



AGENCE NATIONALE DE LA RECHERCHE  
**ANR**

# RISQUES ET CATASTROPHES NATURELS

61 fiches projets

LES CAHIERS DE L'ANR N° 10 - OCTOBRE 2019

# EXEMPLES DE PROJETS FINANCÉS

BHUTANEPAL	p. 3	NAMAZU	p. 34
CARIB	p. 4	ONAMAZU	p. 35
CLIMATRisk	p. 5	PALET	p. 36
COCORISCO	p. 6	PELICAN	p. 37
DELTAS	p. 7	RAVEX	p. 38
DEMOCRITE	p. 8	RECAP	p. 39
DEVAST	p. 9	RECREAHVI	p. 40
DOMERAPI	p. 10	REMAKE	p. 41
DYNTOHOKU	p. 11	REMEMBER	p. 42
EcoCorail	p. 12	REparH	p. 43
E-GRAAL	p. 13	REV	p. 44
EISHA	p. 14	RGC4	p. 45
ESCAPE	p. 15	RICOCHET	p. 46
ESCAPE	p. 16	RISCOPE	p. 47
FireCaster	p. 17	S3F pour Haïti	p. 48
FloodScale	p. 18	SAMCO	p. 49
FlowRes	p. 19	SEAFRONTTERA	p. 50
FOR-WIND	p. 20	SISCOR	p. 51
FOSTER	p. 21	SlideVOLC	p. 52
GEDEAH	p. 22	SPICy	p. 53
HYDROSEIS	p. 23	STORISK	p. 54
INCERDD	p. 24	STRAP	p. 55
INTERNATECH	p. 25	STRATEGIC	p. 56
IODA-MED	p. 26	SuTra <sup>2</sup>	p. 57
KAL-Haïti	p. 27	TO_EOS	p. 58
LAVA	p. 28	TOLTECA	p. 59
MapMuxing	p. 29	TRANSADAPT	p. 60
MAREGAMI	p. 30	TRANSRISK <sup>2</sup>	p. 61
MobiClimEx	p. 31	TWIST	p. 62
MODNAT	p. 32	VOLCPLUME	p. 63
MUSIC	p. 33		

## BHUTANEPAL

## Un séisme de magnitude 9 est-il possible en Himalaya ?

## — Variations latérales le long de l'arc himalayen - segmentation et activité sismique

La chaîne himalayenne, située sur la bordure sud du plateau tibétain, est sans doute la manifestation la plus spectaculaire de la collision entre l'Inde et l'Eurasie. La vitesse de convergence actuelle, d'environ 40 mm/an entre ces deux plaques, est accommodée pour moitié au travers de l'Himalaya, le long d'une grande faille chevauchante communément appelée le MHT (pour Main Himalayan Thrust).

De nombreuses études (e.g. Bollinger et al., 2016 ; Le Roux-Mallouf et al., 2016) ont démontré le caractère sismogène de ce chevauchement. Au cours du dernier siècle, l'arc himalayen a ainsi été affecté par plusieurs séismes destructeurs, de très forte magnitude, comme celui de Kangra en 1905, de Bihar-Népal en 1934, d'Assam en 1950 et plus récemment, celui de Gorkha en 2015. La magnitude maximale que pourrait avoir un séisme le long de l'arc himalayen reste cependant une question ouverte donnant lieu à de nombreux débats scientifiques (e.g. Wesnousky et al., 2017). C'est pourtant un paramètre clé pour estimer l'impact maximal qu'un séisme pourrait avoir sur des pays comme le Pakistan, le Népal, le Bhoutan mais aussi sur tout le nord de l'Inde, qui est l'une des zones les plus peuplées du monde (densité de population supérieure à 500 habitants au km<sup>2</sup>).

## — Apport des données géophysiques et géomorphologiques

Tenter de répondre à la question « Un séisme de magnitude 9 est-il possible le long de l'arc himalayen ? » nécessite de connaître au mieux la géométrie en profondeur du MHT, de caractériser la segmentation de l'arc himalayen et de quantifier le glissement sismique des séismes passés qu'ils soient instrumentaux ou historiques. Pour ce faire, une approche pluridisciplinaire a été mise en œuvre au Népal et au Bhoutan, notamment par :

- ▶ le déploiement de réseaux sismologiques temporaires,
- ▶ l'utilisation de mesures géophysiques de proche surface (méthodes électriques, sismique réflexion et micro gravimétrie),
- ▶ l'acquisition de mesures gravimétriques relatives et absolues,
- ▶ la mesure de points géodésiques temporaires et permanents,
- ▶ l'étude paléo-sismologique de nouveaux sites au front de la chaîne,
- ▶ l'analyse détaillée de nombreux objets géomorphologiques (terrasses fluviales, cônes, surfaces à faible relief),
- ▶ la caractérisation des processus de surface (dénudation et incision),
- ▶ le développement de plusieurs modèles numériques dédiés.

## — Résultats majeurs

Les approches sismologiques et gravimétriques ont permis d'obtenir une image détaillée des structures profondes le long de l'arc, notamment dans l'ouest Népal et au Bhoutan qui jusque-là étaient des régions peu ou pas documentées. Les observations géodésiques effectuées après le séisme de Gorkha et celles associées au raccourcissement séculaire ont démontré pour la première fois la complexité du cycle sismique en Himalaya. Enfin, les études menées au front de la chaîne ont permis de mettre en évidence l'occurrence dans le passé de séismes majeurs au Bhoutan, zone qui avant cette étude était associée à une faible activité sismique. Au terme de ce projet, l'hypothèse de l'occurrence d'un séisme de magnitude 9 en Himalaya ne peut être exclue.



Station GPS installée en Himalaya, Zhemgang, Bhoutan.

## — Production scientifique et brevets

Parmi la vingtaine de publications internationales à comité de lecture, citons :

- ▶ Berthet, T., Ritz, J.F., Ferry, M., Pelgay, P., Cattin, R., Drukpa, D., Braucher, R. and Hetényi, G., *Geology*, 2014.
- ▶ Drukpa, D., Gautier, S., Cattin, R., Namgay, K., Le Moigne, N., *Geophys. J. Int.*, 2018.
- ▶ Le Roux-Mallouf, R., Ferry, M., Ritz, J.F., Berthet, T., Cattin, R., Drukpa, D., *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 2016.
- ▶ Hetényi, G., Le Roux-Mallouf, R., Berthet, T., Cattin, R., Cauzzi, C., Phuntsho, C., Grolimund, R., *Geophys. Res. Lett.*, 2016.
- Hoste-Colomer, R., L. Bollinger, H. Lyon-Caen, A. Burtin, L.B. Adhikari, *Tectonophysics*, 2017.
- ▶ Marechal, A., Mazzotti, S., Cattin, R., Cazes, G., Vernant, P., Drukpa, D., Thinley, K., Tarayoun, A., Le Roux-Mallouf, R., Thapa, B. B., Pelgay, P., Gyeltshen, J., Doerflinger, E., Gautier, S., *Geophys. Res. Lett.*, 2016.

**Le projet BHUTANEPAL** est un projet de recherche fondamentale coordonné par R. Cattin, L. Bollinger, M. Simoes et G. Hetényi. Il associe une dizaine de laboratoires français (dont Géoscience Montpellier, le Commissariat à l'Énergie Atomique et l'Institut de Physique du Globe de Paris) ainsi que des universités et organismes étrangers (l'Université de Lausanne, l'ETH Zurich, le Département des Mines et de Géologie au Népal et au Bhoutan ainsi que le Caltech). Le projet a commencé en janvier 2013 et a duré 48 mois. Il a bénéficié d'une aide ANR de 390 k€ pour un coût global de l'ordre de 4 M€ (salaires compris).

**CONTACT**

**Rodolphe Cattin** : rodolphe.cattin@umontpellier.fr,  
www.gm.univ-montp2.fr/spip/spip.php?rubrique400

## CARIB

## L'histoire des volcans (construction/destruction) révélée par les forages marins

## — Caractérisation des processus d'instabilités dans l'histoire des volcans antillais et impact en termes de risques

La connaissance de l'histoire d'un volcan est essentielle pour comprendre son mode de fonctionnement et estimer les risques qu'il fait encourir aux populations qui vivent sur ses flancs. L'étude des dépôts volcaniques qui permet de reconstruire cette histoire a ses limites car les séquences volcaniques accessibles à terre sont souvent incomplètes, les dépôts pouvant avoir disparu à cause de l'érosion ou s'être épanchés en mer lors de grands glissements de flancs qui affectent les volcans (ex. : 52 épisodes d'instabilités aux Antilles). En contexte insulaire, une partie importante des produits volcaniques va se déposer en mer et sera ainsi préservée par les sédiments marins. Des données de forages exceptionnelles ont été collectées au large des Petites Antilles lors de l'Expédition IODP 340. L'objectif du projet CARIB était d'exploiter ces données afin 1/ de mieux comprendre les processus d'instabilités qui affectent les volcans antillais et leur implication en termes de risques, 2/ d'accéder à l'histoire éruptive à long terme des volcans de la Martinique en documentant les cycles de construction et de destruction volcanique.

## — Forer les sédiments marins au large des volcans pour retracer leur histoire et comprendre les risques

L'expédition IODP 340 s'est déroulée du 3 mars au 17 avril 2012 au large des petites Antilles à bord du Joides resolution du programme international IODP (Integrated Ocean Drilling Program). Nous avons foré 9 sites au large de Montserrat et de la Martinique et collecté 484 carottes soit 2 384 m de matériel au total. Dans le projet CARIB, pour atteindre nos objectifs, nous avons couplé l'analyse de différents types de données (données géologiques à terre, données géophysiques et de forage en mer, données géotechniques). Nous avons utilisé différentes méthodes d'analyses pour : caractériser les niveaux volcaniques (géochimie, pétrologie, sédimentologie, géochronologie), dater l'activité éruptive et les dépôts chaotiques (stratigraphie 180 détaillée et âges 14C), caractériser les unités de glissements et les conditions de stabilité (analyse morpho-structurale et des propriétés physiques) et enfin pour mieux contraindre les mécanismes d'écoulement du matériel glissé nous avons réalisé des modélisations analogique et numérique de son transport.

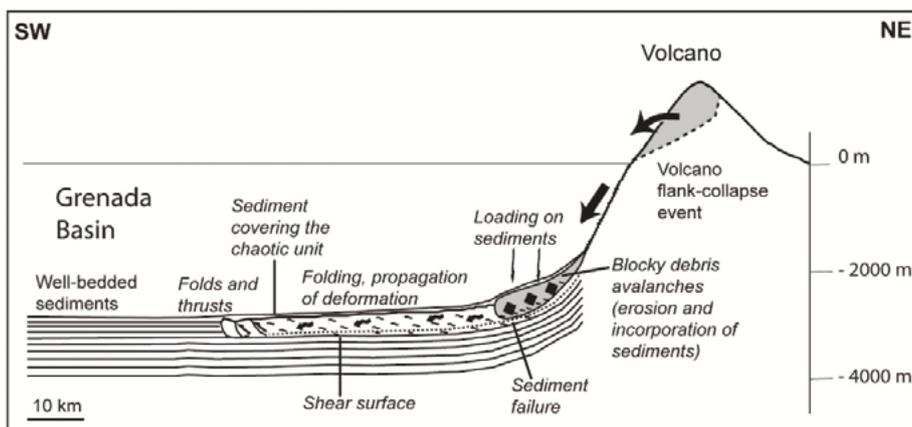
## — Résultats majeurs

Nous avons proposé un nouveau modèle de glissement sur les flancs des volcans antillais qui pourrait être appliqué à d'autres volcans et a des conséquences en termes d'évaluation de l'aléa. Lorsque le flanc d'un volcan se déstabilise, les produits glissés entrent en mer et se déposent à la base de l'édifice où ils vont charger les sédiments marins sous-jacents, susceptibles alors de se déstabiliser sur une surface de moindre résistance et loin de la source. Afin de replacer ces glissements dans l'histoire des volcans, des travaux de téphrochronologie sont en cours et permettront bientôt de préciser l'histoire éruptive de la Montagne Pelée sur les derniers 120 000 ans.

## — Production scientifique et brevets

- Brunet, M., et al. (2017). Numerical simulations of 30-45 ka debris avalanche flow of Montagne Pelee volcano, Martinique: from volcano flank-collapse to submarine emplacement, *Natural Hazards*, vol. 87, 12, p1189-1222.
- Brunet, M. et al., (2016), Composition, geometry, and emplacement dynamics of a large volcanic island landslide offshore Martinique: From volcano flank-collapse to seafloor sediment failure?, *G3*, 17-3, 699– 724.
- Le Friant, A et al. (2015). Submarine record of volcanic island construction and collapse in the Lesser Antilles arc: First scientific drilling of submarine volcanic island landslides by IODP Expedition 340. *G3*, 16.
- Lafuerza S et al. (2014), Geomechanical characterizations of submarine volcano flank sediments, Martinique, Lesser Antilles Arc. S. Krastel et al., (Eds.), *Submarine mass movements and consequences*, *Advances in Natural and Technological Hazards Research*, Springer Inten. Publishing, Switzerland, 2014, 37.

Nouveau modèle de mise en place des dépôts de glissement au large de la Montagne Pelée (Le Friant et al., 2015).



**Le projet CARIB** était un projet de recherche fondamentale coordonné par l'IPGP (Institut de Physique du Globe de Paris). Il associait l'UPMC (Université Pierre et Marie Curie, UMR ISTEP) et l'UA (Université des Antilles, Labo LarGE). Le projet a commencé en janvier 2014 et a duré 68 mois. Il a bénéficié d'une aide ANR de 274 152 € pour un coût global de 2,9 M€.

## CONTACT

Anne Le Friant : lefriant@ipgp.fr

# CLIMATRisk

## S'adapter au risque de submersion marine et au changement climatique dans la Caraïbe

### — CLIMATRisk : vulnérabilité subjective et capacité d'adaptation des sociétés face aux risques de submersion marine

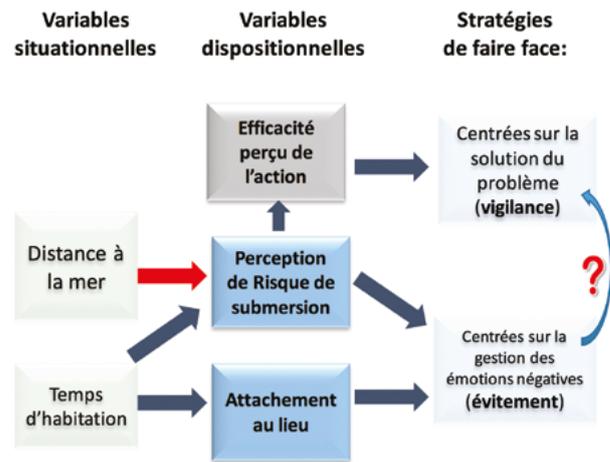
L'évidence d'un changement climatique et de son impact sur les zones littorales, engendre des préoccupations majeures quant à l'efficacité des stratégies d'adaptations mises en place. Les coûts importants que causent ces événements catastrophiques mettent en évidence l'inégale capacité de réponse des territoires face aux risques. La perception des risques par les habitants des zones concernées, est considérée aujourd'hui comme un aspect central de l'analyse de la vulnérabilité. Notre objectif est ainsi de comprendre la vulnérabilité perçue par une population exposée aux risques de submersion marine, en prenant en compte les différents aspects qui peuvent l'expliquer, ainsi que leurs stratégies pour y faire face. En effet, la vulnérabilité perçue ainsi que l'adaptabilité des populations sont déterminées par une multiplicité de facteurs (sociaux, économiques, cognitifs, affectifs et comportementaux) qui nécessitent une analyse d'ensemble. Pour atteindre cet objectif, il a été nécessaire de prendre en compte plusieurs aspects : a) L'analyse fine de la perception des risques, en intégrant les niveaux culturel, psychosocial et spatial qui la composent ; b) L'évaluation des stratégies pour faire face aux risques et notamment l'intention d'agir ; c) La prise en compte de la relation personne-environnement, notamment l'attachement au cadre de vie et les représentations sociales des changements environnementaux.

### — CLIMATRisk : regards croisés géographie et psychologie, méthodologie mixte et approche interculturelle

CLIMATRisk a réalisé une analyse fine de la perception du risque des habitants des zones exposées à la submersion marine dans la Caraïbe, en intégrant les niveaux culturel, spatial et psychosocial qui interviennent dans sa construction. Une comparaison de deux contextes culturels, économiques et institutionnels différents a été opérée, permettant une opérationnalisation de ces variables. Deux terrains ont été investigués : les villes de Sainte Anne et Pointe-à-Pitre dans le département français de la Guadeloupe et la ville de Carthagène dans la caraïbe colombienne. Les deux régions sont fortement exposées au risque de submersion marine dans un scénario de changement climatique. Une approche pluri-méthodologique a été utilisée à l'aide d'une démarche quantitative et qualitative. Cette approche comparative a permis d'élaborer et valider des outils de recherche dans deux langues différentes (français et espagnol). Une approche interdisciplinaire (psychologie sociale, psychologie clinique, psychologie environnementale et géographie) a permis d'aborder le phénomène de la vulnérabilité perçue dans sa complexité.

### — Résultats majeurs

Le principal résultat du projet CLIMATRisk est la formulation d'un modèle explicatif des stratégies de faire face au risque de submersion marine, qui met en lien différents facteurs. Ce modèle permet de comprendre quels sont les facteurs qui expliquent qu'une personne s'engage dans des stratégies pour se protéger ou s'adapter au risque, ou au contraire le fait que certaines personnes préfèrent éviter, voir dénier le problème. Ce modèle permet de mieux adapter les stratégies de communication pour impliquer la population dans la prévention des risques.



Modèle explicatif des stratégies de faire face au risque de submersion marine intégrant des facteurs psychologiques et spatiaux, pour expliquer des stratégies soit centrées sur la solution du problème (vigilant), soit sur la gestion des émotions (évitant).

Nous avons également identifié des barrières psychologiques et spatiales évoquées par les participants pour s'engager sur des stratégies de protection (cartes mentales ou participatives).

### — Production scientifique et brevets

► Lemée C., Fleury-Bahi G. & Navarro O. (in press 2019) Impact of place identity, self-efficacy and anxiety state on the relationship between coastal flooding risk perception and the willingness to cope. *Front. Psychol. - Environmental Psychology*.

► Lemée C., Fleury-Bahi G., Krien N., Deledalle A., Mercier D., Coquet M., Rommel D. & Navarro O. (2018) Factorial structure of the coastal flooding risk perception and validation of a French coastal flooding risk evaluation scale (CFRES) for non-experts. *Ocean and Coastal Management*, 155, 68–75. doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2018.01.030.

Les résultats ont donné lieu à divers produits de valorisation, notamment des communications dans le congrès de psychologie environnementale, Evora, au Portugal en juin 2017 et le colloque interdisciplinaire 'Modes d'habiter et sensibilités environnementales' à Rennes en septembre 2017. Une journée de restitution auprès des autorités et d'associations a été organisée à Carthagène en août 2018, dans laquelle un documentaire réalisé dans le projet a été présenté.

**Le projet CLIMATRisk** est un projet de recherche fondamentale coordonné par Oscar Navarro du Laboratoire de Psychologie des Pays de la Loire, Université de Nantes. Il associe aussi le LETG-Nantes et le Laboratoire de géographie physique de l'Université de Paris-Sorbonne. Le projet a commencé en octobre 2015 et a duré 42 mois. Il a bénéficié d'une aide ANR de 237 853 €.

#### CONTACT

Oscar Navarro : oscar.navarro@univ-nantes.fr  
www.climatrisk.univ-nantes.fr/

# COCORISCO

## Connaissance, compréhension et gestion des risques côtiers d'érosion et de submersion

### — L'étude des risques côtiers par l'analyse conjointe des quatre composantes de la vulnérabilité systémique

Le projet concerne les risques côtiers liés à la mobilité du trait de côte et ses conséquences en termes d'érosion et de submersion (hors zones de cyclones et de tsunamis). Ses objectifs sont d'une part, de mieux comprendre, par un travail de recherche académique pluri et interdisciplinaire, la vulnérabilité des territoires côtiers aux risques d'érosion et de submersion ; d'autre part, de progresser vers des stratégies de prévention et de gestion, en élaborant un guide méthodologique à destination des acteurs du littoral et des praticiens de sa gestion. L'amélioration des stratégies de gestion des risques côtiers ne peut s'appuyer sur la définition classique des risques naturels qui croise l'aléa avec les enjeux. Celle-ci apparaît insuffisante et inadaptée car les risques littoraux contemporains se positionnent simultanément dans un triple contexte évolutif permanent à différentes échelles de temps et d'espace emboîtées : les dynamiques littorales, les tendances actuelles de littoralisation des populations et les conséquences économiques et sociales de ces risques. C'est donc l'amélioration des stratégies de gestion des risques s'appuyant sur l'étude de la vulnérabilité systémique qui est au cœur de ce projet de recherche.

### — L'approche multidimensionnelle et interdisciplinaire de la vulnérabilité systémique

La vulnérabilité systémique considère les aléas, en améliorant leur connaissance, et les enjeux, en tenant compte à la fois de leurs évolutions au cours du temps et de leurs valeurs. Au-delà de ces analyses classiques, sont aussi pris en compte les politiques de gestion des risques et les représentations des acteurs (élus, praticiens de la gestion du littoral et des risques, habitants). Sans cette dimension sociale, les stratégies de gestion peuvent ne pas avoir de sens ou montrent leurs limites d'applicabilité. L'approche de la vulnérabilité côtière est donc néces-

sairement multidimensionnelle et s'appuie sur l'interdisciplinarité. Géologues, géographes, juristes, économistes, psychologues et sociologues sont associés au sein des différentes tâches scientifiques et ont conduit leurs travaux sur des territoires littoraux communs : 5 communes de Bretagne sélectionnées selon le contexte géographique, la diversité géomorphologique, les risques côtiers identifiés et les modes de gestion appliqués, les populations résidentes. Afin d'envisager les retombées pour la société, la réflexion est menée avec deux bureaux d'étude et en s'appuyant sur les avis et les interrogations, du comité de suivi constitué d'élus et de gestionnaires des risques côtiers.

### — Résultats majeurs

L'interdisciplinarité, indispensable à la compréhension de la vulnérabilité systémique, est l'un des résultats majeurs du projet. Cocorisco propose une approche rare sur les risques en intégrant ses quatre composantes. Les avancées significatives sur chacune d'elles ont permis la publication du guide méthodologique de la gestion des risques côtiers, véritable outil destiné aux praticiens. Il est associé au site *Risques-côtiers* et au Mooc *Florisco*. Ces actions ont permis de développer des collaborations nationales (acteurs institutionnels, observatoires) et internationales (CFQCU, MOLOA).

### — Production scientifique et brevets

36 publications nationales et internationales et 32 conférences constituent la production scientifique. 1 700 guides *Gestion des risques d'érosion et de submersion marines. Guide méthodologique* (ISBN-978-2-9549569-0-9) ont été diffusés (collectivités territoriales, services de l'Etat). Y sont associées, le site *Web Risques côtiers*, le colloque international et l'école thématique CNRS (2014), le Mooc *Florisco* (2015) et la poursuite des recherches (2015-2019) dans le projet Fondation de France OSIRISC.

Dans le cadre du projet COCORISCO, la prise en compte et l'analyse intégrée de la vulnérabilité globale ou systémique au travers de ses quatre composantes que sont les aléas, les enjeux, la gestion et les représentations, contribue à l'amélioration de la gestion des risques côtiers d'érosion et de submersion.

**Le projet COCORISCO** est un projet de recherche fondamentale qui avait débuté en mars 2011 pour une durée de 48 mois. Coordonné par LETG-Brest Géomer UMR 6554 Cnrs/UBO, il a rassemblé les 6 partenaires académiques suivants : LETG-Brest Géomer (UMR 6554 Cnrs/UBO, Géographie, UBO-IUEM-Plouzané), LDO (UMR 6538 Cnrs/UBO, Géosciences, IUEM-Plouzané), Amure (UMR 101, Economie, Ifremer/UBO, IUEM-Plouzané), CRPCC (Psychologie de l'environnement, EA 1285, UBO), Géoarchitecture (Géographie et Sociologie, EA 2219, UBO) et LST (UMR 5570 Cnrs/U. Claude Bernard Lyon 1, Géosciences). Ont également été associés à ce projet, 2 bureaux d'étude spécialisés (GEOS AEL, Etel, Réseau ALLEGANS, Brest). Cocorisco a bénéficié d'une aide ANR de 999 908 € ainsi que d'un abondement du Pôle Mer Bretagne de 42 227 € pour un coût total de 2 792 722 €.

#### CONTACT

**Alain Hénaff :**  
alain.henaff@univ-brest.fr,  
www.risques-cotiers.fr/fr



# DELTAS

## Orienter l'action pour des deltas durables

### — Orienter l'action vers une durabilité des systèmes deltaïques par une modélisation intégrée d'évaluation des risques

L'objectif premier du projet DELTAS était d'élaborer un cadre d'intégration et d'analyse scientifique pour évaluer la vulnérabilité des deltas et orienter la gestion durable et les décisions politiques à l'échelle régionale et locale. Bien que chaque delta soit unique, des cadres d'intégration qui reflètent la dynamique et le fonctionnement socio-écologique de ces systèmes peuvent être élaborés et inclus dans les outils d'aide à la décision, en collaboration avec les experts régionaux et communautés scientifiques, pour une gestion durable des deltas. Le projet a porté sur plusieurs questions clés :

- Comment le changement climatique, la pression sur les ressources et le développement de l'ingénierie/des infrastructures rendent-ils vulnérables les populations, la biodiversité et les écosystèmes des deltas ?
- Comment cette vulnérabilité est-elle mesurée ?
- Comment les régions deltaïques font-elles face aux événements extrêmes ?
- Quels sont les seuils hydrologiques et écologiques qui sous-tendent l'intégrité d'une région deltaïque ? Quels sont les facteurs de stress biophysiques et sociaux pertinents au niveau local et régional pour un delta en particulier, comment interagissent-ils et varient-ils dans l'espace et dans le temps ?
- Comment équilibrer la durabilité des deltas avec la croissance économique ?
- Comment réduire les risques à venir tout en atteignant un développement durable ?

### — Télédétection couplée à des expériences sur le terrain impliquant des relevés topographiques et hydrodynamiques à haute résolution

Notre équipe a mené des recherches transversales sur la morphodynamique des deltas, sur le rôle des interventions humaines dans l'instabilité et la vulnérabilité des deltas, et elle a procédé à l'intégration des données de recherche dans des cadres visant à atténuer la vulnérabilité des deltas et à améliorer leur réhabilitation. Nous avons utilisé diverses données de télédétection pour déterminer la dynamique du littoral des deltas, et nous avons couplé les résultats aux expériences de terrain à court terme. Nous montrons les liens entre la réduction de l'apport de sédiments,

due aux barrages et au dragage des chenaux, et les modèles de dispersion des sédiments dans les chenaux et le long du littoral. Le piégeage de la vase et du sable en amont des barrages, et l'extraction à grande échelle du sable dans le lit des rivières, sont considérés comme les causes principales de la diminution de l'apport de sédiments sur les côtes, responsables de l'érosion des deltas. L'extraction induit un creusement des chenaux, qui retiennent le sable venant de l'amont. L'extraction du sable est ainsi responsable du ralentissement de la progradation des secteurs à dominante sableuse des deltas. Un dépôt accru en plaine deltaïque pour combler l'espace d'accommodation créé par l'affaissement accéléré peut avoir un effet similaire sur l'équilibre du transfert de la vase vers la côte, privant potentiellement de vase la zone côtière et favorisant l'érosion accélérée du littoral vaseux.

### — Résultats majeurs

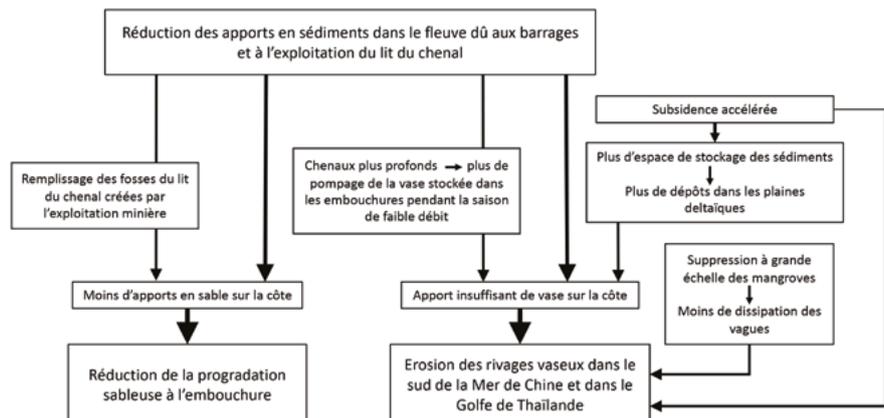
Nos travaux sur l'érosion du delta du Mékong ont attiré l'attention sur la vulnérabilité croissante de ce delta, ils ont trouvé écho dans de nombreux cercles gouvernementaux et séminaires au Vietnam, et ils ont donné lieu à un moratoire sur l'extraction à grande échelle des granulats dans les lits des chenaux, cause majeure d'érosion du delta du Mékong. Notre article : Anthony, E.J., Besset, M., Brunier, G., Goichot, M., Dussouillez, P., Nguyen, V.L., 2015. Linking rapid erosion of the Mekong River delta to human activities. *Scientific Reports*, 5, 14745. <https://www.nature.com/articles/srep14745> a été cité 55 (11/18) fois dans Web of Science.

