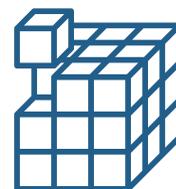
1. Desarthe, J., Bauduceau, N., Quantin, A., 2020. Les défis soulevés par la reconstruction post-Irma. *Annales des Mines*, 98. <http://www.anales.org/re/2020/resumes/avril/08-re-resum-FR-AN-avril-2020.html#08FR>
2. Duvat V., Volto N., Stahl L., Moatty A., Defossez S., Desarthe J., Grancher D., Pillet V., (2021). Understanding interlinkages between long-term trajectory of exposure and vulnerability, path dependency and cascading impacts of disasters in Saint-Martin (Caribbean), *Global Environmental Change*, 67, <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2021.102236>
3. Collectif scientifique du projet ANR TIREX (Dir. F. Leone, Coord. A. Moatty) (2021). Les connaissances et apprentissages de territoires cyclonés (Petites Antilles, saison cyclonique 2017) : synthèse des principaux résultats du projet ANR TIREX à l'attention des décideurs, 91 p., <https://www.calameo.com/books/006591530b5bdb6016ed1>
4. Cécé R., Bernard D., Krien Y., Leone F., Candela T., Péroche M., Biabiany E., Arnaud G., Belmadani A., Palany P., Zahibo N (2020). A 30-m scale modeling of extreme gusts during Hurricane Irma (2017) landfall on very small mountainous islands in the Lesser Antilles. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, <https://doi.org/10.5194/nhess-2020-241>
5. Duvat V., Pillet V., Volto N., Krien Y., Cécé R., Bernard D., (2019). High human influence on beach response to tropical cyclones in small islands : Saint-Martin Island, Lesser Antilles, *Geomorphology*, 325, <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2018.09.029>
6. Rey T., Leone F., Candela T., Belmadani A., Palany P., Krien Y., Cécé R., Gherardi M., Péroche M., Zahibo N. (2019). Coastal Processes and Influence on Damage to Urban Structures during Hurricane Irma (St-Martin & St-Barthélemy, French West Indies). *Journal of Marine Science and Engineering*, 7(7):215, <https://doi.org/10.3390/jmse7070215>
7. Leone F., Péroche M., Candela T., Rey T., Vinet F., Gherardi M., Defossez S., Lagahé E., Pradel B. (2021). Drone et cartographie post-désastre : exemples d'applications sur un territoire cycloné (Petites Antilles du Nord, ouragan Irma, septembre 2017). *Cartes & géomatique : revue du Comité français de cartographie (CFC)*.
8. Vinet F., Péroche M., Palany P., Leone F., Gherardi M., Grancher D., Moatty A., Defossez D. (2020). Collecte et gestion des débris post-cycloniques à Saint-Martin (Antilles françaises) après le passage du cyclone Irma (sept. 2017). *Cybergeo : European Journal of Geography*, 937, <http://journals.openedition.org/cybergeo/34154> ; DOI: <https://doi.org/10.4000/cybergeo.34154>

CITATION

Léone F., Desarthe J., Les apprentissages scientifiques d'un RETEX multidimensionnel sur le cyclone IRMA (projet ANR TIREX), In *Rapport Scientifique CCR 2020* ; CCR, Paris, France, 2021, pp. 76-81

AUTOMATISATION DES PROCESSUS

CCR intègre les nouvelles technologies et l'intelligence artificielle à ses processus de production.



Traitements de données pour l'assurance multirisques climatique en agriculture • p.84

Cet article présente les travaux d'optimisation de traitements de données réalisés dans le cadre de la mission de suivi de l'assurance multirisques climatique confiée à CCR par le ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation. La méthode consiste en l'utilisation d'une plateforme permettant l'automatisation du traitement des données et des analyses statistiques et cartographiques. Les indicateurs développés pour mesurer l'évolution du portefeuille assurantiel ainsi que les principaux résultats sur la campagne 2019 sont également présentés.

This article presents the data processing optimization work carried out as part of the monitoring mission of the multi-risk climate insurance entrusted to CCR by the Ministry of Agriculture and Food. The method consists of using a platform to automate data processing and statistical and cartographic analyses. The indicators developed to measure the evolution of the insurance portfolio and the main results for the 2019 campaign are also presented.

Dorothée Kapsambelis, Stéphane Busson, Roxane Marchal et David Moncoulon

Traitements de données pour l'assurance multirisques climatique en agriculture



Dorothee Kapsambelis¹, Stéphane Busson², Roxane Marchal¹, David Moncoulon¹

(1) Département R&D Modélisation Cat & Agriculture, CCR

(2) Direction des Systèmes d'Information, CCR

INTRODUCTION

Les exploitations agricoles sont soumises à de nombreux risques dont les risques climatiques. Ceux-ci affectent les productions en quantité et en qualité. L'agriculteur évalue le risque auquel il est soumis et adopte des stratégies de gestion pour minimiser son risque. Chaque agriculteur choisit des méthodes de gestion des risques en fonction de sa perception du risque et des caractéristiques intrinsèques à son exploitation. Parmi les outils à disposition de l'agriculteur, figure l'assurance multirisques climatiques mise en place en 2005. Ces contrats couvrent les différentes filières végétales contre les risques climatiques suivants : la grêle, le gel, l'inondation ou l'excès d'eau, la sécheresse et la tempête. Ainsi, les sinistres ne bénéficient plus de la prise en charge par le Fonds national de gestion des risques en agriculture (FNGRA) en grandes cultures depuis 2009 et en viticulture depuis 2010. L'assurance récoltes comporte trois niveaux : un contrat socle subventionné à 65 % avec un seuil de déclenchement et une franchise à 30 %, un deuxième niveau subventionné à 45 % avec une franchise à 25 %, des garanties complémentaires non subventionnées constituant le troisième niveau. Cette assurance apparaît aujourd'hui comme un pilier de la gestion des risques et les dernières concertations entre les différents acteurs du marché portées par le député F. Descrozaille proposent de renforcer le recours à cet outil par les agriculteurs.

