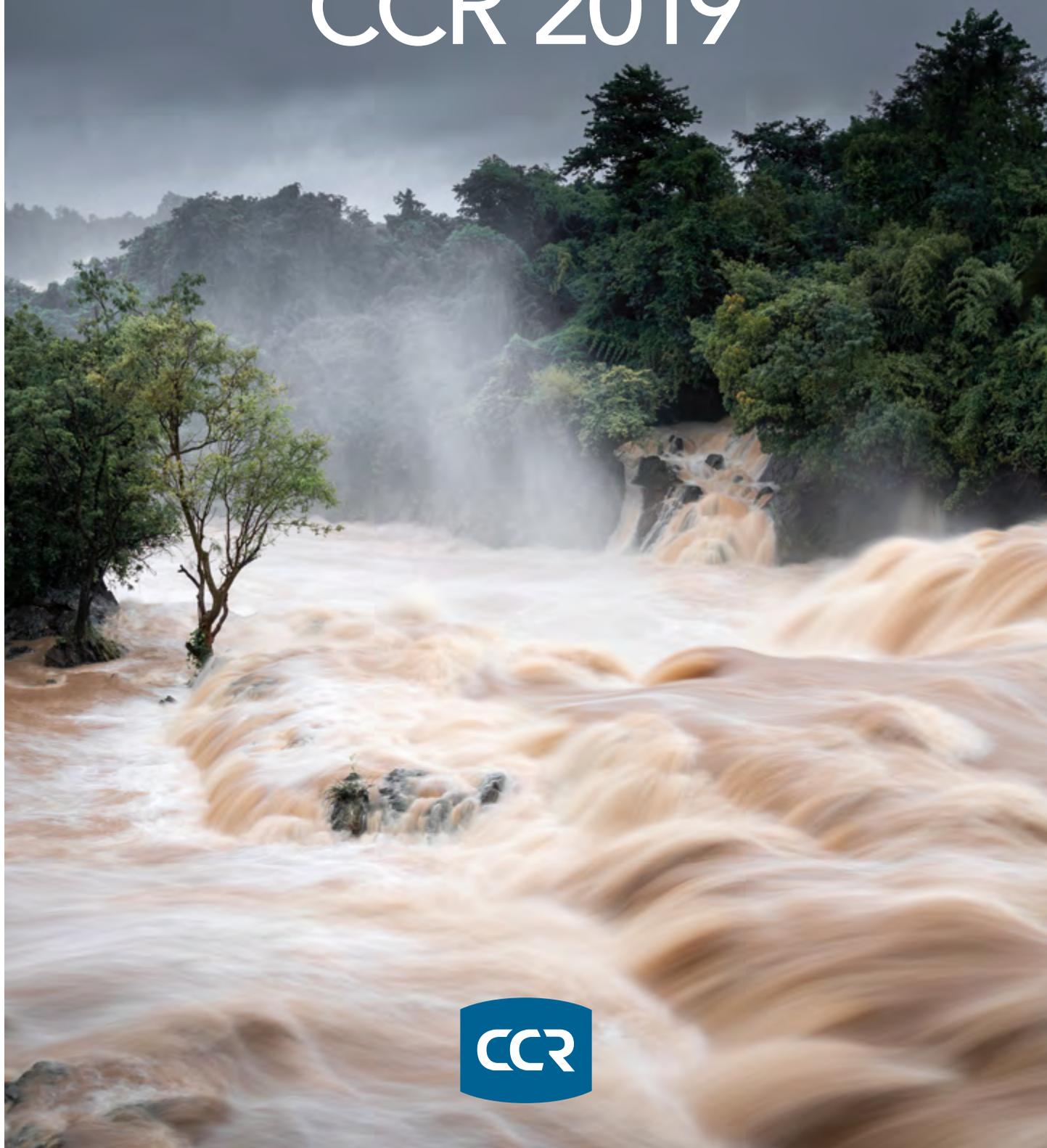


# RAPPORT SCIENTIFIQUE CCR 2019

---



# SOMMAIRE

---

- 01 Éditorial par **Antoine Quantin**,  
Directeur des Réassurances et  
des Fonds Publics
- 02 Rétrospectives 2019
- 06 Publications CCR
- 07 Perspective par **David Moncoulon**,  
Directeur du Département R&D  
Modélisation Cat & Agriculture

---

## 08 RISQUES CLIMATIQUES

- 09 Apports de l'imagerie  
satellitaire dans la  
caractérisation des inondations
- 14 Modéliser le ruissellement pluvial
- 18 Solutions Fondées sur la Nature :  
le projet européen H2020 NAIAD
- 23 Propager les incertitudes  
dans le modèle de submersion  
marine
- 28 Modéliser la sécheresse  
géotechnique

---

## 33 RISQUES GÉOLOGIQUES

- 34 Mesurer l'exposition aux séismes
- 38 Mesurer les conséquences  
des séismes

---

## 42 CHANGEMENT CLIMATIQUE

- 43 Modéliser le changement  
climatique dans les  
territoires d'Outre-mer
- 47 Modéliser les pertes agricoles  
à horizon 2050

---

## 51 DATA SCIENCE

- 52 Mélange de quantiles  
et incertitude de modèle
- 56 Modéliser les valeurs assurées
- 59 Utiliser le text-mining  
en réassurance

- 
- 62 Prix CCR Cat Nat

- 64 Citations

---

## « CETTE DEUXIÈME ÉDITION DU RAPPORT SCIENTIFIQUE DE CCR PREND LA FORME D'ARTICLES SCIENTIFIQUES COÉCRITS AVEC NOS PARTENAIRES. »



**ANTOINE QUANTIN,**  
Directeur des Réassurances  
et des Fonds Publics

**Q**uel est le coût des dommages causés par un événement qui vient de survenir ? Quelle est la distribution des pertes probables pour l'État, pour CCR ou pour un assureur ? Quelles sont les incertitudes de ces estimations et comment les réduire ? Quel est le bénéfice obtenu par les mesures de prévention mises en œuvre ou envisagées ? Quel est l'impact attendu du changement climatique ?

Ces questions sont au cœur de l'activité de réassureur et de préventionniste de CCR. Pour y répondre, il est nécessaire de développer une connaissance fine des risques, en s'appuyant sur la collecte et le traitement de données et sur la modélisation des phénomènes physiques, en allant de l'aléa jusqu'à l'estimation des dommages.

Tels sont les travaux auxquels s'emploie CCR depuis près de vingt ans avec la mise en place d'une équipe pluridisciplinaire d'experts et d'outils d'analyse et de modélisation.

Au fil des ans, pour atteindre ces objectifs, CCR s'est associée à des partenaires scientifiques de renom, au premier rang desquels, on peut citer Météo-France et le BRGM, ainsi que de nombreuses écoles ou universités.

Afin de mettre en exergue cette approche partenariale, cette deuxième édition du rapport scientifique de CCR prend la forme d'articles coécrits avec nos partenaires. Nous souhaitons les remercier tout particulièrement pour leur aide au service de la connaissance des risques, de la résilience des territoires et de la prévention des risques./

# 2019

## RÉTROSPECTIVE

---

### 27 FÉVRIER/PARIS 7<sup>E</sup>

#### UNESCO HQ, Operandum project

Le projet Operandum a convié les projets européens portant sur la prévention des risques et l'adaptation au changement climatique à présenter leurs recherches et résultats. Le projet NAIAD a été présenté du point de vue de la réassurance en insistant sur la modélisation de l'aléa et des dommages assurés.

### 25 – 26 MARS/MONTPPELLIER

#### Assises Nationales des Risques Naturels (ANRN), AFPCN

Partenaire des ANRN 2019, CCR a participé à la fois en tant que Grand Témoin – avec Météo-France – sur les questions climatiques et en participant à des tables rondes et aux ateliers participatifs. La thématique au cœur de ces assises était la question des partenariats entre acteurs de la prévention et de l'indemnisation.

### 28 MARS/PARIS 15<sup>E</sup>

#### Journée d'étude AFPCN, « Les extrêmes et le changement climatique »

L'Association Française pour la Prévention des Catastrophes Naturelles (AFPCN) a organisé une journée d'étude consacrée à l'impact du changement climatique sur différents types d'événements extrêmes. CCR est intervenue dans la troisième partie de la journée portant sur les actions des politiques publiques, en se focalisant sur « assurances et prises en compte du changement climatique ».

### 2 – 5 AVRIL/CAPE TOWN, AFRIQUE DU SUD

#### Actuarial Society of South Africa

Ce congrès de l'Association Internationale des Actuaires avait pour thématique « The Modern Actuary : Challenge, Influence, Lead », avec pour objectif d'effectuer un état des lieux des connaissances en actuariat. Les travaux de R&D portant sur « A quantile mixing approach for the combination of experts' models » ont été présentés.

### 2 AVRIL/PARIS 9<sup>E</sup>

#### Haut Comité Français pour la Résilience Nationale (HCFDC)

Plusieurs fois par an, le HCFDC convie les collaborateurs CCR à participer à des tables rondes techniques. En avril, pour le talk technique « Quelle stratégie de résilience pour 2025-2030 ? », l'intérêt économique d'une démarche de résilience pour les organisations a été discuté.

### 13 – 17 MAI/MILAN, ITALIE

#### MiCo Milano Congressi, Living Planet Symposium 2019 (ESA)

La conférence Living Planet Symposium de l'Agence Spatiale Européenne (ESA) a lieu tous les trois ans. En 2019 elle a été organisée avec le support de l'Agence Spatiale Italienne. Le Living Planet Symposium est focalisé sur l'Observation Terrestre et apporte une contribution au monde scientifique et à la société dans son ensemble. Lors des différents ateliers thématiques et des présentations, l'ESA, les acteurs du domaine spatial et tous les intervenants spécialistes de la télédétection montrent la capacité des nouvelles technologies satellitaires à transformer le paysage de l'Observation Terrestre traditionnelle.



## 28 – 30 MAI/LISBONNE, PORTUGAL

### CCB, 4th European Climate Change Adaptation conference (ECCA)

Cette conférence internationale a réuni tous les acteurs travaillant sur le changement climatique et la réduction des risques. Il a été l'occasion pour le projet NAIAD de présenter des résultats à un large public lors de la session « The insurance value of nature – ecosystem-based solutions to increase the resilience against climate change and natural disasters ».

## 26 MAI/PARIS 4<sup>E</sup>

### Hôtel de Ville, Météo & Climat, 16<sup>e</sup> Forum International de la météo et du climat

L'association Météo & Climat organise un rendez-vous incontournable pour l'éducation et la mobilisation autour des enjeux du climat via un volet pour le grand public et un volet professionnel. CCR a participé au débat participatif « face aux catastrophes naturelles, s'adapter et prévenir pour éviter le pire ».

## 26 MAI/PARIS 12<sup>E</sup>

### Salons de l'Aveyron, 10<sup>e</sup> Journée CCR CAT

Considérée comme l'un des rendez-vous annuels du marché français de l'assurance, cette journée est un moment d'échange sur les connaissances des catastrophes naturelles et de leurs conséquences. Cette année la thématique « Solidarité et responsabilité face aux risques catastrophiques » a réuni environ 200 participants issus du monde de l'assurance, de la communauté scientifique et du secteur de l'expertise des risques catastrophiques. Le prix CCR Cat Nat a été remis à Fanny Benitez pour ses travaux de doctorat portant sur « 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 ».

## 17 JUIN/PARIS 14<sup>E</sup>

### Hôtel Marriott Rive Gauche, Institut des Actuaire, 18<sup>e</sup> Congrès des Actuaire

Événement incontournable pour la place et pour l'Institut, la thématique du congrès s'est orientée cette année autour des questions du changement climatique en tant que sujet actuariel. Fort de son utilisation des outils d'actuariat, CCR a participé à l'atelier « Impact du changement climatique sur le coût des catastrophes naturelles à horizon 2050 » en présentant les résultats de l'étude changement climatique 2018 et avec un éclairage particulier sur les territoires d'Outre-mer.

## 27 JUIN/BREST

### Euro Institut d'Actuariat/ Optimind, Journées dédiées à la diversité et l'innovation

Pour les 30 ans de l'EURIA, ces journées ont été organisées afin de montrer la richesse des problématiques traitées par les actuaires d'aujourd'hui et les enjeux pour demain. Ce fût l'occasion de présenter les travaux portant sur « Catastrophes naturelles et changement climatique : quels enjeux pour le secteur de l'assurance et pour les actuaires ».

## 3 – 5 JUILLET/NANTES

### Exposition Universelle la Mer XXL, Oceanext 2019

Lancée depuis 2016 par le programme Coselmar, la conférence internationale pluridisciplinaire Oceanext de cette année avait pour thématique « Construisons le futur des socio-écosystèmes marins et littoraux », c'est alors que CCR a présenté ses travaux portant sur « Evaluation of climate change impact over damages caused by coastal flooding in France ».



**10 JUILLET/SAN DIEGO, ÉTATS-UNIS**

ESRI, Conférence internationale des utilisateurs d'ESRI

Lors de cette conférence internationale des utilisateurs de SIG, CCR a reçu le prix Special Achievement in GIS Award (SAG) pour son expertise en SIG pour la modélisation des catastrophes naturelles et de l'utilisation des outils SIG web pour la diffusion et la valorisation des travaux.

**10 – 16 AOÛT/STATE COLLEGE, PENNSYLVANIE, ÉTATS-UNIS**

International Association for Mathematical Geosciences (IAMG)

Cette vingtième conférence de l'IAMG a réuni les scientifiques travaillant sur le domaine des géo-mathématiques et géo-modélisation etc. Les travaux de thèse en cours chez CCR ont été présentés : « Regional and exhaustive French seismic catalogues ».

**10 – 13 SEPTEMBRE/NANCY**

Université de Lorraine, Ring, 30<sup>e</sup> Ring Meeting

Ces journées annuelles organisées par l'équipe RING sont l'occasion pour les chercheurs et étudiants en géologie d'échanger sur leurs travaux via conférences, posters scientifiques et groupes de travail. Les travaux de thèse en cours chez CCR ont été présentés : « Stochastic estimation of annual frequencies of main shock in France ».

**9 – 13 SEPTEMBRE/ COPENHAGUE, DANEMARK**

European Conference for Applied Meteorology and Climatology

Cette conférence annuelle est dédiée aux questions climatiques et météorologiques, avec un volet portant sur la météorologie agricole. Les travaux de thèse en cours chez CCR ont été présentés : « Impact of climate change on agricultural economic losses in France: modelling drought and frost events in 2050 and their impact on agricultural yield loss rates ».

**26 SEPTEMBRE/PARIS**

Fondation Xavier Bernard de l'Académie d'Agriculture

Le prix de mémoire de fin d'études de la fondation Xavier Bernard attribué par une Commission composée de membres de la Fondation, du Bureau de l'Académie et d'experts ont récompensé le mémoire de Kapsambelis D., intitulé « Analyse des pertes de récoltes à l'échelle de l'exploitation agricole dans le cadre de l'assurance multirisques climatique en France métropolitaine ».



**24 – 27 SEPTEMBRE/ STRASBOURG**

Association Française de Génie Parasismique (AFPS), 10<sup>e</sup> Colloque quadriennal de l'AFPS

A l'attention du grand public et des professionnels, ce colloque regroupe sessions orales et posters. Cette année la thématique porte sur « La société face au risque sismique : connaissance, protection et gestion de crise ». Les travaux de thèse en cours chez CCR ont été présentés : « Génération stochastique de catalogues sismiques pour le territoire français et séismes : comment garantir la résilience

---

économique ? » et « Calibration de lois d'atténuation par simulation de propagation d'ondes sismiques ».

### 3 OCTOBRE/PARIS-SACLAY

#### EDF Lab, Journée Climat – comprendre pour agir

Cette journée organisée par l'EDF Lab a convié CCR à présenter ses activités de R&D portant sur le changement climatique notamment.

### 6 – 9 OCTOBRE/BORDEAUX

#### 35<sup>e</sup> Congrès de l'Association Internationale des Assureurs de la Production Agricole (AIAG)

La France est l'un des membres de l'AIAG. Cette année à Bordeaux plus de 400 participants de 40 nations ont participé à ce congrès des assureurs récoltes français. La thématique au cœur du congrès était « Risk Management for Agricultural Production, Climate Volatility and the Role of the Insurance Sector and the State ». Les travaux de CCR portant sur la « Modélisation des pertes de récoltes face aux aléas climatiques » ont été présentés.



### 10 OCTOBRE/AUBERVILLIERS

#### ESRI, SIG 2019

Pour la conférence ESRI SIG 2019 de cette année, fort de son SAG Award, CCR a été conviée à présenter « Les explorations des méthodes d'analyses spatiales et application en réassurance » et « Les apports de l'imagerie satellitaire dans la caractérisation des inondations en France : Cartographie de l'aléa et estimation des dommages ».

### 16 – 18 OCTOBRE/NICE

#### Integrated Disaster Risk Management (IDRIM), 10<sup>th</sup> IDRIM Conference for a safer world

Le CNRS, UMR Espace et l'AFPCN ont organisé la 10<sup>e</sup> conférence IDRIM portant principalement sur la résilience des petits territoires et l'organisation de la gestion et de la réduction des risques. CCR a été membre du comité scientifique et a aussi effectué une présentation sur « Evaluating Financial Impact of Earthquakes for France within the Natural Disasters Compensation Scheme - Benefits from a new modelling tool for both prevention and compensation ».

---

### 21 NOVEMBRE/MARNE-LA-VALLÉE, SHF

#### Rencontre SHF : littoral et changement climatique

Lors de ces Rencontres SHF, un séminaire portant sur le littoral et changement climatique a été organisé, CCR a présenté les résultats de l'étude climat : « Impact du changement climatique sur les dommages assurantiels causés par les submersions marines. Prospective à l'horizon 2050 ».

### 28 NOVEMBRE/PARIS 6<sup>E</sup>

#### Hôtel de l'Industrie, Météo & Climat, Journée scientifique

Partenaires officiels des Journées Scientifiques de Météo et Climat, les collaborateurs de CCR ont participé à la 11<sup>e</sup> journée scientifique à la thématique « Changement Climatique Gestion Durable des Terres et Sécurité Alimentaire ».

### 28 NOVEMBRE/LYON

#### Plan Climat Energie Territorial Grand Lyon, Conférence Energie & Climat

Dans le cadre des résultats CCR sur l'impact du changement climatique sur les pertes assurées en France, le PCETGL a convié CCR à participer à la table ronde « Finances & Climat ».

# PUBLICATIONS CCR

---

Cohignac T., and Kazi-Tani N. 2019. "Quantile Mixing and Model Uncertainty Measures." [sub.] <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02405859>

Desarthe J. 2019. Les RETEX dans l'histoire : une pratique ancienne dans la gestion des risques. In Proceedings of the Acte du Colloque Géorisque n°8; Montpellier, France, 2019.

Giacona F., Martin B., Eckert N., et Desarthe J. 2019. Une méthodologie de la modélisation en géohistoire : de la chronologie (spatialisée) des événements au fonctionnement du système par la mise en correspondance spatiale et temporelle. *Physio-Géo* 2019, Volume 4.

Gouache C., Bonneau F., Tinard P., et Montel J.-M. 2019 (soumis). Estimation of main shock frequency - magnitude distributions by adapting the inter event time method for low-to-moderate seismicity areas. Application to French mainland.

Kapsambelis D., Moncoulon D., and Cordier J. 2019. "An Innovative Damage Model for Crop Insurance, Combining Two Hazards into a Single Climatic Index." *Climate* 7 (11): 125. <https://doi.org/10.3390/cli7110125>.

Marchal R., Piton G., Lopez-Gunn E., et al. 2019. "The (Re)Insurance Industry's Roles in the Integration of Nature-Based Solutions for Prevention in Disaster Risk Reduction—Insights from a European Survey." *Sustainability* 11 (22): 6212. <https://doi.org/10.3390/su11226212>.

Marchal R., et Moncoulon D. 2019. Modélisation de l'efficacité et analyse coûts/bénéfices des Solutions fondées sur la Nature face aux risques d'inondation et de sécheresse, Projet H2020 NAIAD. In Des Solutions fondées sur la Nature pour s'adapter au changement climatique, Rapport de l'Onerc au Premier ministre et au Parlement; Paris, France, 2019; pp. 172–175.

Moncoulon D. 2019. "Cyclones and the Global Impact of Climate Change." *Intelligent Insurer*. October 16, 2019. <https://www.intelligentinsurer.com/contributed-article/cyclones-and-the-global-impact-of-climate-change>.

Moncoulon D. 2019. "Régime d'indemnisation des catastrophes naturelles : les enjeux de la modélisation," In *Revue Banque* No. 837 (Novembre 2019) p18–19.

Naulin J-Ph., Moncoulon D., et Quantin A. 2019. "Modélisation déterministe et probabiliste des dommages assurantiels causés par les phénomènes de submersion marine en France métropolitaine." *La Houille Blanche*, no. 3–4 (October): 130–39. <https://doi.org/10.1051/lhb/2019022>.

Onfroy T., Moncoulon D., et Faytre L. 2019. "Étude expérimentale sur le risque inondation dans le bassin versant de la Bièvre." In *Cahiers de l'ONRN*, 3:35–47. *Le Partage Des Données Pour Une Meilleure Connaissance Des Risques Naturels*. ONRN.

Tourjansky L., Goislot D., et Bauduceau N. 2019. Les Solutions d'adaptation fondées sur la Nature dans la politique de prévention et de gestion des risques et des catastrophes naturels. In Des Solutions fondées sur la Nature pour s'adapter au changement climatique, Rapport de l'Onerc au Premier ministre et au Parlement; Paris, France, 2019; pp. 176–183.

## « LES ÉQUIPES DE R&D DE CCR SE MOBILISENT POUR APPORTER UNE EXPERTISE TECHNIQUE AUX RÉFLEXIONS EN COURS DANS LE SECTEUR DE L'ASSURANCE. »

Depuis 2015, les études menées par CCR et ses partenaires, au premier plan desquels se trouve Météo-France, ont montré l'augmentation des dommages économiques et assurés pour les prochaines décennies sur le territoire national français. Cette exposition croissante concerne toutes les filières économiques, des dommages aux biens (habitations, entreprises) aux pertes de récoltes des exploitations agricoles. Elle est due en partie à l'évolution du climat et à son impact sur la fréquence et la sévérité des événements extrêmes, et à l'accroissement des enjeux assurés dans les zones à risques. Les systèmes assurantiels doivent évoluer et s'adapter pour faire face à la progression de la sinistralité pour les prochaines décennies. Les équipes de R&D de CCR se mobilisent pour apporter une expertise technique aux réflexions en cours dans le secteur de l'assurance et une meilleure mise en œuvre de la prévention. Les modèles traditionnels évoluent vers une approche multi-périls intégrant les scénarios climatiques futurs dans leur mesure de l'exposition financière. Ainsi, les événements d'inondation, de sub-

mersionnements marines et de sécheresse vont être simulés à partir d'une situation climatique commune. Les conséquences de ces événements vont être étudiées simultanément sur plusieurs domaines : agriculture et pertes de récoltes, catastrophes naturelles et dommages économiques. Cette approche novatrice va s'appuyer sur la poursuite des travaux en cours dans des projets de recherche (ANR PICS, TIREX ou projet européen NAIAD) et des thèses en collaboration avec des organismes scientifiques à vocation de recherche appliquée (INRAE, ENSG, École des Mines, Agrocampus Ouest). Le sujet de la sécheresse devient primordial pour tous les secteurs économiques, du fait des événements majeurs survenus depuis 2015 et des projections des modèles climatiques. L'augmentation prédite de ces phénomènes nécessite une connaissance plus fine de cet aléa afin de proposer des systèmes d'adaptation et d'évaluer leurs conséquences. Suite au séisme du Teil, le retour d'expérience va permettre d'accroître la connaissance de ce péril et la modélisation de ses conséquences. En parallèle, CCR dé-



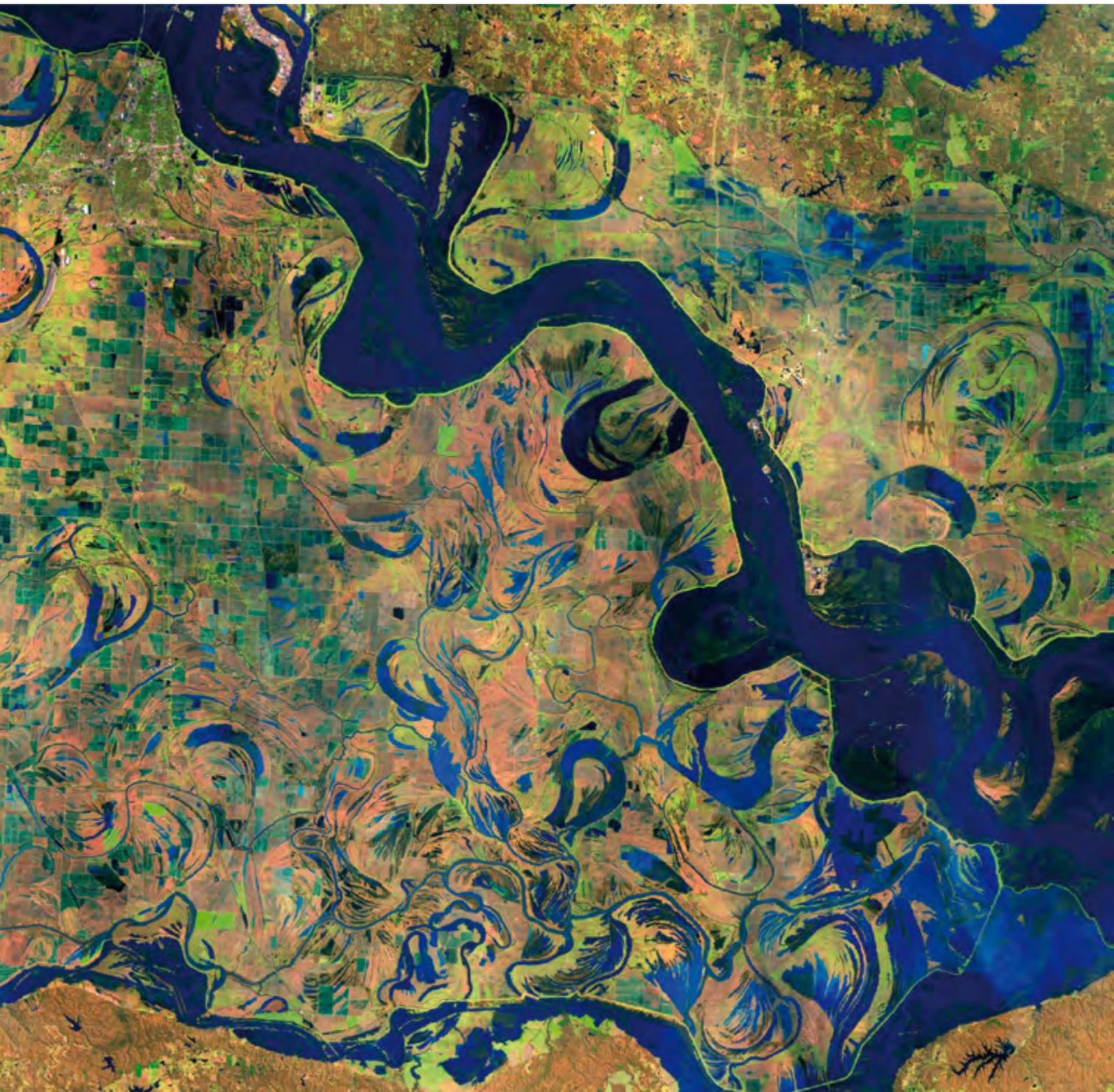
**DAVID MONCOULON,**  
Directeur du Département R&D  
Modélisation Cat & Agriculture

veloppe son propre modèle d'exposition aux tremblements de terre en métropole et dans les DOM et sera en mesure de partager ses résultats dans les prochains mois.

L'accent sera porté dans les prochaines années sur le développement de modèles industrialisés, permettant de les projeter sur de nouvelles problématiques (nouveaux périls, nouveaux territoires), dans des délais courts pour répondre à l'émergence de nouveaux sujets pour les pouvoirs publics.

L'évolution de ces modèles va permettre leur déploiement pour réaliser des études à des échelles locales pour les organismes en charge de la prévention, afin d'évaluer, notamment, les coûts et bénéfices des actions mises en œuvre. Aujourd'hui, la modélisation fine et précise, à différentes échelles, est un outil efficace pour améliorer les connaissances sur l'exposition aux risques de nos territoires. Au-delà de cette connaissance, elle permet de tester des hypothèses d'adaptation des politiques de prévention et de protection./

# RISQUES CLIMATIQUES





# Apports de l'imagerie satellitaire dans la caractérisation des inondations

Thomas Onfroy<sup>1</sup>, Anas Nassih<sup>2</sup>

(1) Département R&D Modélisation Cat & Agriculture, CCR. (2) Master 2 IGAST (Information Géographique : Analyse Spatiale et Télédétection) de l'ENSG (École Nationale des Sciences Géographiques)

## RÉSUMÉ

Depuis quelques années, les assureurs et réassureurs s'appuient de plus en plus sur les technologies spatiales pour développer leur connaissance du risque et estimer de manière plus fine les dommages causés par les inondations. Ces travaux de télédétection ont permis de démontrer le potentiel des données d'imagerie et des méthodes de télédétection dans la caractérisation des phénomènes d'inondation par débordement et dans l'estimation des dommages assurés à partir de données d'imagerie satellitaire à moyenne et haute résolution : Landsat-8, Sentinel-2 et Sentinel-1. Les méthodes ont été développées et appliquées sur trois inondations majeures survenues en France métropolitaine : Seine et Loire en mai et juin 2016, Seine et Marne en janvier et février 2018 et Languedoc en octobre 2018.