### — Production scientifique et brevets

15 articles répertoriés dans Web of Science, parmi lesquels :

- Anthony, E.J., Dussouillez, P., Dolique, F., Besset, M., Brunier, G., Nguyen, V.L., Goichot, M., 2017. Morphodynamics of an eroding beach and foredune in the Mekong River delta: implications for deltaic shoreline change. *Continental Shelf Research*, 147, 155-164.
- Anthony, E.J., Besset, M., Brunier, G., Goichot, M., Dussouillez, P., Nguyen, V.L., 2015. Linking rapid erosion of the Mekong River delta to human activities. *Scientific Reports*, 5, 14745. <https://www.nature.com/articles/srep14745>.

Liens mécaniques présumés entre l'érosion côtière du delta du Mékong et une diminution induite par l'homme des sédiments disponibles dans le delta, de même que l'impact de la destruction des mangroves à grande échelle, au profit notamment des élevages de crevettes. D'après Anthony et al., 2015.



**Le projet DELTAS** est un projet de recherche fondamentale coordonné et mené par le CEREGE UMR 34 (Centre Européen de Recherche et d'Enseignement des Géosciences de l'Environnement). Le projet a débuté en septembre 2013 (48 mois) et il a reçu **140 000 euros d'aide de l'ANR** pour un coût total de 308 000 euros.

#### CONTACT

**Edward Anthony :**  
anthony@cerege.fr

# DEMOCRITE

## Chercheurs, pompiers et industriels unis pour l'analyse des risques

### — Urbanisme, grands événements, menace terroriste... : Comment répondre aux futurs défis des services de secours ?

Les Services Départementaux d'Incendie et de Secours (SDIS), de même que la Brigade de Sapeurs-Pompiers de Paris (BSPP) et le Bataillon de Marins-Pompiers de Marseille (BMPM) ont en charge l'élaboration de schémas d'analyse et de couverture des risques pour leurs territoires d'intervention et leur évolution périodique. Ces dernières années ont vu une augmentation constante des interventions (+3 % à +4 % par an, pour un total de l'ordre de 500 000 en 2017 pour la BSPP), le développement de nouvelles menaces (nuisances intentionnelles à distinguer des risques qui sont des nuisances accidentelles) et un besoin accru de gestion des grands événements, cibles potentielles d'attaques (Coupe du monde 2016, JO 2024, etc.) sur des territoires d'une grande complexité, en particulier en milieu urbain. Au démarrage du projet, le besoin de développer des outils d'analyse et de couverture des risques était devenu pressant. Ces outils devaient pouvoir s'intégrer au socle commun SIG2 mis en place à la Préfecture de Police de Paris, dans le but de répondre au mieux aux attentes des populations et de respecter les engagements de la BSPP.

### — DEMOCRITE propose une approche pluridisciplinaire basée sur une plateforme cartographique d'analyse et de couverture de risques

Pour répondre à ces objectifs, l'approche pluridisciplinaire adoptée dans DEMOCRITE a permis de tirer le meilleur parti des compétences de chacun :

- ▶ les opérationnels (BSPP) ont apporté leur connaissance des besoins et du territoire ainsi que leur retour d'expérience,
- ▶ les chercheurs (CEA, PRISME, IMT-Alès, INRIA/X et CERDACC) ont développé des approches innovantes pour traiter les problèmes scientifiques et juridiques,
- ▶ les industriels (IT Link et SYSTEL) ont intégré ces approches, tout en contribuant également aux recherches scientifiques.

L'analyse préliminaire du besoin avait identifié les composants nécessaires pour une plateforme logicielle d'analyse et de couverture de risques :

- ▶ des données géographiques maîtrisées,

- ▶ la cartographie des risques courants dans leurs deux dimensions : probabilité d'occurrence (selon les interventions passées ou par analyse prédictive) et conséquences potentielles (vulnérabilité humaine et fonctionnelle),
- ▶ des premiers modèles rapides pour certains risques majeurs (explosion en milieu urbain et incendie sans intervention des secours).

Les partenaires ont ajouté durant le projet et sans surcoût la cartographie de disponibilité des moyens à un instant donné (couverture des risques) et la cartographie des risques résiduels.

### — Résultats majeurs

Le premier résultat est le succès de l'intégration de ces éléments a priori très disparates alors que le projet était initialement prévu pour être seulement un démonstrateur. Nous pouvons citer également :

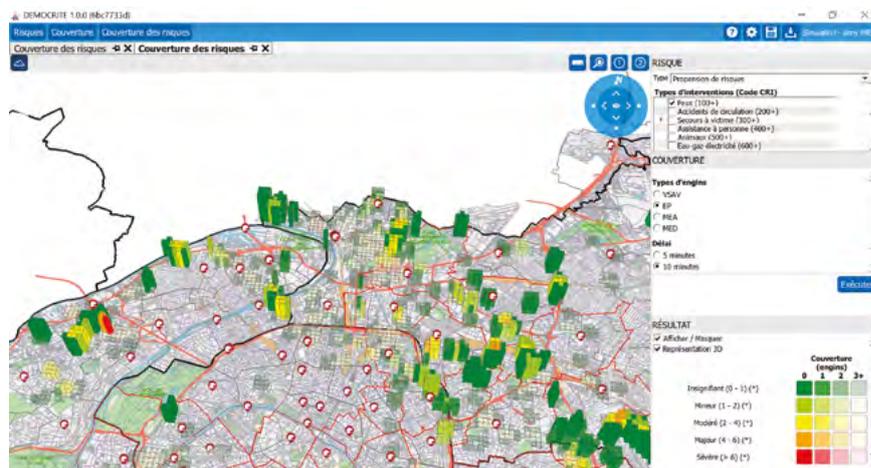
- ▶ le modèle d'explosion, qui est au-delà de l'état de l'art international,
- ▶ l'approche multi-échelle des incendies ainsi qu'une alternative prometteuse (automate tropical),
- ▶ une vision innovante de la cartographie des vulnérabilités,
- ▶ la mise en évidence de « points chauds » du territoire à certaines périodes,
- ▶ les réflexions sur le droit du secouru et les bassins de risques,
- ▶ la préparation d'un projet « suite » pour passer du démonstrateur à un outil opérationnel.
- ▶ deux éléments non prévus : la cartographie de certains risques métier et les cartographies de disponibilité et de couverture.

### — Production scientifique et brevets

Dans le cadre du projet ont été réalisées : 20 communications (dont 11 dans des conférences internationales avec actes), 2 publications dans des revues avec comité de lecture et 1 numéro spécial de la revue RISEO sur le thème « risque et prédiction ». Par ailleurs, le code FLASH fera l'objet d'un dépôt APP d'ici fin 2019.

Deux workshops ont été organisés : un colloque sur les aspects juridiques (octobre 2017) et le colloque final DEMOCRITE (février 2018). Deux thèses en lien avec DEMOCRITE ont été soutenues (Amélie Grangeat et Vianney Bœuf).

Couverture résiduelle « incendie » dans la nuit du 13 au 14 juillet 2015.



**Le projet DEMOCRITE** est un projet de recherche industrielle coordonné par le CEA. Il associe la BSPP, les sociétés ITLINK et SYSTEL, ainsi que des laboratoires de l'institut PPRIME, de l'IMT-Alès et du CERDACC et une équipe mixte INRIA/X. Le projet a commencé en mars 2014 et a duré 55 mois. Il a bénéficié d'une aide ANR de 995 426 € pour un coût global de l'ordre de 2,7 M€, avec un cofinancement SGDSN et DGA. Il a été labellisé par le pôle RISQUES (à présent SAFE cluster).

#### CONTACT

**Emmanuel Lapébie :**  
 anr.democrite@gmail.com,  
 www.anr-democrite.fr/

## APPEL SPÉCIFIQUE

PROGRAMME « FLASH JAPON : GREAT TOHOKU EARTHQUAKE », 2011

## DEVAST

## Analyser les impacts sociaux de la catastrophe du 11 mars 2011 au Japon

## — Enjeux et objectifs : Comprendre comment les catastrophes extrêmes affectent les démocraties

Le bilan humain de la catastrophe du 11 mars 2011 s'élève à 22 000 victimes et plus de 5 000 blessés, avec plus de 200 000 bâtiments endommagés ou détruits. Ce projet cherchait à collecter des données de terrain sur la catastrophe et, en particulier, à étudier la chaîne d'impacts qui a été déclenchée par la catastrophe à travers l'ensemble de la société japonaise, depuis la gestion immédiate de l'urgence jusqu'à la perception des risques à long-terme. Un élément essentiel du projet est qu'il cherche non seulement à analyser la réponse immédiate à la catastrophe, mais aussi ses impacts de long-terme dans la société japonaise et à l'étranger. Ces impacts sont donc considérés non seulement au niveau local, mais aussi au niveau international, notamment au moyen d'une comparaison avec la France.

Les deux thèmes centraux sont :

- ▶ analyser la réponse à la catastrophe, en se concentrant en particulier sur l'organisation de l'évacuation des populations touchées et leurs perspectives de retour ;
- ▶ analyser l'évolution de la perception des risques, notamment dans une comparaison avec la France. Cette comparaison permettra de mieux comprendre comment les démocraties gèrent les catastrophes extrêmes, et comment elles sont touchées par celles-ci.

## — Méthodes : Récolter des matériaux empiriques au moyen d'une recherche de terrain

Le projet repose essentiellement sur une recherche de terrain intensive, conduite dans les régions affectées par le tsunami et par l'accident nucléaire. Cette recherche de terrain inclut des entretiens en profondeur conduits avec les populations déplacées suite à la catastrophe, mais également avec les autorités locales en charge de l'évacuation. Ces entretiens permettront de mieux comprendre la manière dont a été conduite l'évacuation dans différentes zones, ainsi que les perspectives de retour des différentes populations.

Par ailleurs, la recherche cherche également à analyser l'évolution de la perception du risque dans la société japonaise. Cette recherche s'effectuera à la fois au moyen d'entretiens avec des décideurs et des membres de la société civile, mais également grâce à la collecte de matériaux de recherche secondaires.

## — Résultats majeurs

Le projet a fait apparaître de très importantes inégalités dans le traitement des déplacés de la catastrophe, notamment en fonction de leur zone d'habitation. Plus d'une centaine d'entretiens ont été menés dans les zones affectées par la catastrophe, à la fois avec des déplacés et des autorités locales. La manière dont l'évacuation avait été organisée et les problèmes rencontrés par les déplacés ont pu être documentés de façon très complète. L'évolution de la perception du risque parmi les populations a montré l'absence de consensus social sur le niveau de risque acceptable.



Ishinomaki, mars 2012. Un an après la catastrophe, les dégâts du tsunami restent visibles. Crédit photo : F. Gemenne.

## — Production scientifique et brevets

Un volume collectif, « Disaster evacuation and democracies : Lessons from the Fukushima disaster », sous contrat avec Routledge, est en préparation.

L'ensemble des matériaux empiriques collectés, rassemblés en une base de données, est mis à la disposition du public et des chercheurs sur le site internet du projet.

Un essai photographique sera également publié à destination du grand public. Enfin, nous avons organisé deux importants colloques de valorisation de nos résultats : à Paris, les 17 et 18 septembre 2012 ; et à Tokyo (Université de Waseda), le 8 mars 2013.

**Le projet DEVAST** est un projet de recherche fondamentale coordonné par François Gemenne (IDDRI) et Norichika Kanie (TITech) au Japon. Il associe également l'Université de Waseda et le Prof. S. Matsuoka. Le projet a commencé le 1<sup>er</sup> octobre 2011 et a duré 18 mois. Le **financement de l'ANR se montait à 97 550 €**, et le projet a également reçu un financement de la JST de l'ordre de 50 000 €.

**CONTACT**

**François Gemenne** : [Francois.Gemenne@sciencespo.fr](mailto:Francois.Gemenne@sciencespo.fr), [www.devast-project.org](http://www.devast-project.org)

## DOMERAPI

## Le volcan Merapi, dynamique d'un volcan explosif du réservoir au dôme magmatique

## — Comment expliquer l'alternance de cycles courts d'activités éruptives modérées et de cycles centennaux de grandes éruptions explosives ?

L'objectif général de DOMERAPI est d'améliorer notre compréhension des processus magmatiques contrôlant l'activité d'un cas typique de volcans à dôme, en mettant l'accent sur les processus de déclenchement et les échelles de temps de transitions d'une croissance de dôme effusif à une activité explosive. Plusieurs problèmes fondamentaux ont été traités : la contribution de l'assimilation des carbonates de la croûte dans le magma et son rôle dans l'explosivité de 2010, l'origine du magma, ses conditions de stockage, la géométrie des réservoirs magmatiques, les modes de montée du magma dans le conduit et leurs relation avec le style éruptif, la géométrie du système hydrothermal, la morphologie du dôme et le suivi des déformations dans le cratère, la modélisation de effondrement du dôme et des écoulements pyroclastiques en associant des expériences pétrologiques, des mesures géophysiques et des modèles numériques d'écoulement du magma. Ce projet a permis de développer de nouveaux instruments d'observation géophysique et des procédures d'analyse appliquées au suivi en temps réel dont certaines ont été exportées sur d'autres volcans. DOMERAPI a contribué à améliorer la surveillance du Merapi avec un impact direct pour la sécurité des populations.

## — Observations sur le terrain, pétrologie expérimentale, volcanologie physique, imagerie géophysique et modélisation numérique des processus magmatiques

DOMERAPI a mis en œuvre une combinaison de sciences de terrain, de laboratoire et de modélisation dans les domaines de la géophysique, géochimie, géodésie et géologie. La caractérisation des réservoirs magmatiques (profondeur, température, composition des volatiles, géométrie/structure) et l'estimation du rôle de l'assimilation des carbonates dans l'activité explosive ont été effectuées par des études pétrologiques de produits récemment émis, des expériences d'équilibre de phase, de tomographie sismique et des mesures GPS. En reliant des données

pétrologiques, géochimiques et géophysiques des éruptions récentes aux processus dans le conduit, on a pu quantifier et modéliser le transfert du magma depuis la chambre magmatique, à l'intérieur de l'édifice, jusqu'à la surface. La caractérisation du système hydrothermal a été réalisée par des levés géophysiques et géochimiques. DOMERAPI a développé des méthodes d'acquisition et d'analyse de données stéréophotogrammétriques au sol et par satellite qui ont été intégrés dans des modèles d'écoulements pyroclastiques. DOMERAPI a mis en place un réseau de sismomètres, inclinomètres, spectromètres DOAS, caméras thermique et multigaz.

## — Résultats majeurs

- Existence d'un réservoir magmatique principal à environ 15 km de profondeur, probablement alimenté par un réservoir profond situé au MOHO.
- L'explosivité de l'éruption de 2010 s'explique par l'origine profonde du magma riche en eau (environ 12 km).
- Un modèle du système hydrothermal a été développé sur la base de la cartographie géophysique du sommet.
- Un nouveau modèle numérique des écoulements pyroclastiques a été développé, permettant de simuler le comportement des parties denses et diluées.
- Observation d'éruptions phréatiques et magmatiques avec le réseau géophysique multiparamètres dont le fonctionnement se poursuit après le projet sous l'égide du site instrumenté VELI (Volcans Explosifs Laboratoire Indonésien).

## — Production scientifique et brevets

25 publications de rang A et 60 présentations dans des congrès. Des développements de programmes d'analyse de données ont été transférés vers les observatoires d'autres volcans en Indonésie, France et Pérou. Les références des publications sont consultables sur le site de Domerapi (<https://sites.google.com/site/domerapi2/results/publications>).

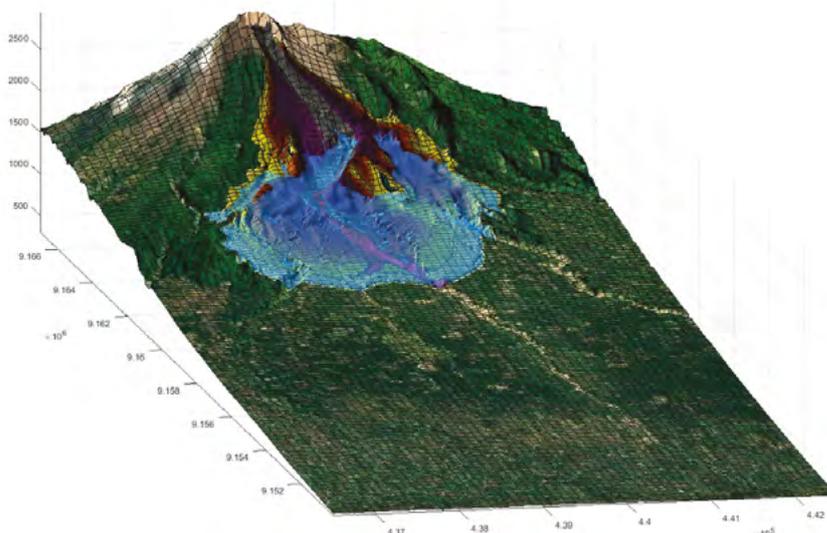
Simulation numérique des parties denses et diluées de l'éruption de Merapi en 2010 (Kelfoun et al., 2017).

**Le projet DOMERAPI** est un projet de recherche fondamentale coordonné par Jean-Philippe Métaxian. Il associe aussi Surono (CVGHM), Caroline Martel (ISTO), François Beauducel (IPGP), Karim Kelfoun (LMV), Philippe Lesage (ISTerre), Sri Widiyantoro (ITB). Le projet a commencé en janvier 2013 et a duré 60 mois. Il a bénéficié d'une aide ANR de 640 000 € pour un coût global de l'ordre de 1 million € en comptant des coûts d'équipements (IRD, Université de Savoie Mont Blanc, OSUG, OPGC), de personnels pour les missions longue durée et expatriations financées par l'IRD.

## CONTACT

**Jean-Philippe Métaxian :**

jean-philippe.metaxian@ird.fr,  
<https://sites.google.com/site/domerapi2/>



# DYNTOHOKU

## Dynamique du séisme de Tohoku de 2011

### — Étude géophysique du tremblement de terre de Tohoku de 2011 : un méga-séisme de subduction inattendu

Ce séisme a surpris toute la communauté scientifique et a produit des dégâts considérables dus au très grand tsunami déclenché par le soulèvement du fond de l'océan. Jusqu'alors, les séismes attendus dans la zone de subduction du nord-est du Japon restaient d'une magnitude inférieure à 8. Cette caractérisation de la région date de la fin des années 70 et début des années 80 quand la centrale nucléaire de Fukushima a été conçue et mise en chantier. Notre but a été d'étudier le séisme de mars 2011 avec une large panoplie de données sismiques et géodésiques afin de modéliser de la façon la plus précise possible ce méga-séisme.

### — Apport des données sismiques et géodésiques à la compréhension du séisme de Tohoku

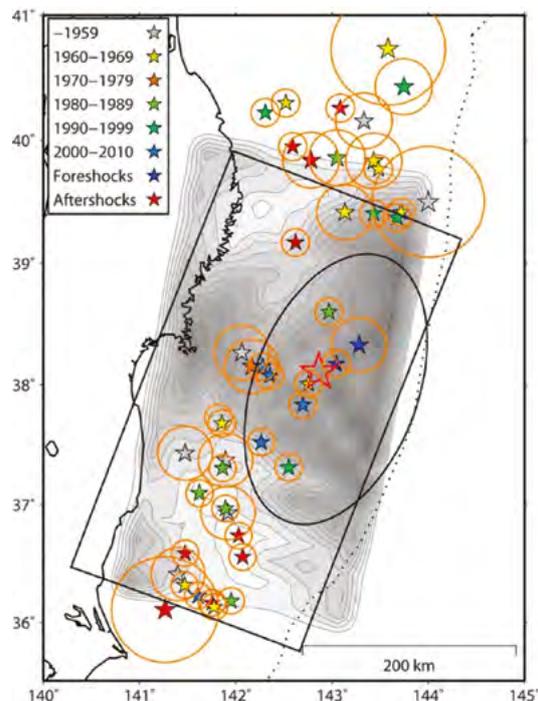
L'objectif était de comprendre la différence entre la déformation basse fréquence et la génération d'ondes sismiques de haute fréquence. Les premières sont responsables du tsunami et les secondes de la destruction provoquée par le passage des ondes sismiques. Les caractéristiques de basse fréquence du séisme ont été une grande surprise : des données géodésiques continentales et du fond de l'océan montrent que le plancher océanique du nord-est du Japon a glissé de plus de 80 m sur la plaque du Pacifique près de la fosse du Japon. Ceci est surprenant parce que les modèles d'accumulation de contraintes dans les zones de subduction ne prévoyaient pas des telles déformations. Il était important d'essayer de comprendre comment se relâchent les contraintes dans les zones de subduction avant, pendant et après un séisme comme celui de Tohoku.

### — Résultats majeurs

Le séisme de Tohoku fait partie d'un large processus de déformation de très grande échelle au nord-est du Japon produit par l'accumulation de contraintes dans une vaste zone de l'interface entre la plaque du Pacifique et les îles du Japon. Cette zone et beaucoup plus étendue et plus cohérente que ce qu'on attendait avant le séisme de Tohoku. Le mécanisme de rupture des séismes de subduction devra être complètement révisé car le très grand déplacement observé près de la fosse du Japon est due à la poussée de la plaque du Japon sur la plaque du Pacifique et non pas à de contraintes locales accumulées près de la fosse. Nous sommes en train de développer des modèles pour expliquer le cycle sismique dans ces zones ainsi que d'autres comme le Chili ou l'Indonésie. Les séismes sont des processus de rupture très complexes avec une composante basse fréquence très lisse ce qui explique le grand déplacement de la plaque du Japon sur celle du Pacifique et des séismes plus fréquents qui se produisent dans des zones de rupture (aspérités) de taille beaucoup plus réduite. Dans le cadre de ce projet des participants ont proposé un modèle qui incorpore nos connaissances actuelles sur le processus multi-échelles qui produisent les tremblements de terre.

### — Production scientifique et brevets

► Aochi, H., T. Ulrich, A. Ducellier, F. Dupros, D. Michea (2013) Finite difference simulations of seismic wave propagation for understanding earthquake physics and predicting ground motions: Advances and challenges, *J. Phys: Conf. Ser.*, **454**, 012010, doi: 10.1088/1742-6596/454/1/012010.



Zone de rupture du tremblement de terre de Tohoku du 11 mars 2011. Le rectangle noir entoure la zone affectée par le séisme, elle fait environ 200 par 450 km. L'ellipse entoure la zone de glissement majeur lors du séisme. Les cercles orange indiquent les zones de ruptures de séismes précédant le choc principal ; et les répliques de celui-ci. Crédit : M. Hideo Aochi.

- Ide, S. and H. Aochi (2013) Historical seismicity and dynamic rupture process of the 2011 Tohoku-Oki earthquake, *Tectonophysics*, 600, 1-13, doi: 10.1016/j.tecto.2011.03.031.
- S. Ruiz and R. Madariaga (2013) Kinematic and dynamic inversion of the 2008 Northern Iwate earthquake. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 103, 694-708.
- Trubienko, O., L. Fleitout, J-D Garaud and Ch. Vigny (2013) Interpretation of interseismic deformations and the seismic cycle associated with large subduction earthquakes. *Tectonophysics*, 589, 126-141, doi: 10.1016/j.tecto.2012.12.027.
- Y. Urata, S. Hok, E. Fukuyama and R. Madariaga (2013) The effect of thermal pressurization on dynamic fault branching. In press, *Geophys. J. Int.*, doi: .1093/gji/ggt457.

**Le projet DYNTOHOKU** est un projet de recherche fondamentale coordonné par R. Madariaga de l'École Normale Supérieure en France et par Satoshi Ide de la Faculté des Sciences de l'Université de Tokyo au Japon. Il associe de plus, le BRGM (France), le NIED (Earth Sciences and Disaster Prevention Research Centre, Japon) et le GSI (Geospatial Information Authority, Japon). Le projet a débuté le 1<sup>er</sup> octobre 2011 pour une durée de 18 mois. **L'aide de l'ANR a été de 85 224 €.**

#### CONTACT

**Raul Madariaga** : madariag@geologie.ens.fr

# ECOCORAIL

## Un éco-matériau durable produit par la mer pour renforcer les côtes océaniques

### — Procédé physico-chimique pour la synthèse d'éco-matériaux durables pour le renforcement et la dépollution des côtes océaniques

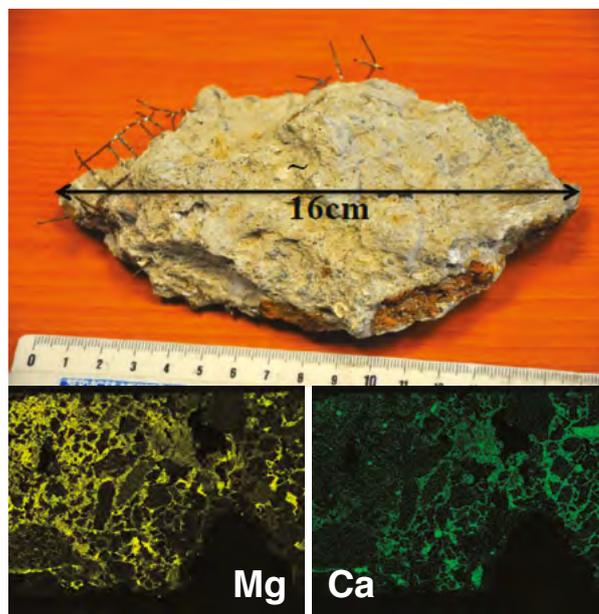
Ces dernières années, on assiste à une érosion considérable des côtes océaniques, conséquence de la montée progressive des océans et des phénomènes climatiques violents. Les côtes françaises sont particulièrement touchées, avec un recul de dunes et des plages de sable ainsi qu'une érosion des falaises. Les différentes techniques existantes pour réduire l'érosion et ses conséquences sont relativement onéreuses et sans doute peu efficaces à long terme. Sans un entretien permanent des digues et des ouvrages d'art existants, la mer reprendra ses droits. La détérioration de ses ouvrages maritimes résulte le plus souvent de l'affouillement des fondations par les vagues et les courants. Il est alors extrêmement difficile d'intervenir, car souvent dans l'eau, et les coûts engendrés sont énormes, quand ils sont faits. Le projet consiste à développer et optimiser un procédé efficace et écologique, le Géocorail, qui permet de maintenir aussi bien le sable en place que l'enrochement des brise-houles. Sur des sites en bord de mer sujets à une forte dégradation liée à l'érosion, le principe consiste à favoriser, par électrolyse de l'eau de mer, la création d'un béton naturel à partir des sédiments et des ions naturellement présents en quantité dans l'eau de mer. On devrait arriver ainsi à créer un conglomérat extrêmement résistant autour d'un grillage en métal.

### — L'électrochimie et la protection cathodique des aciers au service de la fabrication d'un béton naturel en milieu marin

La technique utilisée est basée sur une méthode bien connue de protection cathodique des structures métalliques en eau de mer qui a pour conséquence de faire précipiter sur une grille en acier, les ions calcium et magnésium naturellement présents dans l'eau de mer sous la forme d'un dépôt de calcomagnésien (l'équivalent du tartre). L'idée est donc de faire précipiter ce dépôt en volume dans une matrice de sédiment côtier (sable, coquillage, gravier) et qu'il fasse office de ciment naturel. Compte tenu que les partenaires de ce projet sont tous des laboratoires en bord de mer ou ayant un accès privilégié à la mer et à ses côtes, une approche « in situ » à différentes échelles a été développée par l'installation de sites expérimentaux en bord de mer (en immersion permanente, en zone de marnage et sur un site pilote grandeur nature). Ces expérimentations ont permis de confronter les conditions réelles aux résultats parallèlement obtenus en laboratoire pour comprendre les mécanismes de croissance de ces matériaux. Ainsi de multiples conditions expérimentales ont pu être testées (densité de courant électrique, durée, agitation, température, différence de composition de l'eau de mer entre l'océan Atlantique, la Manche et les eaux du Pacifique sud, ...). Les agglomérats calcomagnésiens (ou Géocorail) ont ensuite été validés par de multiples techniques d'analyses aussi bien microscopique, spectrométrique et thermique que mécanique.