Les données annuelles sont transmises par les assureurs au ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation (MAA) qui fait appel à CCR depuis la campagne 2015 pour effectuer le suivi du développement de l'assurance récoltes. Ces études sont réalisées dans le cadre d'une convention financée par le MAA et le FEADER pour une durée de sept ans. Les études sont publiées sur le site du MAA pour chaque campagne sous la forme de notes de synthèse ^[1]. L'objectif de ces analyses est de fournir des indicateurs mesurant la diffusion de ce produit et les caractéristiques des exploitations agricoles assurées. CCR assure la conception et la gestion d'une base de données géographique des polices et des sinistres. Pour effectuer les nombreuses analyses statistiques et cartographiques, CCR a mis en place une chaîne de traitements de données en plusieurs étapes. Cette méthodologie permet de cibler les opérations réalisées sur la base de données afin de créer des requêtes permettant l'automatisation du nettoyage de données et la génération automatique de tableaux d'analyses de synthèse ainsi que de cartographies. Cet article présente la méthodologie développée et les résultats pour une automatisation efficace de traitements de données et les indicateurs développés pour le suivi de l'assurance récoltes. Les résultats sur la campagne 2019 de l'assurance récoltes sont également présentés.

PRODUCTION D'INDICATEURS CLÉS ET AUTOMATISATION DES TRAITEMENTS

Définition des indicateurs

L'analyse du développement de l'assurance multirisques climatiques est effectuée à plusieurs échelles et s'appuie sur des indicateurs assurantiels, de caractérisation de la ferme France assurée, des caractéristiques des exploitations agricoles et de politique publique de gestion des risques. Les différents indicateurs sont présentés en figure 1. Tous les indicateurs sont étudiés au niveau national, régional et départemental.

L'analyse est également réalisée à différents niveaux de productions végétales : des types de cultures (grandes cultures, viticulture, arboriculture, prairies, légumes) aux natures de récoltes (par exemple le blé tendre).

Un croisement de la base de données assurantielles avec les bases de données des paiements d'aides fournies par le MAA (dotations aux Jeunes Agriculteurs, aides au bovins laitiers, aides aux caprins, aides aux ovins, etc.) est également réalisé. Ce croisement permet de créer une typologie des exploitations agricoles assurées en fonction de leur niveau de capital assuré. Nous obtenons ainsi des informations sur les cultures assurées dans les exploitations d'élevages, sur la spécialisation ou la diversification des exploitations agricoles assurées, sur la proportion de Jeunes Agriculteurs assurés.

De plus, les différentes informations sur l'évolution du portefeuille assuré sont mises en regard de l'évolution du climat et des pratiques de prévention des risques pour comprendre les modifications du portefeuille d'une campagne sur l'autre.