## ABSTRACT

*In recent years, insurers and reinsurers have been increasingly relying on space technologies to develop their knowledge of risk and to estimate flood-related damage more accurately. This Remote Sensing project demonstrated the potential of EO data and remote sensing methods in characterizing overflow flooding phenomena and estimating insured damage from medium to high resolution satellite imaging data collected by Landsat-8, Sentinel-2, and Sentinel-1. The methods have been applied on three major flood events that occurred in mainland France: Seine and Loire in May-June 2016, Seine and Marne in January-February 2018, and Languedoc in October 2018.*

# télédétection

# inondation

# sinistres

# indicateurs assurantiels

## INTRODUCTION

La télédétection est aujourd'hui un outil précieux pour la cartographie et le suivi des catastrophes, notamment les inondations. C'est une discipline relevant de l'observation de la terre, basée sur la mesure du rayonnement électromagnétique émis ou réfléchi par les cibles présentes en surface (sol, eau, végétation, bâti, etc.) dans le spectre de la lumière visible ou dans l'invisible tel que le proche ou le moyen infrarouge. Les satellites optiques acquièrent des images de la surface terrestre par réception de différentes longueurs d'ondes du spectre électromagnétique émises depuis une surface à l'aide d'un capteur

multispectral embarqué. Quant aux satellites radar Sentinel-1, ils opèrent hors du spectre visible pour fournir des images de façon continue, de jour comme de nuit et sans égard aux conditions météorologiques. La plupart des satellites optiques et radar actuels sont capables de couvrir des emprises conséquentes : jusqu'à 400 km pour les satellites radar, 185 km pour Landsat-8 (NASA/USGS) et 290 km pour Sentinel-2 (ESA). Les données d'imagerie satellitaires permettent de suivre les inondations en temps réel ou quelques jours après leur survenance<sup>1</sup>. Cependant au moment de la survenance d'une inon-

dation, les données multispectrales à moyenne (20 à 30 m), haute (5 à 10 m) ou très haute (< 1 m) résolution sont souvent altérées par la présence de nuages qui empêchent l'observation directe du sol. Leur utilisation très aléatoire voire impossible dans le cas d'une nébulosité totale. En revanche, les satellites radar permettent d'observer la surface terrestre et les inondations à travers la couche nuageuse. En 2019, CCR a souhaité mettre en place des méthodes de télédétection fiables et permettant une valorisation de ces données d'imagerie notamment par l'implication d'un projet de fin d'études du Master 2 >

## Apports de l'imagerie satellitaire dans la caractérisation des inondations

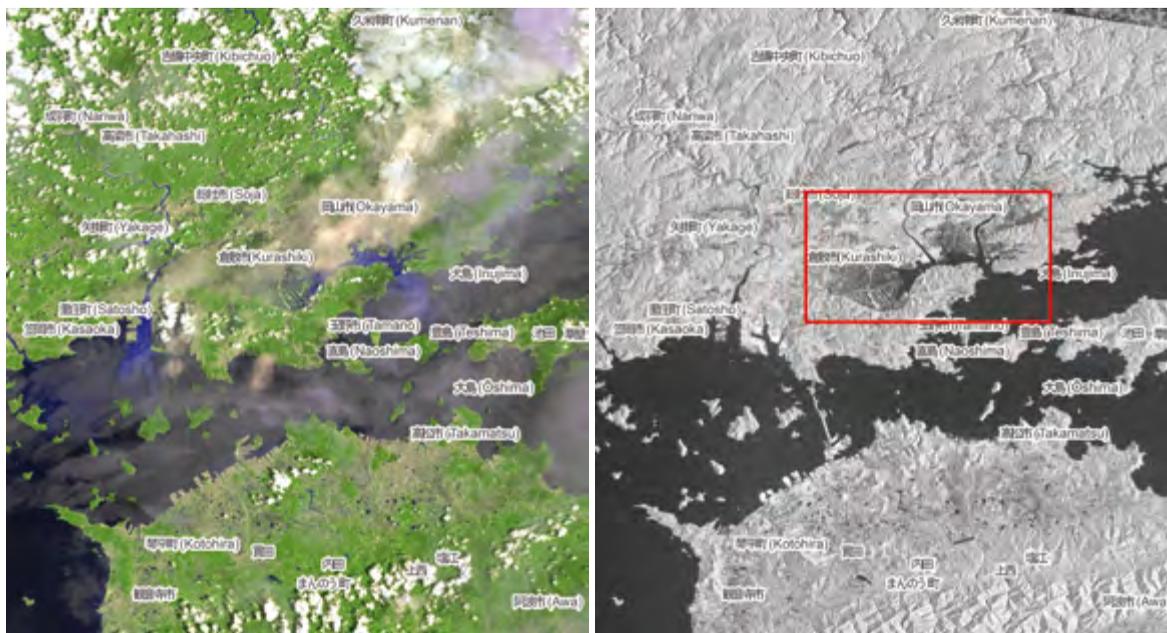


Figure 1 - Inondations observées sur l'imagerie multispectrale à gauche (©NASA/USGS Landsat-8, 2018) et sur l'imagerie radar à droite (©ESA Copernicus Sentinel-1, 2018).

> IGAST (Information Géographique : Analyse Spatiale et Télédétection) de l'ENSG (École Nationale des Sciences Géographiques). Ce projet a eu pour but de comparer les résultats de la modélisation hydrologique aux surfaces inondées observées par télédétection. Les données d'imagerie satellitaires à moyenne et haute résolution (Landsat-8, Sentinel-2 et Sentinel-1 de 30 à 10 m de résolution) ont été étudiées pour trois événements majeurs survenus sur le territoire métropolitain de 2016 à 2018 : inondations de la Seine et de la Loire en mai et juin 2016, inondations de la Seine et de la Marne en janvier et février 2018 et les inondations du Languedoc en octobre 2018. Depuis fin 2017, le traitement et l'analyse post-événements des données d'imagerie satellitaires permettent d'apporter des éléments supplémentaires dans la

validation des résultats du modèle inondation par débordement.

### MÉTHODOLOGIE

Les satellites radar ont la capacité d'acquérir des images de la surface terrestre quelles que soient les conditions météorologiques. Cela est dû à la capacité des ondes radar à opérer hors du spectre visible et à traverser la couche nuageuse de jour comme de nuit. De plus, les ondes radar ont la capacité de pénétrer les premiers centimètres du sol notamment lorsque ceux-ci sont gorgés d'eau. Cela permet de distinguer, sous certaines conditions, les zones inondées des zones hors d'eau et de fournir des informations détaillées lors de la phase active de la crue. Les ondes radar sont sensibles à la rugosité des surfaces rencontrées<sup>2</sup> : les

surfaces rugueuses, comme les bâtiments et les crêtes des reliefs par exemple, ont une forte réflectivité radar et apparaissent en tons clairs. À l'inverse, les surfaces lisses apparaissent très sombres, c'est le cas pour les surfaces inondées.

Les images radar brutes sont traitées à l'aide du logiciel de télédétection ESA SNAP. Un seuil radiométrique est défini pour distinguer les surfaces en eau des surfaces hors d'eau<sup>3</sup> (Figure 1).

En ce qui concerne l'imagerie optique multispectrale, les méthodes utilisées diffèrent. La détection des zones inondées s'effectue par opérations mathématiques entre les différentes bandes spectrales du satellite. Les résultats produisent des indices spectraux comme le MNDWI (*Modified Normalised Difference Water Index*<sup>4</sup>, Figure 2). Pour améliorer la caractérisation des surfaces inondées à partir des données mul-

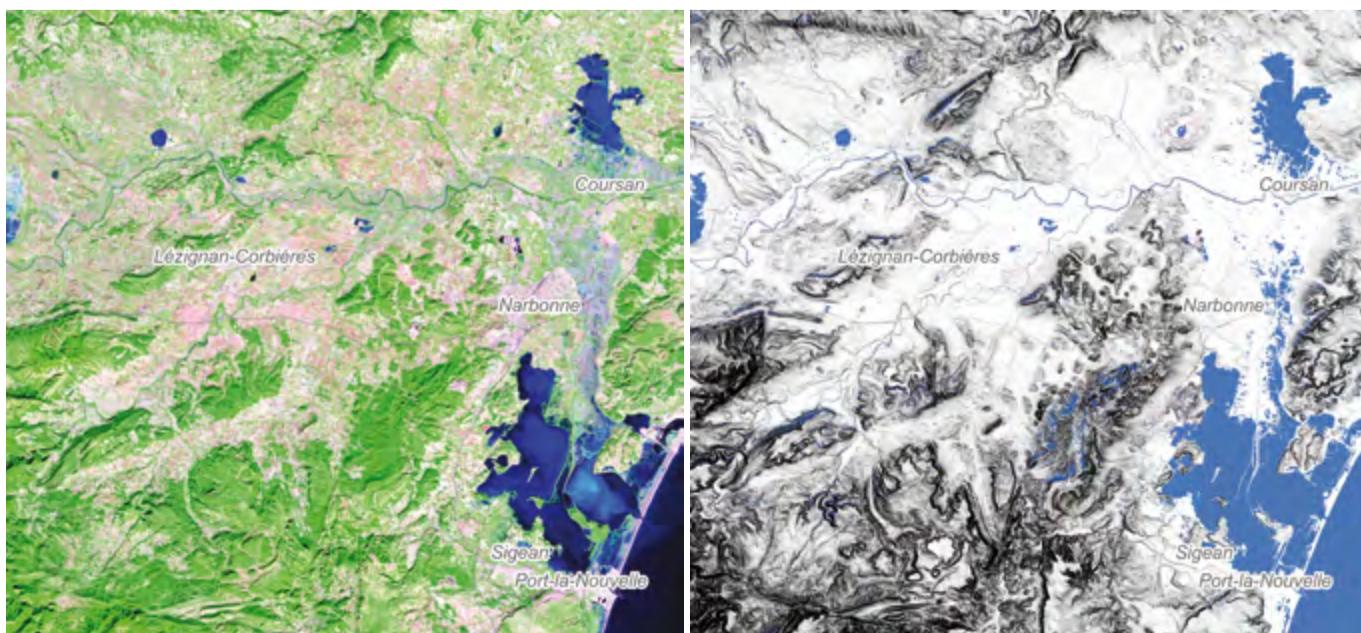


Figure 2 - Extraction des emprises inondées sur l'image optique (© ESA Copernicus Sentinel-2, 2018) avec l'indice MNDWI (Languedoc 2018).

tispectrales, une classification supervisée utilisant l'algorithme de Random Forest a été utilisée. La classification repose sur quatre classes principales : eau, sol, végétation et zones humides. La validation des résultats a été effectuée à l'aide d'une matrice de confusion. Cette méthode a été appliquée pour les inondations du Languedoc 2018 sur des images Landsat-8 acquises huit jours après l'événement. Les sols encore saturés en eau une semaine après les inondations ont permis de détecter les laisses de la crue.

Les données d'imagerie radar sont également utilisables dans les zones urbaines denses suivant une méthode basée sur la cohérence interférométrique<sup>5</sup>. Dans les secteurs les plus urbanisés, la cohérence interférométrique permet d'estimer quels sont les bâtiments inondés lors d'une crue<sup>6</sup>. Cette méthode permet d'établir une corré-

lation croisée entre deux images radar : la première avant la crue et la seconde pendant la crue<sup>7</sup>. Les bâtiments ont une valeur de cohérence très stable en temps normal (proche de 1). Lors d'une inondation, la valeur de la cohérence des bâtiments diminue (entre 0,5 et 0,6). C'est la diminution de la cohérence qui permet, a priori, de distinguer les bâtiments inondés des bâtiments non inondés. Néanmoins, les valeurs de la cohérence de la végétation et les autres types d'occupation du sol à proximité des bâtiments peuvent également diminuer entre les deux périodes observées sur les images. Pour éviter les fausses alarmes, la couche spatiale « European settlement map foot » a été utilisée pour masquer les autres types d'occupation du sol et conserver uniquement les bâtiments, seul objet d'intérêt dans la méthode de la cohérence interférométrique.

Afin d'être prises en compte dans la simulation des dommages, les emprises inondées issues de l'imagerie doivent être extraites en termes de hauteurs d'eau. Ainsi, à partir d'un Modèle Numérique de Terrain (MNT IGN à 25 m de résolution), les hauteurs d'eau issues du débordement observé par télédétection sont obtenues à partir de traitements géomatiques automatisés dans un Model Builder (Esri ArcGIS®). Cet outil permet de croiser des données d'entrées (MNT, hydrographie, lit majeur des cours d'eau, etc.) aux emprises d'inondation issues de la télédétection.

## RÉSULTATS

L'application des méthodes de télédétection sur les trois événements étudiés a permis d'obtenir des cartographies de

## Apports de l'imagerie satellitaire dans la caractérisation des inondations

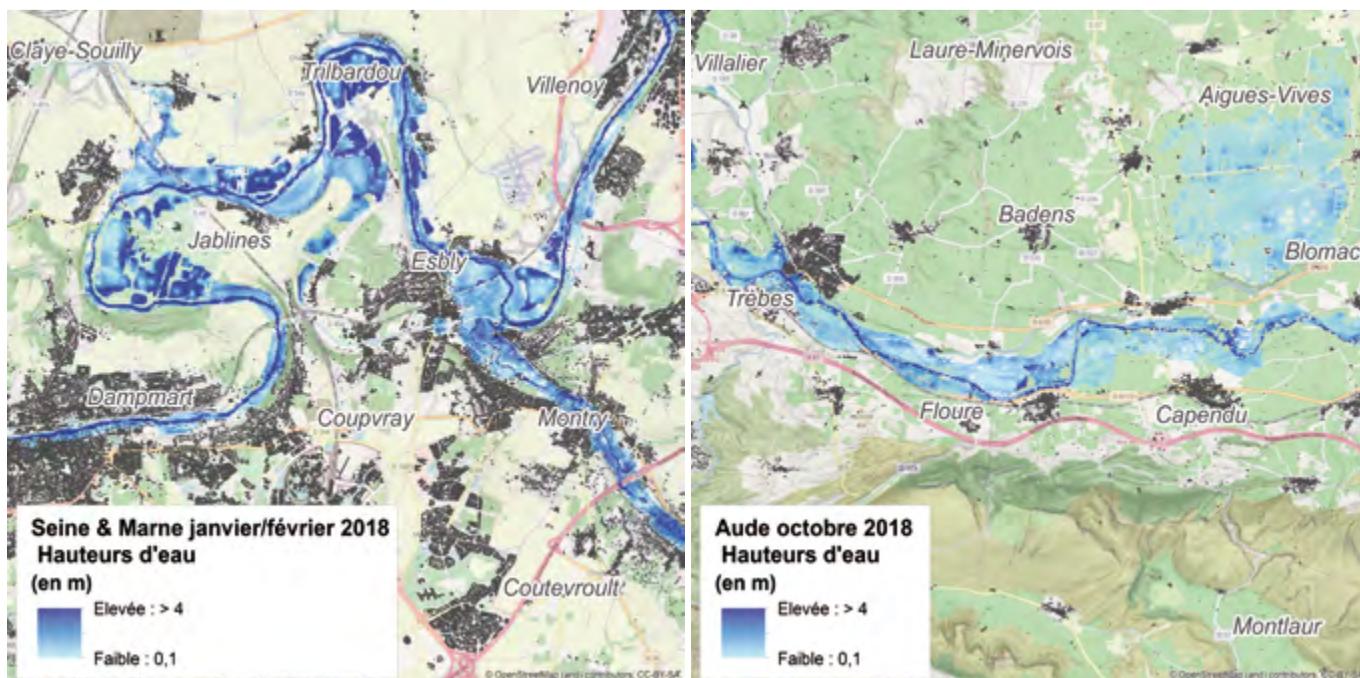


Figure 3 - Résultats de l'extraction des hauteurs d'eau sur la Marne (Seine et Marne 2018) et l'Aude (Languedoc 2018) (Fond de plan : OpenStreetMap®).

> L'aléa débordement et des hauteurs d'eau résultantes de post-traitement SIG des emprises observées.

Pour l'imagerie optique, l'indice MNDWI a été sélectionné car il permet de délimiter plus finement et efficacement les surfaces en eau. La classification Random Forest a été très efficace pour définir la répartition des zones inondées au sein du lit majeur à partir des zones d'apprentissages intégrées à l'algorithme. Dans l'évaluation d'une classification supervisée à partir d'une matrice de confusion, lorsque l'indice Kappa<sup>8</sup> est compris entre 60 % et 80 %, elle est jugée valable et les résultats peuvent être utilisés. Dans ce cas, l'indice Kappa obtenu est de 96,2 % avec une précision globale de 97,7 %. Les résultats de l'image classifiée sont donc satisfaisants et utilisables.

Le résultat de la méthode basée sur la cohérence interférométrique portant sur les bâtiments permet une bonne détection des bâtiments inondés. Le résultat a été validé par comparaison avec les données de sinistralité pour les événements de 2016 et 2018 (Figure 3).

Par la suite, il est possible de comparer les emprises obtenues par télédétection avec l'aléa débordement simulé par CCR. Ainsi, les résultats issus de la télédétection ont été superposés aux sinistres. Le nombre de sinistres comptabilisés dans l'aléa de télédétection est supérieur pour les trois événements étudiés, mais c'est en combinant les emprises des deux types d'aléas que l'on identifie le plus grand nombre de sinistres. En ce qui concerne les fausses alarmes, celles-ci sont moins nombreuses dans l'emprise de l'aléa de télédétection.

Les indicateurs assurantiels suivants ont pu être calculés :

- Probabilité de Détection (POD) : pourcentage de sinistres dans la zone d'aléa sur nombre total de sinistres ;
- Probabilité de Fausses Détections ou fausses alarmes (POFD) : pourcentage de polices se trouvant dans la zone d'aléa mais n'ayant pas été sinistrées ;
- True Skill Score (TSS) : POD soustraite à la POFD. Ce score permet de mesurer l'efficacité d'un modèle d'aléa.

Par exemple, pour l'événement Seine-Loire 2016, la POD passe de 69 % avec le modèle CCR à 86,9 % avec la télédétection seule et à 95,4 % en combinant les deux types d'aléa. Le POFD ne subit pas de dégradation pour autant.

Le coût des dommages simulés selon les deux méthodes est du même ordre

## LE PARTENAIRE

En 2019, Anas Nassih du Master 2 IGAST de l'ENSG a travaillé sur le projet télédétection chez CCR. Le master 2 IGAST, co-accrédité par l'Université Paris-Est Marne-la-Vallée (UPEM) et l'École Nationale des Sciences Géographiques (ENSG) dispense une formation en télédétection spatiale et en analyse de données géographiques.

de grandeur pour l'événement Languedoc 2018 ce qui peut s'expliquer par des emprises inondées similaires. En revanche pour les événements de Seine et Marne 2018 et Seine et Loire 2016, on note une différence notable. La différence est due aux variations d'emprise et de hauteur d'eau entre les deux aléas. C'est surtout à l'échelle communale que le coût des dommages peut varier selon le type de méthode utilisée.

## CONCLUSION

La valeur ajoutée des données d'imagerie satellitaire, en complément des modèles classiques, dans la caractérisation de l'aléa débordement a été démontrée sur la base de trois inondations majeures survenues en 2016 et 2018. Diverses méthodes et données ont été utilisées selon les conditions d'exploitabilité des images satellites. Les méthodes de télédétection comportent cependant certaines limites qui peuvent affecter la qualité des résultats :

- l'utilisation d'un seuil, que ce soit pour les indices spectraux (multispectral) ou bien le seuillage radiométrique (radar) peut causer des anomalies dans la classification entre zones en eau et zones hors d'eau ;
- la non-disponibilité des images au lendemain de l'inondation ;
- l'utilisation de la cohérence interférométrique entre des images acquises à des dates différentes et pour lesquelles les conditions du terrain ont pu changer (cycles de la végétation, présence/absence de véhicules, etc.).

Néanmoins, elles permettent d'améliorer la délimitation des zones d'aléa et l'estimation des dommages. Ces méthodes sont désormais mises en œuvre de manière opérationnelle dans le processus d'estimation des dommages post-événements./

## RÉFÉRENCES

1. Twele A., Cao W., Plank S., Martinis S. Sentinel-1-based flood mapping: a fully automated processing chain. *International Journal of Remote Sensing* 2016, 37, 2990-3004.
2. Curlander J.C., and R.N. McDonough R. F., 1991. "Synthetic aperture radar - Systems and signal processing", John Wiley & Sons, Inc, New-York.
3. Long S., Fatoyinbo T.E., Policelli F. Flood extent mapping for Namibia using change detection and thresholding with SAR. *Environmental Research Letters* 2014, 9, 035002.
4. Xu et al. 2006. "Modification of Normalized Difference Water Index (NDWI) to Enhance Open Water Features in Remotely Sensed Imagery" *International Journal of Remote Sensing*, <https://www.researchgate.net/publication/232724072>
5. Hanssen R. F., 2001. "Radar Interferometry – Data Interpretation and Error Analysis", 308 pp., Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands.
6. Chini et al. 2019. "Sentinel-1 InSAR Coherence to Detect Floodwater in Urban Areas: Houston and Hurricane Harvey as A Test Case." *Remote Sensing* 11 (2): 107. <https://doi.org/10.3390/rs11020107>
7. Angiati et al. 2010. "Operational Evaluation of Damages in Flooded Areas Combining Cosmo-Skymed and Multispectral Optical Images." 2010. *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 2414-17. <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2010.5651502>
8. Landis et al. 1977. "The Measurement of Observer Agreement for Categorical Data" *International Biometric Society*, <https://www.jstor.org/stable/2529310?seq=1>

## CITATION

Onfroy et al., Apports de l'imagerie satellitaire dans la caractérisation des inondations. In *Rapport Scientifique CCR 2019* ; CCR, Paris, France, 2020, pp.09-13.

# Modéliser le ruissellement pluvial



David Moncoulon<sup>1</sup>, Thomas Onfroy<sup>1</sup>, Zi-Xiang Wang<sup>1</sup>, Roxane Marchal<sup>1</sup>  
(1) Département R&D Modélisation Cat & Agriculture, CCR

## RÉSUMÉ

La modélisation du péril inondation est au cœur des activités R&D de CCR depuis plus de quinze ans. CCR dispose d'un modèle d'estimation de l'impact des phénomènes d'inondations par débordement et par ruissellement pluvial, mis à jour régulièrement. L'expertise développée par CCR a démontré qu'une part significative des dommages est due aux phénomènes de ruissellement. Le modèle d'inondation est utilisé dans le cadre de la veille événement pour simuler l'aléa et estimer la sinistralité associée. Une version probabiliste du modèle est développée en parallèle pour mesurer l'exposition des cédantes et de l'État au risque d'inondation. Afin d'améliorer en continu la modélisation des inondations, CCR bénéficie des travaux de Météo-France, des alertes émises par la société Predict et des données d'imagerie satellitaires du Sertit et de l'ESA. En outre, le modèle est développé en continu au cours de projets de recherche et adapté pour des études de cas (ex : Analyses Coûts-Bénéfices) ou pour répondre aux demandes de collectivités territoriales.

## ABSTRACT

*Flood modelling has been at the heart of the CCR R&D activities for more than 15 years. The flood model is used to simulate hazard and to estimate losses in case a natural disaster occurs. A probabilistic version of the model is developed in parallel to assess the flood risk exposure of ceding companies and of the State. The impact model of river overflow and runoff phenomena is regularly updated. CCR's expertise has shown that a significant part of the flood losses are due to surface runoff. In order to continuously improve flood modelling, CCR takes advantage of multiple partnerships with Météo-France, of real-time alerts provided by the company Predict, and of Sertit and ESA satellite imagery. Furthermore, the model contributes to on-going research projects, adaptations are added for case studies (e.g. Cost-Benefit Analyses) or to respond to requests from territorial authorities.*

# inondation  
# ruissellement  
# modèle CAT  
# sinistres  
# pouvoirs publics  
# prévention

## INTRODUCTION

La modélisation des inondations par débordement et des phénomènes de ruissellement est au cœur des activités de R&D de CCR depuis plus de quinze ans<sup>1</sup>. Un modèle opérationnel permet de caractériser le péril et de simuler les événements survenus. Ce modèle, régulièrement mis à jour, est calibré sur une sélection d'événements historiques survenus en France depuis 1999. Pour les événements non survenus mais néan-

moins possibles, un modèle probabiliste reposant sur un catalogue d'événements fictifs est développé afin de mesurer l'exposition financière de l'État, de CCR et des assureurs aux inondations. De par les nombreux événements simulés depuis la mise en place du modèle et grâce à l'amélioration continue de ce dernier, CCR a acquis une expertise dans la simulation des dommages liés aux inondations. Cette connaissance des risques

hydrologiques a permis de démontrer qu'une partie significative de la sinistralité due aux inondations n'est pas uniquement liée au débordement des cours d'eau mais également aux phénomènes de ruissellement pluvial. En 2019, le modèle inondation a été utilisé à plusieurs reprises dans le cadre de la veille événementielle, notamment lors des inondations survenues entre les mois d'octobre, novembre et décembre

en Occitanie, dans le Sud-Est et dans le Sud-Ouest de la France. Il a également été mis en application et valorisé lors de projets réalisés pour des assureurs, au cours de projets de recherche de l'ANR (PICS) et H2020 (NAIAD) ou encore lors d'études pour le compte de collectivités territoriales.

## MÉTHODOLOGIE

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. Ceci est effectué pour tous les bassins versants et les cours d'eau non jaugés. Ainsi, les écoulements de surface sont distribués sur les pentes du Modèle Numérique de Terrain (MNT de l'IGN à 25 m de résolution). Outre le MNT, des données entrées telles que les précipitations et les données d'occupations du sol alimentent le modèle de ruissellement (Figure 1).

Pour la simulation des événements réels, les précipitations sont acquises depuis la bibliothèque de Météo-France pour toutes les stations pluviométriques disponibles et depuis les images Antiloop. Les paramètres météorologiques utilisés par le modèle sont les pluies journalières, les pluies horaires et l'ETP (l'Évapo-Transpiration Potentielle, représentant la quantité d'eau théorique qui s'évapore du sol ou transpirée par la végétation).

Le modèle de ruissellement probabiliste est constitué d'un catalogue d'un millier d'événements fictifs simulés à partir des précipitations issues du modèle climatique ARPEGE-Climat de Météo-France. Les modes d'occupation du sol décrits dans la base de données Corine Land Cover à une résolution de 250 m sont

utilisés au sein du modèle de ruissellement pour caractériser le comportement de l'écoulement et de l'infiltration sur les différents types de surfaces. Pour chaque type d'occupation du sol (8 grands types d'occupation du sol sont retenus), des valeurs de rugosité sont affectées.

Au-delà de son utilisation pour la veille événementielle, 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 commune ou de petits bassins versants par exemple.

C'est le cas de l'étude expérimentale sur le risque inondation dans le bassin versant de la Bièvre (Val-de-Marne) menée en partenariat avec l'Institut Paris Région (IPR)<sup>1</sup>. Les données d'occupation du sol détaillées sur le territoire (Mode d'Occupation des Sols) de l'IPR et des données sur les réseaux d'assainissement par la Direction des Services de l'Environnement et de l'Assainissement du Val-de-Marne ont été intégrées dans le modèle inondation. Aussi pour répondre aux demandes émanant de collectivités territoriales, la méthode de modélisation du ruissellement

sur les périmètres d'intervention de ces collectivités a-t-elle été améliorée afin de produire l'intensité du ruissellement en m<sup>3</sup>/s selon différentes périodes de retour. D'autre part, le modèle pluie-débits de CCR est valorisé dans le cadre de projets de recherche. A l'exemple des événements étudiés sur deux sites en France, les inondations d'octobre 2015 dans le bassin versant de la Brague et les inondations de 2014 dans le bassin versant du Lez. La sinistralité liée à ces inondations a été analysée dans le cadre du projet européen NAIAD (cf. article NAIAD p.18). Les événements étudiés comptent une part significative de dommages liée au ruissellement. Des modifications méthodologiques ont été implémentées dans le modèle afin de tenir compte des spécificités des territoires étudiés en termes d'aléa et en fonction de la disponibilité de données locales détaillées. Considérant la taille des bassins versants étudiés, le modèle a été modifié pour calculer les pentes en superposant les hauteurs d'eau au MNT à un pas de temps horaire. Aussi, en milieu urbain, un réseau pluvial fictif a été modélisé afin de prendre en compte

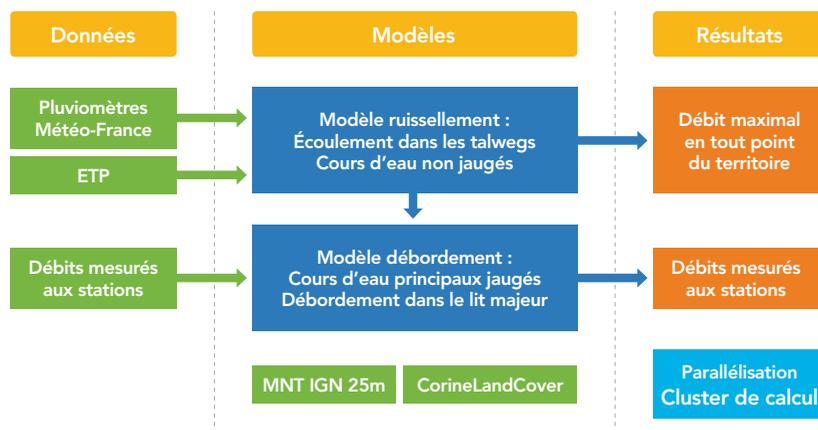


Figure 1 - Schéma fonctionnel du modèle inondation

## Modéliser le ruissellement pluvial

> dans le modèle l'absorption de pluies horaires décennales par les réseaux d'assainissement.