### — Résultats majeurs

Parmi les résultats majeurs de ce projet, notons la compréhension des mécanismes de croissance en volume des dépôts calcomagnésiens permettant de maîtriser la synthèse du Géocorail dans différents environnements. Ce matériau possède de plus une bonne résistance mécanique à la compression le



Bloc de Géocorail formé dans une matrice de sable autour d'une grille en acier. L'ensemble est cimenté par du dépôt calcomagnésien comme le confirme les analyses MEB/EDS d'une coupe transverse.

rendant très intéressant pour la consolidation du trait de côte. Il s'avère également que la croissance de ce dépôt permet de piéger des éléments métalliques polluants dispersés dans l'eau de mer tels que le nickel, le plomb ou le chrome. Ce résultat augmente d'autant son intérêt car ce processus pourrait être utilisé dans la dépollution de certains sites.

### — Production scientifique et brevets

- Nguyen Dang, D., Gascoin, S., Zanibellato, A., Da Silva, C.G., Lemoine, M., Riffault, B., Sabot, R., Jeannin, M., Chateigner, D., Gil, O., *Role of Brucite Dissolution in Calcium Carbonate Precipitation from Artificial and Natural Seawaters*, *Crystal Growth and Design*, 17 (2017), pp. 1502-1513.
- Carré, C., Gunkel-Grillon, P., Serres, A., Jeannin, M., Sabot, R., Quiniou, T., *Calcareous electrochemical precipitation, a new method to trap nickel in seawater* (2017) *Environmental Chemistry Letters*, 15 (1), pp. 151-156.
- « Table ronde de la biodiversité diversité ultra-marine », 07/12/2017 au Sénat - Paris.

**Le projet ECOCORAIL** est un projet de recherche à la fois fondamental et appliqué. Il est coordonné par le LaSIE de l'Université de La Rochelle. Le consortium de ce projet intègre 4 autres partenaires : le PPME de l'Université de La Nouvelle Calédonie, l'ABTE de l'Université de Caen, le CRISMAT du CNRS - Caen et l'entreprise Géocorail SAS. Ce projet a débuté en janvier 2014 pour une durée de 5 ans. Il a bénéficié d'une aide de l'ANR d'un montant de **1 M€** pour un coût total de 4,2 M€.

#### CONTACT

**Marc Jeannin** : marc.jeannin@univ-lr.fr

## E-GRAAL

## Système d'alerte rapide aux tremblements de terre basé sur des signaux de gravité

## — Le but de E-GRAAL est l'étude de la faisabilité d'un système d'alerte rapide aux tremblements de terre basé sur les signaux de gravité

Ce travail se place dans le contexte de l'amélioration des systèmes d'alerte rapide aux tremblements de terre (Earthquake Early Warning Systems), avec une technique innovante.

Pendant un tremblement de terre, une modification quasi-instantanée du champ gravitationnel se produit partout sur terre, avant l'arrivée des ondes sismiques. La détection d'un tel signal pourrait améliorer les performances des systèmes d'alerte rapide aux tremblements de terre, aujourd'hui basés sur les ondes sismiques se propageant à quelques kilomètres par seconde. En particulier, ce système pourrait permettre de gagner des secondes précieuses pour la mise en place de procédures de sécurité, il pourrait aussi réduire la zone, proche de l'épicentre, dans laquelle il n'y a aucune alerte (« la zone aveugle »), et il pourrait aussi permettre une détermination plus rapide de la magnitude des grands séismes.

L'objectif du projet est l'étude de faisabilité d'un tel système. Ceci comporte plusieurs étapes : tout d'abord, le développement d'un modèle théorique du signal de gravité. Ensuite, la détection du signal de gravité dans les données des sismomètres existants et son exploitation pour la vérification des modèles. Enfin, l'étude de faisabilité d'un détecteur de nouvelle génération, qui permettrait d'améliorer les systèmes d'alertes existants.

## — Utilisation de méthodes à la fois propres à la sismologie et à la physique des détecteurs d'ondes gravitationnelles

Les calculs théoriques effectués pour estimer l'amplitude et la forme du signal de gravité produit pendant un tremblement de terre ont été effectués grâce à des méthodes analytiques mais aussi avec des simulations numériques utilisées en sismologie, par exemple la technique des « modes propres de la terre ».

La première détection du signal de gravité dans les données des sismomètres a été obtenue grâce à des techniques d'analyse des données sismologiques combinées à des techniques statistiques de signaux très faibles utilisées dans le domaine de la recherche des ondes gravitationnelles. L'étude de faisabilité d'un détecteur futur du signal de gravité bénéficie de l'expérience du domaine des détecteurs d'ondes gravitationnelles.

**Le projet E-GRAAL** est coordonné par le laboratoire Astroparticule et Cosmologie (APC, UMR7164). Les partenaires sont le laboratoire APC et l'IPGP (Institut de Physique du Globe de Paris). Le projet a commencé en janvier 2015 pour une durée de 57 mois. Il a bénéficié d'une aide ANR de 348 700 €, pour un coût complet de 1 492 600 €.

**CONTACT**

**Matteo Barsuglia (CNRS-APC) :**  
barsuglia@apc.univ-paris7.fr

## — Résultats majeurs

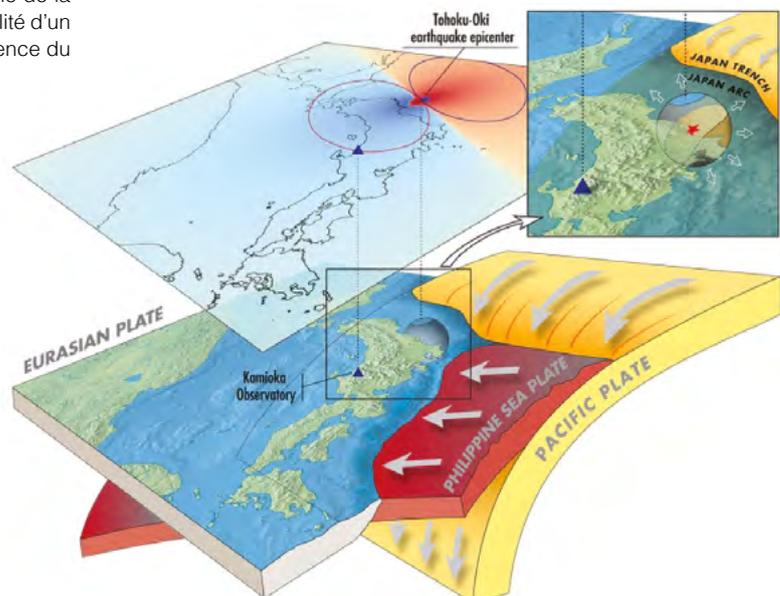
Le résultat le plus important du projet a été la première détection d'un signal de gravité pendant un tremblement de terre et avant l'arrivée des ondes sismiques. Une première évidence a été obtenue en 2016, lors du grand tremblement de terre de 2011 au Japon. Une détection robuste du signal de gravité a été obtenue en 2017.

Les instruments existants ne sont pas encore capables d'améliorer les performances des systèmes d'alerte rapide, mais la détection de ce signal permet déjà de mesurer la magnitude du séisme en quelques minutes. Ceci pourrait avoir des retombées pour les alertes aux tsunamis. Nous continuons maintenant la faisabilité d'un détecteur de nouvelle génération et l'étude de ses performances pour l'amélioration des systèmes d'alerte aux tremblements de terre.

## — Production scientifique et brevets

- ▶ Earthquake early warning using future generation gravity strainmeters, K.Juהל, accepté pour publication sur JGR, solid Earth <https://eartharxiv.org/yqb3a>.
- ▶ Impact of infrasound atmospheric noise on gravity detectors used for astrophysical and geophysical applications, D. Fiorucci et al., Phys. Rev. D (2018).
- ▶ Observation and modeling of the elasto-gravity signal preceding the direct seismic waves, M.Vallée et Science (2017).
- ▶ Prompt gravity signal induced by the 2011 Tohoku-Oki earthquake, J.-P.Montagner et al., Nature Communications (2016).
- ▶ Transient gravity perturbations induced by earthquake rupture, Harms J. et al, Geophys. J. Int. (2015).

Représentation de la rupture lors du tremblement de terre de Tohoku-Oki, dont l'hypocentre (étoile rouge) est représenté sur l'interface de subduction. Sont représentés 1) la propagation des ondes sismiques dans la Terre 10 secondes après l'initiation de la rupture, délimitée par la sphère (zoom en haut à droite) et 2) la distribution de l'anomalie de gravité (carte superposée à la topographie, en haut à gauche). Crédit : Joël Dyon, IPGP, 2016.



## EISHA

## Les conditions de vie des ménages haïtiens : situation actuelle et impact du séisme

## — 4 ans après le séisme : marché du travail et impact du séisme sur les conditions de vie

Un des premiers objectifs du projet EISHA est de collaborer avec les autorités haïtiennes pour fournir des indications propres à optimiser l'utilisation des ressources pour le rétablissement durable du cadre de vie quotidien et des systèmes économiques et sociaux.

Au cœur du projet EISHA, la mise en place d'une enquête représentative au niveau national et d'une enquête panel, centrée sur l'aire métropolitaine, afin de recueillir les données indispensables pour dresser un état des lieux de la situation économique et sociale du pays en 2012 mais aussi d'avoir une évaluation scientifique de l'impact du séisme. Le séisme n'a pas frappé de façon uniforme la population. Il était donc important d'identifier les facteurs de vulnérabilité des ménages afin que les autorités puissent formuler des politiques non seulement d'atténuation des conséquences du séisme mais aussi de politiques préventives ciblées sur les plus vulnérables.

## — Enquête nationale sur les conditions de vie de la population en 2012 et enquête longitudinale des ménages à Port au Prince 2007/2012

Le projet a relevé trois importants défis méthodologiques. En premier lieu, le contexte de destruction massive des logements rend caduque la base de sondage issue du recensement de la population (2003). Le projet a choisi de prendre aussi en compte la population mouvante installée dans les camps de réfugiés. En deuxième lieu, en parallèle de l'enquête nationale, l'équipe DIAL et l'IHSI ont aussi mené une enquête panel avec « tracking » sur un échantillon indépendant constitué de ménages et d'individus déjà enquêtés en 2007. L'objectif de ce panel est d'apprécier les dynamiques individuelles, en comparant leur situation actuelle avec celle qui prévalait trois ans avant le séisme. Enfin, les difficultés liées aux conditions matérielles post-séisme ont significativement aggravé les conditions de réalisation d'une enquête conventionnelle de couverture nationale. Pour y pallier, l'enquête a été conduite sur le terrain grâce à une tablette informatique (dispositif CAPI avec GPS). Ceci a permis d'optimiser la qualité des données grâce à un contrôle en temps réel des opérations de terrain et d'offrir une disponibilité immédiate des données collectées.

**Le projet EISHA** est un projet de recherche en microéconomie appliquée porté par l'Unité Mixte de Recherche DIAL (associant l'Institut de Recherche pour le Développement et l'Université Paris Dauphine). Ce projet ANR, d'une durée de trois ans, avait comme partenaires en France l'Insee et l'Adetef et en Haïti l'Institut Haïtien de Statistique et Informatique (IHSI). Il a bénéficié d'un **financement ANR d'un montant de 398 000 €** pour un coût global de près de 900 000 €.

## CONTACTS

**Javier Herrera** : herrera@dial.prd.fr  
**Claire Zanuso** : zanuso@dial.prd.fr



Le déblaiement 15 mois après le séisme. Crédit photo : Claire Zanuso, 2011.

## — Résultats majeurs

- ▶ Collection de données, développement d'outils d'enquête et élaboration d'un diagnostic des conditions de vie post-séisme.
- ▶ Formation de ~150 étudiants aux concepts de base relatifs au marché du travail, aux conditions de vie, aux enquêtes statistiques ainsi qu'au maniement et à l'administration d'une enquête statistique.
- ▶ Association de l'IHSI (renforcement d'une institution clef dans la reconstruction, garante de l'appropriation des résultats par les autorités nationales).
- ▶ Présentation des premiers résultats : conférence de presse suivie d'une conférence de restitution (en Haïti), conférence-débat « Quatre ans après le séisme en Haïti : Quel impact pour la population et quelles conséquences sur les politiques publiques ? » (en France).
- ▶ Mise en commun des ressources pour une actualisation cartographique et un recensement des camps (projet EISHA, Banque Mondiale, UNICEF et USAID) coordonnée par l'IHSI.

## — Production scientifique et brevets

- ▶ À destination des autorités et décideurs : rapports thématiques (marché du travail, impact du séisme) et présentations de restitution sur place auprès des institutions haïtiennes et internationales, ONG, étudiants et universitaires lors d'un séminaire organisé à Port-au-Prince par les projets EISHA et Kal-Haïti le 26-27 septembre 2013).
- ▶ À destination des bailleurs : conférence à Paris le 14 janvier 2014.
- ▶ À destination des académiques : Herrera, J., Roubaud, F., Saint-Macary, C., Torelli, C., Zanuso, C. (2014), L'Evolution des conditions de vie en Haïti entre 2007 et 2012. La réplique sociale du séisme. IHSI, DIAL, Port-au-Prince, 420pp.

# ESCAPE

## Simuler sur ordinateur l'évacuation massive des populations

### — L'évacuation massive est une stratégie complexe dont les dynamiques peuvent être explorées à partir de modèles de simulation réalistes

L'évacuation des populations peut être la seule parade efficace face à un risque, qui globalement augmente avec les taux d'urbanisation sur les littoraux et dans les deltas, la présence d'usines à risques dans des zones de fortes densités de population, et le changement climatique. Si la planification de cette stratégie est nécessaire, son évaluation en dehors d'un contexte de crise est difficile. La simulation informatique prend donc le relais en s'appuyant sur des modèles de plus en plus réalistes. L'objectif est d'explorer les effets collectifs de milliers de décisions individuelles prises dans des contextes de stress, d'informations imparfaites et d'environnement potentiellement dégradé. Pour répondre à cet objectif, les modèles intègrent une grande variété de profils et de comportements individuels ainsi que des modes de déplacement à pied, en véhicule personnel ou collectif. Les simulations permettent alors de calculer des délais d'évacuation, d'identifier des zones vulnérables au sein des réseaux de transport ou de mettre en exergue des points aveugles dans l'organisation des plans. Les opportunités de ce type de modèles au sein des cellules de crise sont nombreuses.

### — Un modèle multi-agent de description des populations couplé à un système d'information géographique de description des territoires

Le réalisme des simulations passe par une description précise des territoires concernés par les aléas et leurs enjeux. L'utilisation d'un système d'information géographique permet de structurer ces données. Ce réalisme passe également par une description détaillée de la population à évacuer. Avec l'utilisation de la modélisation à base d'agents, chaque agent est différencié selon plusieurs critères : genre, âge, composition familiale... Chaque agent dispose également d'une perception et d'une représentation de son environnement, et peut agir en conséquence. En cas d'alerte, il suivra, ou non, les consignes qui lui sont indiquées. Si cette décision est fonction de ses caractéristiques et ressources propres, elle peut également être conditionnée par les choix pris dans son voisinage ou parmi ses proches. Et cette décision n'est pas figée dans le temps mais peut évoluer au cours de l'événement. L'ensemble de ces micro décisions peut alors conduire à des scénarios difficilement prévisibles. Cette complexité implique donc des analyses de sensibilité du modèle et permet de développer des algorithmes de calibration pour valider et réaliser des scénarios précis : qui évacuer et vers où ? À quel moment prendre la décision d'alerter les populations ?

### — Résultats majeurs

ESCAPE a vocation à évoluer vers une plateforme de modélisation et de simulation sur tablette avec pour objectif d'être utilisé lors d'exercices en cellule de gestion de crise. La possibilité de voir évoluer, en cours d'exercice, les effets des décisions prises par l'exécuteur du plan et par les populations doit permettre de rendre plus réaliste ce type d'exercice. Cela doit également permettre de démultiplier la variété des situations possibles, et de préparer ainsi les opérationnels à d'éventuels effets de surprise en situation réelle. La possibilité de rejouer les mêmes scénarios permet alors d'essayer de nouvelles stratégies.



Simulation numérique du déplacement de voitures (verts) et d'autobus (rouges) sur le réseau routier de l'agglomération rouennaise. La calibration du modèle à partir d'enquêtes ménages déplacements et la comparaison des résultats de simulations avec des données de trafic observés permet de valider le modèle.  
Crédit : Clément Caron, Éric Daudé / IDEES UMR 6266.

### — Production scientifique et brevets

- ▶ Chapis K., Taillandier P., Gaudou B., Drogoul A., Daudé É. (2018), A Multi-modal Urban Traffic Agent-Based Framework to Study Individual Response to Catastrophic Events. PRIMA, Springer Nature Switzerland, p. 440-48, doi:10.1007/978-3-030-03098-8\_28.
- ▶ Taillandier P., Czura G., Tranouez P., Daudé, É. (2018), Agent-based Simulation of Traffic with the GAMA Platform: Application to the Evacuation of a city, International Journal of Geographical Information Science, in rev.

**Le projet ESCAPE** est un projet de recherche fondamentale coordonné par l'UMR CNRS 6266 IDEES (Identités et Différenciations des Espaces, de l'Environnement et des Sociétés). Il associe le LITIS (Laboratoire d'Informatique, de Traitement de l'Information et des Systèmes), l'UMMISCO IRD (Unité de Modélisation Mathématique et Informatique des Systèmes Complexes), Vietnam ainsi qu'un prestataire privé, BRL Ingénierie. Le projet a commencé en décembre 2016 pour une durée de 48 mois. Il a bénéficié d'une **aide ANR de 653 k€** pour un coût global de 3 102 k€.

#### CONTACT

**Éric Daudé** : [eric.daude@cnrs.fr](mailto:eric.daude@cnrs.fr),  
<https://mag.hypotheses.org/escape>

## ESCAPE

## Les sociétés rurales face aux changements environnementaux en Afrique de l'Ouest

## — Le défi posé par le changement climatique pour l'agriculture en Afrique de l'Ouest

L'Afrique Sub-Saharienne est particulièrement vulnérable aux changements environnementaux du fait de la combinaison entre une forte variabilité climatique naturelle, une forte dépendance aux activités liées au climat comme l'agriculture pluviale et des capacités économiques et institutionnelles limitées pour faire face et s'adapter à la variabilité et au changement climatiques. De plus, même en négligeant les effets potentiels du changement climatique sur les systèmes de production, l'Afrique Sub-Saharienne fait face à des crises alimentaires récurrentes ainsi qu'à une pression croissante sur les ressources hydriques. Le futur de cette région dépend de la capacité du secteur de l'agriculture à garantir la sécurité alimentaire sous les pressions multiples d'une population en augmentation croissante, de ressources hydriques qui se raréfient, de sols qui s'appauvrissent et d'une productivité qui diminue. Les systèmes de production ruraux en Afrique doivent en conséquence évoluer sous ces pressions pour sortir du piège de la pauvreté. Cette évolution doit se faire au plus vite et prendre appui sur le meilleur de la connaissance scientifique.

## — La mise en pratique de l'interdisciplinarité

La mise en dialogue des sciences biophysiques et des sciences humaines est le défi qu'a voulu relever le projet ESCAPE en réunissant huit laboratoires français et dix instituts africains autour de deux objectifs : (i) caractériser la vulnérabilité des sociétés rurales en Afrique aux changements environnementaux et climatiques et (ii) explorer des pistes d'adaptation pour atténuer cette vulnérabilité. Tout en menant une recherche spécifique sur l'évolution récente et les projections futures du climat, de l'environnement et de ses impacts, le projet a intégré la dimension humaine sur des terrains au Sénégal, au Mali, au Niger et au Bénin. Démêler cette complexité des systèmes couplés humain – nature a nécessité une approche capable de répondre à des enjeux majeurs de l'interdisciplinarité : i) maîtriser les notions de base de plusieurs disciplines pour pouvoir construire une réflexion commune à partir de concepts et de questions partagés, ii) recueillir des données tant disciplinaires qu'intégratives à plusieurs échelles et sur plusieurs régions et iii) développer des méthodes analytiques pour relier des facteurs sociaux et écologiques sans cesse en mouvement.

## — Résultats majeurs

Le projet ESCAPE a montré que la sécheresse des années 80 fait place à un climat plus humide qui se traduit par une reprise de la végétation et crée de nouvelles opportunités pour l'agriculture. Les sociétés rurales perçoivent bien ces changements et font preuve d'une importante capacité de réaction et d'adaptation spontanée même si toutes les transformations sociétales observées ne sont pas des réponses directes à ces changements. Cependant des risques nouveaux apparaissent comme les événements pluvieux violents, les inondations ainsi qu'une hausse de la température qui menacent l'agriculture sahélienne dans un contexte de vulnérabilité croissante liée à l'explosion démographique.



Grenier à mil au Sénégal. Crédit photo : B. Sultan, avril 2012.

## — Production scientifique et brevets

Ces résultats ont donné lieu à plus de 30 publications ainsi qu'à de nombreuses communications à la fois dans le domaine du climat, de l'agriculture, de l'écologie, de l'hydrologie mais aussi des sciences humaines et sociales.

Un ouvrage collectif a été édité pour rassembler les résultats les plus marquants du projet et apporter une contribution précieuse pour mieux anticiper les risques climatiques et évaluer les capacités des sociétés africaines à y faire face.

**Le projet ESCAPE** (Environmental and Social Changes in Africa: Past, present and futurE) est un projet de recherche fondamentale coordonné par B. Sultan. Ce projet a réuni entre février 2011 et décembre 2015 huit laboratoires français (LOCEAN, LMTG, CIRAD, LPED, OMP, CNRM, LTRE, HSM) et dix instituts africains (AGRHYMET, CEFORP, UCAD, LPAOSF, LASDEL, IER, DNM Mali, AFRICARICE, ICRISAT). Il a bénéficié d'une aide ANR de 1 660 444 € pour un coût global de l'ordre de 8 387 568 €.

**CONTACT**

**Benjamin Sultan** : benjamin.sultan@ird.fr

# FireCaster

## Simuler les incendies à haute résolution et estimer les risques sur le territoire

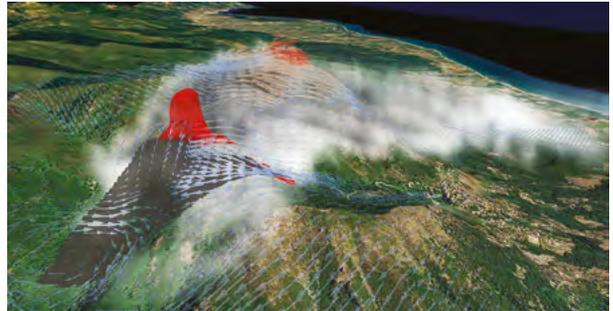
### — Un ensemble cohérent, des données aux résultats, chaîne numérique pré-opérationnelle d'aide à la décision en crise et prévision de risque

Le contexte de changement climatique couplé à une occupation humaine grandissante des espaces végétaux complexifie la gestion des incendies de forêt. Il existe cependant un contexte favorable au développement de nouveaux systèmes d'aide à la décision en incendie, des ordinateurs de plus en plus puissants, des données plus précises et une avancée des méthodes.

L'objectif de FireCaster est de les développer de manière cohérente afin de pouvoir les assembler dans une plateforme pré-opérationnelle. Pour cela il est nécessaire de modifier, généraliser et valider un ensemble d'approches prototypes (ayant fonctionnées sur quelques événements) afin de proposer des méthodes pertinentes dans un contexte prédictif, de réponse courte avec des observations effectivement disponibles en condition réelle. Un modèle de végétation de nouvelle génération permet ainsi de fournir par calcul probabiliste une carte du risque quotidien (grâce à une estimation des enjeux économiques potentiels) et de déterminer les paramètres pour un autre modèle activé en situation de crise. Il permet d'estimer rapidement les scénarios de lutte, leur coût, la position du front, la dispersion de fumées et la micro-météorologie locale.

### — Calcul intensif pour la prévision météorologique de la propagation, estimation d'incertitude, enjeux économiques et assimilation de données

Le système développé est basé sur des outils de modélisation avancés (méthodes d'ensemble, modèle de sol, couplage multi-physique) et l'utilisation de calcul haute performance. Un modèle de végétation de nouvelle génération est au centre du système, permettant de fournir les paramètres nécessaires pour les modèles de combustion. Les modèles MesoNH et ISBA (humidité du végétal mort) (CNRM) sont ainsi utilisés pour disposer d'une prévision quotidienne à haute résolution et haute fréquence (inférieure à 1 heure). Ces prévisions permettent d'envisager le test de simulation probabiliste (INRIA) de propagation où il sera possible de quantifier la fiabilité du modèle. Couplé à un volet économique (LISA), ces probabilités de danger permettent d'estimer le risque potentiel quotidien. Une méthode d'assimilation de données d'observation de flamme (CECI) est aussi développée pour réduire l'incertitude sur la position future du front. Enfin, initialisé quotidiennement par les prévisions du modèle de prévision numérique du temps AROME, la simulation couplée feu/atmosphère (CNRM/LA/SPE) détermine les effets météorologiques locaux ainsi que la dispersion du panache de l'incendie. Une version compressible du modèle Méso-NH est par ailleurs développée en mode recherche, afin d'évaluer l'apport sur la version anélastique classiquement utilisée dans le voisinage du feu.



Simulation couplée MesoNH/ForeFire de l'aérodynamique et propagation de l'incendie de Cervione, 2 janvier 2018. Champ de vent (vecteurs), zone brûlée (au sol, gris), iso-surface d'énergie cinétique turbulente au-dessus de la zone de flamme et traceur de fumée.

### — Résultats majeurs

La série exceptionnelle d'incendies de l'été 2017 en Corse a poussé à mettre en place des prototypes de méthodes dès le mois de juin. Sept cas d'études ont ainsi pu être traités, en temps réel, mais sans disposer de l'intégralité des développements. Une chaîne de prévision, banc d'essai des méthodes, est ainsi en place depuis deux ans. Il propose la météorologie à T+42h et 600 m de résolution. La disponibilité de nouveau modèle de combustible et les deux thèses commencées vont y ajouter les dimensions probabilistes et d'assimilation de données. Une action de mise à disposition des résultats avec les services incendies et un transfert vers un centre opérationnel national sont prévues avant la fin du projet.

### — Production scientifique et brevets

- ▶ 6 papiers issus de conférences internationales avec actes
- ▶ 1 article, 1 soumis et 2 en préparation
- ▶ 4 conférences invitées
- ▶ 1 déclaration d'invention mise à jour

**Le projet FireCaster** est un projet de recherche coordonné par le SPE (Sciences pour l'Environnement CNRS/Université de Corse). Il associe les laboratoires CECI (CNRS/CERFACS), Climat, Environnement, Couplages et Incertitudes, Inria, Institut national de recherche en informatique et en automatique, CNRM (CNRS/Météo-France), Centre National de Recherches Météorologiques, LA (CNRS/ Université Paul Sabatier), Laboratoire d'Aérodynamique et LISA (CNRS/Université de Corse), Lieux, Identités, eSpaces et Activités. Le projet a commencé en janvier 2017 pour une durée initiale de 42 mois. Il bénéficie d'une aide ANR de 441 761 € pour un coût global de 2 634 301 €.

#### CONTACT

**Jean-Baptiste Filippi** : filippi@univ-corse.fr,  
<http://firecaster.universita.corsica>

# FloodScale

## Comment se forment les crues rapides et comment les simuler à différentes échelles ?

### — Les crues rapides : des phénomènes difficilement prévisibles encore à décrypter

Les crues rapides (ou crues éclair) sont l'un des risques naturels les plus destructeurs, notamment en région Méditerranéenne. Les travaux précédents ont montré l'importance, selon les épisodes, de la variabilité spatio-temporelle de la pluie, mais aussi l'impact de la géologie, de l'occupation des sols et de l'humidité initiale des sols, sans toutefois pouvoir généraliser ces conclusions à tout un territoire. La compréhension des crues rapides est aussi un défi météorologique puisqu'elle requiert des observations à des échelles spatiales et temporelles très fines (1 km<sup>2</sup>, 5 min) mais sur de vastes régions. Les mesures des débits de crue sont aussi dangereuses, ce qui rend l'observation de ces crues difficile et lacunaire. Le projet FloodScale, une contribution au programme international HyMeX<sup>1</sup>, a proposé des dispositifs de mesures multi-échelles innovants et adaptés au phénomène, et a permis d'améliorer la compréhension et la simulation des processus hydrologiques conduisant aux crues rapides. Les dispositifs proposés, combinés à des approches d'analyse des données et de modélisation renouvelées ont permis d'aborder deux verrous scientifiques : la question du changement d'échelle et celle de la simulation en bassins non jaugés (sans mesures de débits).

### — Mieux comprendre les crues rapides : développement d'instrumentations innovantes et apport d'une stratégie d'observation et de modélisation multi-échelle

Le projet FloodScale s'est concentré sur les bassins du Gard et de l'Ardèche, avec une stratégie d'observations et de modélisation multi-échelle, depuis le versant jusqu'au bassin de 2 000 km<sup>2</sup>, en passant par les bassins de 1 à 100 km<sup>2</sup>. Les observations ont documenté la variabilité spatio-temporelle des pluies et des réponses hydrologiques (débits, niveaux d'eau dans les cours d'eau, humidité des sols, flux de surface ou de sub-surface), en lien avec les caractéristiques des bassins (topographie, géologie, pédologie, occupation du sol) elles aussi caractérisées. Un effort important a porté sur la quantification de la pluie et de son incertitude et sur le développement de méthodes de mesures innovantes des débits de crue et de quantification des incertitudes associées. Les observations ont été menées en continu durant quatre ans, avec des campagnes spécifiques sur alerte durant l'automne pour documenter les épisodes de crue. La modélisation a permis de formaliser et évaluer différentes hypothèses de fonctionnement hydrologique en comparant la réponse simulée aux observations. Cette stratégie itérative d'aller-retour entre observations et modélisation a permis de dégager, selon les contextes, les hypothèses de fonctionnement les plus pertinentes.