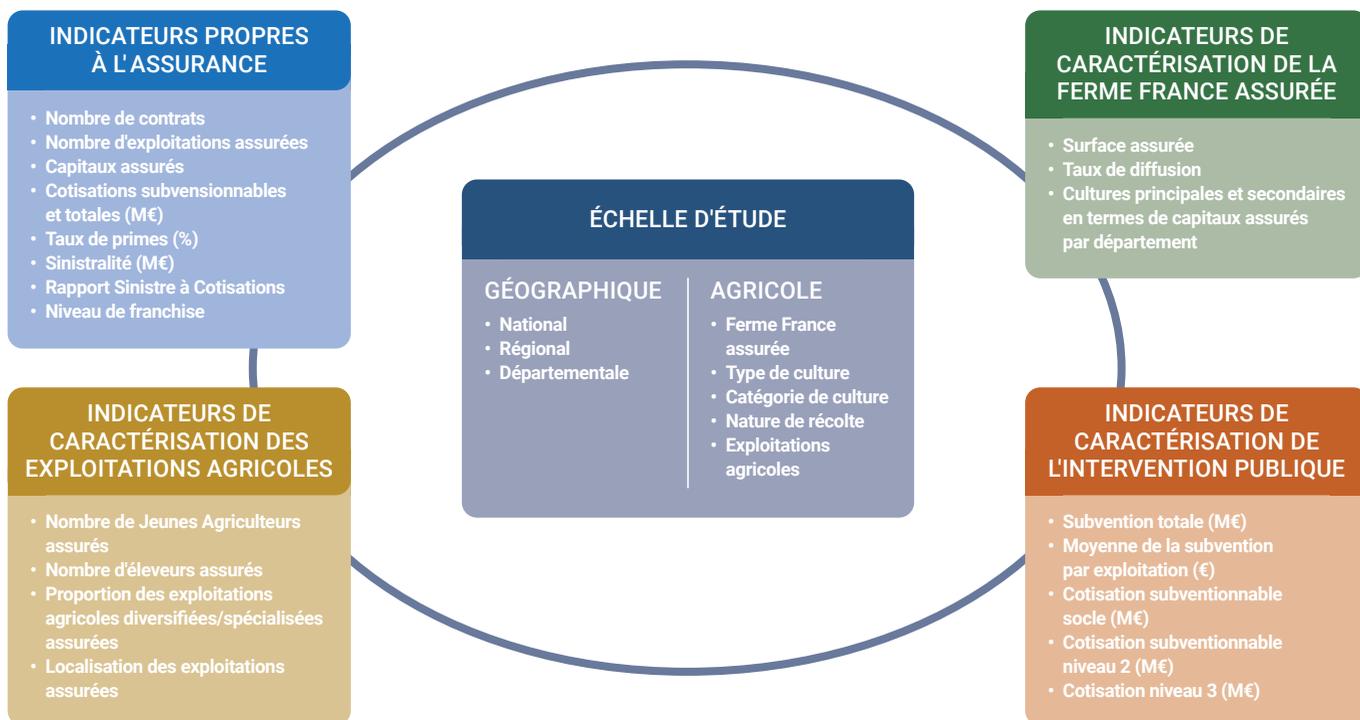


Figure 1 - Exemple d'Indicateurs développés pour l'étude du suivi de l'assurance multirisques climatiques.

Automatisation des traitements de données

Les données sources sont fournies par le MAA sous la forme de fichiers excel. Ces données sont analysées, nettoyées et préparées avant d'être traitées par une plateforme de Data Science (Dataiku) par des opérations de formatage, d'uniformisation, d'enrichissement et de création d'indicateurs. Les opérations de traitements de données sont réalisées à l'aide de recettes visuelles, en interaction avec la base de données et sans avoir recours à des méthodes de codage informatique. Ces premières étapes de nettoyage de la base de données sont essentielles pour obtenir une meilleure qualité des

études. Par exemple, les analyses publiées par CCR sont réalisées par catégorie de cultures : céréales et fourrages, oléagineux, protéagineux, cultures industrielles, légumes, viticulture, arboriculture, prairies. Cependant, certaines natures de récoltes sont mal classées dans les catégories présentées dans les fichiers initiaux. La méthodologie mise en place permet de détecter rapidement les erreurs et de reclasser les natures de récoltes de façon rapide sans générer de biais ni d'oubli. Une fois les données traitées, les résultats sont stockés dans une base de données relationnelle. Le suivi de l'assurance récoltes porte notamment sur des analyses récurrentes d'indicateurs dont l'évolution

est étudiée d'une campagne sur l'autre. Afin d'accélérer les analyses de données, des requêtes SQL ont été automatiquement exécutées via un code informatique. Ces requêtes permettent de réaliser l'analyse globale des différents indicateurs développés. Le passage par la base de données ne concerne alors que des cas particuliers d'évolution de certains indicateurs.

Enfin, la création d'un code informatique d'extraction des données et sa lecture sur une interface faisant le lien avec le logiciel de cartographie permet la génération d'une centaine de cartes de manière automatique en quelques minutes.

- # traitement de données
- # assurance récoltes
- # cartographie
- # indicateurs

> CHIFFRES CLÉS DE L'ASSURANCE RÉCOLTES 2019

En France métropolitaine, 13,1 % des exploitations agricoles sont assurées en 2019 ce qui représente 57 236 assurés. L'assurance est plus développée dans la moitié nord de la France en termes de surfaces assurées, les taux de diffusion étant plus importants (figure 2). Ceci s'explique par une hétérogénéité du portefeuille assuré en termes de spécialisation agricole. En effet, les grandes cultures constituent la très grande majorité du portefeuille (environ 90 % des surfaces assurées) et sont cultivées principalement dans la moitié nord de la France. Le taux de diffusion de l'assurance est de 29,7 % (hors prairies) en 2019.

Les taux de diffusion par catégorie de cultures sont présentés en figure 3 avec leur évolution par rapport à 2018. Depuis 2017, ils sont en augmentation au global, malgré des vitesses d'évolutions différentes selon les catégories de cultures. Pour l'arboriculture et les prairies, l'assurance récoltes peine à se développer depuis plusieurs années.

La typologie des exploitations agricoles assurées montre une prépondérance des exploitations spécialisées en grandes cultures en cohérence avec les résultats présentés précédemment. La proportion d'exploitations agricoles diversifiées continue d'augmenter et il s'agit surtout d'exploitations agricoles cultivant les quatre catégories de cultures en grandes cultures (céréales, oléagineux, protéagineux, cultures industrielles). Les éleveurs quant à eux sont présents dans le portefeuille surtout dans la catégorie des exploitations agricoles à capitaux assurés faibles (inférieurs à 35 000 €) et assurent en particulier les grandes cultures.

Enfin, l'étude de la sinistralité de 2019 montre des résultats négatifs sur l'en-

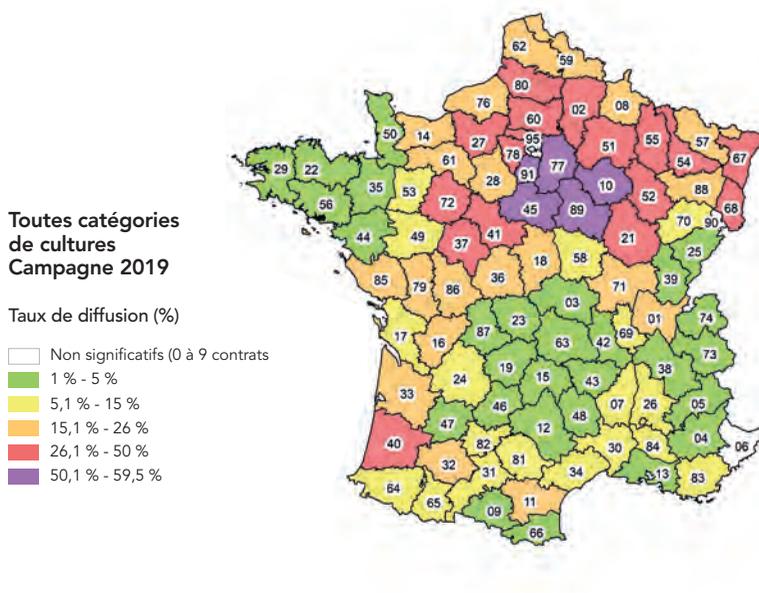


Figure 2 - Répartition des taux de diffusion par département toutes catégories de cultures confondues - Assurance récoltes 2019