Enfin, le modèle est utilisé dans le cadre de projets de R&D effectués par CCR, à l'exemple de l'étude portant sur l'impact du changement climatique sur les DOM en partenariat avec Météo-France et RiskWeatherTech (cf. article DOM p.43). 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. De nouvelles données d'entrée incluant un MNT, le découpage en sous-bassins versants et une occupation du sol ont été intégrées. Quant aux données de précipitations, elles proviennent des scénarios de 400 années fictives à climat actuel produites à partir du modèle ARPEGE-Climat de Météo-France.

### RÉSULTATS

Pour tous les cours d'eau non jaugés et pour chaque bassin versant, le modèle de ruissellement reproduit les écoulements en surface à partir des données de précipitation avec en sortie, pour chaque maille du MNT, une valeur de débit maximal atteint au cours de l'événement. Ainsi, les écoulements sont distribués sur les pentes du MNT et convergent en aval, vers les talwegs.

Les résultats opérationnels issus du suivi des événements climatiques sont des cartes d'aléa modélisant les inondations localement. A l'exemple du résultat de la simulation des inondations survenues dans le Sud-Ouest en décembre 2019 à l'échelle de la commune de Bielle dans les Pyrénées-Atlantiques (Figure 2).

En ce qui concerne la simulation des événements probables, un catalogue d'un millier d'événements fictifs fournit une dis-

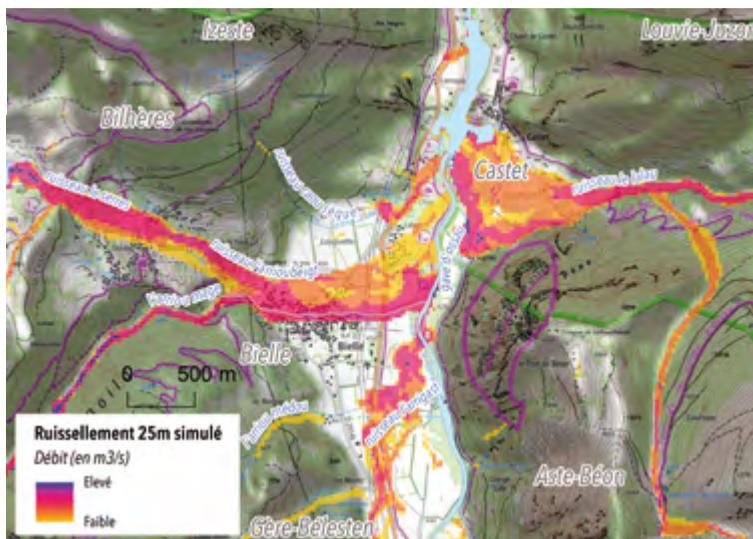


Figure 2 - Crue torrentielle survenue en décembre 2019 à Bielle (Pyrénées Atlantiques).

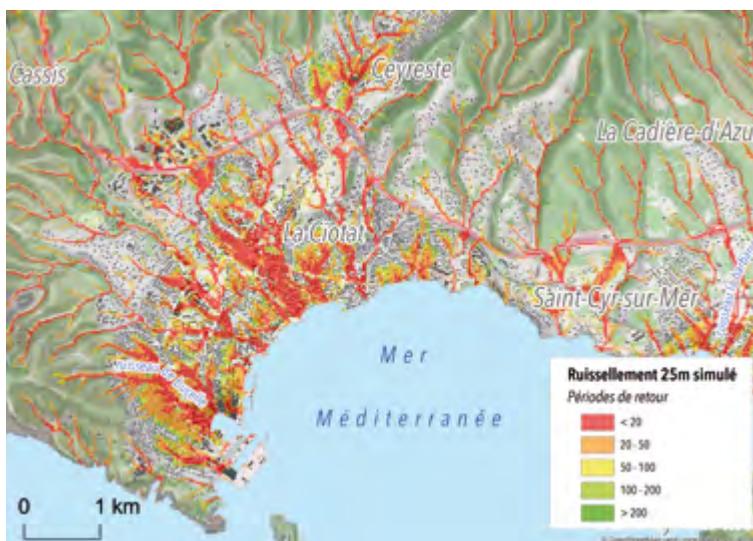


Figure 3 - Cartographie du ruissellement probabiliste dans le secteur de la Ciotat (Bouches-Du-Rhône).

tribution du débit maximal de ruissellement sur chaque maille du territoire. Cela permet d'estimer l'intensité de l'aléa sur chaque maille du MNT pour une période de retour donnée. La fréquence d'impact du phénomène apparaît plus élevée dans les zones imperméabilisées que dans les zones végétalisées (Figure 3).

L'étude réalisée sur le bassin versant de la Bièvre basée sur une amélioration de la qualité des données d'entrées du modèle inondation (MOS et réseaux d'assainissement) a permis la mise en place d'un indicateur d'exposition infra-communal combinant risque d'inondation par écoulements de surface modélisé par CCR et

risque d'inondation par remontées des réseaux d'assainissement (Figure 4). Cet indicateur permet donc de montrer les zones les plus exposées aux risques hydrologiques. Ce résultat a été croisé et validé par les sinistres géolocalisés, qui ont été comptés pour chaque maille de 250 m, avec un nombre important de sinistres (107/177) dans la classe de risque « élevé ».

En ce qui concerne les demandes des collectivités locales pour une meilleure compréhension de leurs expositions au risque de ruissellement pluvial, des cartographies classant le ruissellement selon quatre classes d'intensité de débit ont été fournies pour chaque période de retour. Les pertes moyennes annuelles modélisées pour le péril inondation au titre du régime Cat Nat et agrégées à l'échelle communale ont également été étudiées et transmises aux collectivités.

## CONCLUSION

Le modèle permet de simuler les événements survenus et d'estimer le montant des dommages assurantiels dus aux inondations par débordement et ruissellement. Le modèle est aussi bien utilisé de façon opérationnelle lors de la survenance d'une catastrophe naturelle que pour des études dans le cadre de projets de recherche ou de demandes de collectivités territoriales. Des données d'entrées à plus fines échelles peuvent être facilement intégrées dans le modèle ce qui permet de limiter les incertitudes liées à la qualité ou à la précision des données. Le déploiement d'études sous la forme de partenariat participe à renforcer la connaissance du risque lié au ruissellement pluvial et contribue à encourager les politiques et les actions de prévention des risques. /

## 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. Onfroy T., Moncoulon D., et Faytre L. Étude expérimentale sur le risque inondation dans le bassin versant de la Bièvre. In *Cahiers de l'ONRN*; Le partage des données pour une meilleure connaissance des risques naturels; ONRN, 2019; Vol. 3, pp. 35-47

## CITATION

Moncoulon et al., Modéliser le ruissellement pluvial. In *Rapport Scientifique CCR 2019* ; CCR, Paris, France, 2020, pp. 14-17.

### Indicateur d'exposition (maille 250 m)

Risque - (score exposition en %)

- Pas de risque (0%)
- Faible (< à 15%)
- Modéré (15 à 30%)
- Élevé (30 à 60 %)
- Très élevé (> à 60 %)

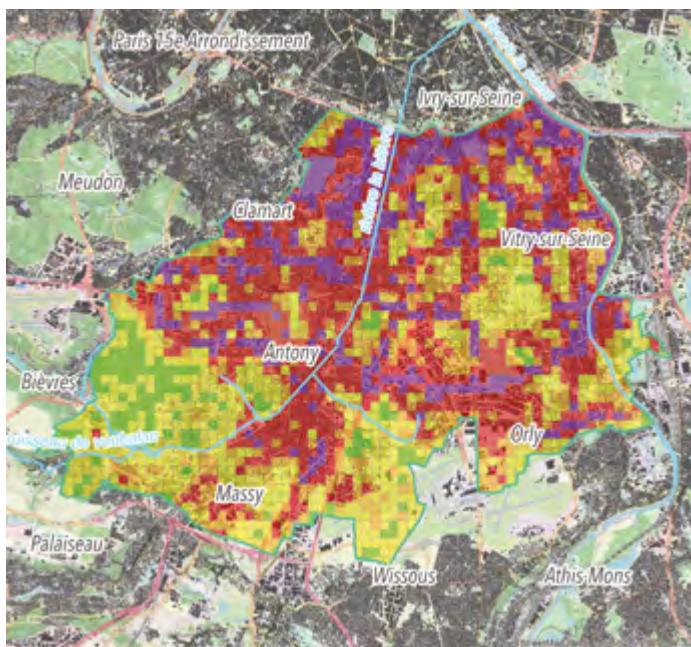


Figure 4 - Indicateur d'exposition aux risques agrégé à la maille de 250 m (bassin versant de la Bièvre, Val-de-Marne)<sup>2</sup>.

# Solutions Fondées sur la Nature : le projet européen H2020 NAIAD



Roxane Marchal<sup>1</sup>, Guillaume Piton<sup>2</sup>

(1) Département R&D Modélisation Cat & Agriculture, CCR. (2) INRAE Grenoble, Unité Erosion Torrentielle Neige et Avalanche (ETNA)

## RÉSUMÉ

Le bassin versant de la Brague est l'un des sites d'expérimentation du projet européen H2020 NAIAD : Nature Insurance Value : Assessment and Demonstration (2016-2019). L'approche repose sur l'analyse des aléas débordement de cours d'eau et ruissellement, en intégrant des données locales fines, avec pour objectif la modélisation des dommages évités par la mise en place de solutions fondées sur la nature. Les conséquences du changement climatique à horizon 2050 ont aussi été étudiées.

## ABSTRACT

*The Brague river is one of the demonstration sites of the H2020 European project NAIAD: Nature Insurance Value: Assessment and Demonstration (2016-2019). The approach relies on the assessment of overflow and runoff hazard, considering locally-adapted data, with the objective of modelling avoided damage of the implementation of nature-based solutions. The consequences of the climate change at horizon 2050 on insured damages were also explored.*

# modèle inondation  
# modèle de dommages  
# solutions fondées sur la nature  
# prévention  
# dommages assurés  
# changement climatique

## INTRODUCTION

Le projet européen Horizon 2020 NAIAD (Nature Insurance Value : Assessment and Demonstration (2016-2020)) rassemble 23 partenaires européens dont quatre français : le BRGM, INRAE, l'Université de Nice et CCR. Ce projet a pour objectif d'évaluer et de démontrer la pertinence de solutions fondées sur la nature (SfN) pour réduire les risques liés à l'eau (crues et sécheresses). CCR intervient principalement sur les questions de modélisation de l'aléa, d'évaluation de la vulnérabilité et des dommages actuels ou potentiellement évités par la mise en place de SfN. Le projet repose sur des sites d'expérimentations (DEMOS) en Europe, dont deux en France : le Lez à Montpellier (Hérault) et la Brague à Antibes (Alpes-Maritimes). Cet article porte uniquement sur l'étude effectuée sur le bassin versant de la Brague. La Brague est une rivière de 21 km de long située en zone méditer-

ranéenne et caractérisée par des crues éclaircies très destructrices et potentielle-ment meurtrières. L'événement étudié est l'épisode cévenol d'octobre 2015 qui a emporté la vie de 20 personnes, et dont les dommages assurés ont été estimés à hauteur de 520 M€ (Non-Auto) par CCR. Le risque inondation varie selon la localisation : la basse vallée est plus exposée au risque de débordement de la Brague et de ses affluents alors que le haut du versant est exposé à un fort risque de ruissellement urbain. Dans ce contexte, l'évaluation des mesures de prévention qu'elles soient conventionnelles ou de types SfN est nécessaire. Cette évaluation porte à la fois sur le potentiel de protection en termes de dommages évités et sur les co-bénéfices paysagers, environnementaux et socio-économiques. Une compréhension fine des aléas et de leurs conséquences en termes de dom-

mages assurés a motivé la collaboration entre INRAE et CCR. L'expertise INRAE a été notamment appliquée à la partie modélisation de l'aléa de débordement de cours d'eau et à l'utilisation des courbes de dommages recommandées par le Ministère de la Transition Ecologique et Solidaire (MTES). CCR a adapté son modèle ruissellement et le calage de courbes de dommages afin d'effectuer une analyse spécifique à la Brague. L'évaluation des SfN est estimée en termes de dommages évités moyens annuels ; les co-bénéfices générés grâce à leur mise en place ont été évalués en parallèle<sup>1</sup>.

## MÉTHODOLOGIE

L'aléa ruissellement a été modélisé sur la Brague à l'échelle du bassin versant. L'approche est basée sur le modèle inon-

ation CCR<sup>2</sup> qui a une résolution de 25 m (cf : Article ruissellement p.09). Quant aux informations sur les caractéristiques et la localisation des sinistres lors de l'événement d'octobre 2015, celles-ci ont été extraites de l'historique de sinistralité de CCR et portent uniquement sur les propriétaires de maisons individuelles. En ce qui concerne la modélisation du changement climatique, l'analyse sur la Brague a été effectuée à partir des résultats de l'étude CCR et Météo-France de 2018<sup>3</sup> qui portait sur l'ensemble du territoire métropolitain.

En complément de cette analyse à large échelle, l'aléa débordement de cours d'eau a été réanalysé plus finement sur la zone de la basse vallée où les dommages les plus graves ont été enregistrés. INRAE a utilisé le modèle numérique 2D Iber<sup>4</sup> pour estimer les hauteurs et vitesses des crues à une maille de 2 m. Un lever LIDAR récent a permis de reconstruire la géométrie de la vallée et des levés de topographie terrestre ont été digitalisés pour déterminer la bathymétrie de la rivière et la géométrie des nombreux ponts et ouvrages hydrauliques présents sur la rivière et ses affluents. Les données des BD Carto<sup>®</sup> et BD Topo<sup>®</sup> de l'IGN ont été utilisées pour intégrer tous les bâtiments et routes au modèle et les données d'occupation du sol ont été vérifiées et précisées pour modéliser les rugosités variables du terrain. Des rapports d'étude existant sur les deux crues majeures bien documentées dans les archives, octobre 2015 et novembre 2011, ont été utilisés pour reconstruire virtuellement ces événements et calibrer le modèle. Plus de 400 laisses de crues, de données géolocalisées, de niveaux atteints par les crues, ont été utilisées pour s'assurer de la vraisemblance des niveaux d'eaux calculés (Figure 1). La méthode SHYREG<sup>5</sup> a ensuite été appliquée pour calculer des épisodes de crue de proba-

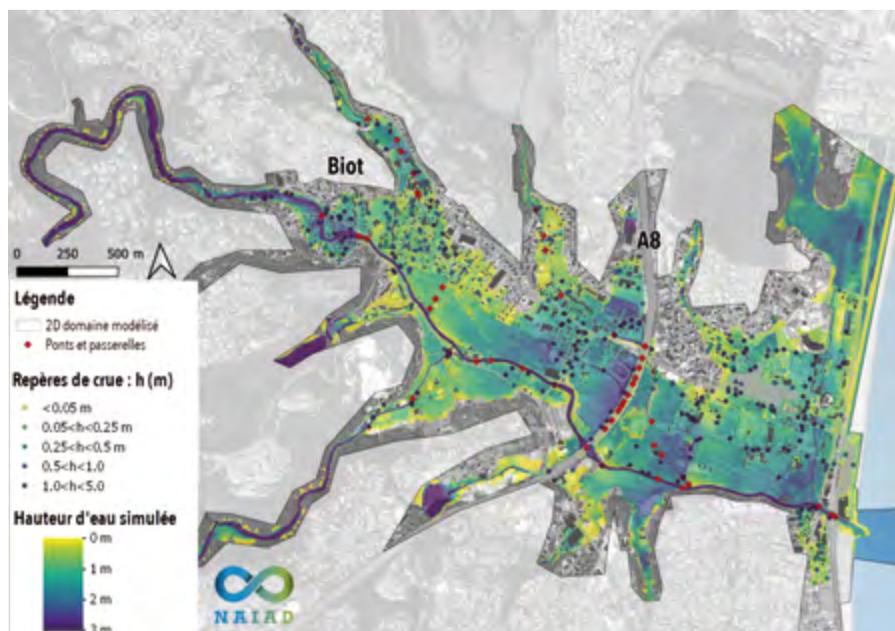


Figure 1 - Résultat de la modélisation effectuée, avec les hauteurs d'eau simulées, comparées aux repères de crue relevés lors de la crue d'Oct. 2015.

bilité d'occurrence donnée dans des scénarios de climat actuel et futur (RCP 4.5 et 8.5 du GIEC). Elle a aussi été utilisée dans des scénarios d'occupation des sols actuel et futur ou encore en présence d'ouvrages de protection conventionnels (barrages de rétention) ou SfN.

Le MTES a développé des courbes de dommages standardisées et nationales qui servent de manière systématique à la réalisation d'analyses coût-bénéfice pour l'octroi de subventions du fonds Barnier aux projets de protection contre les inondations<sup>6</sup>. Les courbes de dommages sont des fonctions représentant la relation entre les dommages mesurés au travers des coûts de réparation et les intensités d'aléas (hauteurs d'eau ou débits).

Ces courbes moyennes ont été réutilisées et comparées aux dommages réels observés et aux approches alternatives de CCR. La calibration des courbes de dommages >

## Solutions Fondées sur la Nature : le projet européen H2020 NAIAD

> basée sur l'utilisation des données de sinistralité assurée a été appliquée à la fois sur le calage des courbes pour le ruissellement et le débordement, selon les intensités d'aléa issues du modèle Iber. Les courbes de dommages ont ensuite été croisées avec les modélisations des aléas issus de l'étude sur les conséquences du changement climatique sur les dommages assurés en France<sup>3</sup>.

### RÉSULTATS

La précision sur les niveaux de crue est de l'ordre de  $\pm 25$  cm pour l'événement de calibration (Oct. 2015) et un peu moins pour l'événement de validation (Nov. 2011).

- Pour des hauteurs d'eau comprises entre 1,5 et 3,5 m (modèle Iber de maille 2 m), le taux de destruction est de l'ordre de 30 % de la valeur assurée. Il a aussi été mis en évidence que les zones soumises à des hauteurs d'écoulement de moins de 20 cm n'étaient généralement pas sinistrées. C'est seulement à partir d'une telle hauteur que les dispositifs d'assainissement pluvial sont complètement saturés et que l'eau atteint les réseaux électriques augmentant significativement les dommages ;

- Pour des ruissellements de l'ordre de  $2,5 \text{ m}^3/\text{s}$  par pixel de 25 m, les taux de destruction moyens sont de 15 % de la valeur assurantielle. Cette très forte sinistralité est notamment corrélée à l'intensité exceptionnelle du phénomène de crue d'octobre 2015 lors duquel plusieurs branches du bassin versant de la Brague ont provoqué des crues proches ou supérieures à une crue centennale<sup>7</sup>. L'occurrence conjointe de ces magnitudes est encore plus rare.

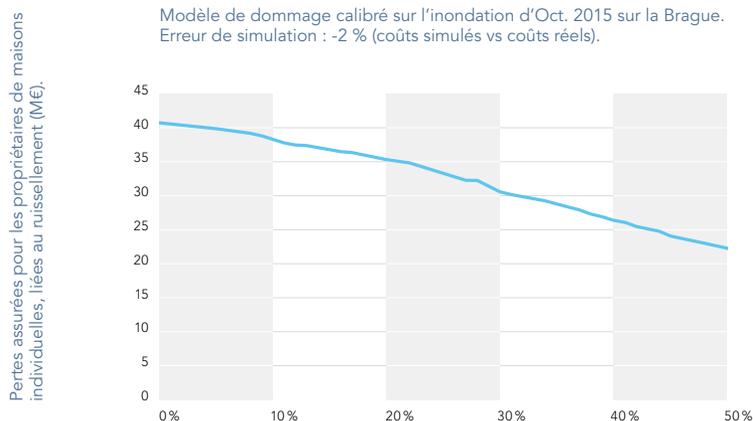
L'aspect plus ou moins chaotique des écoulements dans le milieu périurbain de la

basse vallée de la Brague est partiellement reproduit par les modèles hydrauliques utilisés. Des lacunes sur de nombreuses données d'entrée telles que les débits et la présence d'embâcle n'ont par ailleurs pas permis de réduire davantage les incertitudes sur les niveaux d'inondation.

À la suite de ces évaluations des risques actuels, il a été possible d'évaluer les performances potentielles de stratégies de prévention. Vis-à-vis du ruissellement, il a par exemple été mené une approche inverse où les liens entre réduction du débit de ruissellement et diminution des dommages, quelles que soient les mesures employées pour réduire le ruissellement, ont été quantifiés. Sans réduction de l'aléa, les dommages estimés pour l'ensemble des propriétaires de maisons individuelles sont de 4 M€ pour un événement type Oct. 2015 sur le bassin versant. Une diminution de 20 % des débits de ruissellement réduirait les dommages à 3,5 M€ soit de 12 % (Graphique ci-dessous).

### Effet de la réduction de l'aléa ruissellement sur les dommages assurés liés aux inondations d'Oct. 2015

Modèle de dommage calibré sur l'inondation d'Oct. 2015 sur la Brague.  
Erreur de simulation : -2 % (coûts simulés vs coûts réels).



% de réduction de l'aléa appliqué sur le débit de ruissellement ( $\text{m}^3/\text{s}$ )  
0% équivaut à aucune réduction de l'aléa.

INRAE (anciennement IRSTEA) et CCR sont partenaires depuis 10 ans dont 3 ans au sein du consortium du projet NAIAD (2016-2019). Les deux partenaires échangent leurs connaissances en matière d'aléas et d'évaluation des dommages assurés. De nombreux livrables disponibles en ligne soulignent leurs travaux réalisés au sein de NAIAD [www.naiad2020.eu](http://www.naiad2020.eu). En 2020, IRSTEA et INRA fusionnent pour devenir INRAE.

Au niveau de la basse vallée, un scénario SfN de restauration du corridor hydraulique et écologique de la rivière, «giving-room-to-the-river», a été intégré dans le modèle Iber afin d'estimer les dommages évités par sa mise en place. Selon les estimations et l'utilisation des courbes d'endommagement du CGDD<sup>6</sup> et de CCR, les dommages annuels moyens évités pourraient atteindre 200-700 K€, soit 30 % des dommages annuels moyens actuels. Ceci sans prendre en compte les mesures de réductions des ruissellements amont dont l'ambition reste à définir localement. L'amélioration de la qualité des milieux naturels, du paysage, de la qualité de vie et de la dynamique économique de la vallée sont autant de co-bénéfices qu'il a été difficile d'estimer précisément mais qui pourraient être évalués à plusieurs millions d'euros par an<sup>2</sup>. Les ruissellements issus des nombreux vallons surplombant la basse vallée limitent par ailleurs l'efficacité de tout projet se limitant à des aménagements exclusifs de la rivière. Ceci met en évidence le besoin de mutualiser les approches et mesures envisagées : réduire au mieux les ruissellements à la source et faciliter les écoulements des ruissellements inévitables.

Les courbes de dommages calibrées sur l'événement d'octobre 2015 ont été intégrées dans le modèle de dommages pour estimer le coût des inondations pour des climats actuels et futurs. Les courbes ont été validées en comparant le coût réel des dommages d'octobre 2015 avec le coût estimé pour les niveaux d'intensité modélisés pour cet événement (erreur inférieure à 2 %). A climat actuel, les dommages annuels moyens sont estimés à 48,7 M€ pour les propriétaires de maisons individuelles uniquement. Ces estimations tendent vers 61 M€ à l'horizon 2050 pour le scénario RCP 8.5 du GIEC, soit une augmentation de l'ordre de 25 %, sans

prendre en compte l'augmentation de la vulnérabilité. Les modèles indiquent une augmentation probable de la fréquence des événements intenses et des dommages associés. Ainsi, pour limiter les effets du changement climatique sur les dommages, une réduction de l'aléa de 45 % serait nécessaire pour maintenir les pertes au niveau actuel qui est pourtant déjà considéré localement comme insupportable (Graphique ci-dessous).

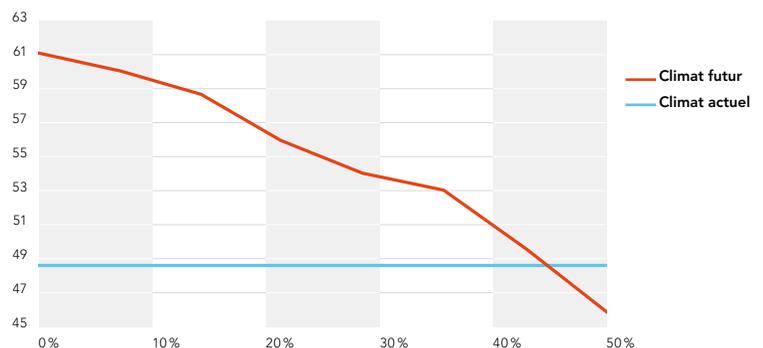
## CONCLUSION

Cette étude approfondie et complémentaire des aléas débordement et ruissellement urbain a permis d'améliorer la connaissance sur les dommages assurés, sur l'évaluation des dommages évités et les co-bénéfices liés à la mise en place de SfN dans le bassin versant de la Brague. Selon les estimations, les dommages an-

Pertes assurées annuelles moyennes pour la Brague basées sur une simulation stochastique de 400 années de précipitations horaires résultant du modèle ARPEGE-Climat à climat actuel et climat 2050 (M€).

### Pourcentage de réduction de l'aléa ruissellement requis pour maintenir les dommages assurés au niveau actuel

Modèle de dommage calibré sur l'inondation d'Oct. 2015 sur la Brague.  
Erreur de simulation : -2 % (coûts simulés vs coûts réels).



% de réduction de l'aléa appliqué sur le débit de ruissellement (m<sup>3</sup>/s)  
0% équivaut à aucune réduction de l'aléa.

## Solutions Fondées sur la Nature : le projet européen H2020 NAIAD

---

> nuels moyens évités pourraient atteindre 30 % avec la mise en place de mesures de prévention portant sur l'aléa débordement, sans tenir compte des mesures réduisant le ruissellement. De manière générale, pour avoir un réel impact sur la réduction de l'aléa et des dommages, les politiques de prévention, utilisant les SfN se doivent d'être ambitieuses. Les résultats de cette étude peuvent participer à orienter les décideurs locaux en matière de prévention via l'utilisation d'analyses coût-bénéfice et multicritères. La sinistralité peut être réduite mais le risque résiduel est toujours présent compte tenu des incertitudes liées à l'aléa et au changement climatique./

### RÉFÉRENCES

1. Gnonlonfin A., Piton G., Marchal R., Munir M.B., Wang Z.X., Moncoulon D., Mas, A., Arnaud, P., Tacnet J-M. & Douai, A. 2019. DELIVERABLE 6.3 DEMO Insurance Value Assessment - Part 7: France: Brague, NAIAD H2020 project (Grant Agreement n° 730497), 267-428.
2. 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.
3. Moncoulon D., Desarthe J., Naulin J-P, Onfroy T., Tinard P., Wang Z-X., Hajji C., Veysseire M., Dequé M., and Régimbeau F. 2018. « Conséquences du changement climatique sur le coût des catastrophes naturelles en France à l'horizon 2050. » Paris : Caisse Centrale de Réassurance & Météo-France.
4. Bladé E., Cea L., Corestein G., Escolano E., Puertas J., Vázquez-Cendón E., Dolz J., and Coll A. 2014. Iber: herramienta de simulación numérica del flujo en ríos. *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería* 30:1–10.
5. Arnaud et al. 2014. Hydro-meteorological risk estimation based on a flood generation model: SHYREG approach: The method, its performances and the associated database [Estimation de l'aléa hydrométéorologique par une méthode par simulation: la méthode SHYREG \*: présentation - performances - bases de données]. *Houille Blanche*:20–26.
6. CGDD. 2018. Analyse multicritère des projets de prévention des inondations - Guide méthodologique 2018. Commissariat général au développement durable.
7. Lebouc L. & Payrastre O. 2017. Reconstitution et analyse des débits de pointe des crues du 3 octobre 2015 dans les Alpes Maritimes. *Convention DGPR-Ifsttar 2016*, 18p.



---

### LE PROJET NAIAD

Le projet NAIAD est financé par la Commission Européenne sous le programme H2020 de recherche et d'innovation sous l'accord de subvention N° 730497. Il est constitué de vingt-trois partenaires européens dont quatre en France (BRGM, INRAE, Université de Nice et CCR) et coordonné par la Confédération Hydraulique du Duero (Espagne). Le projet de recherche est appliqué sur neuf sites d'étude répartis dans onze pays européens et aux échelles variables : d'un quartier urbain à Rotterdam au bassin versant du Danube par exemple.