### — Résultats majeurs

Les résultats du projet ont validé les stratégies d'observation (combinaison de mesures en continu et de mesures sur alerte) et de modélisation (approche itérative observation-modélisation) proposées pour l'analyse des crues rapides avec : l'acquisition d'un jeu de données multi-échelle unique, disponible sur la BDD HyMeX ; une méthode de fusion radar-pluviographe et son erreur d'estimation; la mise au point de méthodes de mesures sans contact des débits en crue et quantification des erreurs associées; l'impact fort de la géologie sur la différenciation des réponses hydrologiques, et la forte capacité de stockage des horizons de roches altérées ; la mise en évidence et la quantification des flux de sub-surface.

### — Production scientifique et brevets

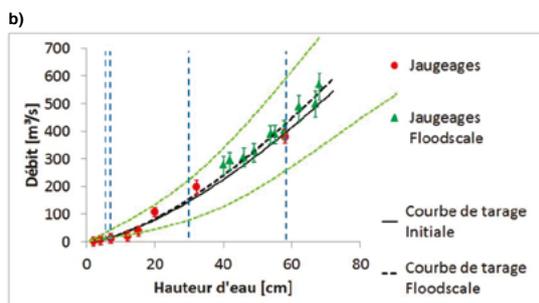
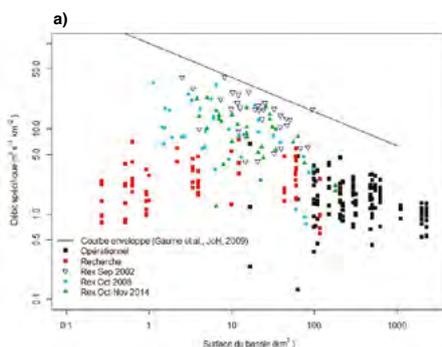
Une vingtaine d'articles ; 60 communications ; 7 thèses soutenues ; 36 jeux de données dans la base HyMeX; l'édition d'un numéro spécial de J. of Hydrol. sur « Flash floods, hydro-geomorphic response and risk management » publié en 2016 ; un séminaire de restitution à destination des opérationnels et bureaux d'étude organisé avec le Pôle Risques (Aix-en Provence, 24/11/2015) ; différents outils de modélisation produits ou améliorés ; des outils de quantification des incertitudes sur les courbes de tarage (BaRatin) et d'analyse de films amateurs (FUDAA-LSPIV) mis à disposition d'opérationnels.

**Le projet FloodScale** (Observation et modélisation hydro-météorologique multi-échelle pour la compréhension et la simulation des crues éclairs) a été coordonné par Isabelle Braud d'Irstea (Institut de Recherche en Sciences et Technologies pour l'Environnement et l'Agriculture) Lyon-Villeurbanne. Ce projet associait quatre laboratoires de recherche publics (Irstea, UR Hydrologie-Hydraulique ; l'Institut des Géosciences de Grenoble (ex-LTHE), HydroSciences-Montpellier et l'UMR ESPACE (Etude des Structures, des Processus d'Adaptation et des Changements de l'Espace). Le projet a débuté en janvier 2012 et s'est déroulé sur 51 mois pour se finir en mars 2016. Il a bénéficié d'un soutien de **740 k€ de la part de l'ANR** pour un coût total d'environ 4 150 k€.

#### CONTACT

Isabelle Braud : [isabelle.braud@irstea.fr](mailto:isabelle.braud@irstea.fr)  
<https://floodscale.irstea.fr/>

<sup>1</sup> <http://www.hymex.org/index.php?lang=english&page=workshops>



a) Illustration de l'apport de l'expérimentation FloodScale pour documenter les crues sur les petits bassins (carrés rouges).

b) Illustration de l'apport de mesures de débit sans contact (triangles verts) pour une meilleure estimation des débits de crues.

## FlowRes

# Prédire les écoulements dans les plaines d'inondation lors de crues extrêmes

### — Améliorer l'évaluation des hauteurs et vitesses de l'eau dans les plaines d'inondation dont l'occupation du sol varie lors de crues extrêmes

Selon la directive européenne sur les inondations, l'aléa hydraulique (hauteurs, vitesses) doit être évalué avec précision dans les zones à haut risque lors des crues extrêmes. Or, la prédiction des écoulements dans les plaines inondables n'est pas aisée en raison de l'absence de données de terrain et du lien étroit entre résistance à l'écoulement et occupation du sol. Le confinement et l'hétérogénéité des rugosités hydrauliques (comme des arbres, des maisons...) dans les directions latérales et longitudinales varient fortement avec l'augmentation de la période de retour de la crue. Les processus physiques sont complexes, encore largement inexplorés, et les hypothèses liées à la modélisation numérique de ces écoulements ne peuvent être validées sans données de terrain. Le projet FlowRes (<https://flowres.irstea.fr/en/>) vise à améliorer l'évaluation de l'aléa dans les plaines inondables en s'appuyant sur les données expérimentales et sur un cas de terrain (les inondations à Besançon).

### — Analyser en laboratoire les écoulements de crues extrêmes, évaluer et améliorer les pratiques de modélisations existantes pour ce type d'écoulements

Des écoulements de crues faibles à extrêmes ont été modélisés dans des canaux de laboratoire (Tâche n°1). En s'appuyant sur des mesures à grande échelle (celle d'un tronçon de rivière) ou petite échelle (celle d'un élément de rugosité hydraulique, comme un arbre ou une maison), la structure des écoulements a été analysée pour différents types d'occupation du sol. Le projet s'est focalisé sur l'étude des effets (i) de transitions longitudinales et transversales de rugosités hydrauliques (d'une forêt à une prairie ou une zone habitée), (ii) du niveau de confinement vertical des éléments de rugosité (émergent/submergé), et (iii) de leur distribution spatiale. Durant la tâche n°2 (« Évaluation et amélioration des pratiques de modélisation »), les données expérimentales ont été comparées à leurs simulations numériques. Certaines méthodes classiques de modélisation de la résistance à l'écoulement ont été testées et améliorées pour restituer la physique quelle que soit l'importance du débit. Les codes et méthodes ont ensuite été appliqués à l'inondation de Besançon.

Des crues de période de retour 100, 1 000 et 10 000 ans ont été simulées sur cette zone avec les méthodes classiques et améliorées, et les écarts en termes de hauteurs et vitesses ont été estimés. Les incertitudes liées aux estimations des débits et aux simulations de l'inondation ont été quantifiées. Un ensemble de recommandations pour la modélisation des crues extrêmes a été tiré de ces travaux.

### — Résultats majeurs

Des données expérimentales d'écoulements de crues faibles à extrêmes ont été collectées dans quatre canaux de laboratoire (<https://flowres.irstea.fr/experiments-photos-and-videos/>), et vont être mises à disposition de la communauté scientifique internationale, notamment via la base de données européenne <https://zenodo.org/>.

Les processus prédominants de résistance à l'écoulement ont été analysés et quantifiés, modélisés théoriquement et numériquement. Un guide de recommandation pour la simulation des



Étude en canal de laboratoire de l'influence de zones boisées (en lit majeur) sur les écoulements de crues extrêmes. Crédit photo : IRSTEA.

écoulements de crues extrêmes, destiné aux opérationnels, est en écriture. Quatre nouveaux partenariats scientifiques sont nés de ce projet.

### — Production scientifique et brevets

L'ensemble des travaux a été (ou va être) valorisé dans 21 articles de revue scientifique, 26 communications scientifiques avec actes (essentiellement des conférences internationales), et 1 chapitre d'ouvrage scientifique. Parmi ces publications, 36 portent sur les processus physiques associés aux crues extrêmes, notamment en présence de rugosité de fond et d'éléments de rugosités émergés et immergés ; 10 portent sur la comparaison simulations/expériences ; et 4 portent sur la simulation de cas de terrain.

Le détail des publications est présenté ici :

<https://flowres.irstea.fr/publications/>

**Le projet FlowRes** est un projet de recherche fondamentale et appliquée coordonné par l'Irstea, Lyon-Villeurbanne (coordinateur : S. Proust, UR Riverly). Il associe également, l'INSA de Lyon, l'Institut de Mécanique des Fluides de Toulouse, le Laboratoire d'Hydraulique Saint-Venant (LHSV - EDF R&D), Chatou, ainsi que l'Instituto Superior Técnico, Lisbonne, Portugal, le National Laboratory for Civil Engineering, Lisbonne, Portugal, l'Université catholique de Louvain, Louvain-la-Neuve, Belgique, la Direction des Recherches Hydrauliques du Service Public de Wallonie, Châtelet, Belgique, l'Université i Agder, Norvège, le Karlsruhe Institut of Technology, Allemagne, l'École Nationale Polytechnique d'Alger, le National Institute of Technology de Rourkela, Inde, et Aberdeen University, Royaume-Uni. Le projet a commencé le 1<sup>er</sup> janvier 2015 et a duré 48 mois. Il a bénéficié d'**une aide ANR de 584 810 €** pour un coût initial global évalué à 1 532 650 €.

#### CONTACT

**Sébastien Proust** : [sebastien.proust@irstea.fr](mailto:sebastien.proust@irstea.fr),  
<https://flowres.irstea.fr/en/>

## APPEL THÉMATIQUE

PROGRAMME « VIABILITÉ ET ADAPTATION DES ECOSYSTÈMES PRODUCTIFS, TERRITOIRES ET RESSOURCES FACE AUX CHANGEMENTS GLOBAUX (AGROBIOSPHERE) », 2012

## FOR-WIND

## Concevoir et simuler les forêts dans le vent

— La physique, la biologie et l'économie des forêts face au vent, facteur d'incertitude, de risque ou au contraire d'adaptation

Le vent est à la fois une cause majeure de dégâts pour les forêts lors des tempêtes, un signal environnemental indispensable à la bonne croissance des arbres car il les endure et les rend moins vulnérables, un risque « modèle » pour penser la gestion économique des forêts, par le particulier et la décision publique, sur le long terme et dans l'incertitude. FOR-WIND vise à produire des modèles et des outils de simulation de la croissance des forêts et de l'économie de leur gestion en incluant des connaissances nouvelles sur l'interaction vent-arbre et l'économie de l'environnement et du risque. FOR-WIND a permis d'intégrer les effets du vent avec les autres facteurs du milieu dans les modèles de vulnérabilité et de croissance en faisant converger des recherches en écophysiologie et biomécanique de l'arbre et des modèles de croissance des forêts utilisés par les ingénieurs, en s'attachant à décrire l'incertitude. En économie, il a permis de mieux formaliser la question de l'assurance et du soutien des politiques publiques pour l'adaptation au risque, tout en insérant, en amont des modèles théoriques économiques, des itinéraires sylvicoles réalistes simulés par les modèles de croissance.

— Entre mécanique, physiologie, simulation statistique, économie du risque et de l'environnement

La mécanique environnementale et la biomécanique végétale permettent de comprendre comment le paysage façonne les profils de vent et comment les propriétés du sol et de l'arbre affectent le risque de déracinement. Un point très innovant incluant des expérimentations pionnières est de modéliser l'effet positif des vents réguliers sur la croissance des arbres, pour comprendre pourquoi certains arbres très exposés sont moins fragiles, ou pourquoi les arbres de lisières ou trouées récentes, initialement très fragiles deviennent ensuite plus résistants. Ces connaissances sont intégrées dans des modèles de croissance des peuplements incluant des représentations statistiques des incertitudes. Les modèles économiques s'attachent à la prise en compte du risque en travaillant sur l'optimisation des contrats d'assurance, le lien entre l'assurance et l'auto-assurance, l'impact des politiques publiques : une question est par exemple de savoir si les transformations sylvicoles pour réduire la vulnérabilité aux vents forts imaginées par les modèles biophysiques précédents, qui ont un coût, doivent être valorisées par l'assurance ou subventionnées. Intégrer ces outils dans les pratiques des décideurs forestiers, permet de mieux raisonner la gestion forestière.

— Résultats majeurs

Des modèles et simulateurs biophysiques et économiques pour l'évaluation de la ressource forestière et de la sylviculture ont été produits. Ils montrent par exemple que d'une part, un arbre vulnérable est d'abord un arbre qui se trouve brutalement exposé au vent ; la sylviculture peut agir en amont et cela stimule le développement de nouvelles technologies pour mieux suivre dans le temps l'état des forêts. D'autre part, la conception du contrat d'assurance doit s'attacher à bien représenter l'effort d'adaptation du propriétaire, son aversion au risque, l'incertitude sur la probabilité de perte.



Mesures morphologiques et mécaniques.

— Production scientifique et brevets

- ▶ Bonnesoeur V, Constant T, Mouliat B, Fournier M, 2016. *New Phytologist*.
  - ▶ Brunette M., Couture S., Pannequin F. (2017). *Annals of Forest Science*.
  - ▶ Dupont S. (2016) *Agricultural and Forest Meteorology*.
  - ▶ Fortin M, Albrecht AT, Kohnle U, Ningre F, 2014 *Forests*.
  - ▶ Gardiner, B., Berry, P., Mouliat, B. (2016). *Plant Science*, 245, 94-118.
  - ▶ Kamimura K., Gardiner B., Dupont S., Guyon D., Meredieu C. (2016). *Canadian Journal of Forest Research*.
  - ▶ Renaud, J. P., Vega, C., Durrieu, S., Lisein, J., Magnussen, S., Lejeune, P., & Fournier, M. (2017). *Annals of Forest Science*.
  - ▶ Yang M, Défossez P, Danjon F, Fourcaud T (2014) *Ann Bot* 114:695–709.
  - ▶ Simulateur Mathilde de la croissance et de la mortalité des peuplements mélangés hêtraies-chênaies.
  - ▶ Bibliothèque de calculs ForestGales de la vulnérabilité des peuplements aux vents forts.
- Développés sous la plate-forme ouverte CAPSIS.  
[http://capsis.cirad.fr/capsis/help\\_fr/mathilde](http://capsis.cirad.fr/capsis/help_fr/mathilde)  
[http://capsis.cirad.fr/capsis/help\\_en/forestgales](http://capsis.cirad.fr/capsis/help_en/forestgales)

**Le projet de recherche FOR-WIND** coordonné par M. Fournier a associé les unités de recherche LERFoB (INRA, AgroParisTech), ISPA (INRA Bordeaux Sciences Agro), BIOGECO (INRA Université de Bordeaux), AMAP (CIRAD, INRA, Université de Montpellier, CNRS, IRD), PIAF (INRA, Université Blaise Pascal de Clermont Ferrand), LEF (INRA, AgroParisTech) et le département Recherche Développement Innovation de l'Office National des Forêts. Le projet a commencé le 1<sup>er</sup> janvier 2013 et a duré 48 mois. Il a bénéficié d'une aide ANR de 617 644 € pour un coût global de l'ordre de 3,4 millions d'euros. Il a été labellisé par les pôles de compétitivité Xylofutur et Fibres du Grand Est.

**CONTACT**

**Meriem Fournier** : meriem.fournier@agroparistech.fr,  
[www6.inra.fr/forwind](http://www6.inra.fr/forwind)

## FOSTER

## Compréhension et surveillance de l'érosion par des modèles spatio-temporels

## — Aide aux experts pour exploiter des données environnementales massives et complexes, ainsi que pour comprendre et caractériser des phénomènes environnementaux

La multiplication des données environnementales, et leur précision, rend complexe l'étude de ces environnements et des processus qui contrôlent leur évolution. Les scientifiques qui exploitent ces données se heurtent à des difficultés d'interprétation. L'arrivée des images à très haute résolution autorise, par exemple, l'étude d'objets plus petits. Cependant, les traitements classiques (géologiques ou informatiques) sont limités face à cette avalanche d'informations. En effet, les données sont hétérogènes, multi-échelles, incomplètes, imprécises, et contiennent des objets complexes. Leurs exploitations massives et spatio-temporelles sont problématiques.

Le projet FOSTER a pour objectif de concevoir, développer et mettre en œuvre de nouveaux processus d'analyse adaptés aux masses de données complexes dans le but d'améliorer la gestion de l'environnement. Deux étapes critiques de ce processus ont été plus particulièrement étudiées : la segmentation des images satellitaires basée sur des méthodes collaboratives, et la construction de modèles descriptifs (motifs...) et/ou prédictifs (arbres de décision...) intégrant l'information spatio-temporelle. Ce projet vise à apporter de nouveaux moyens (méthodes, algorithmes, logiciels) d'exploitation de ces données spatio-temporelles générées par les sciences environnementales, avec la volonté d'assister des experts pour optimiser la découverte de connaissances.

## — Processus complet d'extraction de connaissances intégrant deux approches (pixel et orientée objet) de data mining pour décrire l'aléa érosion

Pour répondre aux objectifs du projet, une base de données complexes a été constituée sur deux sites différents : le site de référence de Barcelonnette soumis à un glissement du terrain, et un site d'érosion particulière au sud de la Nouvelle Calédonie. Cette base de données est constituée de séries temporelles d'images satellitaires complétées par d'autres informations (couches SIG, météorologie, Modèle Numérique du Terrain, etc.).

Le projet s'est intéressé aux différentes étapes du processus. Pour la fouille de données spatio-temporelles, nous avons étudié

et proposé deux approches :

- ▶ une approche par pixel consistant en une stratégie multi-étapes intégrant une méthode d'extraction des motifs séquentiels fréquents groupés (SFG). Elle a permis la sélection des motifs SFG pertinents par une mesure d'intérêt.
- ▶ une approche objet pour laquelle nous avons proposé une chaîne de traitement intégrant des méthodes de segmentation collaboratives permettant de détecter les objets d'intérêt et des méthodes d'extraction de motifs spatio-temporels dans des graphes dynamiques attribués pour analyser les évolutions temporelles de ces objets.

Toutes ces propositions ont été développées et intégrées dans des plateformes logicielles accessibles (MUSTIC, Qêhnelö, PATSI) aux chercheurs et aux collectivités pour l'aide à la décision.

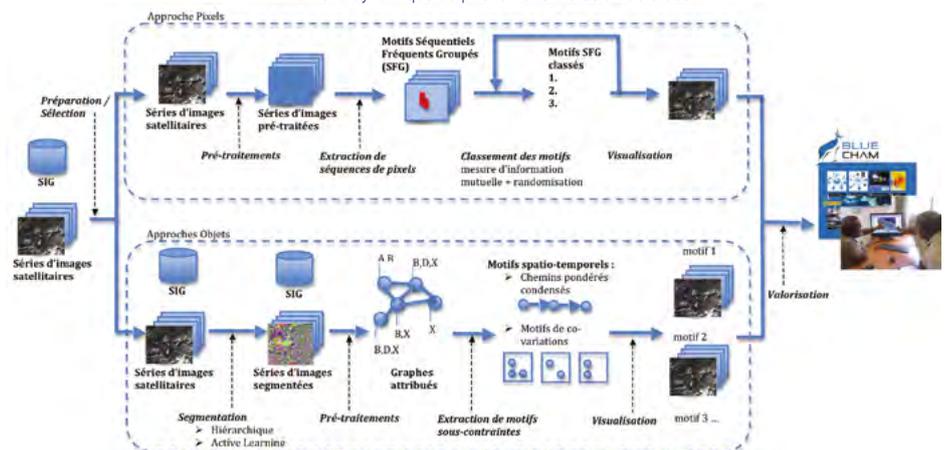
## — Résultats majeurs

Les contributions figurent soit sur une plateforme existante (par exemple la plateforme MUSTIC) soit dans un prototype, spécifique au projet. Il intègre une interface de visualisation pour l'utilisation par des scientifiques ou l'exploitation des résultats par les experts de l'érosion. Ces plateformes sont accessibles au grand public pour l'aide à la décision, comme la plateforme Qêhnelö utilisée par la mairie de Yaté, Nouvelle Calédonie (érosion). FOSTER a ouvert des collaborations majeures, dont une avec l'IFREMER. Il nous a permis de participer au projet INDES0 pour le développement durable des fermes aquacoles en Indonésie.

## — Production scientifique et brevets

- ▶ Selmaoui, et al., 2011 : « Spatial Pattern Mining for Soil Erosion Characterization ». IJAEIS, Vol. 2, N°2, pp. 73-93.
- ▶ Stumpf, A. et al., 2012, September. Active learning in the spatial-domain for landslide mapping in remote sensing images. In ALRA: Active Learning Real-world Appl. Workshop ECML-PKDD, Bristol, UK.
- ▶ Kurtz, C. et al., 2014. Hierarchical extraction of landslides from multiresolution remotely sensed optical images. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 87, pp.122-136.

Processus complet d'extraction de connaissances, incluant deux approches d'analyses (approche pixel et approche orientée objet), pour caractériser et décrire la dynamique du phénomène d'érosion de crues.



**Le projet FOSTER** est un projet de recherche fondamentale avec un souci d'appliquer constamment ses contributions aux phénomènes d'érosion du sol et de glissement de terrain. Coordonné par le PPME EA 3325 / UNC (Nouméa), il associe les laboratoires ICube (Strasbourg) le LIRIS (Lyon), le LISTIC (Annecy) et la société calédonienne Bluecham SAS. Le projet a démarré en janvier 2011 pour une durée de 45 mois. Il a bénéficié d'une aide ANR de 927 593 € pour un coût global de 2 763 829 €.

**CONTACT**

**Nazha Selmaoui-Folcher :**  
nazha.selmaoui@univ-nc.nc,  
foster.univ-nc.nc/

## GEDEAH

## Gestion des déchets et de l'assainissement en zones (péri)urbaines haïtiennes

## — Développement d'un modèle technico-économique de gestion décentralisée et intégrée des déchets

Sur Port-au-Prince, la gestion des déchets ménagers et de l'assainissement n'est pas maîtrisée, avec des conséquences sanitaires importantes, et la situation s'est encore aggravée avec le séisme de 2010. De nouveaux modèles sont à développer pour la gestion et le traitement des déchets adaptés à la situation de pauvreté dans laquelle se trouve la grande majorité de la population de la région métropolitaine de Port-au-Prince, population très peu prise en compte dans les nouveaux et futurs programmes de gestion des déchets et de l'assainissement.

Ce projet porte donc sur le développement d'un modèle de gestion décentralisée et intégrée des déchets et de l'assainissement en zones urbaine et péri-urbaine haïtiennes, et sur la mise en place des modalités de sa réplication. Il s'agit de mettre en place des plateformes de traitement et de valorisation de déchets permettant de gérer les déchets de quartiers socialement défavorisés où les déchets sont rarement collectés, avec pour objectifs une optimisation de la valorisation matière et énergétique, une minimisation des nuisances et des impacts sanitaires et environnementaux et la création de ressources et d'emplois.

## — Développement de plateformes de traitement et de valorisation de déchets

La détermination de la « bonne formule » de gestion décentralisée des déchets a nécessité de développer une méthodologie permettant d'évaluer plusieurs options possibles relatives aux conditions de collecte, de traitement-valorisation et d'élimination des déchets résiduels issus des opérations. Cette méthode est basée sur (i) la définition et la caractérisation du territoire, (ii) l'identification des gisements, (iii) la présélection d'options de modes de gestion, (iv) la sélection de scénarii nécessitant une validation expérimentale et (v) la définition des critères d'évaluation des opérations unitaires et de l'ensemble du modèle de gestion.

Deux sites expérimentaux ont été mis en place : la nouvelle plateforme de compostage de déchets et de valorisation des produits triés localisée sur la commune de Cité-Soleil et le site de Barbancourt pour la réalisation d'essais de digestion anaérobie de déchets organiques. Ces deux sites ont permis l'évaluation technico-économique des scénarii présélectionnés sur la base de critères d'évaluation définis dans la méthodologie.

## — Résultats majeurs

- Mise en place et suivi du Centre de Valorisation des Déchets Jean-Christophe Fernandes.
- Création d'une formation pour les potentiels porteurs de projets (succès de la 1<sup>re</sup> formation en juillet 2013).
- Projet de création d'une plateforme technologique GEDEAH pour accompagner des porteurs de projets.
- Implication locale dans des instances décisionnelles (Ministère de l'environnement, DINEPA) en matière de gestion des déchets et d'assainissement.
- Contribution au nouveau programme RE-SOURCES financé par l'UE pour capitaliser les bonnes pratiques de gestion des déchets dans les PED et mener des actions de plaidoyer auprès des autorités.



Centre de valorisation des déchets Jean-Christophe Fernandes.  
Crédit photo : Rémy Bayard, Association CEFREPADE.

## — Production scientifique et brevets

- Fernandes JC, Jean Denis S, Emmanuel E, Lacour J, Duchaufour H, Vermande P & Bayard R (2012). Notion de transfert Ville-Campagne à Port-au-Prince (Haïti) : en quoi la ville peut-elle apporter une valeur ajoutée pour la campagne par la gestion de ses déchets organiques et la campagne vers la ville par la production de produits alimentaires. RED 5(1):16-26.
- Lacour J, Bayard R, Emmanuel E & Gourdon R (2011). Evaluation du potentiel de valorisation par digestion anaérobie des gisements de déchets organiques d'origine agricole et assimilés en Haïti. Déchets Sc. & Tech. 60:31-41.
- Lacour J & Bayard R (2011). Méthanisation : il faut y aller ! Revue Liaison Energie-Francophonie n° 90 - spécial « Gestion des Déchets Ménagers, regards Croisés ».
- production d'un film « Les fatras de l'espoir » et projet d'écriture en 2014 d'un roman pour la jeunesse par l'écrivain Jean-Yves Loude, « Prince des fatras ».

Démarré le 17 juillet 2010, **le projet GEDEAH** est un projet de recherche coordonné par l'INSA de Lyon - LGCIE (Laboratoire de Génie Civil et Ingénierie Environnementale) et le CEFREPADE (Centre Francophone de Recherche Partenariale sur l'Assainissement, les Déchets et l'Environnement). Il associe plusieurs acteurs français et partenaires locaux : la Fondation Athlétique d'Haïti, le GRET, l'Université Quisqueya (UNIQ), le GRESE de l'Université de Limoges. D'une durée de 42 mois, ce programme a bénéficié d'une aide ANR de 243 000 € pour un coût global de 515 000 € et de la labellisation du pôle AXELERA.

## CONTACTS

**Rémy Bayard (INSA Lyon) :**  
remy.bayard@insa-lyon.fr

**Pascale Naquin (CEFREPADE) :**  
pascale.naquin@cefrepade.fr

# HYDROSEIS

## Sismicité induite par les fluides : du glissement lent à la rupture sismique

### — Comprendre les couplages entre les mouvements de fluides et les déformations qui mènent au glissement asismique et à la rupture sismique sur les failles naturelles

Le projet HYDROSEIS s'intéresse au rôle des fluides dans la mécanique de la rupture sismique des failles géologiques par une approche expérimentale in-situ et numérique. Bien qu'il soit reconnu depuis longtemps que les fluides affaiblissent la résistance des failles et participent aussi bien à l'initiation de la rupture des séismes qu'au glissement asismique se produisant entre deux séismes, les mécanismes reliant les pressions de fluides et les séismes restent mal connus. Il existe deux points de blocages importants empêchant d'appréhender ces mécanismes : (1) l'absence de mesures synchrones et continues de la pression de fluide, de la déformation et de la sismicité dans la zone active des failles, et (2) le manque de modèles prenant en compte les effets de la complexité des couplages hydromécaniques dans les failles sur le processus de rupture. Un certain nombre de questions fondamentales restent ainsi posées, telles : (1) comment les failles se déforment sous l'effet des pressions de fluides?, (2) est-ce que les fluides participent seulement à la phase d'initiation de la rupture, ou bien interviennent-ils aussi dans la propagation et l'arrêt de la rupture?, (3) est-ce que les pressions de fluides, les déplacements et les ondes sismiques mesurés en surface sont de bons marqueurs de la déformation profonde dans les zones sismogènes?, (4) comment les fluides participent à la sismicité induite dans les réservoirs profonds ?

### — Les expériences in-situ d'injection de fluide à petite échelle pour comprendre la physique des séismes

Pour répondre à ces questions et améliorer notre connaissance des relations entre les fluides, les failles et les séismes, nous avons développé au Laboratoire Souterrain à Bas Bruit (Rustrel, France) des expériences de stimulation hydraulique des failles à petite échelle (1 à 10 m) afin de reproduire des glissements réels de quelques dizaines de microns à quelques millimètres. L'originalité de ces expériences repose sur la réalisation de mesures synchrones, continues, denses et sur une très large bande de fréquences des pressions de fluides, de la déformation 3D et de la sismicité avant, pendant et après la rupture de la faille. Grâce à ces données, nous avons ensuite développé de nouveaux modèles numériques pour simuler et comprendre les effets des pressions de fluide dans la rupture sismique des failles actives, ainsi que la sismicité induite par les injections de fluide dans des réservoirs géologiques profonds.