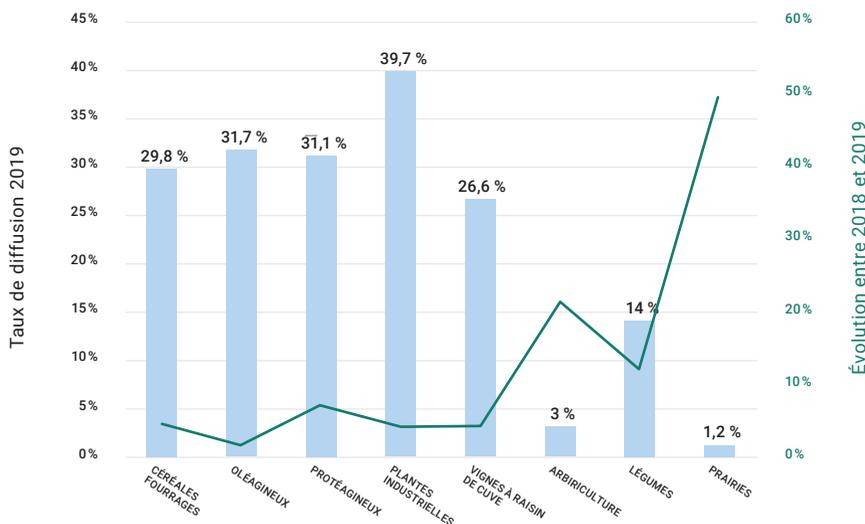


Figure 3 - Taux de diffusion par catégorie de cultures de l'assurance récoltes 2019 et évolution par rapport à 2018

LES PARTENAIRES

Le ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation fait appel à CCR depuis la campagne 2015 pour effectuer le suivi du développement de l'assurance récoltes.

TYPES DE CULTURES	Sinistralité 2019 (M€)	Rapport sinistres à cotis. totale. 2019	Rappel S/cotis. totale 2018
Grandes cultures	269,4	122 %	112 %
Prairies	6,5	149 %	447 %
Viticulture	140	176 %	74 %
Arboriculture	6,4	115 %	77 %

Table 1 – Sinistralité 2019 par types de cultures et rapport entre sinistres et cotisation totale (S/C)

semble des types de cultures (rapports S/C supérieurs à 100 %) (table 1). Cependant, on ne note pas de sinistre extrême en prairies contrairement à l'année 2018 marquée par une sécheresse de grande ampleur dans le Nord-Est de la France. Les départements les plus sinistrés en 2019 se situent dans la moitié nord de la France en raison de la sécheresse et dans le Sud-Ouest et la vallée du Rhône en raison du gel de printemps de mai 2019.

CONCLUSION

Les indicateurs développés par CCR permettent de mesurer l'évolution du portefeuille de l'assurance récoltes (en termes de caractéristiques des exploitations assurées, de la ferme France assurée et des données propres au domaine de l'assurance). Certains indicateurs relatifs au partenariat public-privé (les montants des subventions par exemple) sont particulièrement étudiés par les pouvoirs publics. Afin de réaliser les études pour le ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation dans un délai de quelques mois après la fourniture des données, CCR a mis en place une chaîne de traitements de données. La méthodologie mise en place permet d'assurer l'homogénéité des études d'une campagne sur l'autre en réduisant significativement les temps de traitement et en assurant une haute qualité des données.

Ces éléments chiffrés fournis chaque année par CCR au MAA et publiés sur leur site internet servent de référence pour éclairer les réflexions sur la gestion des risques en agriculture./

RÉFÉRENCES

1. CCR, Note de synthèse sur le suivi de l'aide à l'assurance multirisques climatique pour l'exercice 2019, 2018, 2017 et 2016 par CCR pour le ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation - <https://agriculture.gouv.fr/la-gestion-des-risques-en-agriculture>

CITATION

Kapsambelis D., et al., Traitements de données pour l'assurance multirisques climatique en agriculture. In Rapport Scientifique CCR 2020 ; CCR, Paris, France, 2021, pp. 84-87

RISQUES SANITAIRES

En mars 2020, l'épidémie de Covid-19 se répand dans le monde de manière exponentielle. Le 17 mars, la France se fige avec le premier confinement qui bouleverse la vie des français.





Modélisation des pertes d'exploitation suite à une fermeture administrative liée à une pandémie • p.90

En 2020, suite à la pandémie de Covid-19 et au confinement généralisé, CCR a développé un premier modèle d'estimation des pertes économiques consécutives à ces fermetures administratives.

In 2020, following the Covid-19 pandemic and lockdown, CCR has developed a first model to estimate the economic losses.