### CITATION

Marchal et al., Solutions Fondées sur la Nature : le projet européen H2020 NAIAD. In *Rapport Scientifique CCR 2019* ; CCR, Paris, France, 2020, pp. 18-22.

# Propager les incertitudes dans le modèle de submersion marine



Élodie Perrin<sup>1</sup>, Olivier Roustant<sup>2</sup>, Jérémy Rohmer<sup>3</sup>, Jean-Philippe Naulin<sup>4</sup>, David Moncoulon<sup>4</sup>, Pierre Tinard<sup>4</sup>

(1) Ecole des Mines de Saint-Etienne (2) Institut National des Sciences Appliquées (INSA) Toulouse

(3) Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM) Orléans (4) Département R&D Modélisation Cat & Agriculture, CCR

## RÉSUMÉ

La détermination des sources d'incertitude dans un modèle est primordiale pour appréhender la variabilité du résultat et améliorer la qualité de simulation. Un travail de thèse, en partenariat avec l'École des Mines de Saint-Etienne (ESME) et le BRGM-Orléans, est en cours sur l'analyse des incertitudes dans un modèle d'estimation des impacts des submersions marines. La méthodologie développée est basée sur la construction d'un méta-modèle à partir du modèle physique initial afin de réaliser un grand nombre de simulations en un minimum de temps. Une première implémentation de l'outil a été effectuée sur le site des Boucholeurs en Charente Maritime où une analyse de sensibilité au forçage marin a été réalisée. Le méta-modèle ajusté permet de reproduire les résultats du modèle de manière satisfaisante et est utilisé pour réaliser l'analyse de sensibilité, à la suite de laquelle une méthodologie basée sur des indices de Sobol a été mise en œuvre. La cohérence des résultats obtenus permet de valider la méthodologie qui sera étendue à

l'ensemble des paramètres du modèle. Cette méthodologie pourra également être utilisée pour combiner des modèles afin d'améliorer les capacités prédictives du modèle.

## ABSTRACT

*Determining the sources of uncertainty in a model constitutes a major stage in order to assess the variability of its results and to improve the simulation's quality. An on-going PhD, carried out in partnership with ESME and the BRGM-Orléans, currently focuses on the analysis of uncertainties in an estimation model of the impacts of marine submersions. The developed methodology is based on the implementation of a meta-model from an initial physical model, with the objective of performing a large number of simulations in a minimum of time. A first implementation of the tool has been applied on the Boucholeurs area located in Charente-Maritime, and a sensitivity analysis of marine forcing has been*

# analyses de sensibilité

# mathématiques appliquées

# événements extrêmes

# analyse d'incertitude

# statistiques spatiales

*conducted. The adjusted meta-model reproduces the physical model's results in a satisfactory way. The meta-model was subsequently used to perform a sensitivity analysis using a methodology based on Sobol's indices. The consistency of the results makes it possible to validate the developed methodology, which will be later extended to all the parameters of the model. Finally, this methodology can also be used to combine models in order to improve the model's predictive capabilities.*

## INTRODUCTION

Les estimations des modèles d'impacts présentent des incertitudes importantes. Pour le modèle submersion marine développé par CCR, 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 de submersion marine, a débuté en octobre 2017, en partenariat avec le BRGM et l'École des Mines de Saint-Etienne. 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 iden-

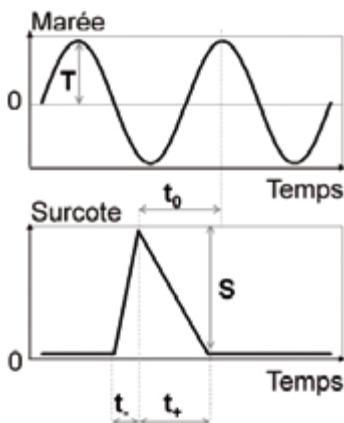
tification et cette hiérarchisation, notamment par la définition d'indices de sensibilité mesurant l'influence d'une ou plusieurs entrées du modèle sur la variabilité des sorties. Un des indices le plus utilisé est l'indice de Sobol<sup>1</sup> qui est basé sur la décomposition de la variance de la sortie. Néanmoins, deux problèmes se posent pour le calcul de cet indice. Le premier est que son estimation nécessite un très grand nombre de simulations du

# Propager les incertitudes dans le modèle de submersion marine

a : Localisation du site



b : Paramétrisation des forçages temporels



> modèle, de l'ordre de  $10^3$ . Or, obtenir autant de simulations peut 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 irrégularités.

Pour pallier le premier problème, il est possible de construire un modèle de substitution, appelé méta-modèle. Des méthodes existent comme par exemple la régression linéaire, la Régression par Processus Gaussien (RPG), etc.

Cependant, quelles que soient les méthodes de méta-modélisation, le second problème subsiste. Ainsi, une méthode a été mise au point pour construire un méta-modèle tout en tenant compte des propriétés spatiales des cartes observées. Une fois le méta-modèle construit, il est possible d'obtenir un nombre suffisant de simulations pour estimer les indices de Sobol. Toutefois, la problématique des données spatialisées se pose aussi pour l'AS. Comme pour le méta-modèle, 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 prédites en un seul indice. Un indice spécifique a donc été mis au point pour ce cas d'étude.

## MÉTHODOLOGIE

Afin de mettre au point la méthode, le site d'étude choisi est celui des Boucholeurs (Charente-Maritime). Ce site, situé sur la côte Atlantique française à proximité de La Rochelle, a été fortement touché lors de la tempête Xynthia en 2010. Un premier travail d'analyse a été réalisé en se focalisant sur l'impact des paramètres de

forçages marins sur l'emprise de l'inondation et des hauteurs d'eau associées. 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 (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<sup>2</sup> et du BRGM (adapté de Lazure et al. (2008)<sup>3</sup>, voir détails dans Rohmer et al., (2018)<sup>5</sup>). 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.

### Calibration du méta-modèle

L'objectif de la méta-modélisation est de remplacer un modèle physique, coûteux en temps de calcul par un modèle mathématique, beaucoup plus rapide, afin de tester un grand nombre de variations possibles du modèle initial. Le méta-modèle 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 du modèle. 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

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

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.

Pour valider le modèle, une méthode croisée est mise en œuvre. L'échantillon d'observations est divisé en 10 sous-échantillons constitués chacun de 50 simulations. Les sorties de chaque échantillon sont comparées avec celles obtenues en calibrant un méta-modèle sur les 9 autres. La pertinence des modèles est quantifiée avec le critère RMSE (racine de la moyenne de l'erreur quadratique). La figure 2 présente la carte des erreurs moyennes obtenues par l'ACP classique et par l'ACP fonctionnelle. Les erreurs ne sont pas réparties de manière homogène. La comparaison de la distribution des erreurs présentée dans la figure 3 (page suivante) montre que la méthode par ACP fonctionnelle sur base d'ondelettes à capacité prédictive est légèrement meilleure que l'ACP standard. De plus, la méthode est 5 fois plus rapide que la méthode standard ; ce qui s'explique par le fait que l'ACP a été appliquée sur moins de variables. En moyenne, l'erreur est de 35 cm pour la méthode basée sur l'ACP fonctionnelle. Cette erreur est tirée vers le haut par

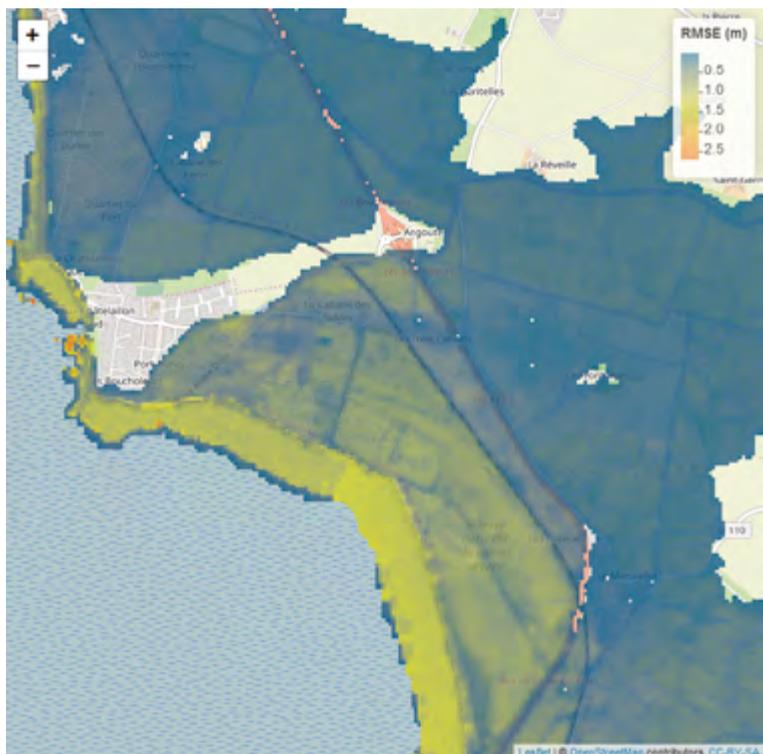
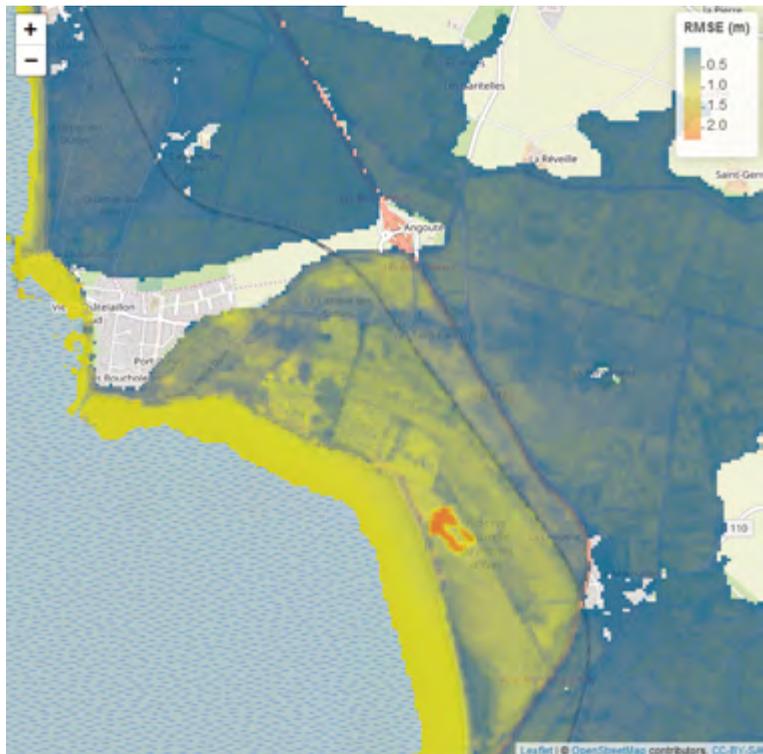


Figure 2 - Représentation des cartes de RMSE obtenues via l'ACP classique (en haut) et l'ACP fonctionnelle (en bas).

# Propager les incertitudes dans le modèle de submersion marine

Histogramme des cartes RMSE

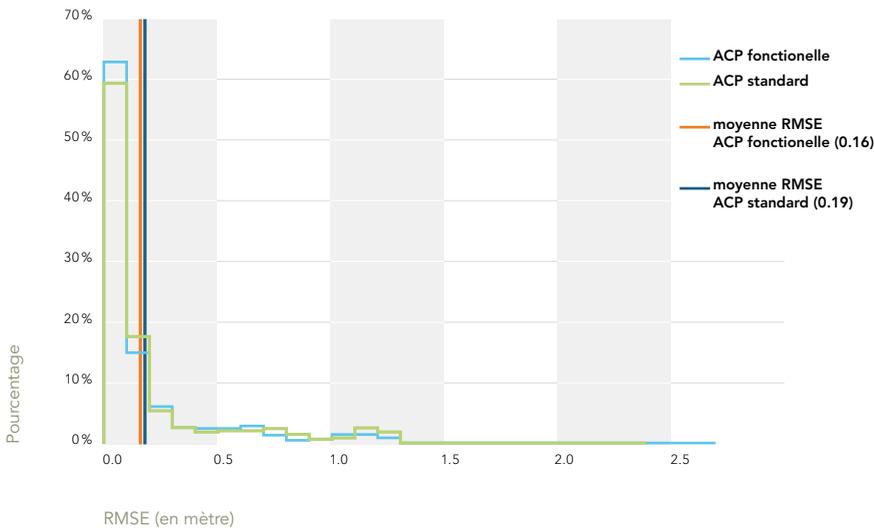


Figure 3 - Comparaison des distributions des critères RMSE entre l'ACP classique et l'ACP fonctionnelle.

> quelques cas où l'irrégularité du terrain entraîne des erreurs de simulation importantes. Cependant, elle reste acceptable quand elle est comparée aux erreurs que peut avoir un MNT.

## Analyse de sensibilité

Une fois le méta-modèle 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 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. L'influence des paramètres est classée selon l'ordre décroissant des valeurs de l'indice. Une adaptation de cet indice a été réalisée sur la base des travaux de Lamboni et al. (2011)<sup>4</sup>.

La figure 4 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 à elle seule. Le second paramètre influent est celui du phasage entre la surcote et la marée ( $t_0$ ). 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 a beau être importante, si elle est en déphasage avec la marée, elle n'induit pas de risque de submersion.

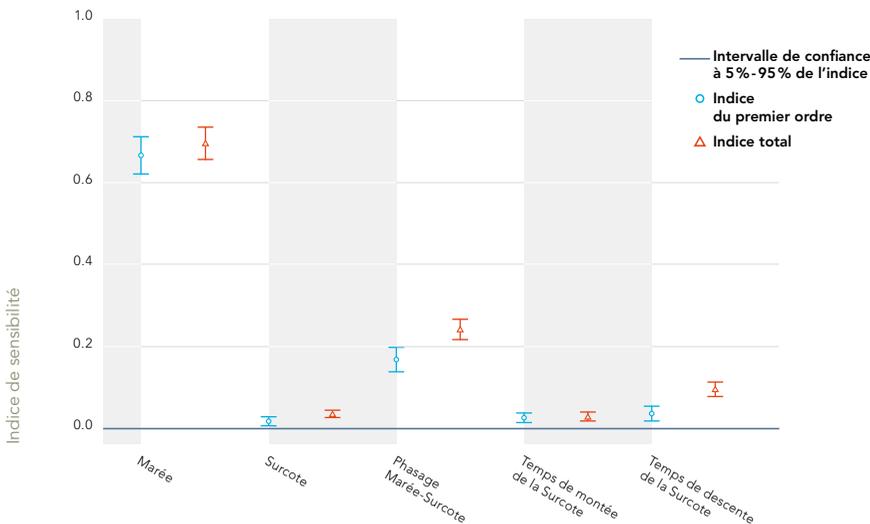


Figure 4 - Indices de sensibilité obtenus pour chaque entrée du modèle.

## LES PARTENAIRES

La thèse est cofinancée et encadrée par le BRGM, ARMINES Saint-Etienne 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.

## 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 faire l'analyse de sensibilité, un méta-modèle 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 méta-modélisation développée a une capacité prédictive non seulement meilleure, mais aussi 5 fois plus rapide que la méthode standard par ACP. L'indice de sensibilité obtenu au final a permis de hiérarchiser les paramètres de forçages marins selon leur importance. Pour la suite de la thèse, il est envisagé d'étudier l'influence d'autres sources d'incertitudes telles que la rugosité du sol ou la présence de connexions hydrauliques, telles que les buses, laissant passer l'eau. Cependant, la difficulté supplémentaire qui se pose est que certains de ces paramètres se présentent comme des variables qualitatives et doivent donc être traités comme telles. Enfin, il est possible de réaliser plusieurs configurations des modèles d'inondation, en changeant de MNT par exemple. C'est pourquoi un travail sur la combinaison de modèles, utilisant la notion de méta-modèle, a été entamé afin d'améliorer les sorties du modèle d'inondation côtière./

## RÉFÉRENCES

1. Sobol' I.M. 1993. Sensitivity estimates for nonlinear mathematical models. In *Mathematical Modelling and Computational Experiments*, Moscou, Russie, Vol.1(4):407-414, 1993. ISBN 1061-7590/93/04407-008\$9.00.
2. Naulin et al. 2016. "Estimation of Insurance-Related Losses Resulting from Coastal Flooding in France". *Natural Hazards and Earth System Sciences* 16, n°1 (20 janvier 2016): 195-207. <https://doi.org/10.5194/nhess-16-195-2016>
3. Lazure P., Dumas F. An external-internal mode coupling for a 3D hydrodynamical model for applications at regional scale (MARS). *Advances in Water Resources* 2008, 31, 233-250.
4. Lamboni et al. 2011. Multivariate sensitivity analysis to measure global contribution of input factors in dynamic models. *Reliability Engineering & System Safety* 2011, 96, 450-459.
5. Rohmer et al. 2018. Casting light on forcing and breaching scenarios that lead to marine inundation: Combining numerical simulations with a random-forest classification approach. *Environmental Modelling & Software* 2018, 104, 64-80.

## CITATION

Perrin et al., Propagation des incertitudes dans le modèle de submersion marine. In *Rapport Scientifique CCR 2019* ; CCR, Paris, France, 2020, pp. 23-27.



# Modéliser la sécheresse géotechnique

Pierre Tinard<sup>1</sup>, David Moncoulon<sup>1</sup>, Michèle Blanchard<sup>2</sup>

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

(2) Direction de la climatologie et des services climatiques, Météo-France

## RÉSUMÉ

CCR dispose d'un modèle d'estimation de l'impact des phénomènes de sécheresse, réhydratation des sols provoquant des désordres majeurs sur les bâtiments et notamment les maisons. Ce péril est le deuxième plus coûteux (36 % du total) depuis la mise en place du régime d'indemnisation des catastrophes naturelles en 1982. Le modèle bénéficie à la fois des travaux de Météo-France s'agissant de la modélisation hydro-météorologique des interactions atmosphère-sol et des retours d'expérience opérés par CCR sur les sécheresses du passé notamment grâce à la caractérisation de la sinistralité. De nouveaux critères météorologiques, dorénavant homogènes pour toute l'année et évalués pour chacune des quatre saisons, ont par ailleurs été mis en place cette année conjointement à une nouvelle méthodologie de génération des événements stochastiques.

## ABSTRACT

*CCR has been modeling the impact of drought/rehydration of soils phenomena of soils causing major disorders on buildings and especially houses. This hazard is the second most costly (36 % of the total) since the implementation of the natural disaster compensation scheme in 1982. The model benefits both from the work of Météo-France in the hydro-meteorological modeling of atmosphere-soil interactions and from the CCR's feedback on past events thanks to the characterization of claims. New meteorological criteria, hereafter homogeneous for the whole year and evaluated for each of the four seasons, have also been implemented this year together with a new methodology for generating stochastic events.*

# modèle sécheresse  
# dommages assurés  
# modélisation  
hydrométéorologique  
# catastrophes  
naturelles

## INTRODUCTION

Les épisodes cycliques d'assèchement et de réhydratation des premiers mètres du sol engendrent une sécheresse géotechnique, aussi nommée retrait gonflement des argiles (RGA). Elle est à distinguer de la sécheresse agricole et de la sécheresse hydrologique. Elle représente l'un des risques les plus coûteux et aussi l'un des plus difficiles à appréhender dans le cadre du régime d'indemnisation des catastrophes naturelles. La sécheresse RGA représente plus de

36 % de la sinistralité globale hors automobile sur la période 1982-2019 en France<sup>1</sup>. La position de CCR au sein du régime Cat Nat, oblige à renforcer le développement de son expertise dans le domaine des risques naturels et notamment pour la modélisation de la sécheresse RGA. Aujourd'hui, le développement d'un modèle physique de caractérisation des déplacements du sol au niveau des fondations relève encore du domaine de la recherche (cf. symposiums SEC 2008 &

2015, projets ARGIC 1 & 2). CCR a élaboré un modèle de simulation de l'impact des sécheresses, réelles ou fictives. Il est basé sur des indicateurs météorologiques (indice d'humidité des sols de Météo-France – SWI pour *Soil Wetness Index*), des indicateurs géologiques (cartes d'aléa RGA du BRGM) et des caractéristiques sur les polices et sinistres collectés par CCR auprès de ses cédantes. En 2019, de nouveaux critères de reconnaissance pour ce péril ont été mis en

place. Une phase importante d'évaluation de ces nouveaux critères a eu lieu et les travaux réalisés ont notamment permis d'intégrer la mise à jour du modèle de représentation des processus physiques régissant l'eau dans le sol (SIM2 pour Safran-Surfex-Modcou par Météo-France). Une approche commune à toutes les typologies de sécheresse, sur l'ensemble de l'année, a été proposée en s'assurant de l'équité du traitement des futures sécheresses.

## MÉTHODOLOGIE

### Principes généraux du modèle

Le modèle d'estimation de l'impact des sécheresses RGA repose sur une approche statistique. Pour un événement sécheresse donné, il s'agit tout d'abord d'estimer par régression, la probabilité qu'une commune formule une demande de reconnaissance Cat Nat au titre de la sécheresse. Cette probabilité est évaluée à la fois au regard de l'historique des demandes effectuées par les communes depuis 1989, date à laquelle le péril a été traité à part entière par la Commission Interministérielle Cat Nat, et à différents indicateurs traduisant l'intensité du phénomène sur diverses périodes de l'année<sup>2</sup>. Ces indicateurs peuvent être, par exemple, des moyennes sur certaines périodes de l'année ou des minimums absolus de l'humidité des sols à des périodes clés, telles que l'été. Par la suite, la probabilité qu'un sinistre survienne pour chaque police assurée et le taux de destruction en cas de sinistre sont évalués. À noter que les bâtis et leurs fondations ne réagissent pas tous de la même façon et les conditions locales (pente, orientation, altitude ou présence de végétation), n'ont pas la même influence sur les dommages.

Enfin, au-delà de l'évaluation de l'impact de la sécheresse pour un événement donné, le modèle dispose dans sa version dite

### Rapport à la normale du SWI uniforme décennal Cartes des moyennes trimestrielles par maille Safran

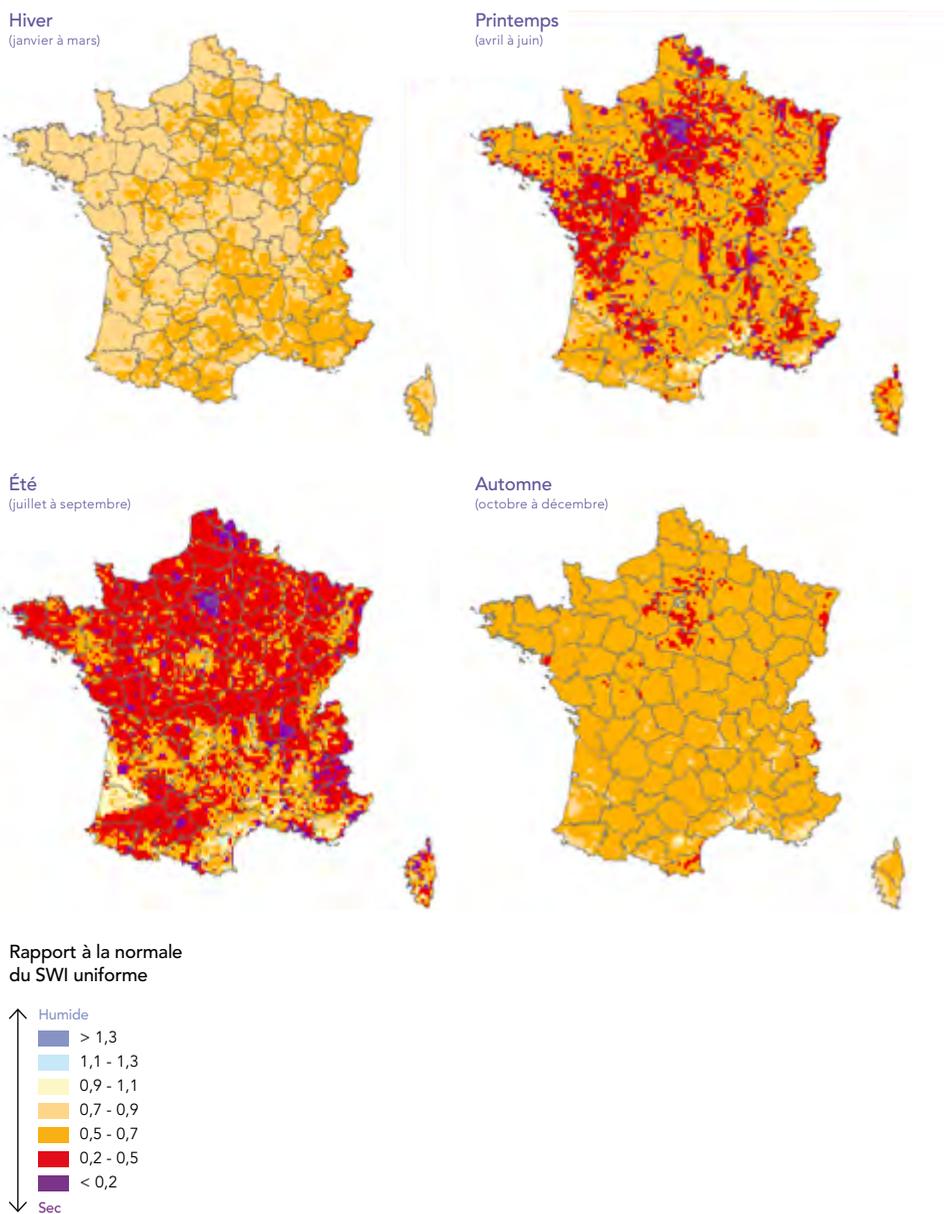


Figure 1 - Cartographie du rapport à la normale, par saison, du SWI uniforme décennal issu du générateur stochastique CCR pour 10 000 années fictives de sécheresse.

## Modéliser la sécheresse géotechnique

> probabiliste, d'un générateur stochastique de sécheresses physiquement plausibles mais encore non survenues. Dérivé des travaux réalisés lors d'une thèse de doctorat portée par CCR et l'Université de La Rochelle<sup>3</sup>, ce modèle permet de générer des événements stochastiques de sécheresses en intégrant l'historique d'humidité des sols. Il est aussi basé sur des corrélations spatio-temporelles pour tous les points du territoire métropolitain (Figure 1). Au final, le modèle génère un catalogue de  $N$  événements permettant d'estimer entre autres, les pertes annuelles moyennes ou les pertes sur de plus longues périodes de retour, de type centennales à l'échelle communale.

### Nouvelle méthodologie de génération du catalogue de sécheresses stochastiques

Le générateur stochastique de sécheresses génère un ensemble d'événements, pour l'année  $N$ , en prenant en compte des tendances, des saisonnalités et des corrélations spatio-temporelles observées sur le passé<sup>2</sup>. Celles-ci sont appliquées à la suite de l'historique des dernières valeurs connues de SWI uniforme pour l'année  $N-1$ . Ainsi, le SWI uniforme modélisé sera d'autant plus faible, traduisant une sécheresse importante, que les dernières décades connues le seront ; la réciproque étant vraie aussi. De fait, une variabilité importante des pertes annuelles moyennes et des pertes deux-centennales issues du générateur stochastique est observée selon les conditions d'initialisation du générateur. Rétrospectivement, l'écart entre les années simulées et les années réelles pouvait être dans certains cas important si des extrêmes d'humidité ou de sécheresse survenaient en fin de période automnale.

En 2019, afin de stabiliser la vision de la sécheresse, une nouvelle méthodologie

de génération d'un catalogue d'événements stochastiques a été implémentée dans le modèle. Le catalogue final de 10 000 événements fictifs, traduisant la vision actualisée du péril, est dorénavant construit en prenant aléatoirement chaque événement parmi 10 catalogues stochastiques dont l'année d'initialisation sur la base du SWI uniforme réel varie, chacun de ces « sous-catalogues » comprenant par ailleurs 10 000 événements. Différentes quantités peuvent être estimées telles que la perte annuelle moyenne ou les pertes selon plusieurs périodes de retour. Une cartographie du rapport à la normale, par saison, du SWI uniforme décennal issu du générateur stochastique CCR pour 10 000 années fictives de sécheresse est par exemple présentée en Figure 1. La tendance actuelle correspondrait à des printemps secs notamment dans un grand quart Nord-Est incluant l'Île-de-France et en vallée du Rhône ; l'occurrence de sécheresse automnale n'est pas exclue faisant écho à celle de 2018 par exemple.

### Mise à jour des critères de reconnaissance de l'état de catastrophe naturelle

Dans une volonté d'amélioration et de simplification des critères de reconnaissance de l'état de catastrophe naturelle, les membres de la Commission Interministérielle ont travaillé cette année sur l'évolution de ces critères.

#### I. Critère lié à la nature du sol

Les mouvements de terrain différentiels provoqués par les cycles de sécheresse et de réhydratation des sols sont à l'origine de désordres sur les bâtiments lorsque ces derniers sont implantés dans des sols dont la composition est sensible à ce phénomène et avec une quantité suffisante de certains types d'argiles.