### — Résultats majeurs

Un des résultats majeurs est que nous avons développé des expériences in-situ uniques qui ont permis de mesurer simultanément en forage la déformation directement sur une faille naturelle et la sismicité lors de l'injection de fluide en conditions contrôlées. Grâce à ces nouvelles données, nous avons pu démontrer avec une précision sans précédent que l'augmentation de la pression de fluide dans la faille induit d'abord un glissement asismique dilatant, qui déclenche ensuite une crise sismique. Ces observations ouvrent ainsi de nombreuses opportunités pour l'identification de processus génériques clés qui nous permettront de mieux comprendre la physique des tremblements de terre. Ainsi, l'idée d'une activation de faille par pressurisation des fluides dans des conditions in situ représente une approche de recherche avec un fort potentiel de découvertes nouvelles.

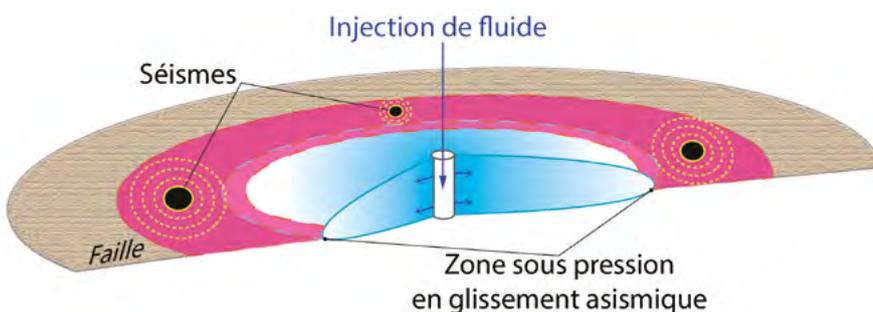
### — Production scientifique et brevets

- ▶ Cappa, F., Scuderi M.M., Collettini C., Guglielmi Y., Avouac J.P., 2018, Science Advances, in press.
- ▶ Cappa, F., Guglielmi Y., Nussbaum C., Birkholzer J., 2018, Geophys Res Lett, doi: 10.1029/2018GL080233.
- ▶ De Barros, L., Guglielmi Y., Rivet D., Cappa F., Duboeuf L., 2018, Compte Rendu Geosciences, in press.
- ▶ Duboeuf, L., De Barros L., Cappa F., Guglielmi Y., Deschamps A., Seguy S., 2017, J Geophys Res, 122, doi : 10.1002/2017JB014535.
- ▶ Galis, M., Ampuero J.P., Mai P.M., Cappa F., 2017, Science Advances, 3:eaap7528, doi: 10.1126/sciadv.aap7528.
- ▶ Guglielmi, Y., Cappa F., Avouac J.P., Henry P., and Elsworth D., 2015, Science, 348, 6240, 1224-1226, doi: 10.1126/science.aab0476.

**Le projet HYDROSEIS** est un projet de recherche fondamentale coordonné par le laboratoire Géoazur (UMR 7329) à Sophia Antipolis. Il associe 15 scientifiques venant de laboratoires nationaux (Géoazur, Cerege et Isterre) et internationaux (Caltech, UC Berkeley et Tufts University aux USA). Le projet a commencé en mars 2014 et a duré 48 mois. Il a bénéficié d'**une aide ANR de 307 000 €** pour un coût global de 900 000 €. Ce projet est labellisé par les pôles de compétitivité « Risques » et « Mer Méditerranée ».

#### CONTACT

**Frédéric Cappa** : [cappa@geoazur.unice.fr](mailto:cappa@geoazur.unice.fr),  
<https://projets.oca.eu/en/hydroseis-home>



Séismes déclenchés par du glissement asismique sur une faille stimulée par une injection de fluide (modèle déduit des observations des expériences HYDROSEIS).  
Crédit : Frédéric Cappa, Géoazur, Université Côte d'Azur.

# INCERDD

## Prise en compte des incertitudes pour des décisions durables

### — Comment quantifier l'influence des incertitudes sur la hiérarchisation de stratégies alternatives de gestion d'une problématique urbaine au moyen de critères d'évaluations cohérents avec les objectifs du développement durable ?

Le projet INCERDD a pour objectif de développer des méthodes permettant la prise en compte de multiples incertitudes dans l'évaluation multicritère des décisions en matière de gestion d'ouvrages urbains et d'aménagement du territoire dans une perspective de développement durable. Il associe un objectif de recherche fondamentale sur la problématique des incertitudes et un objectif de recherche appliquée vis-à-vis de deux études de cas relatives à la gestion de réseaux techniques et des risques naturels.

Le projet INCERDD vise le développement d'une méthodologie permettant d'aider à la prise de décision. Il vise d'abord à identifier des stratégies alternatives de gestion d'une problématique urbaine, à formaliser une grille de critères d'analyse de ces alternatives, à les évaluer au moyen de différentes méthodes, puis à hiérarchiser ces alternatives en prenant explicitement en compte les incertitudes associées.

### — Approches probabilistes et possibilistes pour la qualification et la propagation des incertitudes

Les incertitudes sont de nature très diverses. Elles peuvent concerner d'abord l'identification de stratégies de gestion alternatives. On peut alors employer des approches issues du génie industriel, basées sur l'interview des différents acteurs, pour cerner ces incertitudes.

Les incertitudes peuvent également concerner le processus d'évaluation des critères. Elles sont ici prises en compte selon deux approches : probabiliste ou possibiliste. L'approche probabiliste consiste à exprimer la variabilité d'une grandeur quantitative par une distribution statistique. L'approche possibiliste consiste à formaliser l'incertitude sous forme de sous-ensembles flous associant un niveau de confiance aux différentes grandeurs évaluées. Ce formalisme est particulièrement adapté pour modéliser des avis d'experts par exemple.

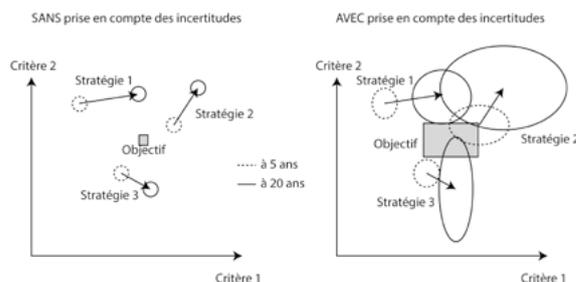
Enfin, les incertitudes peuvent concerner l'étape de hiérarchisation des décisions. Plusieurs alternatives méthodologiques sont alors proposées en lien avec le formalisme utilisé pour caractériser les incertitudes (moyenne arithmétique pondérée, approche utilitariste, viabilité stochastique, AHP hybride, ELECTRE TRI). Plusieurs de ces approches requièrent une pondération de l'influence des critères, qui correspond alors également à une source d'incertitude.

### — Résultats majeurs

Les principaux faits marquants sont :

- L'application de méthodes issues du génie industriel et du management de l'innovation aux projets urbains.
- L'analyse critique de l'état de l'art sur le développement durable, sa déclinaison aux deux études de cas du projet et le développement final d'une grille de critères et indicateurs en lien avec le DD.
- Le développement de nouvelles méthodologies d'évaluation des incertitudes et de hiérarchisation des stratégies pour les deux études de cas.

Evaluation à 5 et 20 ans de 3 stratégies selon 2 critères :



Quelles est la meilleure stratégie compte tenu des incertitudes portant sur leur évaluation et sur l'objectif visé ?

Trois stratégies sont évaluées selon 2 critères afin de juger leur pertinence (proximité) à un objectif. L'évaluation évolue dans le temps. En présence d'incertitude, le choix de la meilleure stratégie peut-être sensiblement modifié.

- La démonstration de la faisabilité opérationnelle de la prise en compte et de la propagation des incertitudes pour la hiérarchisation des décisions.

### — Production scientifique et brevets

- A decision support methodology for assessing the sustainability of natural risk management strategies in urban area, Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 14, 2014.
- Contribution à l'intégration des incertitudes dans les décisions de gestion durable des risques naturels : Application aux inondations. Ouvrage collectif.
- Gestion patrimoniale d'un réseau d'assainissement : incertitudes, robustesse et solution optimale, 8<sup>es</sup> Journées de Fiabilité des Matériaux et de Structures, 2014.
- Prise en compte des incertitudes pour sélectionner une stratégie de gestion des réseaux d'assainissement. 30<sup>es</sup> Rencontres Universitaires de Génie Civil, 2012.

**Le projet INCERDD** est un projet de recherche appliqué coordonné par l'Université de Lorraine (laboratoire GéoRessources). Il associe également 6 partenaires académiques : ERPI et NIT InoCité (Université de Lorraine), I2M (Université de Bordeaux), IREG (Université de Savoie), IP (Université Blaise Pascal – Clermont-Ferrand II), INERIS et 3 partenaires privés : ADUAN, CUGN, DDT-54. Le projet a commencé en janvier 2011 et a duré 48 mois. Il a bénéficié d'une aide ANR de 445 121 € pour un coût global de l'ordre de 1 196 787 €.

#### CONTACT

Olivier Deck : olivier.deck@mines-nancy.univ-lorraine.fr

## APPEL SPÉCIFIQUE

PROGRAMME « FLASH JAPON : GREAT TOHOKU EARTHQUAKE », 2011

## INTERNATECH

## Prévenir le risque NaTech en tirant les leçons du séisme du Japon de mars 2011

## — Capitaliser sur l'expérience du Japon pour développer des outils de maîtrise du risque NaTech sur le territoire européen

Un aléa naturel (séisme et tsunami) peut avoir un impact sur une installation industrielle et être à l'origine d'une série d'accidents technologiques notoires ayant des effets dévastateurs sur la population et l'environnement (accident NaTech). Suite à la catastrophe, de nombreuses défaillances techniques ont été relatées sur des installations (explosion de sphères GPL dans la baie de Chiba, incendies durant plusieurs jours dans la raffinerie de Sendai...). Afin de prévenir ces accidents, des méthodologies d'Analyse de Risque ont été mises au point. Elles visent à identifier, pour un site industriel donné, les séquences accidentelles à l'origine du risque et à proposer pour chacune d'entre elles des réponses techniques adaptées. Le premier objectif du projet est le développement de ces méthodes afin d'améliorer la prise en compte locale du risque NaTech au sein des installations industrielles situées sur notre territoire. Le second objectif est de mettre au point un outil d'aide à la décision permettant d'anticiper l'impact d'une catastrophe naturelle sur la chaîne d'approvisionnement d'un pays. Cette approche stratégique consiste par exemple à traiter le risque présent sur un territoire en ciblant certaines zones industrielles compte tenu de facteurs économiques.

## — Des outils de modélisation pour répondre au besoin des experts en analyse de risques et des décideurs

Le projet a permis de collecter des données inédites et d'appliquer la méthodologie ERRA NaTech (dédiée à l'analyse des risques NaTech au sein d'une installation industrielle et développée précédemment dans le cadre du projet de recherche européen InTeg-Risk) à deux sites industriels fortement impactés par la catastrophe. Ces cas d'étude grandeur nature ont permis de mettre à jour certaines limites de la méthode et de proposer des enrichissements. Tout d'abord, des modélisations fines de résistance des structures ont été développées pour caractériser la réponse mécanique d'équipements industriels à l'inondation et au séisme. Les résultats de ces calculs sont ensuite utilisés par les experts en analyse de risques pour déterminer des pro-

babilités de défaillance et donc d'accidents technologiques au sein d'un site industriel. Ensuite, un panel de mesures de prévention du risque adapté aux aléas sismiques et inondation a été élaboré. Enfin, l'approche des coûts indirects des dommages a abordé une dimension macroéconomique intégrant l'analyse de sensibilité des interactions régionales : la subsidiarité des régions non affectées par la catastrophe modifie la résilience des régions affectées via la chaîne d'approvisionnement de produits nécessaires à la reconstruction.

## — Résultats majeurs

- ▶ Meilleure appréhension des conséquences induites par l'impact d'un tsunami ou d'une inondation au sein d'une installation industrielle.
- ▶ Identification d'un ensemble de mesures organisationnelles et structurelles à mettre en place sur les sites susceptibles d'être impactés.
- ▶ Mise au point d'outils de calcul de la réponse d'équipements industriels aux effets sismiques et au tsunami.
- ▶ Etablissement de courbes de fragilité indiquant la probabilité de défaillance d'un équipement.
- ▶ Apport de bases utiles aux réflexions des politiques publiques en matière de risques NaTech (compensations effectives et conditions favorables à la résilience d'une région).

## — Production scientifique et brevets

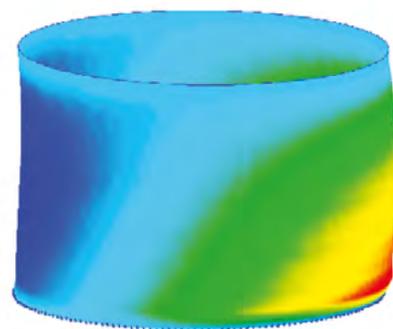
- ▶ Mebarki A., Jerez Barbosa S., Matasic I., Prodhomme G., Reimeringer M., Pensee V., Vu Q.A., Willot A. (2013). Domino effects and industrial risks: Integrated probabilistic framework – Case of tsunamis effects. Monograph Tsunami Events and Lessons Learned; Series: Advances in Natural and Technological Hazards Research.
- ▶ Mebarki A., Jerez Barbosa S., Matasic I., Prodhomme G., Reimeringer M. (2012). Explosions and structural fragments as industrial hazard: domino effect and risks. Procedia Engineering J., Elsevier, 45: 159-166.

**Le projet INTERNATECH** « Interdisciplinary study on the mitigation of NaTech risks in a complex world: learning from the Japanese experience applying ERRA NaTech method, iNTEG-Risk project » est un projet de recherche industrielle coordonné par l'INERIS (Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques). Il associe le MSME (Laboratoire Modélisation et Simulation Multi-Echelle) ainsi que la société PHIMECA et l'AIST (National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, Japon). Le projet a commencé en octobre 2011 et à duré 18 mois. Il a bénéficié d'une aide ANR de 100 k€ pour un coût global de 193 k€.

**CONTACT**

Adrien Willot : adrien.willot@ineris.fr

Analyse des conséquences du tsunami sur les réservoirs de stockage d'hydrocarbures. À gauche, un réservoir renversé par le tsunami. À droite, le calcul des efforts induits par un séisme dans la coque d'un réservoir d'hydrocarbures via la simulation numérique



# IODA-MED

## La prévision des précipitations méditerranéennes intenses

### — Un verrou majeur : une mauvaise connaissance des conditions atmosphériques dans l'environnement marin

En automne, les pourtours de la Méditerranée occidentale sont régulièrement exposés à des épisodes de précipitations intenses et des phénomènes de crues éclairs. Des efforts considérables ont été réalisés ces dernières années pour en améliorer la prévision et des progrès significatifs ont pu être obtenus grâce au développement de modèles numériques à haute résolution, permettant de partiellement résoudre les nuages convectifs.

Malgré ces progrès, la précision des précipitations prévues demeure encore insuffisante pour qu'elles soient efficacement utilisées par les systèmes de prévisions des crues qui en zone de relief sont particulièrement sensibles à de faibles erreurs de localisation spatiale. Parmi les différents facteurs limitant la prévisibilité des événements de précipitations intenses (HPE), les incertitudes relatives à l'état initial des modèles jouent un rôle majeur. Ceci est d'autant plus vrai pour les systèmes méditerranéens dont les précurseurs amont se développent en mer, dans des régions sous échantillonnées par les systèmes d'observations opérationnels. Le projet IODA-MED visait à améliorer la prévisibilité des HPEs grâce à la réduction des incertitudes pesant sur les états initiaux des modèles.

### — La campagne HyMeX 2012 : des observations inédites pour mieux comprendre et mieux prévoir

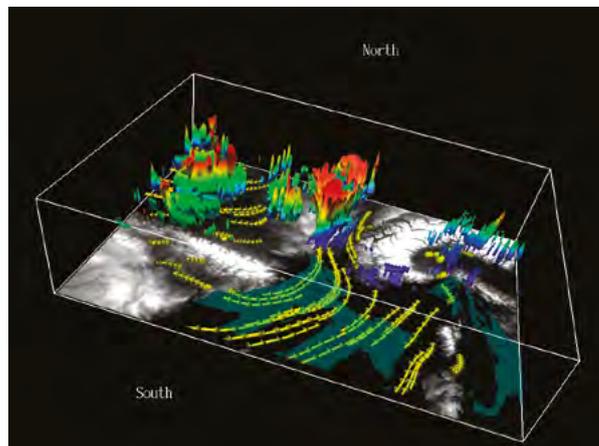
Afin de mieux comprendre et mieux prévoir les situations de précipitations intenses, IODA-MED a proposé i) de renforcer les systèmes d'observations existants en collectant des observations supplémentaires et non conventionnelles dans l'environnement marin amont des systèmes précipitants, ii) de mieux exploiter les observations existantes en accroissant le nombre d'observations introduites dans le système d'assimilation, iii) d'explorer le potentiel offert par l'assimilation de nouveaux types d'observations, et particulièrement de celles liées au cycle de l'eau et iv) de faire progresser la qualité du système d'assimilation en améliorant son adaptation aux fines échelles.

IODA-MED s'intègre dans le cadre du programme de recherche international HyMeX dédié à l'étude du cycle hydrologique en Méditerranée. Il a constitué une contribution majeure à la première phase d'observations intensives (HyMeX-SOP1) organisée à l'automne 2012 et consacrée à l'étude des précipitations intenses et des crues éclairs. IODA-MED a bénéficié d'un contexte de fortes collaborations tant nationales qu'internationales.

### — Résultats majeurs

Parmi les nombreux résultats du projet, nous soulignerons :

- ▶ la construction de la première base de données regroupant l'ensemble des paramètres atmosphériques pertinents pour l'étude des précipitations intenses dans la région méditerranéenne,
- ▶ l'amélioration du système d'assimilation du modèle opérationnel de prévision du temps de Météo-France grâce à une meilleure exploitation des observations de routine ainsi qu'à la prise en compte d'observations non standard,
- ▶ la démonstration que cette amélioration se traduit par de meilleures prévisions des précipitations intenses,



Simulation numérique de l'épisode de pluie intense du 24/09/2012. Au pied des Cévennes, la convergence des vents marins se combine au soulèvement orographique pour déclencher la convection et générer un système pluvio-orageux intense.

- ▶ une meilleure compréhension des processus physiques associés aux épisodes de fortes précipitations et l'identification de ceux qui sont encore mal représentés dans les modèles.

### — Production scientifique et brevets

- ▶ Ducrocq, V. et al. HyMeX-SOP1, the field campaign dedicated to heavy precipitation and flash flooding in the northwestern Mediterranean. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 1083-1099, 2014.
- ▶ Defer, E. et al An overview of the lightning and atmospheric electricity observations collected in Southern France during the Hydrological cycle in Mediterranean EXperiment (HyMeX), SOP1, *Atm. Mea. Tech.*, 8, 649-669, 2015 .
- ▶ Fourrié N. et al AROME-WMED, a real-time mesoscale model designed for the HyMeX Special Observation Periods. *Geo-Model Dev.* 8,1919-1941, 2016.

**Le projet IODA-MED** est principalement un projet de recherche fondamentale. Ses résultats sont toutefois susceptibles d'impacter les activités opérationnelles des services météorologiques. Ce projet a regroupé trois partenaires : le Laboratoire d'Aérodynamique (LA, UPS/CNRS, coordinateur), le Laboratoire Atmosphères, Milieux, Observations Spatiales (LATMOS, UPMC/UVSQ/CNRS) et le Groupe d'étude de l'Atmosphère Météorologique (CNRM-GAME, Météo-France/CNRS) Le projet a débuté le 1<sup>er</sup> octobre 2011 et s'est déroulé sur une période de 48 mois. **Le financement de l'ANR s'est monté à 648 398 €** pour un coût total de 7 084 269 €.

#### CONTACT

**Evelyne Richard** : evelyne.richard@aero.obs-mip.fr, mesonh.aero.obs-mip.fr/iodamed

## APPEL SPÉCIFIQUE

PROGRAMME « FLASH HAITI : POUR UNE RECONSTRUCTION DURABLE », 2010

## KAL-Haïti

## Des images satellitaires pour la gestion du risque et la reconstruction en Haïti

## — Une base de données pour servir les recherches en gestion des risques et la reconstruction en Haïti

KAL-Haïti met à disposition des scientifiques et institutionnels en charge de la reconstruction en Haïti, une base de données d'images de télédétection et de données complémentaires (mesures in situ, cartes, modèles, statistiques) utiles à la compréhension du tremblement de terre du 12 janvier 2010, de ses conséquences, et des actions de reconstruction. Ces données : images satellitaires et autres informations rassemblées par les contributeurs du projet, sont mises à disposition gratuitement (sous conditions) auprès des scientifiques, chercheurs, étudiants et décideurs, via un serveur Web. Le projet est à la fois un outil et un lieu d'échange entre utilisateurs :

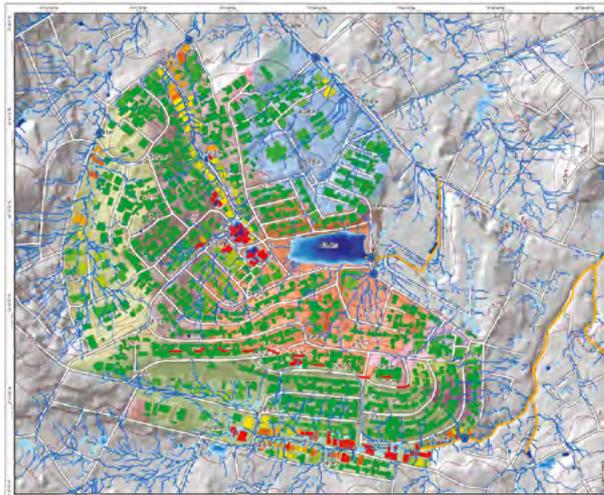
- un outil en proposant une information pertinente pour mieux comprendre le séisme, ses conséquences, mais aussi le processus de la reconstruction.
- un lieu d'échanges et de dialogues humains, scientifiques et techniques. En effet, en rassemblant des scientifiques, des chercheurs et des acteurs du développement (institutions haïtiennes, associations, société civile, organisations internationales), KAL-Haïti est une plateforme favorisant les échanges sur la compréhension, la gestion et la prévention du risque.

## — Construire une base de données pilotée par les besoins : études et applications des utilisateurs-contributeurs

Une communauté d'utilisateurs a été constituée mettant en relation un large panel de scientifiques avec des gestionnaires des crises humanitaires. Par exemple, KAL-Haïti a permis de réaliser une description cartographique et un suivi de 17 camps de déplacés pour la Croix Rouge française juste après le séisme. Dans le cadre d'une coopération entre la Communauté Urbaine de Strasbourg, l'IRCOD et la mairie de Jacmel en Haïti, KAL-Haïti a soutenu la réalisation d'un projet de renforcement des capacités fiscales de Jacmel (projet financé par l'AFD). Ces acteurs constituent un réseau de travail qui se réunit lors d'ateliers annuels au cours desquels sont exprimés les besoins. Ceux-ci se concrétisent par des propositions d'applications et d'actions de recherche. KAL-Haïti prend en charge la production et la mise à disposition des images satellitaires, soutient les applications retenues en mobilisant partenaires et contributeurs et apporte un appui au montage de dossiers d'actions de recherche. Le potentiel de la base de données se concrétise par des travaux scientifiques publiés et des applications pratiques sur le terrain en produisant de nouvelles données à leur tour intégrées dans la base.

## — Résultats majeurs

- Lancement de 20 projets, de la gestion de la post-crise à la reconstruction, en passant par des recherches fondamentales.
- Enrichissement du catalogue de données multi-sources et multi-modales en données et en résultats.
- Collaborations réalisées avec des organismes internationaux (Polytechnicum de Milan, Croix-Rouge américaine, PNUD).
- Réunions annuelles de la communauté d'utilisateurs : 5 ateliers ont été réalisés, dont le dernier à Port-au-Prince en septembre 2013 avec le soutien de l'ambassade de France en Haïti et en coopération avec le projet EISHA.



Vulnérabilité du bâti face au risque de ruissellement (faible en vert, importante en rouge). Quartier de Petite Place Cazeau - Commune de Delmas, Port-au-Prince. Crédit : SERTIT - KAL-Haïti.

- Incitation des utilisateurs haïtiens à s'emparer du matériel et des outils proposés (réunions spécifiques en marge des ateliers).

## — Production scientifique et brevets

- M. Terrier, A. Bialkowski, A. Nachbaur, C. Prépetit, and Y. F. Joseph - Revision of the geological context of the Port-au-Prince, Haiti, metropolitan area: implications for seismic microzonation. Nat. Hazards Earth Syst. Sci. Discuss., 2, 1-23, 2014.
- M. Gasc, D. Treinsoutrot, A. Giros, H. de Boissezon - KAL-Haïti : Une base de donnée recherche pour la gestion des risques et la reconstruction durable en Haïti. Revue française de photogrammétrie et de télédétection, n° 197, (2011) 119-121.

**Le projet KAL-Haïti** est un projet de recherche coordonné par le Centre National d'Etudes Spatiales (CNES). Il associe le Centre Technique de l'Équipement du Sud-Ouest (CETE-SO) du Ministère du Développement Durable et de l'Énergie (MEDDE), le Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM) et le Service de Traitement d'Images et de Télédétection de l'Université de Strasbourg (SERTIT). Le projet a duré 48 mois et a bénéficié d'une aide ANR de 681 830 € pour un coût global de 1 400 651 €.

**CONTACT**

**Delphine Fontannaz** : delphine.fontannaz@cnes.fr,  
<http://kal-haiti.kalimsat.eu>

## LAVA

## Lava Advance into Vulnerable Areas

### — La lave face à la ville: évaluation, réduction des risques et gestion des crises volcaniques effusives

De façon générale les populations installées sur les flancs des volcans actifs sont exposées à un risque volcanique considérable. Même si le nombre de victimes, à La Réunion, pendant l'activité effusive est très faible, le risque d'invasion par les laves en zones urbanisées impose d'anticiper les évacuations et de quantifier l'exposition des infrastructures et de la végétation aux incendies et à l'ensevelissement.

Ce projet vise à apporter une réponse rapide en terme de modélisation de l'avancée d'une coulée de lave lors d'une crise effusive. Les réponses obtenues permettront d'anticiper l'extension des coulées de lave ce qui servira en temps quasi-réel à la prise de décisions par les autorités. Parmi les objectifs, il est également question de modéliser les impacts physico-chimiques des environnements urbains et végétalisés traversés sur la physique d'écoulement des laves. La possible influence d'une forêt plus ou moins dense sur la mise en place d'une coulée de lave sera notamment testée. Enfin, ce projet vise à comprendre l'impact d'une éruption sur l'ensemble du territoire : établissement des scénarios opérationnels de gestion du risque et analyse de la perception.

### — L'impact d'une coulée de lave appréhendé avec des données satellitaires, de terrain, de laboratoire et de modélisation

La force du projet LAVA est d'associer plusieurs approches. Le but du projet est de modéliser l'étendue d'une coulée de lave en injectant dans les modèles mathématiques des données enregistrées par satellite, des contraintes observées et mesurées sur le terrain et des analyses effectuées en laboratoire. Ce jeu de données permettra (i) la calibration du modèle numérique capable de simuler très rapidement l'écoulement de la coulée sur une topographie réaliste (ii) de prendre en compte un environnement végétalisé ou urbanisé. Les données satellitaires utilisées permettent de suivre à distance une éruption avec parfois des possibilités selon les cas d'acquisition de nuit et/ou par mauvais temps. L'approche « terrain » permet de faire des observations et des mesures sur une coulée active. Les échantillons permettront, après analyse, de mieux contraindre les propriétés physico-chimiques nécessaires aux modèles. A l'aide d'un Système d'Information Géographique, les bases de données spatialisées des structures importantes (routes, établissements scolaires, hôpitaux etc.) seront confrontées aux simulations de lave. Cette approche permettra l'évaluation du risque (pertes, coûts, impacts émotionnels) et de la planification de l'évacuation.

### — Résultats majeurs

- L'interaction entre les coulées de lave et les arbres a été définie avec un modèle conceptuel basé sur des observations de terrain et l'analyse d'échantillons et avec un modèle mathématique d'écoulement de fluides de type Bingham – Darcy.
- Un protocole de modélisation des coulées de lave a été défini, testé, et validé comme opérationnel au cours de la dernière éruption du Piton de la Fournaise (sept 2018).



L'éruption du siècle : la coulée de lave de 2007 du Piton de la Fournaise. Cette photo illustre bien la menace et l'étendue que peut avoir une coulée de lave proche d'une zone habitée. Le village Le Tremblet, situé à proximité a été évacué à cause des panaches acides et des fumées en lien avec la coulée et l'incendie provoqué par la coulée.