David Moncoulon, Thierry Cohignac et Dorothée Kapsambelis

Modélisation des pertes d'exploitation suite à une fermeture administrative liée à une pandémie



David Moncoulon¹, Thierry Cohignac², Dorothee Kapsambelis¹
(1) Département R&D Modélisation Risques Cat & Agriculture, CCR
(2) Direction des Réassurances & des Fonds Publics, CCR

INTRODUCTION

La lutte contre la propagation du virus Covid-19 a nécessité la mise en œuvre de mesures administratives restreignant une partie importante des activités économiques du pays pour des raisons de santé publique. Les entreprises des secteurs visés par ces mesures ont dû suspendre tout ou partie de leur activité, entraînant une baisse de chiffre d'affaires significative, voire totale pour certains établissements, au cours de la période. Cette situation a mis en lumière les défis posés par une couverture des pertes d'exploitation provoquées par un événement exceptionnel tel qu'une pandémie. Un groupe de travail associant l'ensemble des parties prenantes concernées a ainsi été créé le 27 avril 2020 par Bruno Le Maire, ministre de l'Économie, des Finances et de la Relance. Animé par la direction générale du Trésor, ce groupe de travail a réuni, outre les services de l'État, des parlementaires ainsi que des représentants des entreprises, des entreprises d'assurance et de réassurance, des distributeurs d'assurance et des actuaires. CCR en tant que réassureur public a été associé aux réflexions autour de la création d'un régime de type « Catastrophes Sanitaires ». Les travaux menés par CCR ont porté sur l'assurabilité de ce risque et sur la modélisation du coût économique d'événements de type pandémie. Nous présentons ici les principes du modèle stochastique régionalisé développé par CCR dans le cadre de ce groupe de travail.

MÉTHODOLOGIE

Le modèle créé a pour objectifs de modéliser les pertes liées à la fermeture administrative des entreprises suite à la pandémie de type Covid-19 et d'étudier la faisabilité de la mise en place d'une protection financière des entreprises par une assurance sous la forme d'un partenariat public-privé. L'approche mise en place est une simulation régionalisée de fermetures administratives de durées différentes. L'objectif est de déterminer la sévérité des scénarios de confinement à partir des données économiques et la fréquence de ces scénarios par la simulation de 1000 événements fictifs stochastiques croisés avec la base de données RMS.

Structure du modèle

La figure 1 présente la structure du modèle créé. Celui-ci est basé sur trois modules.

Le module d'aléa calcule l'intensité de la pandémie à l'échelle locale choisie ainsi que la fréquence de survenance de l'événement. La durée de l'événement est également déterminée en nombre de jours. Le modèle est réalisé à l'échelle régionale sur la France. Ainsi, la probabilité qu'une région soit touchée dépend de sa démographie, de sa densité de population au kilomètre carré et du nombre de lits disponibles en réanimation par habitant dans chaque région. L'intensité de l'aléa est donc déterminée par la durée du confinement, le taux d'arrêt d'activité et la répartition par secteur d'activité et par région.

Le module de vulnérabilité calcule les pertes d'exploitation liées à la fermeture administrative par secteur d'activité. Les données utilisées pour modéliser les pertes d'exploitation liées à une fermeture administrative proviennent de la base de données publique INSEE, ESANE 2017. Cette base de données fournit les caractéristiques comptables, financières et d'emploi par secteur d'activité. Il est ainsi référencé le nombre d'entreprises, l'effectif des salariés, le chiffre d'affaires hors taxes, etc. Les comptes de résultats par type d'entreprise (Micro-entreprises, Petites et moyennes entreprises (PME), Entreprises de taille intermédiaires (ETI) ou Grandes entreprises (GE)) et par secteur d'activité sont également référencés. Ceux-ci nous permettent d'obtenir des informations sur l'ensemble des charges détaillées, la marge commerciale, l'excédent brut d'exploitation, etc. Elles nous servent à calculer la marge brute retraitée (marge brute dont on soustrait les salaires et charges financières) par secteur d'activité et par taille d'entreprise. Enfin, et pour évaluer l'impact du confinement sur l'économie nationale, il a été nécessaire de croiser les données économiques des entreprises avec le nombre de fermetures administratives par secteur d'activité et le taux de chômage engendré. Ces données ont été recensées dans le rapport du 20 avril 2020 de Sciences Po, OFCE à la suite du confinement du 20 mars 2020. Ces données nous permettent de