Le premier critère mis en œuvre histori-

quement par la Commission consistait à vérifier la présence de sols sensibles au phénomène sur le territoire de la commune qui a déposé une demande de reconnaissance. Ce critère d'ordre quantitatif permettait de déterminer la prédisposition des sols superficiels d'une commune à être sensibles au phénomène. Ce critère évaluant la prédisposition au péril est conservé en l'état et est mis en œuvre de façon combinée avec un critère météorologique traduisant quant à lui le facteur déclenchant du phénomène.

#### II. Critères météorologiques

Auparavant, les critères météorologiques étaient au nombre de trois dont certains étaient subdivisés en sous-critères alternatifs ou cumulatifs. Ils visaient à caractériser le niveau d'humidité des sols superficiels sur plusieurs périodes d'une année.

Ces critères présentaient des disparités car le niveau d'humidité des sols était étudié sur trois périodes de durée inégale : sur l'année totale, au printemps (avril/mai/juin) et pendant l'été (juillet/août/septembre). De plus, les paramètres permettant de caractériser le niveau d'humidité des sols étaient différents pour chacune des périodes étudiées (niveau de réserve hydrique, période de référence, fréquence ou durée de retour du niveau d'humidité constaté).

Ainsi, les nouveaux critères ont été définis à l'aide des progrès mis en place dans la chaîne de modélisation hydrométéorologique réalisée par Météo-France (Figure 2). Le calcul des critères sécheresse s'appuie donc sur cette chaîne de modélisation, dite SIM (Safran-Surfex-Modcou). Elle est alimentée par les observations de surface issues des réseaux d'observations de Météo-France. La modélisation simule le contenu en eau des deux premiers mètres du sol en fonction de leur composition géologique, du type de végétation et de son évolution.

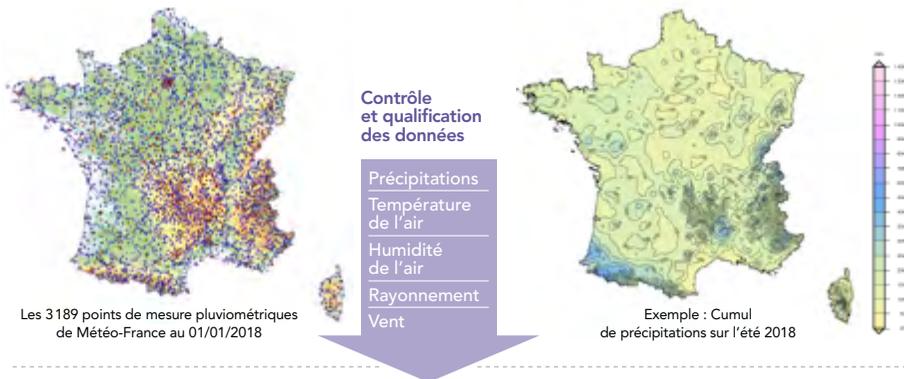


## LE PARTENAIRE

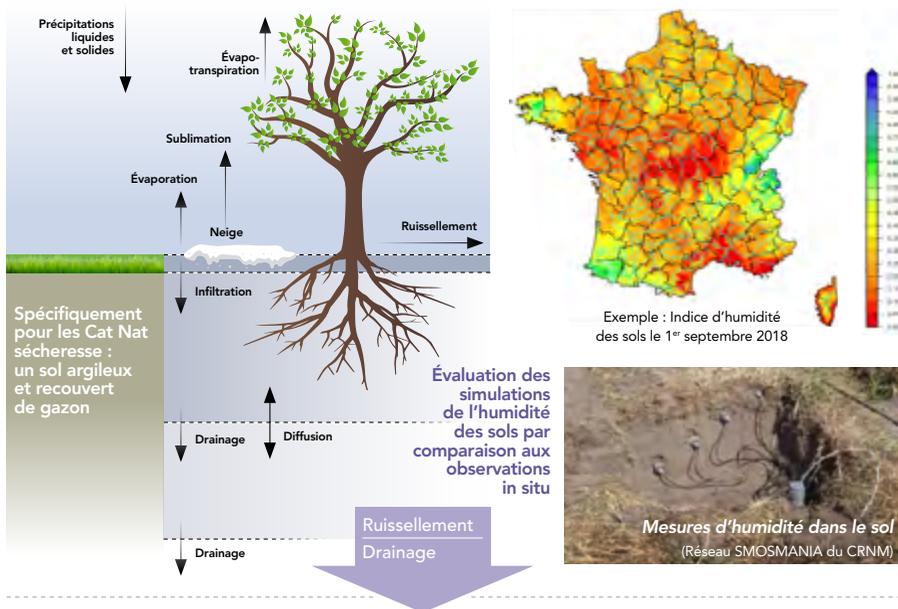
Météo-France en tant que service météorologique et climatologique national conduit des travaux, études et recherches sur le climat et son évolution future, notamment sur la sécheresse, et gère une base de données climatologique sur l'ensemble de la France. À ce titre Météo-France constitue une source d'information et d'expertise essentielle pour la bonne réalisation des missions de CCR. Ainsi depuis 2013 Météo-France et CCR entretiennent un partenariat renouvelé en 2019.

## Le modèle hydrométéorologique de Météo-France

### OBSERVATIONS MÉTÉOROLOGIQUES (dont précipitations)



### MODÈLE DE SURFACE : SIMULER LES ÉCHANGES SOL-ATMOSPHÈRE EN EAU ET ÉNERGIE



### MODÈLE HYDROLOGIQUE : SIMULER LE DÉBIT DES RIVIÈRES



Figure 2 - Principe de fonctionnement de la chaîne de modélisation hydrométéorologique SIM de Météo-France<sup>3</sup>

La nouvelle modélisation SIM permet une meilleure représentation des processus physiques régissant l'eau dans le sol<sup>4</sup>. La mise à jour du modèle numérique de terrain s'est traduite par la redéfinition de l'altitude de certaines mailles géographiques. Enfin, la prise en compte du rayonnement infrarouge incident a été améliorée.

## RÉSULTATS

La chaîne de modélisation hydrométéorologique a été améliorée, en complément de l'introduction de nouveaux critères. Ces modifications ont des effets sur le nombre de communes potentiellement éligibles à une reconnaissance catastrophe naturelle au titre de la sécheresse-RGA. Les critères proposés ont donc été appliqués sur les épisodes de sécheresse de la dernière décennie. Puis les mailles géographiques et les communes « virtuellement reconnues » avec ces nouveaux critères ont été comparées avec celles effectivement reconnues en utilisant les anciens critères.

Après ajustements, il a été décidé que dorénavant pour être reconnu en état de catastrophe naturelle au titre d'une saison donnée, le niveau d'humidité des sols superficiels constaté pour cette saison doit être le 1<sup>er</sup> ou le 2<sup>e</sup> plus faible depuis 50 ans. La période de calcul de référence pour déterminer si le rang 1 ou 2 est atteint, est constituée des 50 dernières années précédant l'épisode de sécheresse. Les reconnaissances se font par trimestre : chaque commune reconnue l'est pour 1, 2, 3 ou 4 trimestres d'une année, correspondant aux saisons, en fonction du contenu de sa demande qui est aussi analysée par trimestre. Enfin les données prises en compte pour calculer le rang sont les données par trimestre glissant, par exemple pour le trimestre hivernal

## Modéliser la sécheresse géotechnique

---

- > 2018, l'éligibilité est évaluée sur les trois trimestres glissants :
  - 1/ [novembre 2017, décembre 2017, janvier 2018]
  - 2/ [décembre 2017, janvier 2018, février 2018]
  - 3/ [janvier 2018, février 2018, mars 2018].

### CONCLUSION

La génération annuelle du catalogue CCR d'événements stochastiques sécheresse permet dorénavant d'incorporer plus de cas plausibles de sécheresses prenant en compte la variabilité annuelle observée sur les 10 dernières années. Ceci a pour effet d'améliorer la quantification des événements extrêmes tout en assurant, année après année, une vision moyenne stable qui reflétera mieux, à moyen terme, les tendances potentielles liées au changement climatique.

La mise en place des nouveaux critères a pour effet :

- d'utiliser les connaissances scientifiques les plus récentes sur l'aléa et de mobiliser les outils de modélisation hydrométéorologique les plus performants de Météo-France ;
- d'adopter les critères géotechniques et météorologiques scientifiquement les plus solides pour caractériser l'intensité d'un épisode de sécheresse-réhydratation des sols tout en s'assurant de leur caractère compréhensible ;
- de mieux caractériser les épisodes de sécheresse-réhydratation des sols sur les périodes automnale et hivernale.

Ces nouveaux critères permettent donc une diminution importante des délais d'instruction des demandes communales, du fait de l'adoption d'un critère météorologique qui n'exige plus la compilation de données techniques sur une année complète pour pouvoir être mis en œuvre. Au

global, le modèle d'estimation développé par CCR permet d'estimer la sinistralité à la charge du régime Cat Nat pour les sécheresses réelles comme celle de 2019 ou celles physiquement plausibles mais non encore survenues. Cette vision de l'exposition des territoires est à la fois partagée auprès des cédantes, des partenaires et des pouvoirs publics et permet aussi de répondre aux exigences réglementaires telles que Solvabilité 2./

### RÉFÉRENCES

1. Bilan des Cat Nat 1982 – 2019, CCR, Paris, France.
2. Quantin et al. 2015. Probabilistic Modeling of Drought Hazard within the French Natural Catastrophes Compensation Scheme, International Symposium – Shrink-Swell processes in soils – Climate and constructions, IFSTTAR, June 2015, France.
3. Ardon J. « Modélisation probabiliste de la dépendance spatiale et temporelle appliquée à l'étude du péril sécheresse dans le cadre du régime français d'indemnisation des catastrophes naturelles », Thèse de doctorat en Mathématiques, image et applications, sous la direction de Jean-François Dupuy et de Clément Dombry, Limoges et La Rochelle, 2014.
4. Decharme et al. 2013. Reconciling soil thermal and hydrological lower boundary conditions in land surface models. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 118(14). <https://doi.org/10.1002/jgrd.50631>
5. Habets et al. 2008. The Safran-Isba-Modcou hydrometeorological model applied over France, *Journal of Geophysical Research*, 113, D06113, doi:10.1029/2007JD008548, <http://www.agu.org/journals/jd/jd0806/2007JD008548/2007JD00548.pdf>

---

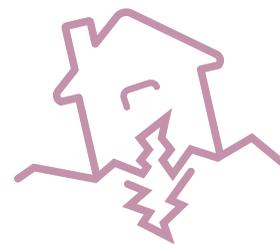
### CITATION

Tinard et al., Modéliser la sécheresse géotechnique. In *Rapport Scientifique CCR 2019* ; CCR, Paris, France, 2020, pp.28-32.

# RISQUES GÉOLOGIQUES



# Mesurer l'exposition aux séismes



Corentin Gouache<sup>1</sup>, Jean-Marc Montel<sup>2</sup>, François Bonneau<sup>1</sup>, Pierre Tinard<sup>3</sup>

(1) ASGA, Université de Lorraine, CNRS, GeoRessources (2) Université de Lorraine, CRPG/CNRS

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

## RÉSUMÉ

Afin de s'affranchir de l'historique restreint de données sismiques en France (métropole et Antilles), un générateur probabiliste de séismes fictifs crée, sur une période de temps donnée, des scénarios sismiques dans lesquels sont générés des séismes non encore survenus mais physiquement plausibles. Cette génération de séismes s'accompagne d'une meilleure estimation dans le calcul de l'aléa sismique (accélération maximale du sol) grâce à l'apport des simulations de propagation d'ondes sismiques.

## ABSTRACT

*In order to avoid the issue of the lack of large seismic recorded data in France (mainland and Lesser Antilles), a probabilistic earthquakes generator is built. Over a chosen period, this generator creates seismic scenarios that contain generated earthquakes on French territories. These earthquakes didn't happen in the past but are plausible. Finally, a better estimation of the seismic hazard (peak ground acceleration) is found thanks to simulations of waves propagation.*

# aléa sismique

# générateur

# probabiliste

# propagation d'ondes

# France

## INTRODUCTION

En France, les séismes sont peu fréquents et depuis la mise en place du régime Cat Nat en 1982 (1990 pour les Départements et Régions d'Outre-Mer), ils ne représentent qu'un pour cent de la sinistralité cumulée. Cependant des séismes dévastateurs ont déjà eu lieu par le passé aux Antilles comme en métropole. Par exemple ceux de Bâle (1356), Bagnères-de-Bigorre (1660), la Martinique (1839), la Guadeloupe (1843), Ligurie (1887) ou encore Lambesc (1909).

Parmi l'ensemble des données sismiques disponibles, les catalogues sismiques sont de loin les plus utilisés. Ces derniers regroupent tous les séismes instrumentaux, dont les secousses ont été enregistrées par le réseau de surveillance (depuis 1960) et/ou les séismes historiques dont les secousses ont été ressenties et témoignées par la population (avant 1960). La problématique est que la France métropolitaine et les Antilles françaises ont des

paradoxes différents concernant ces catalogues sismiques :

- Aux Antilles : les séismes majeurs et dévastateurs se produisent plus souvent qu'en métropole (périodes de retour plus faible) mais la profondeur temporelle d'observation des séismes est très faible (< 200 ans) ;

- En métropole : même si des données historiques existent et peuvent remonter jusqu'au XIV<sup>e</sup> siècle (≈ 700 ans de données), les périodes de retour des séismes dévastateurs (fortes magnitudes) sont très élevées et nécessitent donc des bases de données encore plus grandes.

## MÉTHODOLOGIE

Ainsi, l'idée est de créer, avec les données parfois limitées à disposition, un générateur probabiliste de séismes en métropole et sur le territoire antillais français. En uti-

lisant notamment, les incertitudes sur la magnitude (liée à l'énergie) des séismes passés, différents scénarios de sismicité sont générés numériquement sur ces territoires. Ces scénarios sont tous différents de la sismicité passée observée et tous uniques mais plausibles. Le terme probabiliste désigne le fait que tous les scénarios sismiques générés ont la même probabilité de se réaliser, même s'ils sont différents dans leur phénoménologie et leurs conséquences. De plus, en choisissant des périodes de génération élevées il est possible d'atteindre des magnitudes associées à des périodes de retour très élevées (> 1 000 ans). Ainsi, avec ces nouvelles bases de données fictives (Figure 1), il est possible d'estimer l'aléa sismique français plus aisément qu'avec les petites bases de données initiales.

Pour ce faire, une méthode de filtre<sup>1</sup> est appliquée sur les données initiales incomplètes afin de ne conserver qu'un

ensemble de données considéré comme exhaustif. Une fois filtrées, les données sont analysées grâce à la méthode des temps de latence<sup>2</sup>, c'est-à-dire le temps entre deux séismes successifs. À partir de ces temps de latence, la proportion de séismes indépendants est calculée. Cette proportion sert ensuite à estimer leurs fréquences. Ces dernières permettent enfin de générer des scénarios fictifs de séismes indépendants. Cependant, à cause du peu de données disponibles pour les séismes à fortes magnitudes, la justesse des proportions de séismes indépendants est faible pour ces derniers. Ainsi, une amélioration de la méthode des temps de latence a été mise en place afin d'apporter plus de fiabilité et de stabilité dans l'estimation des proportions de séismes indépendants<sup>3</sup>.

## RÉSULTATS

Les simulations ont été réalisées sur une période d'observation de 100 000 ans afin d'être sûr de générer les plus forts séismes. En raison des données initiales et des méthodes utilisées<sup>2,1</sup>, la magnitude minimale des séismes générés est de 5 sur le territoire antillais tandis qu'elle est de 5,5 pour la métropole. A noter qu'un des critères de reconnaissance Cat Nat est une magnitude supérieure ou égale à 5. En prenant en compte tous les scénarios sismiques simulés, la moyenne du nombre de séismes à magnitude supérieure ou égale à 5 est de 312 000 pour les Antilles ;

- 5 est de 312 000 pour les Antilles ;
- 5,5 est de 6 670 pour la métropole.

Il y aurait donc en moyenne 3 séismes de magnitude supérieure ou égale à 5 tous les ans aux Antilles. De la même manière, il y aurait en moyenne un séisme de magnitude supérieure ou égale à 5,5 tous les 15 ans en métropole.

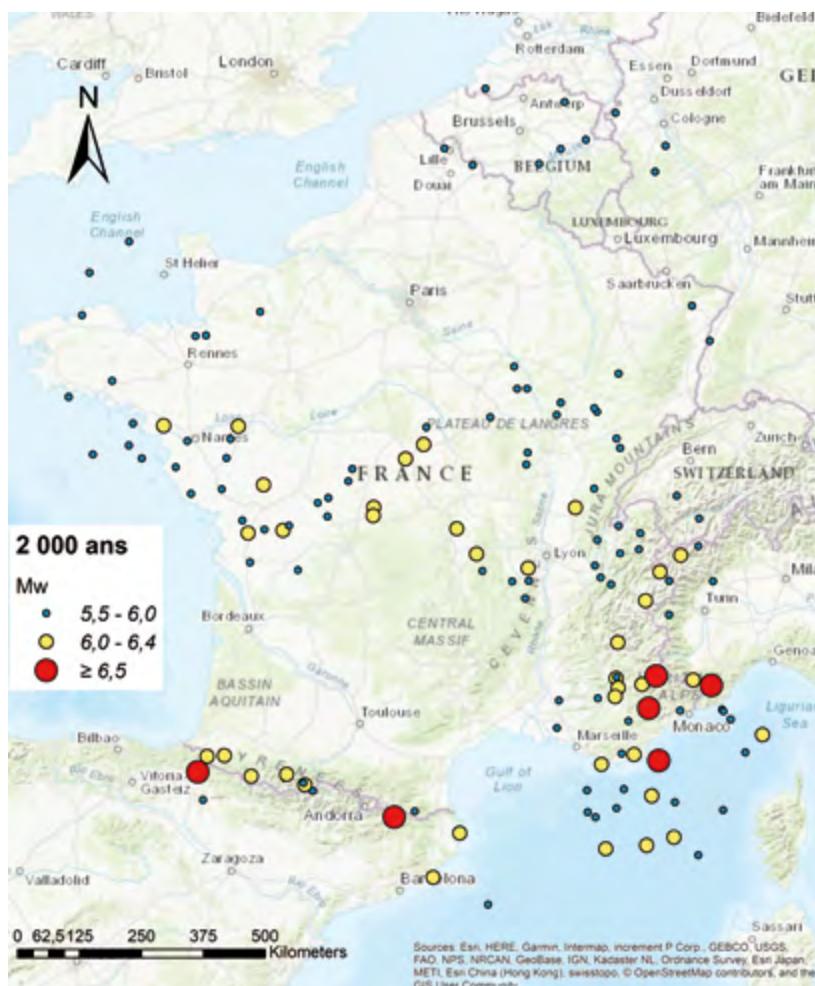


Figure 1 - Représentation de 2 000 années fictives de sismicité, parmi les 100 000 générées, pour la métropole. Seuls les séismes de magnitudes supérieures ou égales à 5,5 sont ici représentés.

# Mesurer l'exposition aux séismes

## > CONCLUSION

L'approche innovante présentée dans cet article repose sur l'application de la méthode des temps de latence et de son adaptation aux données sismiques de zones faiblement à moyennement sismiques, telles que la France métropolitaine. Cette approche permet d'éviter l'utilisation de certaines méthodes largement utilisées pour estimer l'aléa sismique mais qui introduisent des biais et incertitudes importants. Le générateur permet, quant à lui, de fournir une grande quantité de données sismiques plausibles par rapport aux données sismiques réelles. Par exemple, en métropole, ces dernières ne rassemblent que 57 séismes dont la magnitude est supérieure ou égale à 5,5 alors que sur une simulation de 100 000 ans le

générateur en propose en moyenne 6 670. Enfin, à partir des différents scénarios, il est nécessaire de calculer l'aléa sismique associé à chacun des séismes générés au sein de ces scénarios. L'aléa sismique correspond à l'accélération maximale du sol ( $m/s^2$ ) produite par chacun des séismes. Pour calculer cet aléa, des lois d'atténuation sont utilisées. Il s'agit d'équations prenant en compte différents paramètres comme la distance du point d'observation au séisme, la magnitude du séisme, le type de sol (rocher, sol mou, sol dur), la profondeur du séisme etc. (Figure 2 gauche). Ces lois sont facilement applicables à très grande échelle et rapides à calculer. Cependant il en existe une très grande quantité<sup>3</sup>. Ainsi, il n'est pas facile de faire un choix. De plus, ces lois sont physiquement assez simples et présentent quelques limites (Figure 2 centre).

C'est pourquoi les résultats de lois les plus applicables au territoire français (ex : calibrée avec des données italiennes pour la métropole) sont comparées avec les résultats de simulations de propagation d'ondes sismiques (Figure 2 droite<sup>4</sup>). Ces dernières sont physiquement plus réalistes car elles traduisent plus justement la propagation des ondes sismiques dans le sol (Figure 2 gauche). Cependant les simulations ne peuvent se faire à l'échelle nationale étant donné les contraintes de puissance de calcul. Ainsi ces résultats considérés comme références sont utilisés afin de calibrer les lois d'atténuation à échelle locale (30 x 30 x 30 km). Finalement des poids sont attribués à chacune des lois d'atténuation suivant la proximité de ses résultats avec ceux des simulations. Ce travail est en cours d'élaboration./

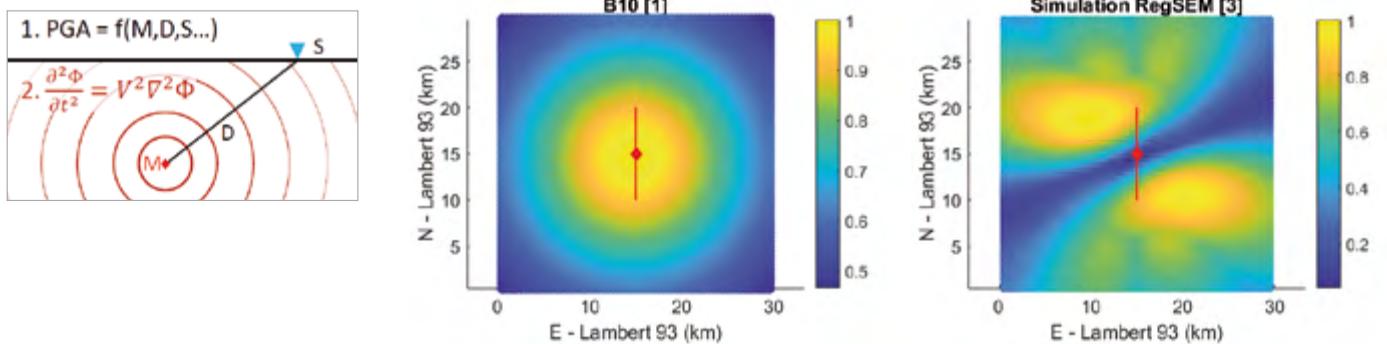


Figure 2 - Gauche : Il existe deux façons de calculer l'aléa sismique (accélération du sol) qu'un séisme (M) provoque à un point d'observation (S) en surface : les lois d'atténuation (1) et les simulations de propagation d'ondes sismiques (2).

Centre et droite : Comparaison de calcul d'aléa sismique via une loi d'atténuation (au centre<sup>5</sup>) et une simulation de propagation d'ondes sismiques (à droite<sup>4</sup>).



## LES PARTENAIRES

L'Association Scientifique pour la Géologie et ses Applications (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'École Nationale Supérieure de la Géologie Nancy au sein de l'Université de Lorraine.

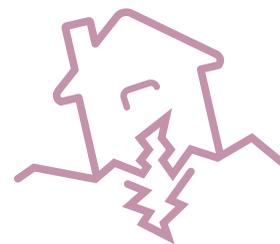
## RÉFÉRENCES

1. Wiemer S., et Wyss M. 2000. Minimum Magnitude of Completeness in Earthquake Catalogs: Examples from Alaska, the Western United States, and Japan. Bulletin of the Seismological Society of America 90, 859-869.
2. Hainzl et al. 2006. Estimating Background Activity Based on Interevent-Time Distribution. Bulletin of the Seismological Society of America 96, 313-320.
3. Douglas J. 2019. Ground motion prediction equations 1964-2019. 642, <http://www.gmpe.org.uk/gmpereport2014.html>
4. Cupillard et al. 2012. RegSEM: a versatile code based on the spectral element method to compute seismic wave propagation at the regional scale. Geophysical Journal International 188, 1203-1220.
5. Bindi et al. 2010. Horizontal and vertical ground motion prediction equations derived from the Italian Accelerometric Archive (ITACA). Bulletin of Earthquake Engineering 8, 1209-1230.

## CITATION

Gouache et al., Mesurer l'exposition aux séismes. In Rapport Scientifique CCR 2019 ; CCR, Paris, France, 2020, pp.34-37.

# Mesurer les conséquences des séismes



Julien Rey<sup>1</sup>, Pierre Tinard<sup>2</sup>, avec la collaboration de Abed Benaïchouche, Didier Bertil, Pierre Gehl et Caterina Negulescu<sup>1</sup>  
(1) DRP/RSV, BRGM, Orléans (France) (2) Département R&D Modélisation Cat & Agriculture, CCR

## RÉSUMÉ

Forts d'un partenariat pluriannuel lancé dès 2014, BRGM et CCR ont finalisé en 2019 un modèle d'évaluation de l'impact des séismes en France prenant en compte les spécificités françaises à la fois de l'aléa et de la vulnérabilité des bâtiments. Les effets de sites lithologiques et topographiques ont été évalués. La vulnérabilité des bâtiments selon les typologies locales de construction a été caractérisée aussi bien pour la métropole que pour l'Outre-mer pour le bâti courant comme pour les centres commerciaux ou les zones industrielles. Enfin, une évaluation de l'incertitude globale liée aux très nombreux paramètres du modèle est en cours de finalisation.

## ABSTRACT

*Based on a multi-year partnership initiated in 2014, BRGM and CCR finalized in 2019 a model for assessing the impact of earthquakes in France taking into account the French specificities of both the hazard and the vulnerability of buildings. The effects of lithological and topographic sites were evaluated. The vulnerability of the buildings according to the local typologies of construction were characterized as well for the French mainland and its overseas territories for dwellings, malls or the industrial zones. Finally, an assessment of the overall uncertainty related to the many parameters of the model is being finalized.*

# risque sismique  
# vulnérabilité  
# stochastique  
# PSHA  
# incertitudes

## INTRODUCTION

Dans le cadre de leur convention cadre établie depuis 2014, BRGM et CCR ont mis en place un partenariat de recherche collaborative visant à :

- améliorer l'expertise multi-périls des vulnérabilités et la transformation de ces vulnérabilités en approche économique ;
- établir une cartographie homogène et cohérente du risque sismique - vision probabiliste de l'exposition - en termes financiers par la caractérisation de l'aléa, de la vulnérabilité, de l'endommagement et des coûts assurés ;
- estimer la vulnérabilité physique et les pertes assurantielles pour les principales typologies de bâtiments : résidences, commerces, bâtiments agricoles et industriels.

Pour les séismes, cette approche se décline en la réalisation de scénarios de

dommages départementaux afin d'évaluer les conséquences financières sur les constructions pour une source sismique donnée. L'évaluation des conséquences financières porte sur le seul périmètre des biens assurés indemnisables dans le cadre du régime français d'indemnisation des catastrophes naturelles.

Un modèle complet allant de l'aléa jusqu'aux dommages, en passant par la vulnérabilité, a été développé au fil des années. En 2019, les développements ont permis de finaliser les travaux sur la totalité des territoires couverts par le régime Cat Nat (en dehors de Wallis-et-Futuna) pour toutes les typologies usuelles de biens assurés : logements, commerces, industries et bâtis en relation avec l'exploitation agricole.

Ce modèle aléa/vulnérabilité/dommages

est intégré dans un outil plus large incluant un générateur probabiliste de séismes développé dans le cadre d'une thèse de doctorat financée par CCR (cf : article thèse GOUACHE p.34) et un outil d'évaluation de la propagation des incertitudes tout au long de la chaîne de traitements.

## MÉTHODOLOGIE

Etant entendu que la partie aléa en entrée du modèle est alimentée par le générateur probabiliste développé par CCR, les travaux conjoints BRGM-CCR ont porté principalement en 2019 sur I) la caractérisation des effets de sites lithologiques et topographiques et II) la caractérisation de la vulnérabilité des bâtis ultramarins pour les territoires nouvellement inclus dans le

modèle en 2019. La méthodologie 2019 est cohérente avec celle employée précédemment pour les travaux BRGM-CCR portant sur d'autres territoires<sup>1,2,3,4</sup>.

La caractérisation des effets de sites lithologiques et topographiques est une étape importante de l'évaluation du risque sismique. Dans les études probabilistes de l'aléa sismique (PSHA), les accélérations du sol (PGA traduisant l'effet des ondes sismiques en surface) sont toujours exprimées pour un cas idéal dit « au rocher » afin de présenter une harmonisation à l'échelle du globe des études ; c'est notamment le cas de la carte d'aléa sismique réglementaire en France.