- Une analyse socio-géographique (i) du comportement des visiteurs (ii) de l'accidentologie, (iii) de l'affectif, (iv) de l'appropriation des médias au Piton de la Fournaise en dehors et pendant les phases éruptives a été menée.
- Spatialisation des résultats par le SIG.

### — Production scientifique et brevets

- Harris et al. 2017. Journal of Applied Volcanology
- Harris, Villeneuve. 2018a. Journal of Applied Volcanology
- Harris, Villeneuve. 2018b. Journal of Applied Volcanology
- Bernabeu, Saramito, Harris. 2018. Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics
- Soldati et al. 2018 Bulletin of Volcanology
- Bernabeu et al. 2018 Volcanology and Geothermal Research
- Kolzenburg et al. 2018 Annals of Geophysics
- Chevrel et al. 2018 Bulletin of Volcanology

**Le projet LAVA** est un projet de recherche fondamentale coordonné par le Professeur Andrew Harris (volcanologie physique) du Laboratoire Magmas et Volcans (LMV) de l'Université Clermont Auvergne (UCA). Il associe le Dr Pierre Saramito (Mathématique) du Laboratoire Jean Kuntzmann (LJK) de l'Université Grenoble-Alpes, et du Dr. Nicolas Villeneuve (volcanologue et géographe) de l'Université de Saint-Denis ainsi que l'Observatoire Volcanologique du Piton de la Fournaise (OVPF). Le projet a commencé en octobre 2016 pour une durée de 48 mois. Il a bénéficié d'une aide ANR de 412 000 €.

#### CONTACT

**Andrew Harris** : [andrew.harris@uca.fr](mailto:andrew.harris@uca.fr)

# MapMuxing

## Multiplexage cartographique multi-dimensionnel

### — Le multiplexage cartographique : interagir avec des représentations cartographiques multiples

L'objectif du projet était d'améliorer, sur différents supports numériques, la visualisation et l'interaction avec les représentations cartographiques multiples (cartes à différentes échelles, images aériennes) qu'un utilisateur doit manipuler dans des tâches grand public ou professionnelles. Pour atteindre cet objectif, les partenaires ont misé sur l'interdisciplinarité avec l'intégration des problématiques de la géovisualisation dans des questions de recherche en interaction homme-machine (IHM) et inversement l'utilisation de tests contrôlés courant en IHM pour valider les visualisations proposées dans le projet. Pour ajouter de la fluidité dans la navigation entre des représentations cartographiques, les recherches ont porté sur la conception de continuums cartographiques soit en ensemble de représentations intermédiaires, plus ou moins continues, qui sont utilisées dans des outils d'interface comme des loupes ou des animations. Par exemple, des recherches ont porté sur la conception de continuums entre deux échelles où le continu de carte change beaucoup, pour permettre à l'utilisateur de ne pas être perdu dans la carte lors d'un zoom.

### — Le multiplexage cartographique au service de la gestion des risques naturels

Au-delà d'un usage grand public des géovisualisations comme dans GoogleMaps ou le Géoportail de l'IGN, le projet s'est intéressé à l'usage particulier de ces géovisualisations par les opérationnels de la gestion de crise, avec un cas d'application sur la question des tsunamis aux Antilles (voir la figure qui montre l'utilisation d'un mur d'écran simulant une salle de crise). Des visites ont été organisées dans des administrations, ou des sociétés possédant des salles de crise pour bien comprendre leur utilisation actuelle et potentielle d'outils de multiplexage cartographique. Les outils développés pendant le projet ont été prototypés pour les besoins recueillis pendant les visites, comme MapMosaic par exemple qui permet facilement de mixer les données géographiques pour identifier les enjeux dans une commune et les zones d'évacuation possible. Des travaux ont également porté sur la sémiologie des cartes d'évacuation et de l'aléa, et l'identification des toutes les données à multiplexer pour les besoins d'une gestion de crise de tsunami (par exemple des données de météorologie ou d'emplacement des bateaux en mer).

### — Résultats majeurs

Le projet a eu plusieurs résultats concrets. Le premier est la réutilisation de résultats sur les continuums cartographiques dans la production de cartes numériques à l'IGN, avec notamment la « pyramide écran » programmée pour début 2019. Le projet a aussi permis de rapprocher les partenaires des décideurs de la gestion des risques en Ile de France, via la participation au projet de l'I-Site FUTURE UrbanRiskLab qui regroupe des chercheurs en géographie, en sciences de l'environnement et en informatique, ainsi que des professionnels du risque.



Une « DragMag » sur un mur d'écran tactile montre une représentation à plus grande échelle d'une partie de la carte tout en montrant simultanément une carte topographique et une image aérienne.

### — Production scientifique et brevets

- ▶ M.-J. Lobo, E. Pietriga, C. Appert (2017) MapMosaic: Dynamic Layer Compositing for Interactive Geovisualization, *International Journal of Geographical Information Science*, Volume 31, Issue 9, pages 1818-1845, 2017.
- ▶ J.-F. Girres, F. Leone, M. Péroche, G. Gustave, M. Gherardi (2016) Analysis of tsunami evacuation maps for a consensual symbolization rules proposal, *International Journal of Cartography*, Volume 4, Issue 1, pages 4-24.
- ▶ M. Dumont, G. Touya, C. Duchêne (2019) Designing Multi-Scale Maps: Lessons Learned from Existing Practices, *International Journal of Cartography*, in press.

**Le projet MapMuxing** est un projet collaboratif de développement expérimental coordonné par Guillaume Touya du LASTIG (Laboratoire en Sciences et Technologies de l'Information Géographique). Il associe l'équipe ILDA (Interacting with Large Data) de l'INRIA Saclay et le laboratoire GRED de Montpellier (Gouvernance, Risque, Environnement, Développement). Le projet a commencé en octobre 2014 et a duré 54 mois. Il a bénéficié d'une aide ANR de 498 509 € pour un coût global de 1 967 030 €.

#### CONTACT

**Guillaume Touya** : guillaume.touya@ign.fr,  
<http://mapmuxing.ign.fr/>

## MAREGAMI

## Aléa sismique/tsunami et surveillance sous-marine dans la région d'Istanbul

## — Évaluation de l'aléa sismique et surveillance en mer de Marmara au moyen d'observatoires sous-marins

La mer de Marmara est située le long de la faille nord-anatolienne qui sépare la plaque anatolienne de la plaque eurasiennne. À terre, la faille est bien connue et les textes historiques abondants. On sait que la faille à terre est constituée de différents segments qui ont tous connu des séismes majeurs au cours des siècles précédents. En mer de Marmara, la situation est plus difficile à appréhender à cause de la colonne d'eau qui peut atteindre 1200 mètres par endroits. Depuis les séismes de 1999, qui ont fait plus de 20000 morts dans les zones d'Izmit et de Duzce, la France et la Turquie poursuivent une collaboration extrêmement active dans le domaine marin (8 campagnes depuis 2000). Les résultats ont permis de préciser la géométrie des différents segments de la faille, la structure des bassins et les interactions entre les fluides et la sismicité. Le projet MAREGAMI vise à étudier le comportement mécanique des segments de la faille, via une approche multidisciplinaire comprenant : i) l'analyse et la modélisation de données de géodésie et sismologie sous-marine ; ii) la définition (sur papier) du réseau sous-marin optimal à déployer pour la surveillance de la faille.

## — Approches spécifiques au domaine marin pour l'évaluation et la surveillance de l'aléa sismique/tsunami en Mer de Marmara

Le projet MAREGAMI propose la mise en œuvre de méthodes innovantes pour étudier le comportement mécanique des segments de la faille et améliorer ainsi l'évaluation et la surveillance de l'aléa sismique/tsunami en mer de Marmara. Les résultats principaux sont : 1) l'analyse des données de géodésie sous-marines par télémétrie acoustique suggère que le segment central - de Istanbul à Silivri - serait plutôt bloqué ; 2) ce résultat est cohérent avec l'existence de séquences de turbidites-homogenites, observées dans des carottes prélevées le long de ce segment, qui pourraient bien avoir été déclenchées par des séismes tous les 200 à 250 ans, à partir de l'analyse de carottes provenant du segment central ; 3) une partie des microséismes ( $M < 3$ ) détectés

sur le segment ouest de la faille ne sont pas d'origine tectonique mais induits par la présence de réservoirs de gaz traversés par la faille ; 4) la surveillance sismique de la faille passe par la mise en œuvre d'un réseau d'observatoires sous-marins. Un nouveau concept est proposé pour optimiser les coûts (investissement, exploitation, maintenance) à partir de bouées de surface reliées à des stations déployées en fond de mer.

## — Résultats majeurs

Les résultats majeurs concernent 1) l'existence d'un segment aujourd'hui bloqué (donc potentiellement dangereux) entre Silivri et Istanbul qui n'a connu de rupture majeure depuis au moins 250 ans ; 2) l'existence de micro-sismicité d'origine non tectonique, mais induite par la présence de gaz sur le segment ouest ; 3) l'élaboration d'un nouveau concept d'observatoire comprenant une bouée centrale de surface, connectée à un réseau de 5 stations de fond de mer permettant de localiser la micro-sismicité superficielle et d'améliorer la surveillance sismique en temps réel.

## — Production scientifique et brevets

- Henry P., et al (2018), A statistical approach to relationships between fluid emissions and faults: The Sea of Marmara case. Deep Sea Research Part II, doi : 10.1016/j.dsr2.2018.05.010
- Batsi E. et al, An alternative view of the microseismicity along the Western Main Marmara Fault, Bull. Seism. Soc. Am. (2018) 108 (5A): 2650-2674.
- Tsang-Hin-Sun, E., et al, (2018), Spatial and temporal dynamics of gas-related processes in the Sea of Marmara monitored with ocean bottom seismometers, Geophysical Journal International, in press.

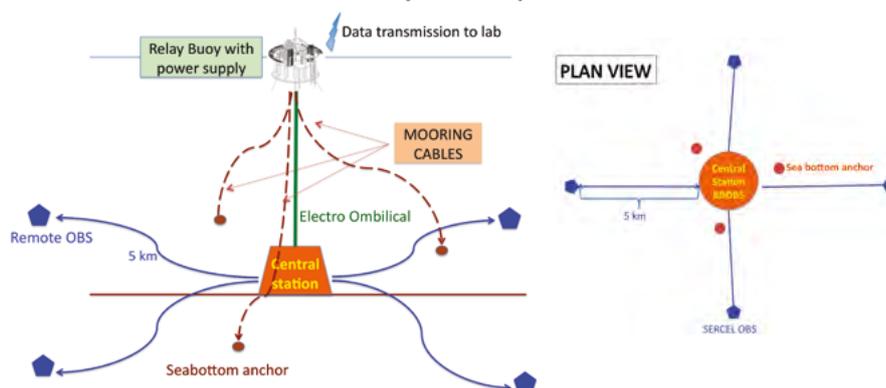
Concept d'observatoire proposant un système composé de 3 segments : i) un segment de surface, constitué d'une bouée équipée de panneaux solaires interfacés à des batteries pour la fourniture d'énergie et d'une antenne pour la transmission des données en temps réel ; ii) une liaison fond surface, constituée d'un ombilical pour la transmission de données de la station à la bouée et d'un système d'enroulement 3 points pour la stabilisation et l'ancrage de la bouée ; iii) un segment de fond, constitué d'une station centrale (avec un OBS large bande, un capteur de pression de type PAROS équipé d'un système de calage pour éviter la dérive) et d'un réseau de 4 capteurs de faible consommation permettant de localiser les séismes superficiels (profondeur < 5 km). Crédit : IFREMER.

**Le projet MAREGAMI** est un projet de recherche de collaboration internationale entre la France et la Turquie. Du côté français, le projet est coordonné par l'Unité de Recherches Géosciences Marines de l'Ifremer, et inclut les laboratoires Géosciences Océan, LIENS et CEREGE. Du côté Turc, le projet est coordonné par l'Istanbul Technical University (ITU) et inclut des chercheurs du KOERI (Kandilli Observatory and Earthquake Research Institute) de l'Université du Bosphore. GEOMAR (Allemagne) contribue également au projet sur fonds propres. Le projet a commencé en avril 2017 et durera 36 mois. Il a bénéficié d'une aide ANR de 229 915 € pour un coût global de 972 813 €.

**CONTACT**

Louis Géli : louis.geli@ifremer.fr

## MAREGAMI Observatory Concept



# MobiClimEx

## Mobilités quotidiennes et résidentielles des populations face aux crues rapides

### — Interactions spatiales et temporelles entre mobilités des populations et dynamique de l'eau lors des crues rapides

Le projet MobiClimEx interroge les interactions entre mobilités sociales et dynamiques hydrologiques lors des crues rapides. Les dynamiques sociales sont d'une part les mobilités quotidiennes sur le temps court de la journée, d'autre part les mobilités résidentielles sur le temps long des trajectoires de vie. L'enjeu est de comprendre en quoi les dynamiques des crues entrent en résonance avec les mobilités sociales pour former des événements extrêmes faisant des victimes sur les routes et dans différents lieux de vie.

Le département du Gard a été choisi comme terrain d'étude étant donnée son exposition particulière aux crues rapides et les observations existantes sur les interactions entre crues et mobilité quotidienne. A l'échelle de la France, il est l'un des départements les plus fréquemment affectés par les crues rapides. Avec le changement climatique, ces dernières voient leur intensité renforcée et pourraient survenir dans des régions jusqu'à présent épargnées. S'appuyer sur les savoir-faire et connaissances acquis par la recherche et par les acteurs et résidents du Gard constitue un enjeu important pour gérer ces phénomènes tant à l'échelle nationale qu'internationale.

### — Analyse interdisciplinaire des échelles pertinentes et des cycles de réponses

Une approche interdisciplinaire originale est déployée avec pour objectif central d'analyser à la fois les dynamiques sociales et celles des crues. À terme, il s'agit de mieux cerner à quoi correspondent les situations critiques amenant à un impact majeur des événements (notamment en nombre de victimes) ou à l'inverse les situations plus favorables.

Cette recherche se fonde sur l'identification des échelles pertinentes pour mieux cerner les interactions en jeu. Au-delà des échelles spatiales et temporelles directement impliquées par la nature même des phénomènes, l'idée est aussi d'identifier quels sont les niveaux institutionnels, juridiques et sociaux mobilisés dans les différentes formes de réponses observées au moment ou à la suite des crues. La difficulté de cette recherche des échelles pertinentes est liée à la diversité et à la complexité des phénomènes tant physiques que sociaux que nous observons. Néanmoins, elle est essentielle pour mettre en évidence et caractériser les cycles de réponse sociale à ces phénomènes et les zones d'ombre qui restent à investir pour une adaptation optimale des mobilités sociales.

### — Résultats majeurs

- ▶ Simulateur d'exposition des automobilistes face aux crues rapides : MobRISK. (Suite via le projet PICS, ANR, 2018-21).
- ▶ Diminution des résidences en zones inondables entre 1958 et 2012, rythmée par les événements extrêmes et par la réglementation nationale.
- ▶ Evolution de l'occupation des zones inondables variable d'un territoire à l'autre, en fonction de la pression urbaine.
- ▶ Diminution des résidences en zones inondables mais remplacement par des zones d'activités.
- ▶ Efforts de mise en protection des résidents, mais l'exposition reste notable sur les lieux d'activité ou lors des déplacements vers ces zones.



© Fred Smith, 10/10/14. Le quartier de Camplanier à Nîmes vers 10h30. Cette photographie prise par une habitante du Gard lors de l'inondation du 10 octobre 2014 résume toute la problématique de MobiClimEx : comment ces événements extrêmes perturbent-ils à la fois la mobilité quotidienne (les routes se transformant en rivières) et les lieux de vie ? Quelles sont les réponses sociales en terme de mobilité à différentes échelles face à la récurrence des crues ?

### — Production scientifique et brevets

- ▶ Boulouier J., Dubos-Paillard E., Pavard A., 2015, « Évolution de la vulnérabilité urbaine face au risque de crue rapide dans le Gard », in Pumain D et Mattei F (coord) *Données urbaines 7*, Coll villes, Economica.
- ▶ Debionne, S., Ruin, I., Shabou, S., Lutoff, C., & Creutin, J. D., 2016, Assessment of commuters' daily exposure to flash flooding over the roads of the Gard region, France. *Journal of Hydrology*, 541, 636-648.
- ▶ Lutoff C. et Durand S. (coord.), 2018, Mobilités face aux événements hydrométéorologiques extrêmes. Tome 1 : Quelles échelles de référence ? Editions ISTE (en cours d'édition).
- ▶ Shabou, S., Ruin, I., Lutoff, C., Debionne, S., Anquetin, S., Creutin, J. D., & Beaufils, X., 2017, MobRISK : a model for assessing the exposure of road users to flash flood events. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 17(9), 1631.
- ▶ Vannier, O., Anquetin, S. and Braud, I., 2016, Investigating the role of geology in the hydrological response of Mediterranean catchments prone to flash-floods: Regional modelling study and process understanding, *Journal of Hydrology*, 541, pp. 158-172.
- ▶ Vincendon, B., Edouard, S., Dewaele, H., Ducrocq, V., Lespinas, F., Delrieu, G. and Anquetin, S., 2016, Modeling flash floods in southern France for road management purposes, *Journal of Hydrology*, 541, 190-205.

**Le projet MobiClimEx** est un projet de recherche interdisciplinaire à visée opérationnelle. Céline Lutoff du laboratoire PACTE de l'Université Grenoble Alpes (UGA) en est la coordinatrice. Il associe des chercheurs de l'IGE (CNRS, UGA), du CNRM (Météo France et CNRS), de Géographie Cité (Université Diderot Paris 7) et de Armines - CRC (Mines Paris Tech). Il a débuté en janvier 2013 et s'est déroulé sur une durée de 5 ans. Il a bénéficié d'une **aide ANR de 760 000 €** pour un coût global de l'ordre de 3 millions d'euros.

#### CONTACT

**Céline Lutoff** : celine.lutoff@univ-grenoble-alpes.fr

# MODNAT

## Imiter la nature pour mieux évaluer l'impact du changement climatique sur les structures

### — Construire des modèles probabilistes à partir d'observations de phénomènes naturels

L'objectif principal de ce projet est de développer des modèles stochastiques « réalistes » de phénomènes naturels afin de prendre en compte et décrire leur aspect aléatoire et imprévisible (non pas dans l'occurrence du phénomène mais dans leurs effets physiques), de pouvoir générer aisément des réalisations simulées utilisables dans des approches de type Monte Carlo, et d'évaluer l'apport de ces modèles par rapport aux modèles classiques (modèles gaussiens, stationnaires) sur des applications industrielles dans le domaine des séismes, de la turbulence, et de la houle.

### — Enrichir les bases de données de mesures d'aléas naturels pour accroître la fiabilité des structures

Différentes approches probabilistes ont été explorées afin de pouvoir construire de nouveaux modèles représentés par des processus non gaussiens et non stationnaires. Une première approche basée sur une décomposition en composante principale (appelée développement de Karhunen Loève), qui permet de séparer la dépendance en temps de la dépendance de l'aléa du phénomène, a ainsi démontré son efficacité à restituer les caractéristiques aléatoires ainsi que certaines caractéristiques physiques de phénomène étudié.

Elle a également débouché sur une méthode particulièrement efficace pour générer par simulation des échantillons synthétiques du phénomène, permettant ainsi, en enrichissant la base de données initiale, d'utiliser des techniques de type Monte Carlo pour évaluer l'impact des phénomènes naturels sur les structures. Une approche basée sur l'utilisation des processus de Laplace à moyenne mobile a également été développée, ainsi qu'une approche basée sur les processus à spectre évolutionnaire à paramètres aléatoires.

### — Résultats majeurs

La modélisation des phénomènes naturels par l'approche Karhunen Loève (KL) et plus généralement par son extension au cas des champs par la décomposition bi-orthogonale, s'est montrée très efficace et très générale. Le modèle obtenu permet alors de générer très rapidement de nouvelles trajectoires qui viendront enrichir la base de données initiale et permettre ainsi de donner accès à des analyses probabilistes de type fiabilité par des approches Monte Carlo.

Cette approche va être utilisée pour construire un modèle tridimensionnel de rafales en milieu montagneux dans le cadre du projet LCA60T de Flyingwhales, <http://flying-whales.com/fr>. Il s'agit du développement d'une méthode innovante pour le calcul de probabilités d'événements rares liés aux maxima en horizon fini de processus stochastiques. Cette méthode s'applique à tout type de processus qu'il soit décrit explicitement par sa loi, solution d'une équation différentielle stochastique (univoque ou multivoque) ou tout simplement connu par voie expérimentale.



Vue d'artiste d'une éolienne flottante implantée dans le parc éolien Hywind par Statoil. Crédit photo : STATOIL.

### — Production scientifique et brevets

- ▶ Poirion F. *Karhunen Loève expansion and distribution of non Gaussian process maximum*. Probabilistic Engineering Mechanics, 2016, 43, 85-90.
- ▶ Poirion, F. & Zentner, I. *Stochastic model construction of observed random phenomena*, Prob. Eng. Mech, DOI information: 10.1016/j.probengmech.2014.03.005.
- ▶ Raillard N., Prevosto P. & Ailliot P. *Modeling process asymmetries with Laplace moving average*, Computational Statistics and Data Analysis 81 (2015) 24-37.
- ▶ Zentner I. *A procedure for simulating synthetic accelerograms compatible with correlated and conditional probabilistic response spectra*, Soil Dynamics and Earthquake Engineering 63, 2014, 226-233.
- ▶ Zentner I., Ferré G., Poirion F. & Benoit M. *A biorthogonal decomposition for the identification and simulation of non stationary and non Gaussian random fields*, submitted to J. of Computational Physics, 2015.

**Le projet MODNAT** est un projet de recherche fondamentale coordonné par l'ONERA, office national d'études et de recherches aérospatiales. Il associe l'Université de Brighton, EDF R&D Electricité de France, IFPEN IFP Energies nouvelles, IFREMER Institut français de recherche pour l'exploitation de la mer et l'Université Blaise Pascal Institut Pascal. Le projet a commencé en octobre 2012 et a duré 39 mois. Il a bénéficié d'une aide ANR de 621 257 € pour un coût global de 1 300 000 €.

#### CONTACT

**Fabrice Poirion** : [poirion@gmail.com](mailto:poirion@gmail.com),  
<http://sites.onera.fr/MODNAT/>

# MUSIC

## Épisodes méditerranéens de pluie intense

### — Mieux comprendre et modéliser les épisodes méditerranéens de pluie intense

La région méditerranéenne est fréquemment affectée par des précipitations intenses qui produisent des crues soudaines et des glissements de terrain. Risque majeur en Méditerranée, les inondations et glissements de terrain causent chaque année des victimes et plusieurs milliards d'euros de dégâts. Bien souvent, les forts cumuls de précipitations qui produisent ces crues sont enregistrés en moins d'une journée lorsqu'un système orageux stationne au-dessus d'une même région pendant plusieurs heures. La formation et la stationnarité de ces systèmes résultent d'interactions multi-échelles complexes entre le flux atmosphérique environnant, les reliefs du pourtour méditerranéen et les cellules orageuses qui rendent difficile une prévision précise du lieu et de la chronologie des précipitations convectives intenses. Le projet MUSIC a pour objectif principal de progresser dans la compréhension et la modélisation des systèmes orageux induisant ces précipitations intenses afin d'améliorer leur prévision à différents horizons.

### — Campagnes de mesures et modélisation à très haute résolution

Le projet MUSIC exploite les observations recueillies au cours de la première campagne de terrain du programme de recherche HyMeX ([www.hymex.org](http://www.hymex.org)) qui a eu lieu en Méditerranée nord-occidentale (France, Italie, Espagne) à l'automne 2012. Le projet fait également appel à des capacités nouvelles de simulations sur de grands domaines avec des résolutions hectométriques de cas observés pendant la campagne HyMeX pour résoudre de manière détaillée : (i) la turbulence et la microphysique dans les systèmes orageux et dans la couche limite et (ii) les interactions multi-échelles entre les orages et son environnement météorologique à plus grande échelle. L'utilisation combinée des observations et des simulations a permis de progresser dans la compréhension des événements de pluies orageuses intenses en Méditerranée et dans leur modélisation. Le projet s'est concentré plus particulièrement sur la représentation des processus physiques clés qui influencent fortement la modélisation et les prévisions de la convection atmosphérique profonde aux résolutions kilométriques et sub-kilométrique (turbulence, microphysique) et contribue ainsi à améliorer et valider les modèles de résolution kilométrique utilisés pour la prévision numérique du temps et du climat régional.

### — Résultats majeurs

Pour la première fois, des simulations à 150 m de résolution de systèmes orageux méditerranéens sur un domaine couvrant toute la Méditerranée nord-occidentale ont été réalisées.

Plusieurs jeux d'observations innovantes ont été produits. Ils ont permis de caractériser les systèmes orageux et leur environnement et ont été utilisés pour développer de nouvelles paramétrisations physiques, dont certaines d'entre-elles devraient être intégrées à terme dans le modèle AROME de Météo-France utilisé pour la prévision opérationnelle du temps et pour la réalisation de projections climatiques régionales.

### — Production scientifique et brevets

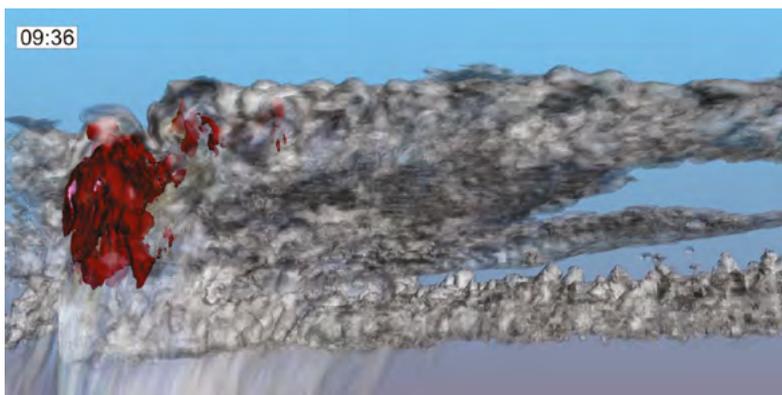
Plus de 20 articles scientifiques publiés dans des journaux internationaux à comité de lecture, qui s'inscrivent pour la plupart dans :

- ▶ le numéro spécial « Advances in understanding and forecasting of heavy precipitation in the Mediterranean through the HyMeX SOP1 field campaign », *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, vol. 142, S1, 1-471, 2016.
- ▶ le numéro spécial « Hydrological Cycle in the Mediterranean » commun aux journaux *Natural Hazards and Earth System Sciences*, *Hydrology and Earth System Sciences*, *Ocean Sciences*, *Atmospheric Chemistry and Physics*, *Atmospheric Measurement Techniques*, *Geoscientific Model Development*.

**Le projet MUSIC** est un projet de recherche fondamentale coordonné par le CNRM (Centre National de Recherches météorologiques, Météo-France et CNRS) et associe le LA (Laboratoire d'Aérodynamique, Université de Toulouse et CNRS), LaMP (Laboratoire de Météorologie Physique, Université Blaise Pascal Clermont 2 et CNRS), LATMOS (Laboratoire Atmosphères, Milieux, Observations Spatiales, Université de Versailles Saint Quentin en Yvelines et CNRS). Le projet a commencé en octobre 2014, pour une durée de 54 mois. Il a bénéficié d'une aide ANR de 563 272 € pour un coût global de 5 880 987 €.

#### CONTACT

**Véronique Ducrocq** : [veronique.ducrocq@meteo.fr](mailto:veronique.ducrocq@meteo.fr),  
[www.hymex.org/MUSIC/](http://www.hymex.org/MUSIC/)



Zoom sur une cellule d'un système orageux observé pendant la campagne HyMeX et simulé par le modèle atmosphérique Meso-NH à 150 m de résolution. Nuages et précipitations en tons grisés, zone de fortes ascendances du cœur de la cellule convective en tons rouges.

# NAMAZU

## Endommagements de la croûte terrestre sous le Japon induits par le séisme de Tohoku-oki

### — Mesures, à partir du bruit de fond sismique, de l'effet du séisme de Tohoku-oki sur la croûte terrestre au Japon

Les séismes géants sont le résultat du mouvement lent des plaques tectoniques qui induit une accumulation de forces à l'interface entre ces plaques. La déformation ainsi accumulée au cœur de la croûte terrestre est relâchée soit de manière brutale lors des séismes, soit de manière lente par fluage ou glissement lent. L'étude de l'effet sur la croûte terrestre du relâchement brutal de ces contraintes lors d'un grand séisme apporte des informations précieuses sur le comportement mécanique de la Terre. Le méga-séisme de Tohoku-oki (2011) de magnitude 9 est le 4<sup>e</sup> plus gros séisme jamais enregistré. Il est en outre le séisme le mieux enregistré dans l'histoire de la sismologie du fait de la proximité du réseau sismologique japonais, le plus dense au monde.