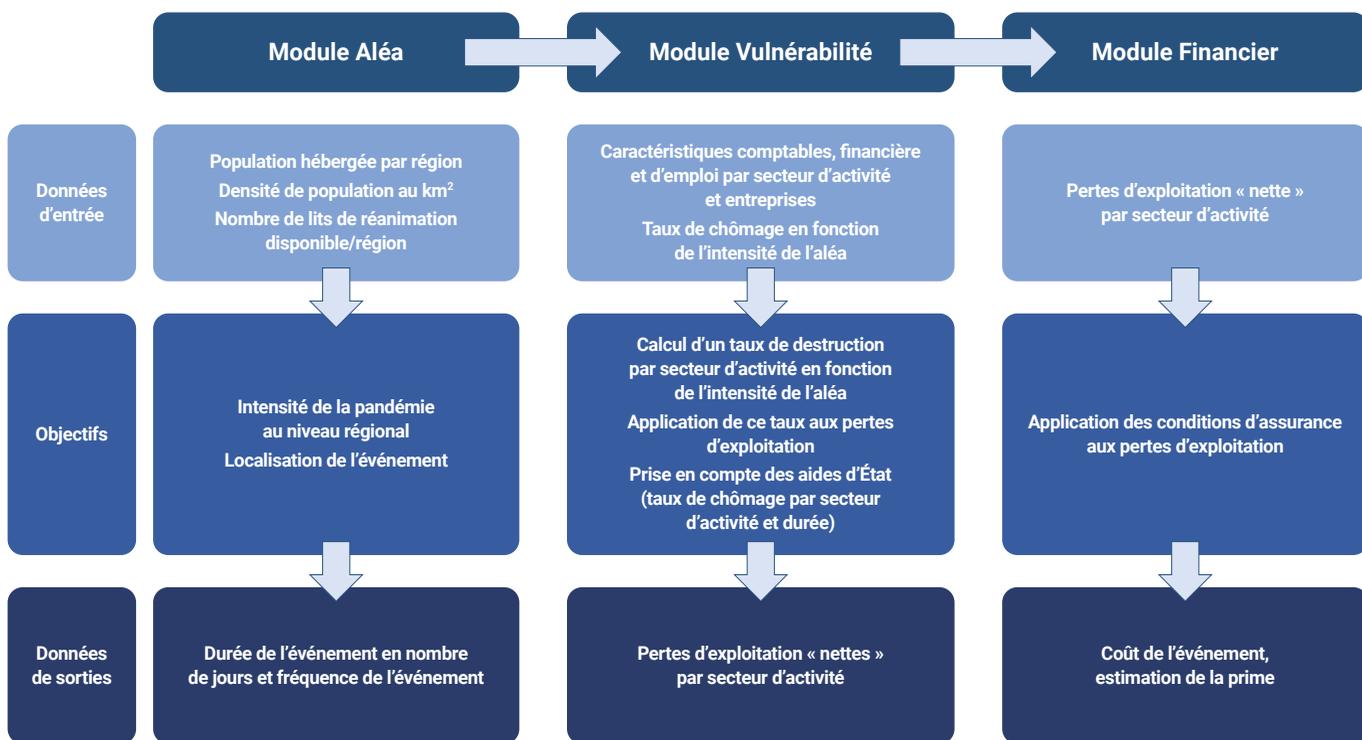


Figure 1 – Structure du modèle pandémie.

calculer une baisse d'activité (%) par secteur économique. Les différents secteurs économiques étudiés représentent 66 % du marché. Ils sont au nombre de huit et sont les suivants : l'industrie (matériel de transport), l'industrie de l'électronique, construction, commerce, transports et entreposage, hébergement et restauration, l'information et la communication, les activités financières et d'assurance. Une extrapolation sur l'ensemble du marché est ensuite réalisée.

De plus, le produit intérieur brut (PIB) par secteur d'activité et par région (Base de données INSEE, 2015) est également utilisé pour calculer la part que représente le PIB pour chaque région afin de mesurer les conséquences économiques de scénarios de confinement par région.

Enfin, le module financier permet d'intégrer les conditions d'assurance des pertes d'exploitation, soit les seuils de franchises et les limites. Le modèle développé suppose que l'ensemble des entreprises sont couvertes par le régime d'indemnisation afin de renforcer la solidarité entre secteurs économiques et d'éviter l'anti-sélection. Une durée maximum de couverture (basée sur la durée du confinement suite au Covid-19) est également appliquée ainsi qu'une franchise de quelques jours.

Enfin, le module financier permet d'intégrer les conditions d'assurance des pertes d'exploitation, soit les seuils de franchises et les limites. Le modèle développé suppose que l'ensemble des entreprises sont couvertes par le régime d'indemnisation afin de renforcer la solidarité entre secteurs économiques et d'éviter l'anti-sélection. Une durée maximum de couverture (basée sur la durée du confinement suite au Covid-19) est également appliquée ainsi qu'une franchise de quelques jours.

Modélisation stochastique

Il est généré un catalogue d'événements de pandémie fictifs définis selon leur durée (durée variable entre 15 et 60 jours de fermeture administrative) et selon le nombre de régions touchées. De manière arbitraire, il est considéré que si le nombre de régions touchées est supérieur à 7, soit un tiers des régions, alors l'ensemble de la France métropolitaine est impacté par l'événement pandémique. Le croisement avec le catalogue d'événements RMS Pandémie permet d'estimer la période de retour d'un tel événement touchant la France. La période de retour est de 25 ans. Cette modélisation nous permet de calculer le coût moyen d'un événement et la perte maximale.

- # pandémie
- # covid-19
- # pertes exploitation
- # pertes économiques

> RÉSULTATS

La modélisation stochastique permet de quantifier le coût moyen d'un événement de pandémie avec confinement. Celui-ci s'élève à 6,5 Md€ pour la France métropolitaine. Par ailleurs, la perte maximale s'élèverait à 30 Md€. Ces résultats sont calculés pour des périodes de confinement variables entre 15 et 60 jours.

À titre d'exemple, le détail de l'estimation des pertes d'exploitation pour le secteur hébergement et restauration est détaillé dans le tableau 1. Ces chiffres représentent une perte moyenne par microentreprise s'élevant à 7 056 €, une perte moyenne par PME de 123 818 € et une perte moyenne pour les ETI et GE de 8,79 M€.

La perte d'exploitation totale représentant 66 % du marché est estimée à 38 Md€ par le modèle développé. Extrapolée à 100 % du marché, cette perte est de 58 Md€ pour 60 jours de confinement comme exposé dans le tableau 2. Ainsi, le caractère systémique des catastrophes sanitaires conduit à des pertes économiques non assurables sur base indemnitaire. C'est pourquoi le module financier intègre une approche forfaitaire de l'assurance, simple et rapide à mettre en œuvre, qui permet d'envisager un équilibre financier du régime tout en procurant une aide financière aux entreprises dans des délais relativement courts.