Pour autant, cet aléa « au rocher » ne saurait rendre compte de l'effet de la nature des sols et des configurations topographiques pouvant amener à amplifier localement les ondes sismiques. Par exemple, les ressauts topographiques ou les collines se comportent comme des guides ou des pièges d'ondes sismiques augmentant l'amplitude de celles-ci et les dommages potentiels aux bâtiments en surface. De la même façon, des sols meubles comme des bassins alluvionnaires faits de sédiments récents (au sens géologique) encore meubles et peu structurés peuvent amplifier les ondes sismiques et avoir les mêmes conséquences que les topographies marquées.

Dans la pratique, dans les cas les plus défavorables, des coefficients d'amplifications allant jusqu'à 3 sont estimés en France métropolitaine comme en Outre-mer.

Un autre point clé des études menées par le BRGM et CCR consiste en la caractérisation fine de la vulnérabilité des bâtiments et l'estimation du stock de bâtis français relevant des différentes classes de vulnérabilité estimées. L'évaluation des conséquences des séismes, inspirée des méthodes RISK-UE<sup>5</sup>, décrit la distribution probable des états d'endommagement

Type d'industrie	Typologie RISK-UE															
	W	S1	S2	S5	S4	S3	RC1	RC2	RC3.1	RC5	RC6	M4	M5	M3.4	MH	
IND1	3	29	13	2	2	15	0	14	7	1	0	4	2	8	0	
IND2	4	14	8	22	1	18	0	16	1	1	0	2	0	13	0	
IND3	1	18	8	3	3	20	0	22	0	2	0	2	0	13	0	
IND4	2	24	12	7	2	13	0	16	0	2	0	3	0	20	0	
IND5	0	21	5	5	0	3	0	35	2	10	2	15	0	2	0	
IND6	32	3	2	10	0	18	0	8	7	0	0	0	0	13	7	
Total par typologie	42	109	48	49	8	87	0	111	17	16	2	26	8	70	7	
Distribution selon les types (%)	7	18,2	8	8,2	1,3	14,5	0	18,5	2,8	2,7	0,3	4,3	1,3	11,7	1,2	
	7	50,2						24,3			18,5					

Tableau 1 : Exemple d'une répartition des classes de vulnérabilité (en colonne) selon la typologie d'activités industrielles IND1 à IND6 pour un territoire français exposé au risque sismique.

Type	Vi	Description
Maison individuelle type 1 à 4	0,447 à 0,527	Structure en bois
Petit collectif type 1 et 2	0,547	Structure en bois
Petit collectif type 3	0,722	Système poteaux/poutres avec murs de remplissage en maçonnerie non armé - Structures irrégulières (système porteur ou remplissage irréguliers ou niveau souple)
Petit collectif type 4	0,562	Système poteaux/poutres avec murs de remplissage en maçonnerie non armé - Structures irrégulières (système porteur ou remplissage irréguliers ou niveau souple)

Tableau 2 : Estimation de l'indice central de vulnérabilité (Vi) pour les bâtiments de Saint-Pierre-et-Miquelon ; la distribution des indices est évaluée par ailleurs.

Composante de la chaîne	Nb de paramètres	Description
Aléa et phénomène	9	Tirage du catalogue probabiliste CCR, profondeur, azimuth, pendage, dimensions de la faille, paramètres de la loi de Gutenberg-Richter, loi d'atténuation
Vulnérabilité et dommages	20	Facteurs d'amplification pour les classes de sol, loi de conversion intensité-accelération, sigma de la loi de conversion, indices de vulnérabilité pour les classes de bâtiments
Pertes	13	Taux de destruction pour les types de bâti considérés (maisons, appartements, immeubles, commerces, industries)

Tableau 3 : Description des 42 paramètres considérés dans le plan d'expérience, pour l'étude de la propagation des incertitudes.

## Mesurer les conséquences des séismes

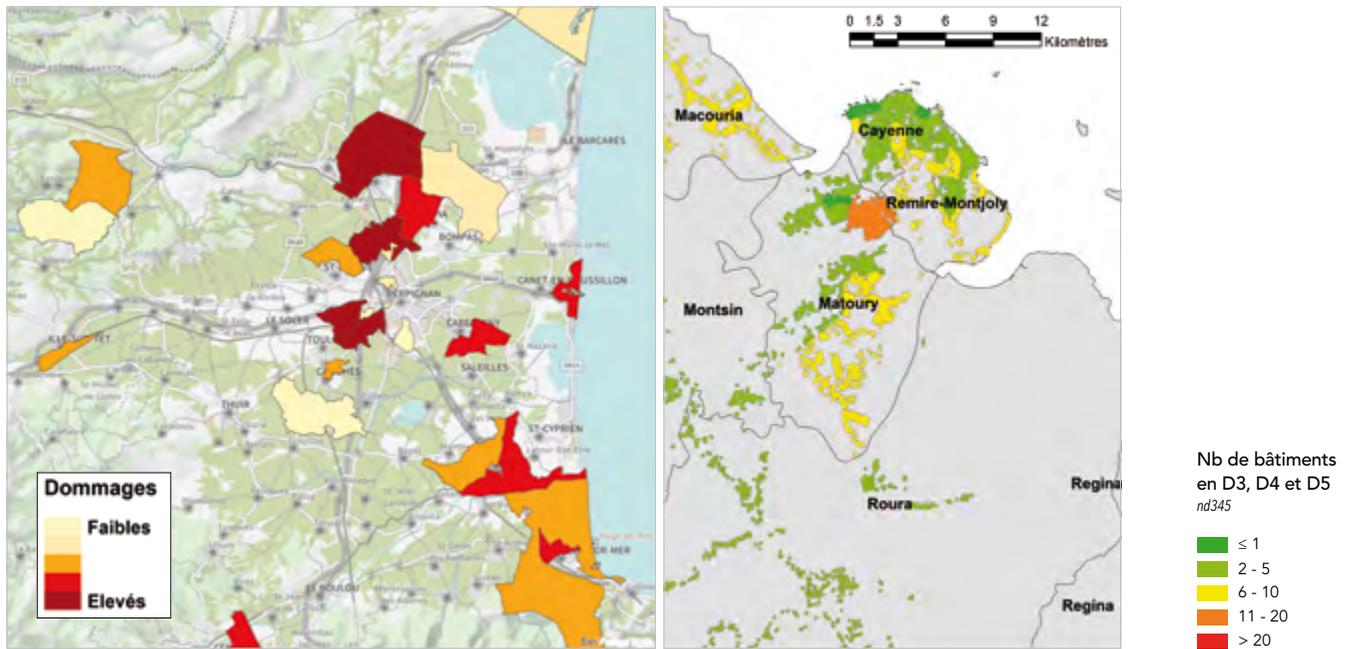


Figure 1 – À gauche, dommages pour les risques industriels autour de Perpignan. Estimation des pertes sous sollicitation sismique équivalente à l'aléa sismique réglementaire. À droite, dommages pour le bâti courant en Guyane.

> des bâtis sous sollicitation sismique donnée selon l'indice de vulnérabilité de ceux-ci.

De façon macroscopique, ce travail s'effectue tout d'abord en estimant pour chaque typologie de risques (maisons individuelles, logements collectifs, industries, etc.) la répartition du stock selon les différentes classes de vulnérabilité (Tableau 1) puis en attribuant à chacune de ces classes un intervalle plausible d'indices de vulnérabilité (Tableau 2) sur la base des connaissances en ingénierie structurelle des bâtiments.

Enfin, concernant la propagation des incertitudes le long de la chaîne de traitement, un outil spécifique a été développé couplant le générateur probabiliste CCR d'événements sismiques, le module « Armagedom batch » du BRGM

pour l'évaluation des dommages<sup>6,7</sup>, et le module de conversion dommages/coûts de CCR. Ainsi, 42 variables continues ou catégorielles sont présentes dans les différentes composantes du modèle. Un plan d'expérience de 1 million de lignes et 42 colonnes a été généré où, pour chacune des 42 millions d'entrée, une valeur aléatoire a été estimée avec un échantillonnage par hypercube latin. L'idée est de jouer l'ensemble de la chaîne de traitements en utilisant la variabilité permise pour chacun des 42 paramètres du modèle (Tableau 3) et ainsi d'estimer à la fois le poids de chaque paramètre dans l'incertitude globale et de proposer une loi traduisant l'incertitude globale du modèle. Sur la base de cette approche, une estimation des indices de Sobol appliquée à l'ensemble des

pertes calculées (à l'échelle du territoire du métropolitain ou d'une zone urbaine spécifique) permettrait de quantifier le poids relatif de l'incertitude liée à chacun des paramètres considérés. A ce stade, d'importants développements méthodologiques ont été réalisés et l'évaluation est effectuée pour les composantes aléas, vulnérabilité et dommages. Les incertitudes liées à l'estimation des coûts seront intégrées prochainement et l'ensemble des travaux fera l'objet de communications en 2020.

## RÉSULTATS

Les résultats des différents scénarios ont été présentés dans le cadre de différents congrès nationaux et inter-

## LE PARTENAIRE

Le Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM) est un établissement public à caractère industriel et commercial dont l'objectif est de comprendre les phénomènes géologiques et les risques associés dans un cadre de soutien de la politique publique de réduction et de maîtrise des risques. Le BRGM est labellisé Institut Carnot depuis 2011 saluant l'excellence des travaux de recherche menés en partenariat avec des acteurs socio-économiques, principalement des entreprises, en réponse à leurs besoins dont ceux de CCR.

nationaux en 2019 dont les actes sont accessibles en ligne (AFPS Strasbourg septembre 2019 et IDRIM Nice octobre 2019). A titre illustratif, des résultats sont présentés pour l'évaluation des dommages sur le bâti courant, à vocation résidentiel, pour un territoire ultramarin et des risques industriels dans les Pyrénées-Orientales (Figure 1), tous deux sous sollicitation sismique liée à l'aléa sismique réglementaire et après application d'effets de sites lithologiques et topographies.

Ces résultats individuels ne sont que l'illustration de deux cas d'usage. Au global les travaux finalisés permettent dorénavant d'estimer l'impact des séismes en tout point du territoire français relevant du régime d'indemnisation des catastrophes naturelles hors Wallis-et-Futuna.

Le modèle est notamment utilisé pour évaluer les conséquences de la crise sismique en cours depuis mi-2018 à Mayotte ou pour le récent séisme du Teil en Ardèche le 11 novembre 2019.

## CONCLUSION

Si la caractérisation de la vulnérabilité des bâtiments, des effets de sites lithologiques et topographiques sont désormais terminés et permettent d'estimer les coûts liés à tout séisme touchant le territoire français comme ultramarin, la propagation des incertitudes et leur quantification dans l'estimation globale de l'impact d'un séisme devraient être finalisées durant l'année 2020.

Des études plus détaillées sur certains territoires plus exposés, l'intégration de nouvelles données scientifiques acquises lors de différentes missions ou une entrée en résolution sur le risque industriel en zone sismique sont aussi envisagées. /

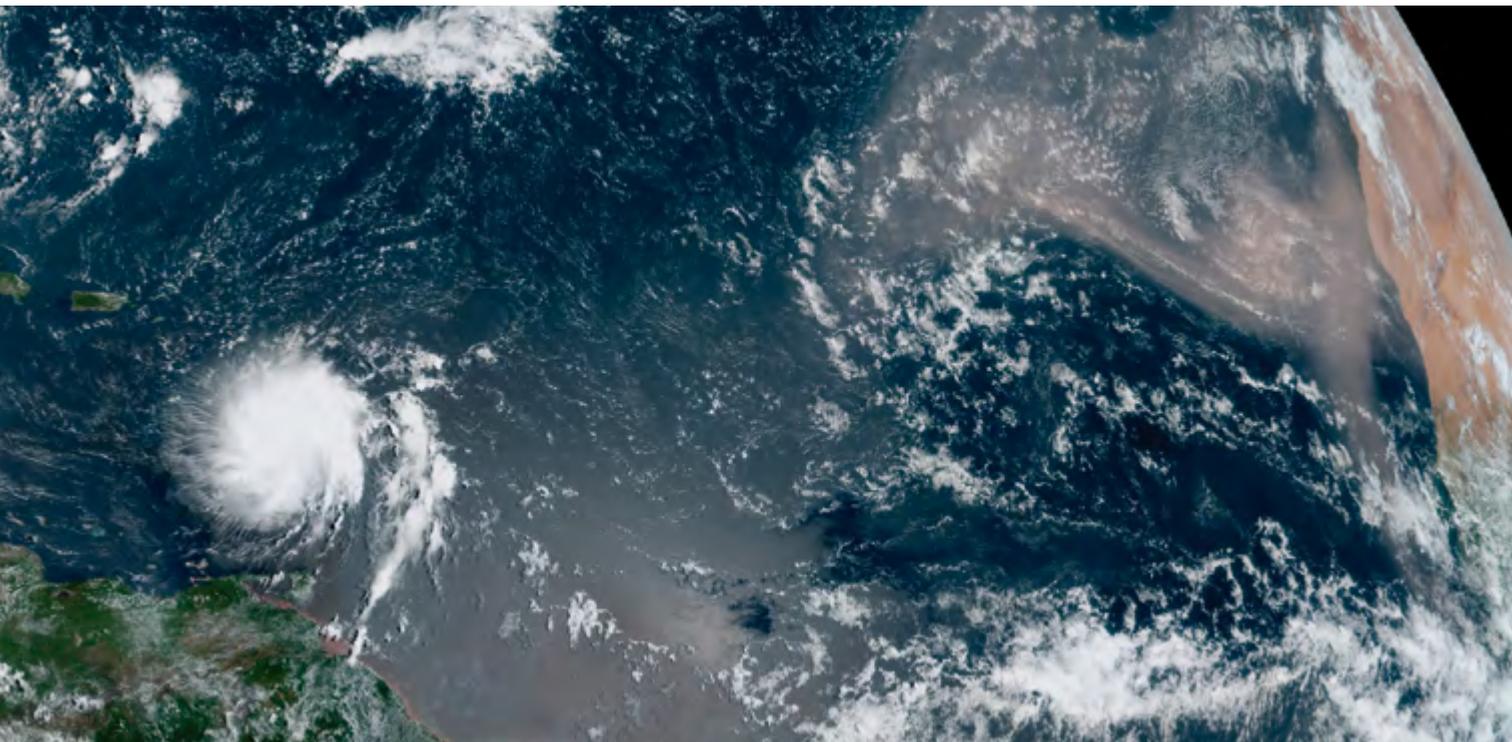
## RÉFÉRENCES

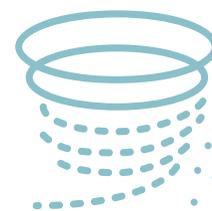
1. Rey J. (BRGM), Tinard P. (CCR) avec la collaboration de Abad J., Bertil D., Monfort-Climent D. et Taillefer N. 2015 – Partenariat CCR-BRGM 2014-2019. Travaux menés en 2015 dans le cadre du programme commun sur le risque sismique. Rapport BRGM/RP-65372-FR, 20 p., 9 fig., 1 tabl.
2. Rey J. (BRGM) et Tinard P. (CCR) avec la collaboration de Abad J., Bertil D., Monfort-Climent D. et Taillefer N. 2015 – Partenariat CCR-BRGM 2014-2019. Travaux menés en 2014 dans le cadre du programme commun sur le risque sismique. Rapport BRGM/RP-64454-FR, 18 p., 6 fig.
3. Rey J. (BRGM), Tinard P. (CCR) avec la collaboration de Abad J., Bertil D., Imtiaz A., Monfort-Climent D. et Taillefer N. 2016 – Partenariat CCR-BRGM 2014-2019. Travaux menés en 2016 dans le cadre du programme commun sur le risque sismique. Rapport BRGM/RP-66473-FR, 25 p., 11 fig., 1 tabl.
4. Rey J. (BRGM), Tinard P. (CCR) avec la collaboration de Abad J., Imtiaz A., Monfort-Climent D. 2018 – Partenariat CCR-BRGM 2014-2019. Travaux menés en 2017 dans le cadre du programme commun sur le risque sismique. Rapport BRGM/RP-68082-FR, 25 p., 9 fig.
5. RISK-UE (2003): RISK-UE WP4 Handbook. Vulnerability of current buildings - an advanced approach to earthquake risk scenarios with applications to different European towns. Zoran V. Milutinovic & Goran S. Trendafiloski, September, 2003.
6. Sedan et al. 2013. Armageddon—a tool for seismic risk assessment illustrated with applications. *Journal of earthquake engineering*, 17(2), 253-281.
7. Benaïchouche et al. 2018. Seismic Vulnerability Assessment from Earthquake Damages Historical Data Using Constrained Optimization Technique. *Journal of Geoscience and Environment Protection*, 6(02), 89.

## CITATION

Rey et al., Mesurer les conséquences des séismes. In Rapport Scientifique CCR 2019 ; CCR, Paris, France, 2020, pp.38-41.

# CHANGEMENT CLIMATIQUE





# Modéliser le changement climatique dans les territoires d'Outre-mer

David Moncoulon<sup>1</sup>, Martine Veysseire<sup>2</sup>, Yann Amice<sup>3</sup>, Gilles André<sup>3</sup>, Blandine Lhévéder<sup>3</sup>

(1) Département R&D Modélisation Cat & Agriculture, CCR (2) Direction des Services Météorologiques/Conseil et Services/Data science et Consultance, Météo-France (3) RiskWeatherTech

## RÉSUMÉ

Après une première étude sur la modélisation des conséquences du changement climatique sur le coût des catastrophes naturelles en France à horizon 2050, Météo-France et CCR ont travaillé en 2019 sur l'évolution du risque cyclonique en Outre-mer à horizon 2050. Ces travaux scientifiques participent à l'amélioration de la connaissance de l'exposition des territoires ultramarins à ce risque, en cartographiant les zones exposées aux périls consécutifs aux cyclones. Cette étude peut être utilisée pour mettre en place des moyens de prévention adaptés aux enjeux locaux.

## ABSTRACT

*After an initial study on the modelling of consequences of climate change on the cost of natural disasters in France by 2050, Météo-France and CCR worked in 2019 on the evolution of cyclonic risk in overseas territories by 2050. These scientific works are helping to improve knowledge of the exposure of overseas territories to this risk by mapping the areas exposed to perils due to cyclones. This study can be used to set up prevention measures adapted to local issues.*

# cyclones  
# outre-mer  
# changement climatique  
# dommages assurés  
# inondations  
# vents cycloniques  
# submersion marine  
# prévention des risques

## INTRODUCTION

Les territoires ultramarins sont soumis aux aléas climatiques imprévisibles et destructeurs que sont les cyclones tropicaux. L'histoire de ces îles et de leur activité économique doit se lire à la lumière de ces événements aux conséquences parfois catastrophiques.

En s'intéressant à l'histoire de ces territoires, il est possible de reconstituer une chronologie des événements marquants, à partir de la description de leurs conséquences, dans les carnets de bords des navires ou encore dans les journaux des anciens gouverneurs<sup>1</sup>. Ce regard vers le passé montre la régularité de la survenance de ces événements et le caractère cyclique des périodes de forte intensité. Après plusieurs décennies qualifiées de calmes – aucun événement majeur, c'est-à-dire de cyclones de catégories 4 ou 5, n'a affecté les territoires ultramarins de-

puis Hugo en 1989 – deux ouragans de catégorie 5, Irma et Maria ont traversé les Antilles en septembre 2017. Le premier, Irma, a traversé les petites Antilles du Nord ravageant Saint-Barthélemy et Saint-Martin, et engendrant des dommages assurés estimés à ce jour à plus de 2 MDE (les dommages économiques dans leur ensemble ne faisant pas l'objet à ce jour d'une évaluation définitive). Le second, Maria, compte tenu de sa trajectoire a causé des dommages beaucoup moins élevés en dehors du sud de la Guadeloupe et du nord de la Martinique, affectés par des précipitations très intenses. Les dommages consécutifs à l'action des vents cycloniques sont pris en charge depuis la Loi d'Orientation sur l'Outre-mer du 13 décembre 2000 par le régime français d'indemnisation des catastrophes naturelles, s'ils dépassent le seuil

de 145 km/h en moyenne ou 210 km/h de vitesse maximale en rafale.

Ces catastrophes successives en une seule saison cyclonique, ont rappelé l'exposition de ces territoires. De nombreuses questions ont été soulevées : à quelle fréquence se produisent de tels événements ? Quelles auraient été leurs conséquences s'ils avaient traversé des territoires comme la Guadeloupe, la Martinique, voire La Réunion ? Leur nombre va-t-il augmenter avec le changement climatique ? Est-ce que la prévention peut permettre d'y faire face ?

Pour répondre à ces questions, CCR, Météo-France et RiskWeatherTech<sup>2,3</sup> se sont associés pour modéliser les conséquences du changement climatique sur l'évolution des dommages assurés en Outre-mer. La chaîne de modélisation débute à Météo-France par l'utilisation du modèle

## Modéliser le changement climatique dans les territoires d’Outre-mer

> ARPEGE-Climat - un modèle de prévision et d’évolution du climat à l’échelle mondiale et du modèle régional ALADIN-Climat, puis se poursuit chez RiskWeather-Tech par une descente d’échelle utilisant le modèle WRF et se finalise chez CCR, par l’évaluation des dommages.

Les travaux reposent sur le scénario le plus pessimiste du GIEC, le Representative Concentration Pathway (RCP) 8.5. L’intérêt de cette étude réside dans le caractère multi-périls des cyclones, qui engendrent trois types d’aléas : vents violents, pluies intenses générant des crues éclair et des phénomènes de ruissellement et des submersions marines associées aux vagues déferlantes et à la surcote océanique. Les résultats de ces travaux fournissent une base scientifique solide pour guider les décisions politiques en faveur de la prévention et de l’adaptation au changement climatique.

### MÉTHODOLOGIE

Un cyclone, c’est-à-dire une dépression tropicale, se forme dans des conditions thermiques spécifiques qui sont une température de l’eau aux alentours de 28-29°C dans les soixante premiers mètres. Ces conditions se produisent généralement à la fin de l’été, qui est de juin à octobre pour les Antilles et de novembre à avril pour La Réunion. Le caractère rare de ces phénomènes nécessite un regard sur une longue durée historique afin d’estimer la période de retour des cyclones. Néanmoins, sur les zones ultramarines, la faible profondeur historique des données de précipitations et de vitesses de vent mesurées aux stations météorologiques ne permet pas de caractériser les cyclones extrêmes. En faisant l’hypothèse d’un climat stable sur les 400 dernières années, il est possible d’estimer la période de retour

d’un cyclone selon sa puissance. Celle-ci est notée par l’échelle de Saffir-Simpson, créée en 1970 dans le but de catégoriser les événements selon leurs conséquences et la force des vents<sup>4</sup>. Pour estimer l’évolution des durées de retour des événements de rafales de vent supérieures à 22 m/s, un autre jeu de simulation a été exploité : celui de CORDEX-CAM (Central America). Les fréquences ont ensuite été modifiées en fonction des conclusions de l’étude CORDEX <sup>(1)</sup> pour déterminer l’évolution des rafales cycloniques entre les périodes [1980-2005] et [2035-2065].

Actuellement, le lien entre le changement climatique et la formation des cyclones est mal connu au sein de la communauté scientifique. Les hypothèses peuvent être parfois contradictoires concernant l’effet de la température de l’eau, du taux de CO<sub>2</sub> et de l’humidité de l’air dans la moyenne atmosphère<sup>5</sup>. La méthodologie appliquée dans cette étude repose sur le modèle numérique global ARPEGE-Climat de Météo-France pour produire des simulations d’occurrence de trajectoires cycloniques sur trois catalogues de 400 années fictives. Parmi les années simulées, un détecteur de cyclones « tracker », permet de repérer les dépressions tropicales et de suivre leur déplacement dans les résultats d’ARPEGE-Climat.

Une fois les événements détectés, les plus intéressants sont sélectionnés, c’est-à-dire ceux qui peuvent affecter les îles antillaises ou La Réunion, et une modélisation plus fine à petite échelle est réalisée. Elle s’appuie sur les modèles ALADIN (Météo-France) et WRF (RiskWeatherTech). Elle est nécessaire pour prendre en compte le relief des îles qui affecte à la fois les vents violents mais également les précipitations.

(1) « Coordinated Regional Downscaling Experiment » coordonné par le Programme Mondial de Recherche sur le Climat.

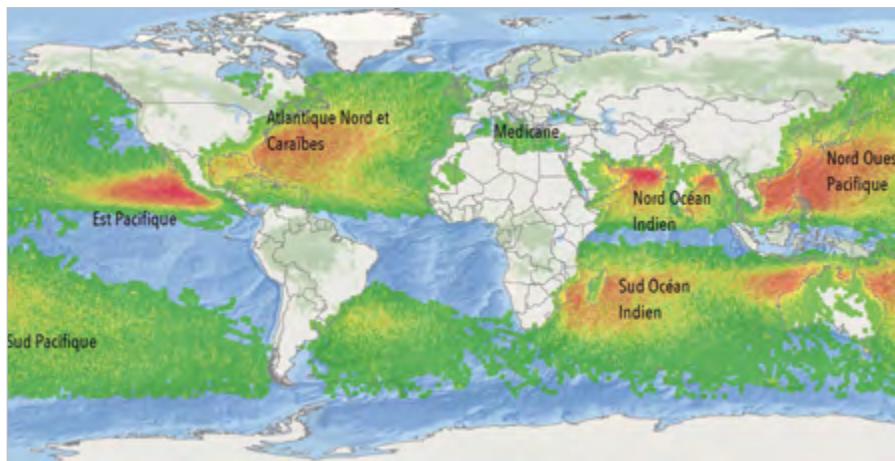


## LES PARTENAIRES

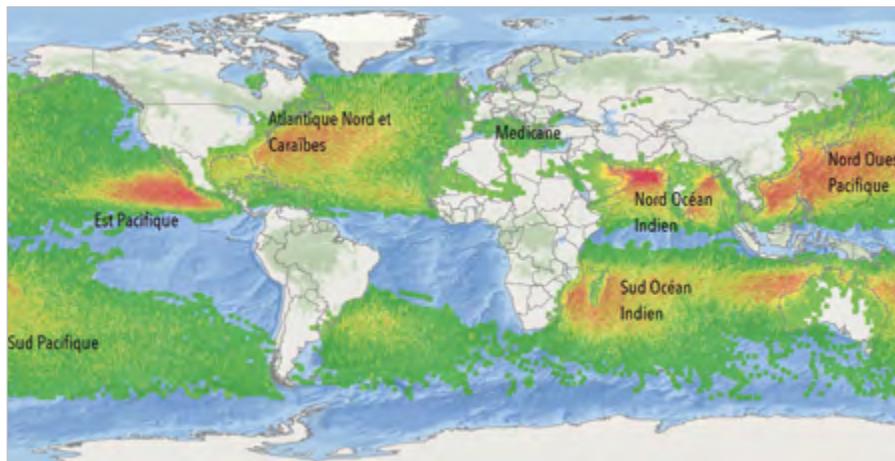
Météo-France en tant que service météorologique et climatologique national conduit des travaux, études et recherches sur le climat et son évolution future, via le développement de deux modèles mondiaux ARPEGE et ALADIN-Climat. Depuis 2013 Météo-France et CCR entretiennent un partenariat renouvelé en 2019.

RiskWeatherTech est une société spécialisée en modélisation des risques climatiques et a utilisé le modèle WRF pour la modélisation à fine échelle ainsi que les données CORDEX pour l'étude des fréquences de cyclones.

### Modélisation climatique aujourd'hui



### Horizon 2050



Nombre de cyclones par maille de 10 km

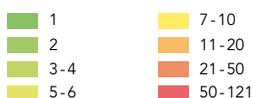


Figure 1 - Comparaison des trajectoires de cyclones entre les différents scénarios (source : simulations ARPEGE-Climat Météo-France : 400 années de simulation à climat constant).

Ces premières étapes effectuées, les modèles d'aléa et de dommages CCR sont appliqués. Ils lisent en entrée les données d'ALADIN ou WRF (précipitations horaires, vents en rafale ou pression atmosphérique) et calculent les zones inondées, submergées par la mer ou touchées par les vents violents pour chaque cyclone. Ce qui constitue le coût global assuré d'un cyclone. CCR a donc simulé une trentaine d'événements extrêmes parmi ceux touchant les îles.