Notre groupe a développé ces dernières années une méthode novatrice qui permet de sonder les perturbations au cœur de la croûte terrestre à partir de l'écoute du bruit de fond sismique. Au sein de ce projet, nous nous sommes concentrés avec nos collègues Japonais sur l'utilisation des données sismiques et de déformation (GPS) japonaises dans l'objectif d'imager au cœur de la croûte terrestre les perturbations induites par le relâchement de contrainte lors du séisme de Tohoku-oki.

### — L'écoute du bruit de fond sismique permet d'imager la réponse de la croûte terrestre à un méga-séisme

Depuis très récemment, aucune méthode ne permettait de sonder de manière continue dans le temps les déformations que subit la croûte terrestre en profondeur. Ce verrou a récemment été levé par la découverte par notre groupe de la possibilité d'utiliser le bruit de fond sismique pour suivre ces perturbations de manière continue dans le temps. Cette approche novatrice a notamment apporté un éclairage nouveau sur la mécanique des séismes en Californie sur la faille de San-Andreas (Breguier et al., *Science*, 2008).

Au sein de ce projet, nous avons appliqué cette approche au Japon pour le cas du séisme de Tohoku-oki (2011). Grâce à la densité unique au monde de stations sismiques au Japon, nous avons pu dépasser les limites de la méthode en termes de résolution temporelle et spatiale.

Grâce à une collaboration fructueuse avec nos collègues Japonais, nous avons pu analyser plus de 70 téraoctets de données sismiques. Leur analyse a permis d'obtenir les premières images de l'effet du séisme sur la croûte terrestre sous le Japon apportant ainsi de nouvelles contraintes sur la réponse de la croûte terrestre aux méga-séismes.

### — Résultats majeurs

Le résultat majeur de ce projet a été l'obtention des premières images de perturbations crustales induites par le séisme de Tohoku-oki pour toute la partie centrale et nord de l'archipel du Japon. Ces images permettent de mieux comprendre le régime de relâchement de contraintes au cœur de la croûte terrestre ainsi que du manteau supérieur induit par le séisme de Tohoku. Nous avons aussi pu obtenir des mesures de ces perturbations avec une résolution temporelle inférieure à 1 jour, ce qui n'avait jamais été obtenu auparavant. Ces résultats auront un impact majeur sur notre compréhension du comportement mécanique

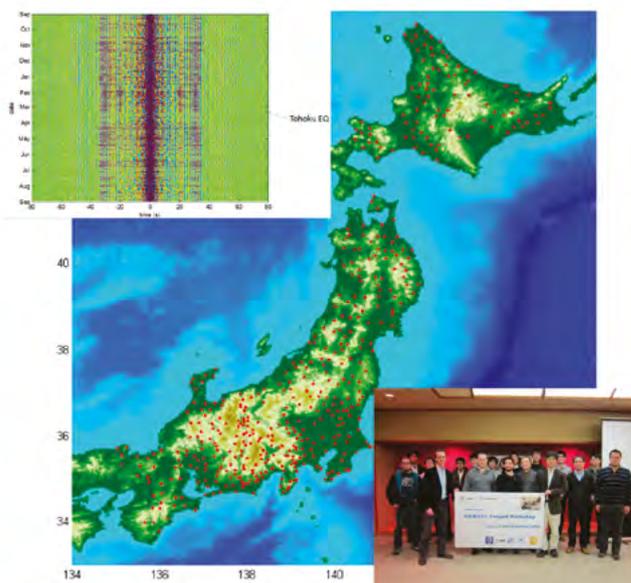


Figure du réseau sismologique utilisé pour cette étude (chaque point rouge correspond à un sismomètre). En haut, à gauche, exemple de corrélations de bruit de fond sismique utilisées pour cette étude. En bas, à droite, membres du projet lors d'une réunion à Matsushima au Japon en mars 2013.

de l'écorce terrestre superficielle en mettant notamment en lumière l'interaction forte entre séismes et régions volcaniques (Breguier et al., *Science*, 2014).

### — Production scientifique et brevets

Nous avons présenté nos résultats à l'occasion de plusieurs conférences d'envergure internationale (AGU, EGU).

Les publications majeures sont :

- Mapping pressurized volcanic fluids from induced crustal seismic velocity drops (2014), Breguier, F., Campillo, M., Takeda, T., Aoki, Y., Shapiro, N. M., Briand, X., ... & Miyake, H.. *Science*, 345(6192), 80-82.
- Seasonal crustal seismic velocity changes throughout Japan (2017), Q. Wang, F. Breguier, M. Campillo, A. Lecointre, T. Takeda, Y. Aoki, *Journal of Geophysical Research*.

**Le projet NAMAZU** est un projet de recherche fondamentale coordonné par l'Institut de Physique du Globe de Paris et l'Université de Sendai, Tohoku au Japon. Il associe l'Institut des Sciences de la Terre de Grenoble ainsi que l'Earthquake Research Institute à Tokyo et le NIED à Tsukuba au Japon. Le projet a débuté le 1<sup>er</sup> octobre 2011 et a duré 18 mois. **La subvention ANR pour ce projet était de 33,8 k€** pour l'IPGP et de 57,9 k€ pour l'ISTerre pour un budget total de 317,2 k€.

#### CONTACT

**Florent Breguier :**  
florent.breguier@univ-grenoble-alpes.fr

# ONAMAZU

## Lecture des ondes du Grand Séisme de Tohoku au travers des sédiments de proche surface

### — La réponse non-linéaire des sédiments : où, quand, comment ?

Grâce à plusieurs réseaux sismiques japonais, des données d'excellente qualité ont été enregistrées lors du méga-séisme de subduction (Mw 9.0) de 2011. Ces données étaient susceptibles de contenir de l'information sur le comportement non-linéaire entre les contraintes et les déformations au sein des sédiments de proche surface (quelques centaines de mètres de profondeur). La compréhension de ce phénomène non-linéaire est primordiale pour mieux quantifier le niveau d'aléa sismique dans les régions à sismicité forte ou modérée car la relation entre les contraintes et les déformations a un impact direct sur les niveaux d'accéléérations enregistrés en surface. L'ensemble des données à disposition (pré-chocs, choc principal, répliques et mesures de bruit de fond) enregistrées sur plusieurs sites ont été utilisées pour répondre à certaines questions fondamentales en sismologie des mouvements forts : vers quelles profondeurs apparaît la réponse non-linéaire des sédiments ? quels niveaux de déformations sont mis en jeu ? y-a-t-il un recouvrement des propriétés mécaniques élastiques suite à des effets non-linéaires ?

### — Inversion temporelle des formes d'ondes et analyses temps-fréquences

La détermination des propriétés mécaniques des sédiments (ou de leurs niveaux de déformations) en profondeur nécessite la résolution d'un problème inverse. Au lieu de calculer les formes d'ondes (ex : l'accélération du sol) à partir des propriétés mécaniques des sédiments, il s'agit de remonter à ces propriétés mécaniques à partir des accélérations. Ce type de problème étant généralement sous-contraint (nombre d'inconnues supérieur au nombre d'équations), il faut d'abord s'assurer de la robustesse de la technique d'inversion – couplant un algorithme génétique et la méthode des matrices de propagation de Thomson-Haskell – sur un jeu de données synthétiques. Ensuite, il faut décoder à l'aide de cette technique les informations incluses dans les accélérations observées en surface pour remonter à la vitesse des ondes de cisaillement et aux facteurs d'amortissements des couches de sédiments. Pour étudier le recouvrement des propriétés mécaniques des sols au cours du temps, une technique d'analyse temps-fréquence a été développée et permet de suivre l'évolution temporelle de la fréquence prédominante d'un site.

Cette technique repose sur un ratio de transformées de Stockwell qui génère des informations à haute résolution, aussi bien en temps qu'en fréquence.

### — Résultats majeurs

Ce projet a permis d'améliorer la connaissance des propriétés mécaniques de plusieurs sites KNET et KIK-net. Afin de mener à bien ce travail, un milliard d'accélérogrammes générés synthétiquement ont été comparés aux accélérogrammes observés afin de remonter aux propriétés des sites. Certains sites nous ont clairement permis de quantifier les niveaux de non-linéarité mis en jeu dans les couches sédimentaires ; d'autres, plus complexes du fait de leur géométrie à deux ou trois dimensions, suggèrent que des inversions basées sur une théorie à une dimension peuvent être fortement biaisées.

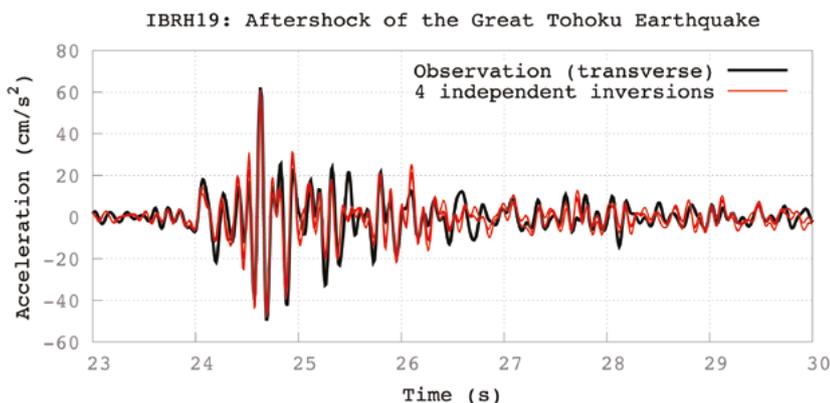
### — Production scientifique et brevets

- ▶ De Martin F, Matsushima S and Kawase H (2013) Impact of geometric effects on near-surface Green's functions. *Bulletin of the Seismological Society of America* 103 (6) 3289-3304, doi:10.1785/0120130039.
- ▶ Ducellier A, Kawase H and Matsushima S (2013) Validation of a new velocity structure inversion method based on horizontal-to-vertical (H/V) spectral ratios of earthquake motions in the Tohoku area, Japan. *Bulletin of the Seismological Society of America* 103 (2A) 958-970, doi:10.1785/0120120214.

**Le projet ONAMAZU** est un projet de recherche fondamentale coordonné par le BRGM en France et par le « Disaster Prevention Research Institute » (DPRI, Université de Kyoto) au Japon. Les autres partenaires sont l'IFSTTAR (France), SHIMIZU Corporation (Japon) et NIED (Japon). Le projet a débuté en octobre 2011 pour une période de 18 mois. **L'aide ANR s'élève à 60 k€** et l'aide JST s'élève à 28 k€.

#### CONTACT

**Florent De Martin** : f.demartin@brgm.fr



Comparaison entre des données observées (accélération du sol lors d'un séisme, courbe noire) et des données inversées (courbes rouges). Les données inversées sont obtenues en recherchant les meilleures propriétés mécaniques des couches de sédiments permettant de reproduire au mieux les données observées. Crédit : F. De Martin.

## PALET

Subsidence/soulèvements côtiers  
et cycle sismique à Tohoku (Mw 9, 2011)— Paléo-séismes liés à la zone de subduction du Japon  
et séisme de Tohoku : Détermination du cycle sismique

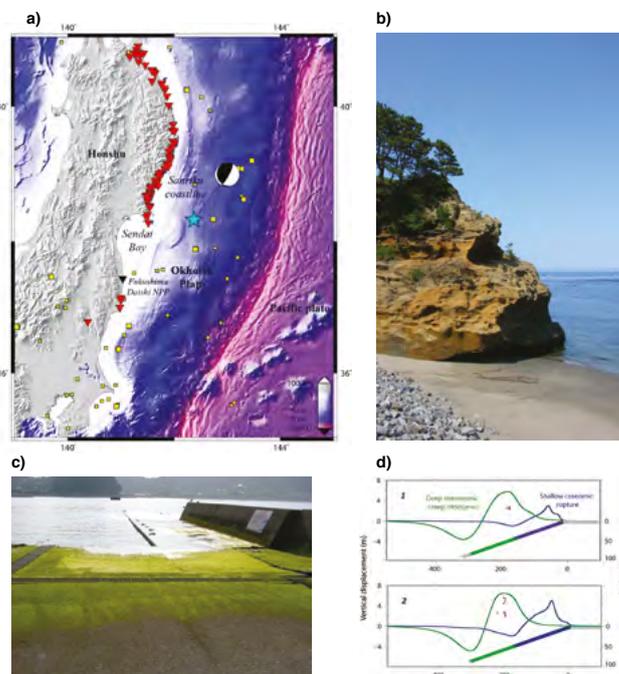
Les séismes de fortes magnitudes ( $M_w > 7$ ) génèrent une déformation en surface parfois visible et souvent mesurable. L'identification du cycle sismique devient possible lorsque son enregistrement géomorphologique est permanent en surface. Le projet PALET est basé sur des investigations de terrain des traces des séismes et tsunamis anciens dans la région de Tohoku, site du séisme géant de 2011 ( $M_w = 9$ ) sur la zone de subduction du Japon. Le moteur de cette déformation étant la convergence de 8 cm/an des plaques pacifique et eurasienne, le taux de déformation sismique précédent l'évènement de 2011 ne rendait compte que de 25 % de cette convergence, mettant ainsi en évidence un déficit sismique considérable. La zone épiscopentrale étant en mer (~150 km à l'est de l'île de Honshu), l'enjeu est ici de mettre en évidence la déformation du cycle sismique (pré-co- et post-sismiques) le long de la côte de Sanriku. Il s'agit de décrire, analyser et modéliser l'impact en surface de la déformation et du cycle sismique depuis au moins le séisme historique majeur de Jogan du 13/07/869. La lecture et la modélisation de cette déformation est une étape importante pour l'évaluation de l'aléa et du risque sismique.

— Estimation de la vitesse du soulèvement côtier  
et du couplage sismique par la paléo-sismologie  
et la paléo-géodésie

L'accumulation de la déformation inter-sismique est une composante importante du cycle sismique dans les zones de subduction. Lors du séisme de 2011, les résultats des mesures GPS et sismo-tectoniques ont mis en évidence une rupture en faille inverse longue de ~500 km, large de ~100 km, et un glissement maximum de ~44 m sur la faille à l'épicentre. En revanche, la déformation co-sismique montre une subsidence maximum de ~1.2 m suivit d'un soulèvement post-sismique de ~25 cm sur la côte. Les terrasses côtières liées aux niveaux isotopiques marins MIS5e (124 ka) à MIS19 (~780 ka) révèlent une déformation constante de 0.2 – 0.4 mm/an en soulèvement. La vitesse ~1.1 mm/an du soulèvement des terrasses durant l'Holocène et les mesures post-sismiques (GPS) témoignent d'une accélération de cette déformation. Les dépôts de tsunami de la région côtière de Sanriku-Fukushima durant les derniers 7 000 ans montrent une récurrence de 400 à 800 ans des séismes majeurs ( $M_w > 8$ ) pour la région de Tohoku. L'inversion conjointe des déformations co-, post- et inter-sismiques montrent une co-localisation de la subsidence avec les mouvements de soulèvement à long terme.

## — Résultats majeurs

Les résultats montrent la subsidence liée au séisme de Tohoku ( $M_9$ , 2011) et le soulèvement quaternaire sur la côte est de l'île de Honshu. La détermination du cycle sismique et la répétition des séismes majeurs indiquent le comportement à long-terme de la zone de subduction. La modélisation de la déformation co-sismique (subsidence) et inter-sismique (soulèvement) indique la superposition de la déformation élastique avec la déformation visco-élastique profonde. La récurrence des séismes majeurs ( $M \geq 8$ ) de 400 à 800 ans marque le couplage sismique le long de la zone de subduction.



a) Sites étudiés (triangle rouge) et épicentre (étoile) du séisme du 11 mars 2011 au large de l'île de Honshu (Japon). Le mécanisme (cercle) est la solution focale du CMT Harvard. b) Encoches dues à l'érosion côtière qui marquent les niveaux marins holocènes et le soulèvement consécutif. c) Subsidence de ~0.45 m observée suite au séisme de 2011. d) Coupes à travers la zone du séisme de 2011 (1 et 2 au nord et au sud de la baie de Sendai, respectivement) et modèle de déformation co-sismique élastique (trait bleu) et inter-sismique visco-élastique (trait vert), obtenues par la combinaison des données géodésiques, sismiques et tectoniques.

## — Production scientifique et brevets

- Meghraoui, M., et al., 2013, The PALET project: Paleoseismology, paleotsunamis and uplift rates of NE Japan and their relationship to the earthquake cycle, Geophysical Research Abstracts, Vol. 15, EGU2013-5904, EGU General Assembly, Vienna.
- Mechernich, S., et al., 2012, Constraint of the active coastal deformation and seismic cycle in the 2011 Mw 9.0 Tohoku-oki earthquake area. AGU Fall Meeting, San Francisco, Oral G21B-04.
- Meghraoui, M., Mechernich, S., Cetin, E. and Ferry, M., 2019, Coastal uplift and subsidence from 8-year GPS and neotectonic data in northeast Honshu (Japan), implications for the Tohoku earthquake cycle, submitted to Geology.

**Le projet PALET** est un projet de recherche fondamentale est coordonné par l'Institut de Physique du Globe de Strasbourg (DGDA), France, et par l'International Research Institute of Disaster Science (IRIDeS), Tohoku University, Japon. Ce projet associe également le laboratoire de Géographie de l'université de Kyoto (Japon), et le laboratoire Geosciences Montpellier (France). Le projet a été initié en octobre 2011 pour une durée de 18 mois. **Les crédits ANR accordés ont été de 98 k€** et les crédits japonais sont estimés à 50 k€.

**CONTACT**

**Prof. Mustapha Meghraoui** : m.meghraoui@unistra.fr,  
<http://eost.unistra.fr/recherche/ipgs/da/da-perso/projet-anr-palet/>

## APPEL THÉMATIQUE

PROGRAMME « ÉMERGENCE DE PRODUITS, TECHNOLOGIES OU SERVICES À FORT POTENTIEL DE VALORISATION (EMERGENCE) », 2010

## PELICAN

## Un radar imageur pour cartographier les cours d'eau et les milieux naturels

## — Suivre l'évolution des cours d'eau : un diagnostic indispensable

De par leur attractivité et leur richesse écologique, les cours d'eau sont associés à d'importants enjeux environnementaux, sociétaux et économiques. Depuis 2000, la France s'est engagée à parvenir au « bon état » de tous les milieux aquatiques. Leur gestion passe notamment par un suivi de leur morphodynamique.

Les méthodes traditionnelles consistent généralement en un levé GPS réalisé à pied, en cheminant le long des berges. Or, en pratique, ce suivi peut s'avérer complexe, en raison de la présence de végétation, de difficultés d'accès, ou de signal GPS inaccessible à cause de l'encaissement du cours d'eau. C'est pourquoi des techniques de télédétection sont utilisées en complément ou en substitution. La plupart s'appuient sur l'imagerie optique, ou le Lidar aéroporté. Malgré leurs avantages, ces systèmes sont dépendants des conditions météorologiques et doivent être impérativement couplés à un GPS et à une centrale inertielle. A la différence, les ondes radar sont insensibles aux aléas climatiques et traversent la végétation, permettant de discerner la limite eau/sol, indispensable pour le suivi géomorphologique, réalisé lors d'un aménagement ou après un épisode de crue.

## — Le radar, une technologie adaptée aux mesures en milieu extérieur

Lorsque les conditions climatiques varient, ou plus généralement en environnement extérieur, les techniques radar présentent beaucoup d'atouts, comparées aux systèmes optiques. Afin de permettre un suivi régulier des cours d'eau, nous avons pu développer dans le cadre du projet, un radar adapté à ces situations particulières. Facile à installer sur une embarcation, le radar PELICAN est capable de dresser une cartographie 2D de la rivière au fur et à mesure de la descente du cours d'eau. Son antenne tournante capte les échos de l'environnement sur 360°, permettant de construire une image panoramique sur un rayon de 100 mètres autour de l'embarcation. Un logiciel spécifique baptisé R-SLAM, a été conçu, qui associe les images panoramiques afin d'élaborer une carte de l'environnement et calculer simultanément la trajectoire de l'embarcation.

**Le projet PELICAN** est un projet de recherche à fort potentiel de valorisation coordonné par IRSTEA avec l'appui de sa cellule de valorisation et du pôle de compétitivité ViaMéca. Le projet a débuté en mars 2011 et a duré 32 mois. Il a bénéficié d'une aide ANR de 185 k€ et d'une contribution du pôle ViaMéca de 14 k€ pour un coût global de 451 k€.

## CONTACT

**Marie-Odile Monod :**  
marie-odile.monod@irstea.fr

Comparé aux techniques existantes, les volumes de données générées sont faibles (10 mégaoctet par seconde) et la carte fournie est facile à exploiter pour calculer les limites de berges, positionner les épis, ou identifier les rapides. Avantage supplémentaire et fondamental, le système n'a pas besoin du GPS pour se repérer, car le géoréférencement de la carte peut être effectué en post-traitement.

## — Résultats majeurs

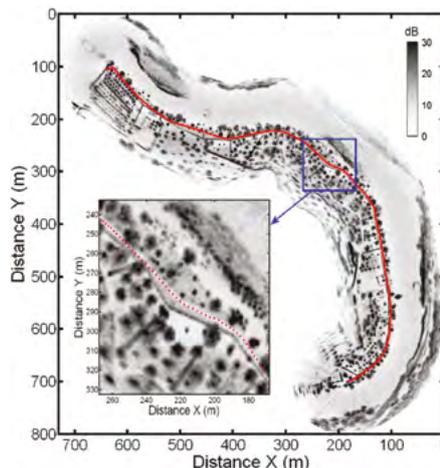
Le système imageur radar PELICAN a été mis en œuvre sur différents types de cours d'eau (plaine alluviale et gorges), sur des tronçons allant de 2 à 25 km. Il a été comparé à des relevés photogrammétriques couleur et infrarouge ainsi qu'à des relevés scanner laser. Il en ressort que le radar peut fournir une cartographie précise et pertinente des berges, quand les systèmes optiques sont affectés par les effets d'ombre portée, de masquage par la végétation ou d'artefacts à la transition eau-sol. Ses avantages majeurs sont sa facilité de mise en œuvre et son indépendance vis-à-vis du GPS. Il a été présenté au SIMA 2013, ainsi qu'au salon du Bourget 2013 par l'entreprise NSE.

## — Production scientifique et brevets

Parmi les publications internationales à comité de lecture, citons :

- ▶ Jaud M., Rouveure R., Faure P., Monod M.O., 2013. Methods for FMCW Radar maps georeferencing. ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, vol. 84, pp. 33-42.
- ▶ Jaud M., Rouveure R., Faure P., Monod M.O. 2014. Boat borne radar mapping versus aerial photogrammetry and mobile laser scanning applied to river gorge monitoring. Open Journal of Remote Sensing and Positioning, vol. 1, N°1, pp. 48-63.
- ▶ Jaud M., Rouveure R., Faure P., Monod M.O., 2014. Method for orthorectification of terrestrial radar maps. ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, vol. 97, pp. 185-194.
- ▶ Dépôt de logiciel : R-SLAM, logiciel de cartographie de l'environnement par radar, déposé le 13/07/2012 à l'Agence de Protection des Programmes.

Un méandre de l'Allier (Puy de Dôme, France) cartographié par le radar PELICAN (photo P. Faure) au cours de la descente de la rivière. Une carte précise du cours d'eau peut ainsi être élaborée dans des environnements encaissés ou à couvert végétal dense.



## RAVEX

# Développer une approche intégrée pour réduire les risques associés au volcanisme explosif

## — Un projet pluridisciplinaire pour étudier les aléas volcaniques et développer des outils de gestion des risques

Les éruptions volcaniques explosives génèrent des jets turbulents et chauds de gaz et de particules volcaniques qui s'élèvent dans l'atmosphère ou bien qui s'effondrent sous la forme d'une fontaine éruptive pour former des écoulements pyroclastiques, lesquels peuvent déclencher des tsunamis lorsqu'ils entrent en contact à vitesse élevée avec une masse d'eau. Ces phénomènes représentent des aléas naturels majeurs pour les populations qui vivent à proximité des volcans actifs.

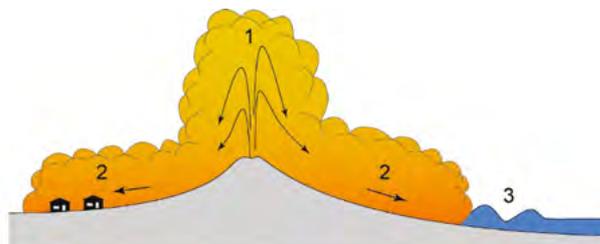
Le projet RAVEX a pour objectif de développer une approche intégrée afin d'étudier les mécanismes physiques de ces écoulements volcaniques qui se produisent en chaîne et d'évaluer les risques qu'ils représentent. Nos travaux sur les phénomènes volcaniques portent notamment sur les modes de formation de la fontaine éruptive, la création des écoulements pyroclastiques à la zone d'impact et leurs mécanismes de propagation, et les processus de déclenchement d'un tsunami. Ils sont complétés par un programme transverse qui porte sur l'évaluation de l'aléa et du risque et les outils de gestion de ce dernier sur l'île de la Martinique, réalisé par l'intermédiaire de simulations numériques et d'enquêtes auprès des acteurs de la chaîne du risque.

## — Modèles théoriques, expériences de laboratoire et travaux de terrain pour comprendre les mécanismes et identifier les enjeux

Les mécanismes éruptifs sont étudiés grâce à des modèles théoriques et des expériences de laboratoire. Les travaux sur les fontaines éruptives et les écoulements pyroclastiques portent sur la dynamique des mélanges gaz-particules à des concentrations variées. Ils concernent notamment le couplage entre les parties ascendantes et descendantes d'une fontaine ainsi que l'effet des particules sur l'entraînement du fluide ambiant, le phénomène d'accumulation des particules à la zone d'impact de la fontaine, la concentration des particules dans les écoulements dilués turbulents, et la propagation des écoulements gaz-particules denses.

Modèles et expériences permettent également d'étudier le déclenchement d'un tsunami par un écoulement pyroclastique, les échanges thermiques associés et les caractéristiques de la vague formée. Les résultats de ces travaux, complétés par ceux d'études sur le terrain, permettent d'élaborer des simulations d'éruptions et de tsunamis à la Martinique.

Enfin, la représentation du risque par les acteurs locaux sur l'île est analysée à partir d'analyse de documents d'archives et d'enquêtes (par entretiens et observations ethnographiques) réalisées auprès des populations et des instances de gestion des risques.



Représentation schématique d'une fontaine éruptive (1) à l'origine d'écoulements pyroclastiques (2) qui génèrent un tsunami (3).

## — Résultats majeurs

Nous avons élaboré un modèle théorique qui rend compte de l'effet du piégeage du gaz dans les particules sur l'effondrement d'un panache éruptif, réalisé des expériences pour quantifier la concentration maximale de particules dans les suspensions diluées turbulentes, et mis au point un nouveau code pour simuler des écoulements gaz-particules denses. Les tests expérimentaux sur le déclenchement des tsunamis par les écoulements granulaires ont ouvert une voie pour mieux comprendre ce phénomène. Enfin, l'enquête sur le terrain a permis d'identifier les liens entre les acteurs impliqués dans la gestion du risque en Martinique.

## — Production scientifique et brevets

À ce jour, les principales productions du projet RAVEX sont :

- ▶ Chalayer R., Chupin L., Dubois T. (2018). SIAM Journal on Numerical Analysis.
- ▶ Chupin L., Mathé J. (2017). Eur. J. Mech. B Fluids 61, part 1, 135-143.
- ▶ Michaud-Dubuy A., Carazzo G., Kaminski E., Girault F. (2018). J. Volcanol. Geotherm. Res., 357: 349-361.
- ▶ Weit A., Roche O., Dubois T., Manga M. (2018). J. Geophys. Res.: Solid Earth, 123, 3747-3761.
- ▶ Worlein J. (2018). Congrès Assoc. Française d'études caribéennes, Bordeaux. Communication.

**Le projet RAVEX** « Développement d'une approche intégrée pour la réduction des Risques Associés au Volcanisme EXplosif, de la recherche sur l'aléa aux outils de gestion de crise : le cas de la Martinique » est un projet de recherche fondamentale coordonné par le LMV (Laboratoire Magmas et Volcans. Il associe l'IPGP (Institut de Physique du Globe de Paris), le LMBP (Laboratoire de Mathématiques Blaise Pascal), le SIAME (Laboratoire des Sciences pour l'ingénieur appliquées à la mécanique et au génie électrique), le CERI (Centre de Recherches Internationales - Sciences Po) et l'ICEE (Intégration et Coopération dans l'Espace Européen). Le projet a commencé en octobre 2016 pour une durée de 48 mois. Il bénéficie d'une aide ANR de 619 k€ pour un coût global de 3,8 M€.