Secteur	Hébergement/restauration
Nombre d'entreprises	256 539
Chiffre d'affaires (M€)	99 628
Taux de chômage partiel	75 %
Marge brute hors charges salariales couvertes par chômage partiel, hors résultats avant impôts (M€)	44 231
% baisse d'activité (OCDE)	90 %
Perte sur 8 semaines (M€)	4 690
Moyenne par entreprise (€)	18 282

Tableau 1 – Perte d'exploitation sur la France métropolitaine pour le secteur Hébergement/Restauration suite à un confinement de 60 jours dans le contexte d'une crise sanitaire.

Secteur	CA (M€)	Baisse activité (%)	Perte estimée (M€)
Industrie - Matériels de transport	243 130	-69	2 334
Industrie - Électroniques	122 354	-61	1 908
Construction	295 139	-79	5 353
Commerce	1 315 219	-55	12 619
Transports et entreposage	214 835	-63	7 580
Hébergement et restauration	99 628	-91	4 690
Information et communication	195 830	-34	3 722
Activités financières et d'assurance	43 186	0	0
Total des branches traitées	2 529 293		38 207
TOTAL	3 830 221	-35	57 858

Tableau 2 – Perte d'exploitation extrapolée à l'ensemble du marché sur la France métropolitaine suite à confinement de 60 jours dans le contexte d'une crise sanitaire.

CONCLUSION

Même si le principe de la création d'un régime de couverture des catastrophes sanitaires (ou exceptionnelles) a été temporairement écarté par le gouvernement, les travaux de modélisation de CCR ont permis de faire un premier pas scientifique vers une meilleure compréhension de l'impact économique du risque de pandémie. Conscient des incertitudes liées à la modélisation d'un tel risque, CCR continuera ses efforts pour fiabiliser les premiers résultats obtenus et renforcer son expertise sur le sujet au service de l'État et pour le bien commun./

CITATION

Moncoulon D., et al.,
Modélisation des pertes
d'exploitation suite à
une fermeture administrative
liée à une pandémie.
In Rapport Scientifique CCR
2020 ; CCR, Paris, France,
2021, pp. 90-93

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 2022, les jeunes chercheurs doivent avoir présenté ou soutenu une thèse entre le 1^{er} juillet 2020 et le 31 décembre 2021. 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 2020
Accédez à la vidéo

Pour plus d'information
prixccrcat@ccr.fr



Lauréate 2021
Accédez à la vidéo

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 ».

PUBLICATIONS CCR

Gouache, C., Bonneau, F., Tinard, P., Montel, J.M. 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* 2021, 25, 771–782, doi:10.1007/s10950-021-10001-8.

Gouache, C., Cupillard, P., Tinard, P., Enriching the RESORCE database by synthetic waveforms to weight Ground-Motion Prediction Equations for seismic hazard assessment, in: 2020 RING meeting, ASGA, <https://www.ring-team.org/home/team?view=pub&id=4984>

Desarthe, J., Bauduceau, N., Quantin, A., Les défis soulevés par la reconstruction post-Irma, n°98 Actualité de la catastrophe, Responsabilité & Environnement, Annales des Mines, 2020, <http://annales.org/re/2020/resumes/avril/08-re-resum-FR-AN-avril-2020.html>

Costa, M.M., Marchal, R., Moncoulon, D., Martín, E.G. A Sustainable Flywheel: Opportunities from Insurance? Business to Support Nature-Based Solutions for Climate Adaptation. *Environ. Res. Lett.* 2020, doi:10.1088/1748-9326/abc046.

Quantin, A., Desarthe, J., Régime des catastrophes naturelles : Solidarité et responsabilité au service de la résilience des territoires, Pour Mémoires, n°21, Automne 2020

Onfroy, T., Moncoulon, D., La modélisation du ruissellement pluvial : Aléa CCR à 25 mètres de résolution. Colloque SHF « Ruissellement, Lyon 30 nov.-2 déc. 2020 ». <https://cdn-assets.inwink.com/1ae2566a-cf11-492f-afbe-911336e79f66/e631adff-6a26-4dac-a1ec-ad05deaff346>

Onfroy, T., Tinard, P., Nassih, A., Couplage d'un modèle hydrologique de débordement et de données d'observation terrestre. Apports dans la caractérisation de l'aléa et l'estimation des dommages dus aux inondations en France, Actes du colloque SHF 2020 « Contribution du spatial face aux enjeux de l'eau ».

Lopez-Gunn, E., et al., Natural assurance schemes: moving earlier in the risk management cycle with nature based solutions and strategies, *ConsorSeguros*, 2020 <https://www.consorsegurosdigital.com/en/numero-12/front-page/natural-assurance-schemes-moving-earlier-in-the-risk-management-cycle-with-nature-based-solutions-and-strategies>

Desarthe, J., Les temps de la catastrophe. *EchoGéo* 2020, doi:10.4000/echogeo.19116.