## RÉSULTATS

Concernant les trajectoires cycloniques, elles peuvent être comparées entre les différents scénarios (Figure 1). Au total à climat actuel 31 872 cyclones sont simulés contre 26 714 cyclones à climat 2050 RCP 8.5. La comparaison des deux cartes ci-contre met notamment en évidence la diminution du nombre de cyclones dans la zone Caraïbes et un déplacement des trajectoires vers le Nord à horizon 2050. Quant aux simulations CORDEX, les résultats sont très divergents selon les modèles. Sur la Guadeloupe, tous les modèles CORDEX-CAM mettent en évidence une augmentation de fréquence des événements comprise entre + 17 % et + 68 %. Sur la Martinique et La Réunion, les résultats sont plus contrastés avec une évolution comprise entre - 35 % et + 51 % sur la Martinique et - 18 % à + 26 % sur La Réunion. Les résultats de cette étude sont en cohérence avec la synthèse des travaux du GIEC<sup>6</sup> indiquant une diminution globale du nombre de systèmes cycloniques (- 6 % à - 34 %) et une augmentation des cyclones extrêmes (catégories 4 et 5) et des pluies associées. En effet, l'eau de la mer constituant le carburant des cyclones sera plus chaude plus au nord de l'Atlantique Nord et plus au sud de l'Océan

## Modéliser le changement climatique dans les territoires d'Outre-mer

> Indien, ce qui permettra à ces phénomènes d'effectuer des trajectoires plus longues et de se renforcer. En termes d'exposition de l'Outre-mer, une analyse a été réalisée en associant la fréquence de survenance d'extrêmes et les dommages assurés sur les périls consécutifs aux cyclones. L'exposition des territoires ultramarins est démontrée et était donc largement sous-estimée jusqu'à présent dans les modèles de dommages existants. Ainsi, le coût moyen des cyclones de catégorie 5 est estimé à 6,8 MD€ en Guadeloupe (avec des extrêmes pouvant atteindre 19,1 MD€), à 4,9 MD€ en Martinique (jusqu'à 18 MD€) et à 5,2 MD€ à La Réunion (jusqu'à 21,9 MD€). À horizon 2050, les résultats montrent que la sinistralité augmenterait de 20 % sur l'Outre-mer du fait de l'accroissement de la fréquence moyenne des cyclones (selon CORDEX) et de la hausse du niveau de la mer. Aujourd'hui, la fréquence de survenance d'un événement de catégorie 5 est proche d'une fréquence centennale pour ces îles. Il est ainsi possible de faire le parallèle avec un événement de type d'une crue majeure de la Seine à Paris qui pourrait coûter entre 8,8 et 23,9 MD€<sup>7</sup> de dommages directs (hors pertes d'exploitation) selon nos modélisations. Au regard des coûts moyens et maximums simulés, un cyclone de catégorie 5 sur les Outre-mer aurait donc un impact financier d'une ampleur comparable. La survenance d'un événement de ce type, en particulier sur la Guadeloupe, ferait donc peser un risque plus important sur ces territoires.

### CONCLUSION

Cette étude conjointe de CCR, Météo-France et RiskWeatherTech met en évidence les conséquences des phénomènes cycloniques extrêmes et évalue à sa juste mesure la vulnérabilité des territoires qui y sont exposés. Elle permet de mieux cerner l'effet du changement climatique sur ces événements, en distinguant l'impact du changement climatique sur l'intensité de ces événements et le caractère aléatoire de leurs trajectoires. Concernant les cyclones de catégories 4 et 5, il est important de raisonner par bassin cyclonique, les évolutions étant très différentes selon le contexte climatologique local. La modélisation des impacts du vent, des submersions marines et des inondations à échelle fine sur les Antilles et La Réunion permet de disposer d'une cartographie des zones exposées aux événements extrêmes (à climat actuel et à climat 2050). Ce zonage peut être utilisé pour mettre en œuvre des moyens de prévention adaptés à une échelle locale en prenant en compte l'ensemble des périls associés à la survenance d'un cyclone./

### RÉFÉRENCES

1. Desarthe J. Moncoulon D. Quatre siècles de cyclones tropicaux dans les départements français d'Outre-mer. La Météorologie 2017, 52.
2. Moncoulon D., Desarthe J., Naulin J-P., Onfroy T., Tinard P., Wang Z-X., Hajji C., Veysseire M., Dequé M., and Régimbeau F. 2018. « Conséquences du changement climatique sur le coût des catastrophes naturelles en France à l'horizon 2050. » Paris : CCR & Météo-France.
3. CCR. 2015. Modélisation de l'impact du changement climatique sur les dommages assurés dans le cadre du régime Catastrophes Naturelles; CCR, Paris, 2015.
4. Dr. Simpson R. The Saffir/Simpson Hurricane Scale: An interview with Dr. Robert Simpson by Debi Iacovelli 1991.
5. Ocean-Climate, Cyclones et changements climatiques, <https://ocean-climate.org/?p=4829>
6. Pörtner et al. 2019. Summary for Policymakers. In IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate; IPCC, 2019; p. 1170.
7. Bilan des Cat Nat 1982 – 2019, CCR, Paris, France

### CITATION

Moncoulon et al., Modéliser le changement climatique dans les territoires d'Outre-mer. In Rapport Scientifique CCR 2019 ; CCR, Paris, France, 2020, pp. 43-46.



# Modéliser les pertes agricoles à horizon 2050

Dorothee Kapsambelis<sup>1</sup>, David Moncoulon<sup>2</sup>, Jean Cordier<sup>1</sup>, Martine Veysseire<sup>3</sup>

(1) Agrocampus Ouest, Economie et Gestion, SMART-LERECO (2) Département R&D Modélisation Cat & Agriculture, CCR

(3) Direction des Services Météorologiques/Conseil et Services/Data science et Consultance, Météo-France

## RÉSUMÉ

Les événements extrêmes de sécheresses (2003, 2011, 2018) et d'excès d'eau (2001, 2016) ont causé de fortes pertes de rendements sur les productions agricoles en France métropolitaine. L'objectif de cet article est de développer un modèle liant un indice météorologique aux pertes de rendements avec un focus sur ces événements extrêmes. Pour ce faire, un nouvel indice a été créé, le DOWKI (Drought and Overwhelmed Key Indicator) basé sur le calcul du bilan hydrique, calculé à l'échelle départementale et corrélé aux rendements. Un modèle stochastique permet d'estimer la fréquence et l'intensité des pertes de productions dues aux sécheresses et excès d'eau extrêmes.

## ABSTRACT

*Extreme climatic events like drought (2003, 2011, 2018) and excess of water (2001, 2016) severely impact crop yield in metropolitan France. Therefore, the objective of this paper is to develop a model that links one meteorological index to crop yield losses with focus on extreme events. A new index, DOWKI (Drought and Overwhelmed Key Indicator) based on a water balance, on departmental scale, and correlated to crop yield losses has been developed. Stochastic simulations of the DOWKI are used to estimate crop yield losses frequency and intensity due to extreme drought and excess of water.*

# événements extrêmes

# agriculture

# modélisation

# changement climatique

# pertes de récoltes

## INTRODUCTION

Les événements climatiques extrêmes ont des conséquences importantes sur les rendements des cultures agricoles<sup>1</sup>. En France, la sécheresse de 2003 a engendré des pertes de récoltes correspondant à une baisse de 20 % du rendement attendu pour les grandes cultures, 25 % à 30 % pour les fruits et plus de 50 % pour les fourrages<sup>2,3</sup>. Ces événements climatiques extrêmes se répètent et en 2018, une sécheresse importante a causé de fortes pertes de production sur les prairies, notamment dans le Nord-Est de la France. D'autres types d'événements extrêmes impactent les productions végétales comme les précipitations exceptionnelles de mai-juin 2016 dans la moi-

tié nord de la France qui ont causé des baisses de rendements estimées à plus de 50 %. Dans un contexte de dérèglement climatique, il est important d'accroître les connaissances sur l'exposition aux risques des principales cultures en vue d'adapter les politiques publiques de gestion des risques et de prévention. Dans cette optique, le Ministre de l'Agriculture et de l'Alimentation a lancé en septembre dernier une consultation élargie sur la gestion des risques climatiques, à laquelle CCR participe pour apporter des éléments de réponse sur l'exposition des cultures. Un projet de recherche est en cours dans le cadre d'une thèse de doctorat, en partenariat entre CCR, AgroCampus Ouest et

Météo-France. L'objectif de ces travaux est de modéliser l'impact du changement climatique à horizon 2050 sur les événements extrêmes de sécheresse et d'excès d'eau et leurs conséquences sur les principales productions végétales en France. Ces travaux s'attarderont notamment sur le rôle de l'assurance et sa pérennité en 2050. L'étude présentée ici porte sur le développement d'un modèle d'estimation de la fréquence et de l'intensité des pertes de rendements sur les principales productions végétales (céréales et prairies). Cette méthodologie s'appuie sur la création d'un nouvel indice climatique calculé à partir de données météorologiques : le DOWKI (Drought and

## Modéliser les pertes agricoles à horizon 2050

> Overwhelmed Key Indicator) Cet indice est basé sur le calcul du bilan hydrique et corrélé aux pertes de rendements<sup>4</sup>. La création d'un modèle stochastique permet de prédire la fréquence et l'intensité des pertes de rendements dues aux événements climatiques extrêmes.

### MÉTHODOLOGIE

Le modèle climatique développé repose sur la combinaison entre un modèle d'aléa et un modèle de dommages. Le premier correspond à la création d'un nouvel indice (DOWKI) représentant les événements extrêmes de sécheresse et d'excès d'eau. Le modèle de dommages permet quant à lui d'estimer une perte de rendements pour une valeur d'indice donnée. Le modèle climatique est couplé à une approche stochastique afin de calculer la probabilité de survenance d'un évé-

nement extrême et son impact en termes de pertes de rendements.

Les données météorologiques proviennent des stations Météo-France, avec une station par département. Il s'agit des données de précipitations (P) et d'évapotranspiration (ETP) décennales (10 jours), disponibles depuis 1989 jusqu'à nos jours. Les données de rendements utilisées proviennent de la base de données publique AGRESTE<sup>(1)</sup>, avec un rendement par culture, par département et par année sur la période 1989-2018. La perte de rendement de l'année n est calculée par rapport à un rendement de référence, qui correspond à une moyenne olympique des rendements sur les 5 dernières années. Cette méthodologie est utilisée dans le cadre de l'assurance multirisques climatiques (MRC).

Le DOWKI est basé sur la différence cumulée entre P et ETP calculée sur chaque décennie. L'indice repose uniquement sur

ces données climatiques et ne requiert donc pas de calibration : son unique paramètre de calibrage est la période de vulnérabilité des cultures sur laquelle il est calculé. Il est ensuite décliné sous deux formes pour représenter les sécheresses et les excès d'eau.

Un plan d'expérience a ensuite été réalisé afin d'optimiser les paramètres de l'indice : la période de vulnérabilité des cultures, les seuils respectifs pour les deux périls à partir desquels on considère que l'indice représente bien des événements extrêmes et le nombre de départements atteints par le péril, pour représenter des événements systémiques. Ce plan d'expérience consiste en 2 880 simulations par culture. Les critères de validation du modèle reposent, entre autre sur le calcul de l'erreur moyenne globale pour les deux types de péril, par département, par événement.

La calibration de l'indice sur les pertes de rendements est réalisée sur un historique de 30 ans par classes d'indices. Pour chaque classe, la distribution des pertes de rendements observées et la fréquence de survenance d'un sinistre sont calculées (Figure 1).

Le modèle stochastique de simulations des valeurs de l'indice utilise une méthode de copules gaussiennes pour simuler un grand nombre d'événements dont l'intensité serait corrélée spatialement. Pour ce faire, les copules sont calculées à partir de la matrice de corrélation des DOWKI calculés sur les départements. L'ajustement de lois marginales sur les données historiques permet de traduire la fréquence résultant des copules en intensité.

Les distributions marginales sont calculées en utilisant une loi normale pour le

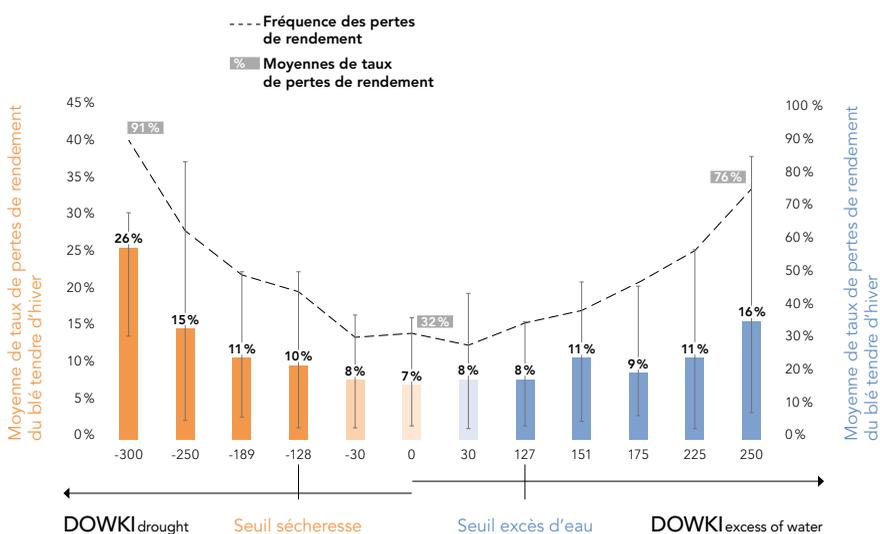


Figure 1 - Fonctions de dommages pour le blé tendre d'hiver : fréquences des pertes de rendements, centiles [10-90] et moyenne de taux de pertes de rendement selon les valeurs du DOWKI.

(1) <http://agreste.agriculture.gouv.fr/page-d-accueil/article/agreste-donnees-en-ligne>



## LES PARTENAIRES

L'unité Mixte de Recherche « SMART-LERECO » a été officiellement créée le 1<sup>er</sup> 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.

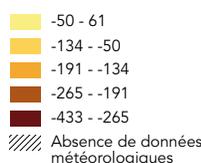
$DOWKI_{drought}$  (un K-S test a été fait pour vérifier que l'indice suit bien une loi normale) et un bootstrap pour le  $DOWKI_{excess}$  of water.

## RÉSULTATS

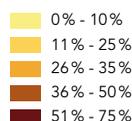
Les fréquences de dommages sont calculées pour les valeurs extrêmes du DOWKI. Pour le blé tendre d'hiver, sur la France métropolitaine, on observe une probabilité de 91 % d'avoir une perte de rendement lorsque la valeur du DOWKI est inférieure à -300 pour une sécheresse, et une probabilité de 76 % quand le DOWKI est supérieur à 250 (excès d'eau). L'indice créé a donc une forte capacité à prédire l'occurrence des pertes extrêmes de rendements pour les deux périls (Figure 1). Sur une année extrême comme 2003, les départements les plus sinistrés correspondent aux départements avec les valeurs les plus extrêmes du DOWKI comme l'illustre la Figure 2 pour les prairies et le blé tendre d'hiver.

La Figure 3 (p. 50) illustre la distribution de 5 000 années simulées de pertes de rendement du blé tendre d'hiver dues à la sécheresse dans quelques départements en France. Pour chaque distribution, le pourcentage de pertes nulles a été calculé. On constate que les départements d'une même région climatique (par exemple les départements du Cher (18) et de l'Eure et Loire (28) ou le Gers (31) et la Haute Garonne (32)) ont des résultats homogènes. Les fréquences des événements extrêmes semblent être plus rares pour l'Hérault mais les anomalies de rendements sont en revanche supérieures lorsqu'un événement survient. La plus faible proportion de surfaces en production de blé dans le Sud de la France peut expliquer la plus grande volatilité des résultats.

Valeurs du DOWKI en 2003



Pertes de récoltes (%) des prairies (SHT) en 2003



Pertes de récoltes (%) du blé tendre d'hiver en 2003

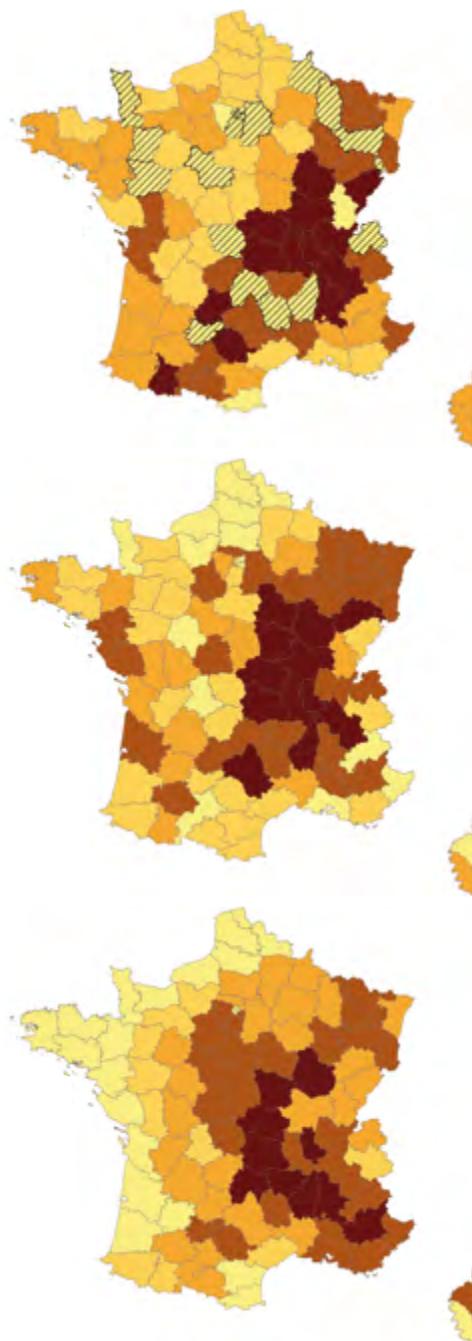
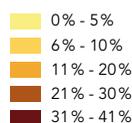


Figure 2 - Valeurs du DOWKI pour l'année 2003 et taux de pertes de rendements pour les cultures de prairies et le blé tendre d'hiver.

# Modéliser les pertes agricoles à horizon 2050

## CONCLUSIONS

Ces travaux proposent un nouvel indice climatique, basé uniquement sur des données météorologiques, pour prédire les anomalies de rendements des cultures dues aux événements extrêmes de sécheresses et d'excès d'eau. La calibration et la validation de l'indice a permis de réaliser des simulations stochastiques de pertes de récoltes dans des conditions de climat actuel. L'objectif plus général de ces travaux est de prédire l'impact du changement climatique sur l'exposition aux risques des exploitations agricoles. Pour ce faire, l'indice sera projeté à climat actuel et à climat futur (2050) selon le modèle ARPEGE-Climat de Météo-France

(grille de 8\*8 km sur la France<sup>5</sup>). Ces simulations reposeront sur 400 années de climat actuel et 400 années de climat futur. Elles permettront d'estimer les fréquences et les intensités des événements extrêmes à horizon 2050, et ainsi l'exposition aux risques des cultures. Il sera alors envisageable d'anticiper l'impact de l'application des conditions de politiques publiques telles que la MRC./

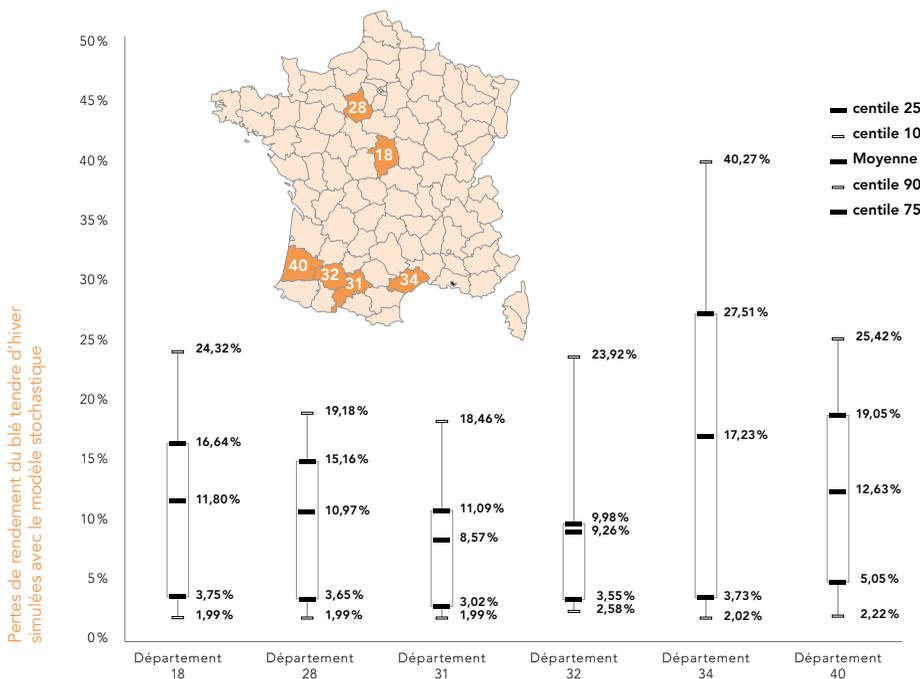


Figure 3 - Pertes de rendement simulées avec le modèle stochastique dues à la sécheresse pour le blé tendre d'hiver. Le département 34 est caractérisé par un climat méditerranéen, les départements 31, 32 et 40 sont représentatifs du climat océanique Sud, les départements 18 et 28 par le climat océanique dégradé Nord.

## RÉFÉRENCES

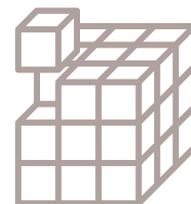
1. IPCC. 2012. "Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation". A special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press. Cambridge, UK, and New-York, NY, USA.
2. Van der Velde et al. 2012. "Impacts of extreme weather on wheat and maize in France : evaluating regional crop simulations against observed data". Climate Change, Springer, 113: 751-65.
3. COPA COGECA. 2003. "Assessment of the impact of the heat wave and drought of the summer 2003 on agriculture and forestry". Technical report. Brussels: Committee of Agricultural Organisations in the European Union and General Committee for Agricultural cooperation in the European Union.
4. Kapsambelis et al. 2019. "An Innovative Damage Model for Crop Insurance, Combining Two Hazards into a Single Climatic Index". Climate 7 (11): 125. <https://doi.org/10.3390/cli7110125>
5. Moncoulon D., Desarthe J., Naulin J-P, Onfroy T., Tinard P., Wang Z-X., Hajji C., Veysseire M., Dequé M., and Régimbeau F. 2018. « Conséquences du changement climatique sur le coût des catastrophes naturelles en France à l'horizon 2050. » Paris : CCR & Météo-France.

## CITATION

Kapsambelis et al., Modéliser les pertes agricoles à horizon 2050. In Rapport Scientifique CCR 2019 ; CCR, Paris, France 2020, pp. 47-50.

# DATA SCIENCE





# Mélange de quantiles et incertitude de modèle

Thierry Cohignac<sup>1</sup>, Nabil Kazi-Tani<sup>2</sup>

(1) Directeur adjoint des Réassurances et Fonds Publics, CCR (2) Enseignant chercheur au Laboratoire Science Actuarielle et Financière (SAF), Institut de Science Financière et d'Assurances (ISFA)

## RÉSUMÉ

Dans cet article, une nouvelle méthodologie est introduite pour combiner deux modèles, qui sont donnés sous la forme de deux distributions de probabilité. Des combinaisons convexes de fonctions quantiles sont utilisées, avec des poids dépendant du niveau de quantile. Les poids sont choisis en comparant, pour chaque niveau de quantile, une mesure donnée de l'incertitude de modèle calculée pour les deux distributions de probabilité à combiner. Cette méthodologie est particulièrement utile dans l'assurance et la réassurance des catastrophes naturelles, pour lesquelles il existe différents modèles physiques disponibles, ainsi que des données historiques. Cette procédure est appliquée à un portefeuille réel de pertes d'assurance et il est démontré que les mesures d'incertitude de modèle ont un comportement similaire sur l'ensemble des cédantes en portefeuille.

## ABSTRACT

*In this paper, a new methodology is introduced for combining two models, which are given in the form of two probability distributions. Convex combinations of quantile functions is used, with weights depending on the quantile level. The weights are chosen by comparing, for each quantile level, a given measure of model uncertainty calculated for the two probability distributions that we want to combine. This methodology is particularly useful in insurance and reinsurance of natural disasters, for which there are various physical models available, along with historical data. Our procedure is applied to a real portfolio of insurance losses, and it is demonstrated that the model uncertainty measures have a similar behavior on the set of various insurance losses considered.*

# combinaison de modèles  
# incertitudes dans les modèles  
# quantiles  
# gestion des risques  
# modèles CAT

## INTRODUCTION

Les sujets de cette collaboration avec Nabil Kazi-Tani, chercheur au laboratoire SAF de l'Institut de Science Financière et d'Assurances, sont liés à des problématiques actuarielles rencontrées par CCR dans le contexte de son modèle interne d'entreprise. Une théorie mathématique permettant de mélanger deux modèles (deux distributions de probabilités) modélisant le même phénomène (par exemple des sinistres catastrophes naturelles (CAT)) a été développée. Cette technique permet de combiner deux modèles en se basant

sur un calcul d'incertitude de modèle pour en extraire le meilleur de chacun. L'intérêt opérationnel de cette technique réside dans une mise en œuvre sans aucun paramètre. Elle est basée à 100% sur les données. Cette méthode est utilisée chez CCR pour mélanger des modèles CAT obtenus par approche historique et par approche basée sur la physique du phénomène CAT sous-jacent. Elle peut cependant être utilisée pour tous types d'applications pour lesquelles deux modèles coexistent. Ces travaux ont fait l'objet d'une publica-

tion dans le bulletin français d'actuariat (BFA) sous le titre : Quantile Mixing and Model Uncertainty Measures, <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02405859>

## MÉTHODOLOGIE

Dans différentes situations pratiques, il est possible d'avoir plusieurs modèles pour un même phénomène. La question principale est de savoir comment choisir parmi ces modèles, ou encore comment

les combiner pour obtenir des décisions optimales.

Il existe une littérature abondante sur la combinaison de modèles<sup>1,2,3,4,5</sup> : l'une des principales méthodologies est le mélange linéaire, qui consiste à prendre une combinaison linéaire des résultats de chaque modèle<sup>6</sup>. Une hypothèse standard est de considérer que la sortie de chaque modèle est donnée sous la forme d'une mesure de probabilité. Une partie de la

littérature traite alors des combinaisons convexes des densités fournies par les modèles ou des fonctions de répartition (Cumulative Distribution Function)<sup>7</sup>. Dans cet article, nous mélangeons des mesures de probabilité en effectuant des combinaisons convexes des fonctions quantiles. En effet, les fonctions quantiles, tout comme les densités ou les CDF, caractérisent la distribution d'une variable aléatoire. Une méthode est également

fournie pour choisir les poids à appliquer à chaque niveau de quantile basée sur des mesures d'incertitude du modèle.

Les critères introduits dans cet article, pour choisir les poids, sont basés sur des mesures d'incertitude du modèle. Cela conduit à des poids élevés pour le quantile du modèle historique pour les événements fréquents et des poids élevés pour le quantile du modèle CAT pour les événements rares et extrêmes.

## RÉSUMÉ DE L'APPROCHE

### Mélange de quantiles

Supposons que les modèles à combiner soient donnés sous la forme de deux mesures de probabilité  $\mu$  et  $\gamma$ . Soient  $Q_\mu$  et  $Q_\gamma$  les fonctions quantiles associées à  $\mu$  et  $\gamma$ .

On considère la fonction  $Q$  définie par :

$$Q(u) = \lambda(u)Q_\mu(u) + [1 - \lambda(u)]Q_\gamma(u)$$

Avec

$\lambda: [0,1] \rightarrow [0,1]$ , une fonction de poids.

Ce type de combinaison de fonction quantile a d'abord été suggéré par Granger prix Nobel d'économie<sup>[4]</sup>.

Afin de déterminer cette fonction de poids  $\lambda$ , nous comparons l'incertitude de modèle associée à  $\mu$  et  $\gamma$ .

### Incertitude de modèle

Définition de l'incertitude « absolue » de modèle retenue (cf P. Barrieu<sup>[1]</sup>) :

$$AM(X_0) = \frac{\overline{\rho(L)} - \rho(X_0)}{\overline{\rho(L)}}$$

Avec :

- $L$  : un ensemble de distributions de probabilité donné ;
- $X_0$  : une variable aléatoire associée à un modèle de référence ;
- $\rho$  : une mesure de risque ;
- $\overline{\rho(L)} = \sup_{X \in L} \rho(X)$ .

## Mélange de quantiles et incertitude de modèle

> Proposition

Si  $\rho = \text{VaR}_\alpha$  (ie., la mesure de risque retenue est la VaR de niveau  $\alpha$ ), alors l'incertitude de modèle définie ci-dessus se calcule par la formule :

$$AM(X_0, L)(\alpha) = \begin{cases} 1 - \frac{\rho(X_0)}{\mu + \sigma \sqrt{\frac{\alpha}{1-\alpha}}} & \text{si } \alpha^* \leq \alpha < 1 \\ 1 - (1-\alpha) \frac{\rho(X_0)}{\mu} & \text{sinon} \end{cases}$$

Avec :

$\mu$ : le moment d'ordre 1 de  $X_0$

$\sigma$ : l'écart-type de  $X_0$

$$\alpha^* = \frac{\mu^2}{\mu^2 + \alpha^2}$$

Ainsi, la fonction de poids choisi, est celle donnant plus de poids au modèle ayant la plus faible incertitude. Cette fonction est construite à l'aide de l'ensemble des mesures d'incertitude sur tous les modèles (toutes les modélisations sur tous les portefeuilles d'assurance dans ce cas particulier) :

$$\lambda(u) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n 1_{\{\alpha_i \leq u\}}$$

Avec  $\alpha_i$ , le quantile tel que l'incertitude associée au modèle  $\mu$  est plus faible que celle associée au modèle  $v$ .

Ainsi  $\lambda(u)$  représente la proportion de modèles ayant une incertitude plus faible pour le niveau de risque  $u$  (pour le quantile  $u$ ).

### ILLUSTRATIONS

Le graphique en page 55 illustre les résultats obtenus à l'aide de cette méthode. Pour les faibles périodes de retour, un poids plus important est donné au modèle basé sur une approche historique (l'erreur de modèle associée est plus faible). A l'inverse, pour les périodes de retour élevées, un poids plus important est donné aux modèles basés sur une approche physique (modèles CAT). Le modèle obtenu par ce procédé est appelé modèle hybride.

### CONCLUSION

Ces méthodes de mélange de modèles sont particulièrement utiles dans l'assurance et la réassurance des catastrophes naturelles, pour lesquelles il existe différents modèles physiques disponibles, pour lesquelles il existe différents modèles physiques disponibles, pour lesquelles il existe différents modèles physiques disponibles. Les méthodes classiquement utilisées permettent de calculer certaines quantités (par exemple l'espérance) à partir des deux modèles (technique classique de crédibilisation). La méthode développée permet, quant à elle, d'étendre ces calculs

à l'ensemble de la distribution de sinistralité et non plus de se limiter à une grandeur caractérisant la distribution. La distribution de sinistralité obtenue synthétise ainsi la meilleure connaissance du risque à partir des modèles disponibles. Cette distribution de sinistralité est ensuite utilisée pour de nombreuses applications telles que la tarification, le calcul des réserves, le modèle interne et toutes applications nécessitant une connaissance précise de la sinistralité CAT./

Depuis 3 ans, CCR collabore avec Nabil Kazi-Tani, enseignant chercheur au laboratoire SAF de l'Institut de Science Financière et d'assurances (ISFA à Lyon).

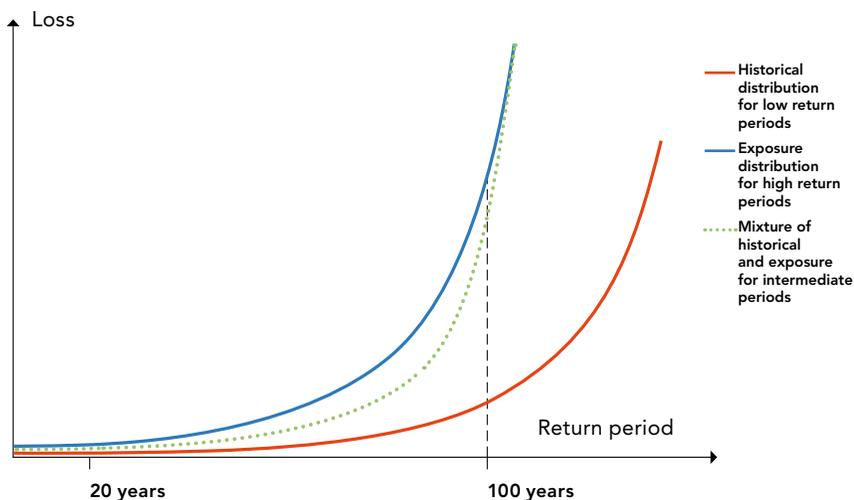
## RÉFÉRENCES

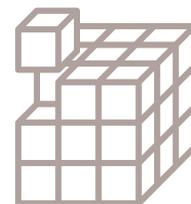
1. Barrieu P., and Scandolo G. 2015. Assessing financial model risk. *European Journal of Operational Research* 242, 2 (2015), 546–556.
2. Clemen R. T. Combining forecasts: A review and annotated bibliography. *International Journal of Forecasting* 5 (1989), 559–583.
3. Genest C., and Zidek J. 1986. V. Combining probability distributions: A critique and an annotated bibliography. *Statist. Sci.* 1, 1 (02 1986), 114–135.
4. Granger C. W. J. Invited review combining forecasts twenty years later. *Journal of Forecasting* 8, 3 (1989), 167–173.
5. Swiss Re Institute, Sigma 2018. *World insurance in 2017: Solid, but mature life markets weigh on growth.*
6. McConway K.J. Marginalization and linear opinions pools. *Journal of American Statistical Association* 1981, 76, 374, 410-414.
7. Gneiting T., and Ranjan R. 2013. Combining predictive distributions. *Electron. J. Statist.* 2013, 7, 1747-1782.

## CITATION

Cohignac et al., Mélange de quantiles et incertitude de modèle. In *Rapport Scientifique CCR 2019* ; CCR, Paris, France, 2020, pp.52-55.

## Hybrid modelling of natural hazard disaster





# Modéliser les valeurs assurées

Luc Rongiéras<sup>1</sup>, Hans Wackernagel<sup>1</sup>, Émilie Chautru<sup>1</sup>, Georges Farah<sup>2</sup>  
(1) Mines PARISTECH (2) Département Data Science & Actuariat, CCR

## RÉSUMÉ

L'estimation des valeurs assurées dépend de la géolocalisation et d'un nombre important de facteurs qui ne sont pas toujours répertoriés dans les bases de données des assureurs. L'objectif de cette thèse est de mettre en place une méthode d'estimation des valeurs assurées, en étudiant deux approches, l'une s'inscrivant dans le domaine de la géostatistique et l'autre dans celui de la statistique bayésienne. Au fur et à mesure de l'avancement des travaux, de nouvelles sources de données, non issues du monde assurantiel peuvent être exploitées.

## ABSTRACT

*Insured values depend on spatial location and on many factors that are not necessarily available in insurers' databases. The goal of this work is to estimate insured values following two different approaches, one using geostatistics and the other using Bayesian statistics. New sources of data, outside from the insurance world, may be exploited.*

# géostatistique  
# bayésien  
# entropie  
# modèles mixtes

## INTRODUCTION

En lien avec son activité de réassurances publiques en France, CCR mène depuis de nombreuses années des travaux visant à améliorer la connaissance des périls naturels et de la vulnérabilité des zones exposées en collectant des données dans le cadre de ses relations contractuelles avec les assureurs (cédantes). Ces données, disponibles à l'adresse, intègrent parfois l'information sur les valeurs assurées. En revanche, cette information n'est pas toujours fiable et certaines données peuvent être manquantes. Les données sont volumineuses, certaines bases de données contiennent plusieurs centaines de millions de lignes. C'est ainsi qu'une thèse de doctorat visant à améliorer l'algorithme d'estimation des valeurs assurées a débuté fin décembre 2018, dans le cadre d'une collaboration entre CCR et Mines PARISTECH. L'objectif de ces

travaux est de proposer des approches pouvant apporter des solutions à la modélisation des valeurs assurées dans le contexte du régime français d'assurance des catastrophes naturelles et sur tous les types de risques (particuliers et professionnels). Les valeurs assurées se définissent comme l'indemnité maximale pour remettre un bien assuré en état après sa destruction totale. Ce montant se décompose en 3 parties :  
- la valeur assurée de contenu : l'ensemble des biens physiquement mobiles contenus à l'intérieur du bien assuré ;  
- la valeur assurée de bâti : les biens non mobiles ;  
- la valeur assurée des pertes d'exploitation : si le bien est utilisé à des fins professionnelles, cette valeur est prédéfinie dans un contrat et doit permettre de compenser la perte de chiffre d'affaires résultant

de la non-exploitation du bien et de couvrir les frais fixes pendant la période d'interruption de l'activité. L'évaluation des valeurs assurées est un préalable essentiel à la modélisation des catastrophes naturelles, et à la quantification des enjeux assurantiers. L'étude présentée ici porte sur le développement de méthodes géostatistiques et bayésiennes afin d'estimer ces trois composantes et d'identifier l'incertitude qui en découle et de l'intégrer plus facilement dans les différentes analyses.

## MÉTHODOLOGIE ET TRAVAUX EN COURS

Une première difficulté rencontrée dans le travail de doctorat concerne l'absence de formule générale pour le calcul des



## LE PARTENAIRE

La thèse est cofinancée et encadrée par Mines Paristech et CCR. Le caractère spatial des valeurs assurées peut être modélisé par la théorie de la géostatistique, créée par Georges Matheron. Aujourd'hui encore, la géostatistique est enseignée à l'École Nationale Supérieure des Mines de Paris, et reste une activité de recherche majeure du Centre de Géostatistique de Mines Paristech.

valeurs assurées. S'il est relativement facile de cibler les variables potentiellement les plus influentes (e.g. le coût des matériaux, de leur transport, de la main d'œuvre, la surface du bâtiment, son implantation géographique), leur nombre est conséquent et il peut être très compliqué de proposer un modèle de calcul de valeurs assurées utilisant l'ensemble de ces variables et pour les différents types de risques assurés.

Les cédantes fournissent à CCR des données géolocalisées pouvant comprendre l'estimation des valeurs assurées effectuée par leurs soins. Outre les problèmes liés à la présence d'anomalies ou encore à la simple absence de données, une autre difficulté se dégage : du fait qu'aucune formule générale n'existe pour le calcul des valeurs assurées, chaque cédante fournit ses propres valeurs estimées. Ainsi, les valeurs assurées peuvent être hétérogènes et ne correspondent pas à la réalité exacte, ce sont seulement des estimations dont la méthode varie d'une cédante à l'autre. La quantification des incertitudes liées aux calculs de ces valeurs est à considérer dans ce travail de recherche.

Les données fournies par les cédantes permettent d'évaluer les premières potentielles variables explicatives des valeurs assurées, notamment la localisation, les caractéristiques des biens assurés et leurs usages. Ces variables joueront un

rôle principal dans le développement de l'approche.

Les individus de la base de données étant, avec une précision plus ou moins grande, spatialement localisés, une des premières approches retenues s'inscrit dans le domaine de la géostatistique<sup>1,2</sup>. Alternativement, une approche statistique plus classique est actuellement développée. Il s'agit de considérer les estimations des valeurs assurées fournies par les cédantes

comme un signal bruité des valeurs assurées réelles et ce via une approche bayésienne<sup>3,4,5</sup>. L'objectif de cette approche est de choisir un modèle approprié du bruit, tirant partie de l'ensemble de l'information disponible, de manière à produire une modélisation réaliste de la valeur assurée d'un bien quelconque. Le choix du modèle est supervisé par la connaissance du monde de l'assurance fournie par des experts.

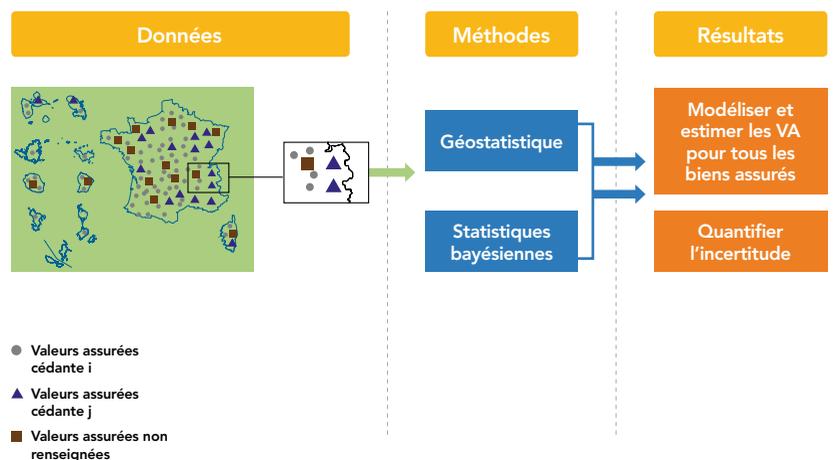


Figure 1 - Méthodologie mise en place dans le cadre de la thèse.

# Modéliser les valeurs assurées

---

## > CONCLUSION

Ces travaux proposent deux approches méthodologiques pour traiter la problématique du calcul des valeurs assurées pour tous les types de risques assurés. Le déploiement de ces travaux en cours permettra de sélectionner l'une, géostatistique et/ou l'autre, bayésienne, en prenant en compte les atouts et inconvénients de chacune, sa pertinence au contexte et aux besoins de CCR et la rapidité de son exécution. L'intérêt opérationnel de ces travaux réside dans une amélioration de la précision de la connaissance des risques concernant l'exposition de CCR, de l'État et des assureurs. Au fur et à mesure de l'avancement de ces travaux, de nouvelles sources de données, non issues du monde assurantiel peuvent être exploitées (e.g., base de données des notaires, BD Topo® etc.)./

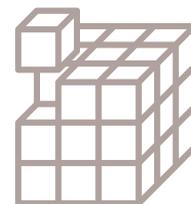
## RÉFÉRENCES

1. Matheron G. Estimer et choisir: essai sur la pratique des probabilités; Les cahiers du Centre de morphologie mathématique de Fontainebleau; École nationale supérieure des mines de Paris, 1978.
2. Wackernagel H. Multivariate Geostatistics: An Introduction with Applications; 3rd ed.; Springer-Verlag: Berlin Heidelberg, 2003; ISBN 978-3-540-44142-7.
3. James et al. 2013. Statistical Learning. In An Introduction to Statistical Learning: with Applications in R; James G., Witten D., Hastie T., Tibshirani R. Eds.; Springer Texts in Statistics; Springer: New York, NY, 2013; pp. 15–57 ISBN 978-1-4614-7138-7.
4. Parent É. et Bernier J. 2007. Le raisonnement bayésien: Modélisation et inférence; Springer, Ed.; Springer Science & Business Media: Paris, France, 2007; ISBN 978-2-287-33906-6.
5. Zong Z. Information-Theoretic Methods for Estimating of Complicated Probability Distributions; Elsevier.; 2006; Vol. 207; ISBN 978-0-08-046385-8.

---

## CITATION

Rongjiéras et al., Modéliser les valeurs assurées. In Rapport Scientifique CCR 2019 ; CCR, Paris, France, 2020, pp.56-58.



# Utiliser le text-mining en réassurance

Aurélien Couloumy<sup>1</sup>, Loris Chiapparo<sup>1</sup>, Georges Farah<sup>2</sup>, Christian Cousin<sup>2</sup>, Eric Gelly<sup>2</sup>

(1) Département Data Science, ReacFin, Place de l'Université 25 - B-1348 Louvain-la-Neuve - Belgique

(2) Département Data Science & Actuariat - Réassurances et Fonds Publics, CCR

## RÉSUMÉ

En collaborant avec REACFIN, CCR a intégré dans ses process le « text-mining » pour extraire de l'information de façon automatique à partir de documents PDF ou de scans. Depuis le passage en production, le délai moyen de traitement est de 5 minutes par arrêté alors qu'il pouvait durer plusieurs heures auparavant. La qualité de la donnée s'est trouvée bien améliorée. C'est un vrai succès !

## ABSTRACT

*By collaborating with REACFIN, CCR has automated some of its processes thanks to text-mining. Information is extracted from PDF documents or scans within 5 minutes as an average time, whereas it may have lasted several hours before. This automation highly contributes to improve the data quality. What as success!*

# text-mining  
# arrêtés catastrophe naturelle  
# calamité agricole  
# traitement de texte  
# data cleaning  
# data mining

## INTRODUCTION

Au cœur du dispositif d'indemnisation des catastrophes naturelles en France, CCR propose aux assureurs exerçant sur le marché français des couvertures de réassurance publique. Les arrêtés de catastrophes naturelles font suite aux avis de la Commission interministérielle qui étudie les demandes de dossiers de reconnaissances par les préfets après la survenance d'un événement exceptionnel. La liste des communes faisant l'objet d'un arrêté est publiée dans le Journal Officiel. C'est ce qui permet de déclencher l'intervention de CCR pour réassurer les assureurs dans le cadre de la garantie catastrophes naturelles.

CCR est également chargée de la gestion comptable et financière de fonds publics pour le compte de l'État, dont le Fonds national de gestion des risques en agriculture (FNGRA). Le régime des calamités agricoles participe à l'indemnisation des agriculteurs ayant subi une perte de récoltes ou une perte de fonds occasion-

nées par la survenance d'un événement climatique exceptionnel reconnu par un arrêté ministériel.

Dans le cadre de l'optimisation des processus de traitement des arrêtés de catastrophes naturelles et de calamités agricoles, CCR a exploité en 2018 et 2019 l'utilisation du « text-mining ». Ces arrêtés sont des documents .pdf ou des images, dont le traitement manuel peut être source d'erreurs. Le développement de l'approche « text-mining » se justifie par la capacité de cette dernière à extraire de l'information provenant de documents textuels et à la structurer en vue de son analyse. Ce projet repose sur un partenariat agile avec la société REACFIN experte en traitement de langage naturel et dans le développement de méthodes d'analyse textuelle automatique pour analyser des données non-structurées. A la suite d'un « proof of concept » (POC) sur un échantillon de documents effectué en 2018, un pilote est mis en production en 2019. Les

objectifs sont l'optimisation de l'analyse des tâches récurrentes et chronophages ; la réduction des risques opérationnels liés aux traitements manuels ; et l'aide de l'utilisateur dans son activité en mettant à sa disposition un outil d'aide à la décision, ce qui lui permet de gagner du temps et de se concentrer sur son cœur de métier ou sur des tâches de contrôle qualité.

## MÉTHODOLOGIE

La première étape a été de comprendre les étapes des traitements effectués manuellement et la structuration des arrêtés étudiés. Les deux types d'arrêtés ont été étudiés comme source de données textuelles.

Les arrêtés de catastrophe naturelle (Figure 1) sont des fichiers .pdf en format texte numérique et dont la structure est standardisée. Ils contiennent des informations sur les reconnaissances de l'état

## Utiliser le text-mining en réassurance



Figure 1 - Exemple de documents PDF utilisés pour le traitement de texte automatique – Les arrêtés de catastrophe naturelle.

de catastrophe naturelle d'une ou de plusieurs communes. Le nom des communes, le nombre de modulation de franchise, la décision favorable ou défavorable et le code NOR constitué de 12 caractères alphanumériques etc. sont structurés de façon identique pour chaque arrêté. Ces arrêtés proviennent de la base de données Légifrance<sup>(1)</sup>. Un échantillon de 100 arrêtés dont la date de parution est comprise entre 2014 et 2018 a servi à l'étude.

Les arrêtés de calamité agricole sont des images en noir et blanc (format PDF), contenant des informations sur les arrêtés de calamité agricole ou sur leur indemnisation. Ces arrêtés sont des documents non publics et de ce fait ne peuvent pas être présentés. Ils sont issus de scans et sont de mauvaise qualité (texte rongé). Un échantillon de 79 arrêtés a servi à l'étude. Dans un second temps, les méthodes de « text-mining » ont été développées et mises en place. Après téléchargement des documents, les sources sont nettoyées pour transformer le .pdf ou le scan en

contenu textuel, via l'utilisation du package pdftotext. Pour cela, une reconnaissance optique de caractères (OCR, via le package Tesseract) est appliquée sur différentes zones du document, ce qui permet à partir d'une image de retranscrire du texte de façon automatique.

Ces zones de texte sont ensuite analysées par une technique d'apprentissage supervisé (réseaux de neurones récurrents) afin d'associer à chaque zone une classe relative à un sujet donné (package Scikit-Learn). En fonction du sujet identifié, l'algorithme extrait de chaque zone des informations et procède à des contrôles de qualité et des vérifications avant de structurer la donnée dans une base.

### RÉSULTATS

Les taux de détection ont dépassé 99 % pour les arrêtés de catastrophe naturelle, le temps de traitement pour un arrêté de plusieurs pages est inférieur à la seconde. Quant aux arrêtés de calamité agricole, les taux de détection se situent autour de 95 %, ce qui est un très bon résultat compte tenu de la faible qualité de la donnée. Le temps de traitement se situe autour de 20 secondes en moyenne, dont 19 secondes pour l'OCR.

Dans la pratique, les taux de détection réels sont de 100 %, car l'utilisateur se voit suggérer un résultat par l'outil, et il a la possibilité de le modifier ou de le confirmer.

L'outil a été mis en production pour les deux types d'arrêtés : les catastrophes naturelles en juin 2019 et les calamités agricoles en septembre 2019.

Le retour d'expérience sur les arrêtés de catastrophe naturelle est très positif : la durée moyenne de traitement d'un arrêté est passée à 5 minutes quel que soit le nombre de communes à traiter, alors

Code NOR (numérotation des textes officiels français)	Date de commission	Date de l'arrêté	Date de publication au Journal Officiel
INTE1818802A	3 juillet 2018	9 juillet 2018	27 juillet 2018

Libellé décision	Nom département	Nom du péril	Début de péril	Fin de péril	Nom de la commune	Code INSEE	Modulation de la franchise
Favorable	Aisne	Inondations et coulées de boue	22 mai 2018		Nouvron-Vingré	02562	(2)
Favorable	Aisne	Inondations et coulées de boue	24 mai 2018		Holnon	02382	(1)

Figure 2 – Vision des résultats obtenus suite aux traitements d'un arrêté de catastrophe naturelle.

---

qu'auparavant, cette durée était de 45 minutes en moyenne et pouvait aller jusqu'à plusieurs heures pour les arrêtés de plusieurs pages. Le gain principal a été de remplacer le traitement manuel par un chargement automatisé avec une suggestion des possibles anomalies, ce qui a accéléré le temps de traitement tout en minimisant les risques d'erreur.

Quant aux arrêtés de calamité agricole, nous ne disposons pas encore suffisamment de recul nous permettant d'établir un retour d'expérience.

## CONCLUSION

Grâce à l'approche « text-mining », CCR a pu automatiser des tâches récurrentes et chronophages, tout en permettant à l'utilisateur de traiter plus rapidement l'information et ce de façon plus fiable, et lui offrant la possibilité de se recentrer sur des tâches à plus forte valeur ajoutée et d'en créer de nouvelles. Les nouvelles données étant plus fiables, cela permet à CCR d'améliorer la qualité de la donnée au sein de son système d'information.

La collaboration avec REACFIN a été très positive, et d'autres collaborations et synergies sont en cours d'études, en particulier sur des problématiques liées à la data science ou l'intelligence artificielle, pour des objectifs de gain en productivité et en qualité./

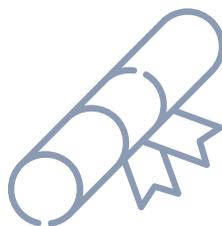
## CITATION

Couloumy et al., Utiliser le text-mining en réassurance. In Rapport Scientifique CCR 2019 ; CCR, Paris, France, 2020, pp.59-61.

(1) [www.legifrance.gouv.fr](http://www.legifrance.gouv.fr)

# 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. Le prix est ouvert aux candidats ayant présenté ou soutenu une thèse entre le 1<sup>er</sup> janvier et le 31 décembre 2020.



#### 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 cartographique 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 ».

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. En 2019 le jury était présidé par M. Alberto Monti, Professeur de Droit Comparé à l'IUSS Pavia et membre du Haut Conseil de l'OCDE sur la gestion financière des risques catastrophiques.

Le lauréat reçoit une récompense monétaire et est invité à présenter ses travaux de recherche lors de la journée annuelle CCR Cat, afin de pouvoir rencontrer des acteurs reconnus du secteur de l'assurance et de la prévention. La thèse est diffusée sur le site de CCR et le lauréat a aussi la possibilité d'écrire un article au sein du rapport scientifique annuel.

Nous remercions tous les candidats et les lauréats pour leurs contributions dans ces domaines de recherche émergents et espérons que les lecteurs auront autant de plaisir que nous à lire et découvrir leurs travaux.

L'édition 2019 a récompensé Fanny Benitez pour ses travaux de recherche au sein de l'espace Caraïbe (Martinique, Guadeloupe, Haïti) portant sur « 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 »./

#### Résumé vidéo

<https://www.ccr.fr/journee-ccr-cat/videos>

#### Pour plus d'information

[prixccrccat@ccr.fr](mailto:prixccrccat@ccr.fr)

# CITATIONS

---

Onfroy et al., Apports de l'imagerie satellitaire dans la caractérisation des inondations. In Rapport Scientifique CCR 2019 ; CCR, Paris, France, 2020, pp.09-13.

Moncoulon et al., Modéliser le ruissellement pluvial. In Rapport Scientifique CCR 2019 ; CCR, Paris, France, 2020, pp. 14-17.

Marchal et al., Solutions Fondées sur la Nature : le projet européen H2020 NAIAD. In Rapport Scientifique CCR 2019 ; CCR, Paris, France, 2020, pp. 18-22.

Perrin et al., Propagation des incertitudes dans le modèle de submersion marine. In Rapport Scientifique CCR 2019 ; CCR, Paris, France, 2020, pp.23-27.

Tinard et al., Modéliser la sécheresse géotechnique. In Rapport Scientifique CCR 2019 ; CCR, Paris, France, 2020, pp.28-32.

Gouache et al., Mesurer l'exposition aux séismes. In Rapport Scientifique CCR 2019 ; CCR, Paris, France, 2020, pp.34-37.

Rey et al., Mesurer les conséquences des séismes. In Rapport Scientifique CCR 2019 ; CCR, Paris, France, 2020, pp.38-41.

Moncoulon et al., Modéliser le changement climatique dans les territoires d'Outre-mer. In Rapport Scientifique CCR 2019 ; CCR, Paris, France, 2020, pp.43-46.

Kapsambelis et al., Modéliser les pertes agricoles à horizon 2050. In Rapport Scientifique CCR 2019 ; CCR, Paris, France 2020, pp.47-50.

Cohignac et al., Mélange de quantiles et incertitude de modèle. In Rapport Scientifique CCR 2019 ; CCR, Paris, France, 2020, pp.52-55.

Rongjéras et al., Modéliser les valeurs assurées. In Rapport Scientifique CCR 2019 ; CCR, Paris, France, 2020, pp.56-58.

Couloumy et al., Utiliser le text-mining en réassurance. In Rapport Scientifique CCR 2019 ; CCR, Paris, France, 2020, pp.59-61.

Moncoulon et al., Modéliser le ruissellement pluvial. In Rapport Scientifique CCR 2019 ; CCR, Paris, France, 2020, pp.9-12.

Onfroy et al., Apports de l'imagerie satellitaire dans la caractérisation des inondations. In Rapport Scientifique CCR 2019 ; CCR, Paris, France, 2020, pp. 13-17.

Marchal et al., Solutions Fondées sur la Nature : le projet européen H2020 NAIAD. In Rapport Scientifique CCR 2019 ; CCR, Paris, France, 2020, pp. 18-22.

Perrin et al., Propagation des incertitudes dans le modèle de submersion marine. In Rapport Scientifique CCR 2019 ; CCR, Paris, France, 2020, pp.23-27.

Tinard et al., Modéliser la sécheresse géotechnique. In Rapport Scientifique CCR 2019 ; CCR, Paris, France, 2020, pp.28-32.

Gouache et al., Mesurer l'exposition aux séismes. In Rapport Scientifique CCR 2019 ; CCR, Paris, France, 2020, pp.34-37.

### **Rapport Scientifique édité par CCR - Septembre 2020**

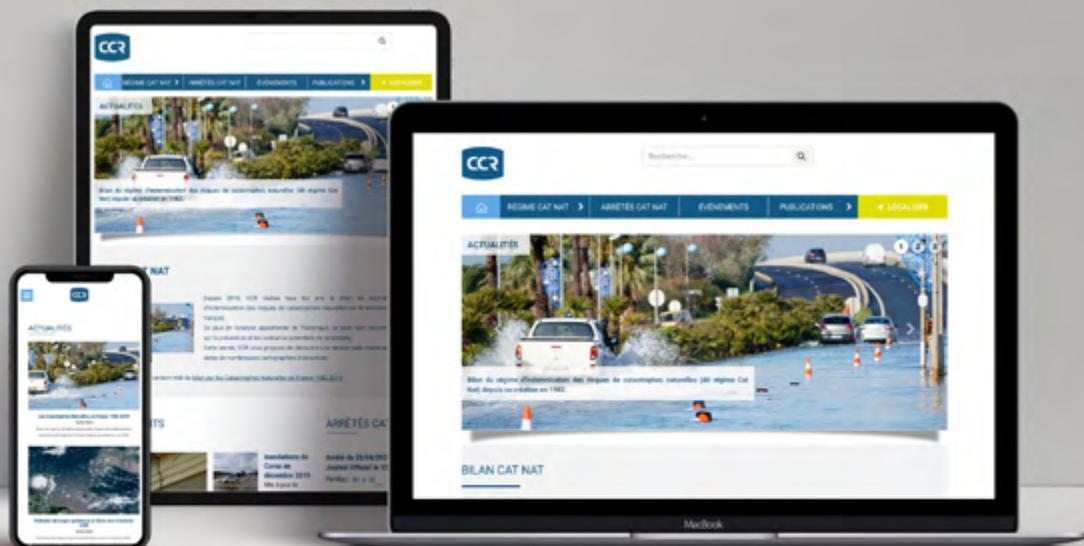
Le Rapport d'activité Scientifique 2019 de CCR et tous les éléments scientifiques qu'il contient (notamment les textes, publications, images, schémas, tableaux ou éléments cartographiques) sont la propriété exclusive de CCR ou de tiers l'ayant expressément autorisée à les utiliser, et sont protégés par les dispositions du Code de la propriété intellectuelle et les traités internationaux sur le copyright.  
Copyright © 2020 Caisse Centrale de Réassurance, Paris, France.

**Crédits photos :** GettyImages/ Thirada Srinil (couverture), picture alliance (p.42), Yuichiro Chino (p.51) - Allan Haas/Pixabay (p.31) - Freepik.com - Thenounproject.com - Photothèque CCR.

#### **Conception et réalisation : [story-building.fr](http://story-building.fr)**

Ce rapport scientifique a été imprimé en France par HandiPRINT, une entreprise adaptée filiale du Groupe Lecaux 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](http://ccr.fr)  
Plus d'informations sur [catastrophes-naturelles.ccr.fr](http://catastrophes-naturelles.ccr.fr)