CITATIONS

Naulin J-P., Payrastre O., Préviation immédiate des impacts des crues soudaines. In *Rapport Scientifique CCR 2021* ; CCR, Paris, France, 2021, pp. 07-10

Onfroy T., Moncoulon D., La modélisation du ruissellement pluvial : Aléa CCR à 25 mètres de résolution. In *Rapport Scientifique CCR 2020* ; CCR, Paris, France, 2021, pp. 11-16

Moncoulon D., et al., Modélisation des pertes financières dues au risque d'inondation au Maroc. In *Rapport Scientifique CCR 2020* ; CCR, Paris, France, 2021, pp. 17-21

Onfroy T., Orhac N., Cartographie de synthèse de l'impact des inondations en France Métropolitaine. In *Rapport Scientifique CCR 2020* ; CCR, Paris, France, 2021, pp. 22-29

Perrin E., Naulin J-P., Analyse des incertitudes dans le modèle d'aléa submersion marine. In *Rapport Scientifique CCR 2021* ; CCR, Paris, France, 2021, pp. 30-33

Tinard P., Moncoulon D., Modélisation de la sécheresse géotechnique. In *Rapport Scientifique CCR 2020* ; CCR, Paris, France, 2021, pp. 36-39

Ecoto G., et al., Super Learning séquentiel pour anticiper les dommages consécutifs à la survenance d'un épisode de sécheresse géotechnique. In *Rapport Scientifique CCR 2020* ; CCR, Paris, France, 2021, pp. 40-43

Gouache C., et al., Générateur stochastique de séismes en contexte de sismicité faible à modérée : des données à l'aléa. Cas de la France métropolitaine. In *Rapport Scientifique CCR 2020* ; CCR, Paris, France, 2021, pp. 46-49

Michaud-Dubuy A. Réévaluer l'aléa volcanique en Martinique. In *Rapport Scientifique CCR 2020* ; CCR, Paris, France, 2021, pp. 50-53

Moncoulon D., et al., Changement climatique : une approche multi-périls. In *Rapport Scientifique CCR 2020* ; CCR, Paris, France, 2021, pp. 57-61

Kapsambelis D., et al., Modélisation de l'impact des sécheresses et excès d'eau sur les productions végétales à horizon 2050. In *Rapport Scientifique CCR 2020* ; CCR, Paris, France, 2021, pp. 62-66

Cohignac T., Comprendre les conséquences du changement climatique : l'exemple de l'exercice pilote de l'ACPR. In *Rapport Scientifique CCR 2020* ; CCR, Paris, France, 2021, pp. 67-69

Rongières L., Chautru E. Estimation géolocalisée de la surface des logements individuels par Krigeage Monte-Carlo. In *Rapport Scientifique CCR 2020* ; CCR, Paris, France, 2021, pp. 72-75

Léone F., Desarthe J., Les apprentissages scientifiques d'un RETEX multidimensionnel sur le cyclone IRMA (projet ANR TIREX), In *Rapport Scientifique CCR 2020* ; CCR, Paris, France, 2021, pp. 76-81

Kapsambelis D., et al., Traitements de données pour l'assurance multirisques climatique en agriculture. In *Rapport Scientifique CCR 2020* ; CCR, Paris, France, 2021, pp. 84-87

Moncoulon D., et al., Modélisation des pertes d'exploitation suite à une fermeture administrative liée à une pandémie. In *Rapport Scientifique CCR 2020* ; CCR, Paris, France, 2021, pp. 90-93

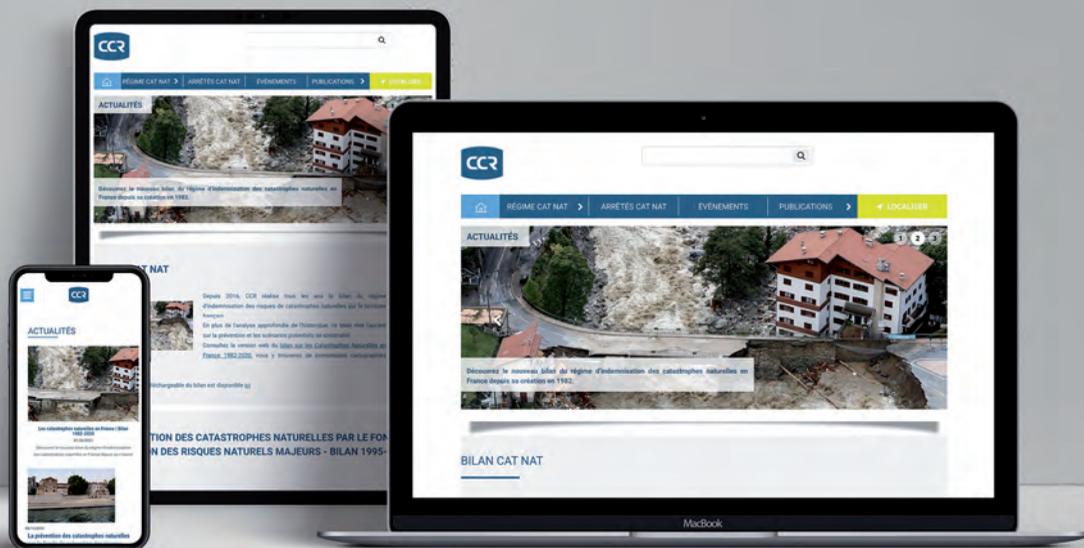
Rapport Scientifique édité par CCR - Octobre 2021

Le Rapport d'activité Scientifique 2021 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 © 2021 Caisse Centrale de Réassurance, Paris, France.

Crédits photos : AFP - GettyImages - 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
Plus d'informations sur catastrophes-naturelles.ccr.fr



Contacts presse

Vincent Gros, vgros@ccr.fr
Sophie Bodin, s.bodin@dgm-conseil.fr

Contact scientifique

David Moncoulon, dmoncoulon@ccr.fr