### CONTACT

Olivier Roche : olivier.roche@uca.fr

# RECAP

## Reconstruire après un tremblement de terre

### — Expériences antiques et innovations à Pompéi : une architecture du risque et de l'urgence

Les textes anciens rapportent, de façon plus ou moins objective, les dommages et les travaux de réfection consécutifs à des séismes. Mais les modalités pratiques de ces reconstructions nous échappent en grande partie. RECAP se propose de les éclairer d'une façon nouvelle, à travers le laboratoire exceptionnel que constitue Pompéi. En effet, cette petite ville de Campanie a pour particularité d'avoir été victime de plusieurs tremblements de terre précurseurs de l'éruption du Vésuve en 79 ap. J.-C., le premier, particulièrement dévastateur, en 63 après J.-C. Confrontés à un risque récurrent, les bâtisseurs ont-ils développé des techniques de construction anti-sismiques ? Dans l'histoire de la construction romaine, cette question n'a guère été abordée, alors qu'elle présente un enjeu crucial pour comprendre le développement d'une architecture du risque et de l'urgence. Une double approche a été développée afin d'y répondre : quantitative, en évaluant l'intensité des épisodes sismiques et qualitative, en caractérisant les différentes modalités des reconstructions. Autant d'indices réunis pour appréhender la mobilisation des hommes, des savoirs et des matériaux face au risque.

### — Des méthodes pluridisciplinaires pour caractériser les réfections

Ce projet est fondé sur de fortes interactions pluridisciplinaires, qui sollicitent archéologie de la construction, sciences de la Terre, informatique et ingénierie des structures. Plusieurs outils ont été employés : bases de données, systèmes d'information géographique, photogrammétries, modélisations 3D, analyses du comportement des maçonneries (mesures soniques et accélérométriques) et prospections géo-radar. Deux études de cas à petite échelle ont tout d'abord été engagées, l'une sur les quinze châteaux d'eau de Pompéi, témoins de la gestion des infrastructures collectives, l'autre sur la Villa de Diomède, une grande demeure aristocratique à la périphérie de la ville.

À plus large échelle, une étude urbaine a été menée sur un pan entier de Pompéi, la Regio VII (5 ha environ), en y inventariant toutes les réparations post-sismiques. Enfin, une étude régionale a été développée à travers l'aqueduc du Serino, qui alimentait plusieurs cités de Campanie, dont Pompéi, et qui achevait son parcours dans les Champs Plégréens, une autre zone fortement exposée au risque. Par cette approche scalaire, différentes dynamiques de réfections ont pu être mises en évidence, en fonction des types de dommages et des bâtiments observés.

### — Résultats majeurs

RECAP a révélé un aspect méconnu de Pompéi, une ville fortement affectée par les dommages sismiques et se trouvant encore en plein chantier de reconstruction au moment de l'éruption du Vésuve. Dans la Regio VII, ce sont plus 250 réparations qui ont été identifiées. Des formations internationales ont été intégrées aux missions de terrain, avec deux stages de niveau Master et un atelier doctoral. Au-delà des résultats obtenus, ce projet expérimental a consolidé des collaborations et débouché sur d'autres projets internationaux, en générant une synergie inédite entre archéologues, ingénieurs des structures, géologues et sismologues. De nouvelles perspectives sur l'analyse du patrimoine bâti et sa conservation sont ainsi ouvertes.

### — Production scientifique et brevets

Sélection de publications :

- F. Filocamo, J. Carlut, H. Dessales, S. Borensztajn, Roman builders facing the risk of disaster : coupling archaeological and geochemical analyses of a section of the « Aqua Augusta » (the Roman Serino aqueduct, Southern Italy), *Archaeometry*, 60.3, 2018, 18 p.
- H. Dessales (dir.), *The Villa of Diomedes in Pompeii : the fabric of a Roman villa*, à paraître, Paris, 2019.



Pompéi, réfections et fabrique urbaine : identification des réparations post-sismiques opérées dans la Regio VII. Données RECAP, réalisation J. Caverro.



Julien Caverro (labex TransferS), ANR RECAP

**Le projet RECAP** est un projet de recherche fondamentale coordonné par le laboratoire AOROC (UMR 8546, ENS-CNRS-EPHE, Université PSL). Il associe trois autres partenaires, l'IPGP (Institut de Physique du Globe de Paris, UMR 7154), l'Inria (Institut national de recherche en informatique et en automatique, Paris - Rocquencourt, UMR 8548) et le Centre Jean Bérard (USR 3133, CNRS - EFR), en collaboration avec le labex TransferS, l'ISTerre (UMR 5275), l'Università degli Studi di Padova, l'Università degli Studi di Napoli Federico II et le Parco archeologico di Pompéi. Il a commencé en janvier 2015 et a duré 48 mois. Il a bénéficié d'une aide ANR de 395 188 €.

#### CONTACT

**Hélène Dessales :**  
helene.dessales@ens.fr  
<http://recap.huma-num.fr>

# RECREAHVI

## Les bases de la résilience post-séisme en Haïti

### — Nécessité de comprendre les stratégies utilisées par les enfants et adolescents pour faire face à l'adversité

Il n'y a pas de culture parasismique en Haïti. Aucune étude scientifique n'a jusque-là été réalisée sur les traumatismes et la résilience liés aux catastrophes naturelles. Dans le contexte de la reconstruction globale du pays, l'objectif général du projet est d'analyser le processus traumatique sur le long terme et d'identifier les facteurs et les tuteurs de résilience permettant aux enfants, adolescents et adultes de se reconstruire psychologiquement et socialement de manière durable. Cette étude vise à donner des pistes pour la conception d'outils de prévention et d'accompagnement dans les domaines de la santé, de l'éducation et de l'art.

### — Articulation de méthodes quantitatives et qualitatives

Environ 4 015 enfants scolarisés et non scolarisés (dont des enfants des rues) et 1 355 adultes ont été évalués dans 4 villes touchées par les catastrophes naturelles (Port-au-Prince, Jacmel, Léogane, Gonaïves) à l'aide de questionnaires, d'entretiens, de focus groups ou de tests projectifs selon une méthodologie articulant la recherche documentaire et une recherche empirique qualitative. Les différentes études ont été décalées dans le temps : environ un an, deux ans, trois ans après le séisme. Les données qualitatives ont permis d'approfondir les résultats quantitatifs. L'ensemble est interprété en tenant à la fois compte des normes standard et des spécificités culturelles haïtiennes.

### — Résultats majeurs

Près de 4 ans après le séisme, les troubles traumatiques et dépressifs restent très présents chez la population (15 mois après : 42,04 % et 30 mois après : 36,93 % pour les moins de 18 ans, 30,75 % chez les adultes de Port-au-Prince et 45,04 % pour ceux des Gonaïves pour le Trouble de Stress Post Traumatique (TSPT)). Le jeune âge, l'âge avancé, le sexe féminin, le chômage, le bas niveau d'éducation et les difficultés économiques sont les principaux facteurs de risque. Le degré d'exposition et la détresse péri-traumatique sont les principaux facteurs prédictifs du TSPT et de la dépression.

Comparativement à d'autres pays (Chine, Sichuan, 2008 ; Japon, 2011 et d'autres), les enfants et adolescents haïtiens ont un niveau de résilience plus élevé à l'échelle de la « Resilience Scale » traduite, validée et publiée en créole. Le soutien social mutuel est très élevé chez les survivants et constitue le meilleur prédictif de la résilience. Pourtant ils sont insatisfaits de l'aide apportée par les acteurs étatiques et internationaux. Des programmes dans les domaines de la santé, de l'éducation et de l'art sont nécessaires afin de développer les aptitudes résilientes des enfants et adolescents.

### — Production scientifique et brevets

- Derivois D, Mérisier GG, Cénat JM & Val C (in press). Symptoms of Traumatic Stress Disorder and social support among children and adolescents after the 2010 Haitian earthquake. *Journal of Loss and Trauma*.
- Cénat JM & Derivois D (in press). Psychometric properties of the Creole Haitian version of the Resilience Scale amongst child and adolescent survivors of the 2010 earthquake. *Comprehensive Psychiatry* <http://dx.doi.org/10.1016/j.comppsy.2013.09.008>



Modèle parasismique de la psyché collective haïtienne : les tuteurs de résilience, leur ancrage historique et les piliers de la reconstruction (santé, éducation, art).

- Cénat JM & Derivois D (in press). Assessment of prevalence and determinants of posttraumatic stress disorder and depressive symptoms in adult survivors of earthquake in Haiti 30 months after. *Journal of Affective Disorders* <http://dx.doi.org/10.1016/j.jad.2014.02.025>
- manifestations scientifiques réalisées avec la participation de l'Association Haïtienne de Psychologie, le service santé mentale du Ministère de la Santé Publique et de la Population, la FOKAL (Fondation Connaissance et Liberté), la Mairie des Gonaïves et la Protection Civile des Gonaïves.

**Le projet RECREAHVI** est un projet de recherche fondamentale coordonné par le CRPPC (Centre de Recherche en Psychologie et Psychopathologie Clinique) de l'Université Lyon 2. Il associe l'Université d'Etat d'Haïti (UEH), EDITEC (Education-Investigation-Technologie) et l'Université Paris 13. Le projet a duré 54 mois et a bénéficié d'une aide ANR de 580 840 € pour un coût global de 1 286 540 €.

#### CONTACT

**Daniel Derivois** : [daniel.derivois@univ-lyon2.fr](mailto:daniel.derivois@univ-lyon2.fr)

## REMAKE

## Prévision, anticipation et connaissance des séismes en Équateur

## — Le risque sismique en Équateur : anticipation des séismes, atténuation des effets et politique de prévention

L'objectif est de développer un modèle de prévision des séismes en Équateur et au Pérou, où des séismes majeurs sont susceptibles de se produire. Le dernier, de magnitude 7,8, a fait plus de 600 morts et des millions de dollars de dégâts en avril 2016. Le déploiement d'un réseau géophysique post-sismique a permis l'acquisition de données exceptionnelles qui permettront de mieux comprendre le cycle des séismes sur cette frontière de plaque. Alors que les modèles classiques sont contrôlés par la sismicité historique, nous intégrerons toutes nos connaissances sur la subduction et les failles continentales, y compris leur potentiel sismique évalué à partir d'approches géodésiques, sismologiques et géologiques.

Le principal résultat attendu est l'anticipation de la localisation, de la taille, de la fréquence et des mouvements du sol d'événements destructeurs futurs, avec un focus sur la vulnérabilité de Quito, le développement d'une plateforme sismique en temps réel ainsi qu'un bilan des politiques de prévention des désastres liés aux séismes et une évaluation de l'importance de la connaissance scientifique et de gestion du risque.

## — Une approche interdisciplinaire de l'aléa et du risque sismique

REMAKE propose une approche interdisciplinaire du risque sismique autour de 6 axes.

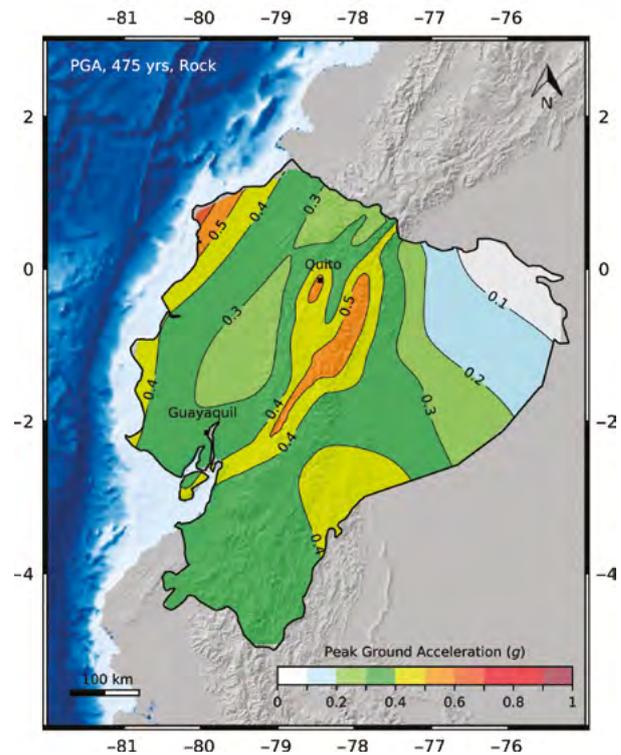
1. Pour la zone de subduction, la connaissance des séismes historiques est trop brève pour établir un modèle de récurrence des séismes. Des travaux sur les séismes plus anciens et sur le séisme de 2016 permettront d'évaluer la localisation et la fréquence des futurs grands séismes.
2. Pour les failles continentales, une étude des séismes passés et une analyse fine de la déformation actuelle permettra l'établissement de scénarios de rupture en particulier à proximité des villes de Quito et Guayaquil.
3. Un modèle de l'aléa sismique basé sur des modèles de récurrence intégrant l'ensemble des données disponibles est proposé à l'échelle de l'Équateur.
4. Dans la ville de Quito, l'aléa sismique est évalué à partir des mouvements du sol lors du séisme de 2016 et de l'interaction entre les structures et le sol.
5. Enfin la détermination rapide des paramètres de source des grands séismes permettra d'optimiser la gestion de crise lors des catastrophes.
6. Une analyse des difficultés à prendre en compte ces nouvelles connaissances scientifiques dans l'établissement des règles parasismiques.

## — Résultats majeurs

Le séisme de 2016 a mis en évidence l'existence d'un super-cycle sismique libérant l'énergie accumulée pendant plusieurs siècles et prouvé que d'autres séismes similaires sont susceptibles d'affecter cette zone.

Une réévaluation de l'aléa sismique à l'échelle de l'Équateur et une analyse des amplifications des mouvements du sol dans le bassin de Quito ont été réalisées.

Par ailleurs nous avons montré la nécessité d'intégrer à la connaissance les spécificités des territoires stratégiques et exposés pour prétendre améliorer significativement la prévention.



Carte de l'aléa sismique probabiliste en Équateur (Beauval et al., 2018) – l'accélération du sol (au PGA) pour une période de retour de 475 ans.

## — Production scientifique et brevets

- Beauval, C., et al., 2018. doi:10.1785/0120170259
- Laurendeau, A., et al., 2017. <https://doi.org/10.1785/0120170134>
- Nocquet, J.-M., et al., 2017. doi:10.1038/ngeo2864
- Rolandone, F., et al., 2018. <http://advances.sciencemag.org/content/4/1/eaao6596>
- Segovia M., et al., 2018. <https://doi.org/10.1029/2017TC004771>
- Vaca, S., et al., 2018. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2017.12.012>
- Pigeon, P. et Rebotier, J., 2018. <https://hal-univ-tlse2.archives-ouvertes.fr/REMAKE-SHS/halshs-01760516>

**Le projet REMAKE** est un projet de recherche coordonné par l'UMR Géoazur (Univ. Côte d'Azur, IRD, CNRS, OCA) avec la participation d'ISTerre (UGA, IRD, CNRS, IFSTAR), du CEREMA et de partenaires sud-américains, principalement l'Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional (Ecuador), Instituto Oceanográfico de la Armada del Ecuador et l' Instituto Geofísico del Perú. Le projet a débuté début 2016 pour une durée de 48 mois. Il a bénéficié d'une aide ANR de 544 k€ pour un coût global de 4 700 k€.

**CONTACT**

**Philippe Charvis** : [philippe.charvis@geoazur.unice.fr](mailto:philippe.charvis@geoazur.unice.fr), <https://remake.osug.fr/>

## REMEMBER

## Prévention des risques hydrométéorologiques en Méditerranée dans un contexte de changement global

## — Compréhension et modélisation du climat méditerranéen et des extrêmes hydrométéorologiques

La région méditerranéenne est un « hot spot » du changement climatique. La vulnérabilité augmente avec une probabilité plus élevée de pluies diluviennes, canicules et sécheresses. L'élévation du niveau de la mer est également une préoccupation majeure car les côtes sont parmi les plus fréquentées. La motivation du projet REMEMBER est de mieux comprendre et modéliser le climat méditerranéen. Déterminer la façon dont les événements hydrométéorologiques extrêmes et l'élévation du niveau de la mer répondent au changement climatique est crucial pour élaborer des stratégies d'adaptation. Le projet a permis de produire et analyser des simulations climatiques avec trois modèles français, une fois des améliorations apportées aux modèles sur les précipitations, les échanges d'énergie à la surface de la mer, l'apport à la mer d'eau fluviale. Le projet a permis la prise en compte de l'irrigation et la modélisation du niveau de la mer. Le projet a enfin permis de renforcer l'expertise internationale des équipes françaises avec des modèles à la pointe de l'état de l'art, de contribuer à des projets internationaux (e.g. HyMeX, MED-CORDEX), et de promouvoir les simulations via des services climatiques.

## — Approche scientifique et technique

Le projet REMEMBER s'appuie sur l'analyse d'une première série de simulations effectuées avec les trois modèles climatiques régionaux français, permettant la quantification des incertitudes des simulations. Le projet consiste ensuite à améliorer ces modèles avec de nouvelles représentations mathématiques, appelées paramétrisations, pour les précipitations, les échanges d'énergie à la surface de la mer, le débit des fleuves et les inondations, l'irrigation, la phénologie de la végétation et le niveau des mers. Il vise à intégrer ces améliorations au sein de ces modèles pour produire et analyser une nouvelle série de simulations régionales pour le climat présent et futur. La production de ces simulations sont accompagnées par la production d'indicateurs des événements climatiques extrêmes, afin de faciliter leur analyse climatologique et la diffusion de ces indicateurs vers un

public plus large, au travers de structures de type « services climatiques ». Ce projet s'inscrit dans le cadre des programmes internationaux HyMeX et MED-CORDEX, et bénéficie d'une large collaboration avec des partenaires européens et méditerranéens.

## — Résultats majeurs

Le projet REMEMBER a permis d'élaborer des modèles améliorés pour simuler le cycle de l'eau méditerranéen, en assurant le couplage entre l'atmosphère, la végétation, les rivières et la Mer Méditerranée. En particulier ont été améliorés la simulation des précipitations faibles et extrêmes, des canicules et sécheresses et de la circulation océanique. Le projet REMEMBER a enfin permis de renforcer l'expertise française dans la communauté internationale avec des modèles à la pointe de l'état de l'art, de contribuer à des projets collaboratifs internationaux, et de promouvoir les simulations réalisées au travers de services climatiques aux niveaux national et européen.

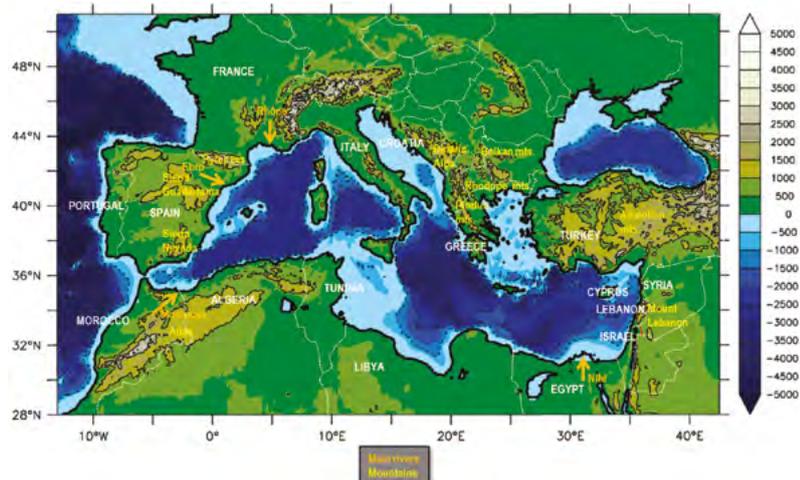
## — Production scientifique et brevets

Les travaux conduits dans le cadre du projet REMEMBER ont fait l'objet de 38 publications scientifiques à fort impact (en particulier dans une édition spéciale de *Climate Dynamics* sur le climat méditerranéen), de 100 présentations orales et poster. Ce projet a également servi de support à la vidéo réalisé par CNRS Image sur le programme HyMeX et à la rédaction de rapports d'expertise sur l'évolution du climat méditerranéen.

Publications collectives de référence :

- Drobinski et al., 2014: *HyMeX, a 10-year Multidisciplinary Program on the Mediterranean Water Cycle*. Bull. Amer. Meteorol. Soc., 95, 1063-1082.
- Ruti et al., 2016: *MED-CORDEX Initiative for Mediterranean Climate Studies*. Bull. Amer. Meteorol. Soc., 97, 1187-1208.

Bassin Méditerranéen (également domaine géographique des simulations climatiques régionales des projets HyMeX et MED-CORDEX) (Source : Drobinski et al., 2014).



**Le projet REMEMBER** est un projet de recherche fondamentale sur le climat méditerranéen et ces extrêmes météorologiques (précipitations intenses et crues, vagues de chaleur et sécheresse, élévation du niveau de la mer). Le projet est coordonné par Philippe Drobinski, chercheur au Laboratoire de Météorologie Dynamique (LMD). Il associe aussi une cinquantaine de chercheurs, ingénieurs, doctorants et post-doctorants du LMD, LATMOS et LSCE au sein de l'Institut Pierre Simon Laplace (IPSL), de l'ENSTA-ParisTech, du CNRM, du LEGOS et du CEFREM. Il associe également la société civile MERCATOR Océan. Le projet a commencé en janvier 2013 et a duré 60 mois. Il a bénéficié d'une aide ANR de 890 492,65 € pour un coût global de l'ordre de 2 788 250,51 €.

**CONTACT**

**Philippe Drobinski :**  
philippe.drobinski@lmd.polytechnique.fr

## APPEL SPÉCIFIQUE

PROGRAMME « FLASH HAITI : POUR UNE RECONSTRUCTION DURABLE », 2010

## REparH

## Réingénierie des cultures constructives locales pour reconstruire Haïti durablement

## — Répondre à la demande sociale d'un habitat para-sinistre qui soit accessible et réponde aux usages et modes d'habiter locaux

Les nouvelles pratiques de construction en Haïti ont conduit à un immense désastre lors du séisme de janvier 2010 du fait de carences en compétences pour la conception et la construction, et des difficultés pour produire des bétons de qualité. Cette situation tend à se généraliser, augmentant la vulnérabilité de l'habitat et des populations en cas de séisme alors que, paradoxalement, l'habitat traditionnel à ossature bois et remplissage en matériaux locaux s'était bien comporté. Mais, souffrant de nombreux a priori et de l'absence de données scientifiques et réglementaires, le potentiel de ces cultures constructives pour la reconstruction avait été très peu mis en avant. En réponse à cette situation et à la demande de plusieurs organisations locales impliquées dans la reconstruction, le projet REparH a été élaboré avec pour objectifs d'améliorer les connaissances de ces cultures constructives, de caractériser leur comportement vis-à-vis des aléas naturels pour, ensuite, proposer des améliorations et des stratégies de diffusion appropriées. Il s'est aussi agi de contribuer à la réflexion sur les possibilités d'amélioration de la résilience locale à travers un processus impliquant les acteurs locaux.

## — Articuler recherche, recherche-action et action, et établir les nécessaires complémentarités entre disciplines scientifiques

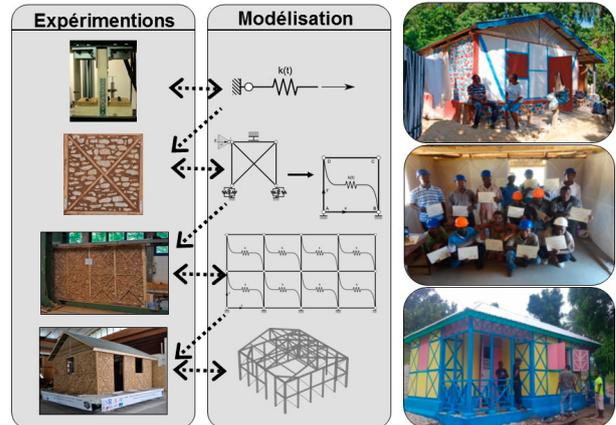
À partir d'un travail d'enquête et d'observations, un diagnostic partagé et un état de l'art ont été établis, bases sur lesquelles des solutions ont pu être élaborées et proposées aux opérateurs de terrain partenaires du projet, et des prototypes construits pour obtenir l'avis des communautés ciblées.

Des études expérimentales (mur de réaction, table vibrante) ont permis de caler la modélisation à différentes échelles des systèmes constructifs retenus. Cette approche qui intégrait les phénomènes non-linéaires a permis d'établir les paramètres nécessaires à l'évaluation de la vulnérabilité de bâtiments de formes et tailles diverses. Ces travaux ont été menés dans le cadre de deux thèses en lien avec des activités complémentaires (séminaires, études, publications, etc.). Ils ont permis de préparer des outils d'aide à la décision intégrant les aspects techniques, environnementaux, sociaux et culturels (organisation, savoir-faire, modes d'habiter, etc.).

Enfin, l'analyse des stratégies des acteurs de la reconstruction a visé la définition d'une approche méthodologique pour des interventions en diverses zones d'Haïti, qui s'avère adaptable dans bien d'autres contextes, aussi bien en réponse à la catastrophe qu'en amont, en phases de prévention/mitigation.

## — Résultats majeurs

- Une documentation scientifique et pédagogique (en haïtien), largement diffusée.
- Validation du système constructif par le ministère haïtien en charge de l'Habitat (MTPTC).
- Formation de formateurs et de plus de 200 artisans et petits entrepreneurs dont certains structurés au sein d'associations professionnelles (ATECO, ATPROCOM).
- Large appropriation de l'approche, y compris par la cellule du Gouvernement pour la prévention des catastrophes naturelles (LBPTC) et des acteurs internationaux (UN-Habitat, IOM, FAP, etc.).



Analyse multi-échelle de l'évaluation de la vulnérabilité sismique des structures à ossatures bois – première construction du projet – formation des artisans – modèle d'habitat répliqué.

- Environ 8 000 constructions fin 2018 (neuves et réhabilitations).
- Essais sur table vibrante (FCBA) à l'échelle 1 confirmant la résistance sismique du système constructif.
- Un guide méthodologique « cultures constructives locales » intégré au « tool kit » de la fédération internationale des sociétés Croix-Rouge et Croissant-Rouge.

## — Production scientifique et brevets

- CAIMI, A. *et al.*, 2014. « Savoirs traditionnels et connaissances scientifiques pour une réduction de la vulnérabilité de l'habitat rural face aux aléas naturels en Haïti ». In : Field Actions Science Reports. The journal of field actions [en ligne]. janvier 2014. n° Special Issue 9, p. non paginé.
- SIEFFERT, Y. *et al.*, 2016a. « Full-field measurement with a digital image correlation analysis of a shake table test on a timber-framed structure filled with stones and earth ». In: Engineering Structures [en ligne]. 15 septembre 2016. Vol. 123, p. 451-472.
- JOFFROY, T. (dir) *et al.*, 2018. (re) Construire en Haïti, du séisme de 2010 à l'ouragan Irma en 2017, Villefontaine : CRAterre. 80 p. ISBN 978-2-906901-79-7.
- World Habitat Award 2018 : [www.world-habitat.org/world-habitat-awards/](http://www.world-habitat.org/world-habitat-awards/)

**Le projet REparH** a été coordonné par CRAterre (Centre International de la Construction en Terre). Il associe l'unité de recherche AE&CC (Architecture, Environnement et Cultures Constructives) de l'ENSAG (Ecole nationale supérieure de Grenoble), le laboratoire 3SR (Sols, Solides, Structures, Risques - UMR 5521) de l'Université Grenoble Alpes et l'organisation GADRU (plateforme haïtienne PADED) soutenue par l'ONG allemande Misereor. Le projet a débuté en juillet 2010 pour une durée de 54 mois. Il a bénéficié d'une aide de l'ANR de 569 434 € pour un coût global de 1 261 198 €. D'autres financements se sont ajoutés pour soutenir des initiatives connexes, notamment de formation et de diffusion, ce qui a permis de largement dépasser les objectifs initiaux avec un important impact au niveau national, toujours bien visible en 2019.

## CONTACT

**Philippe Garnier** : [craterre.pgarnier@club-internet.fr](mailto:craterre.pgarnier@club-internet.fr), [www.craterre.org](http://www.craterre.org)

## REV

## Des documents officiels (état civil, cadastre, diplômes) garantis par l'État ?

## — Reconstituer ou constituer l'univers documentaire des inscriptions officielles de l'état civil, du cadastre et des titres universitaires

L'identification et la reconnaissance des individus dans les sociétés modernes de droits passent par la possession de documents (papiers d'identité, diplômes, titres de propriétés...) qui sont enregistrés dans les systèmes d'état civil ou dans un cadastre. Le séisme a peu détruit l'existant des bureaux d'état civil, mais ceux-ci présentaient bien des dysfonctionnements avant le séisme et une demande forte est apparue pour assurer les successions, permettre la mobilité des familles vers les pays de la diaspora ou poursuivre une traçabilité relative aux adoptions internationales. Par ailleurs, Haïti visait à développer son enseignement supérieur pour s'efforcer de délivrer des titres permettant à leurs détenteurs de participer à la compétition internationale et le séisme a posé la question des archives institutionnelles et personnelles, notamment sur les diplômes perdus. Enfin, seuls 5 % du pays avaient été cadastrés avant le séisme. La nécessité pour les victimes de se loger, la création de camps puis leur résorption, l'effort de reconstruction venaient actualiser les problèmes fonciers, les sans-domicile rejoignant les victimes dans la même quête d'un habitat permanent et sûr, les partenaires internationaux réclamant de leur côté des garanties pour pouvoir investir en toute sécurité.

## — Effets du séisme sur l'univers des documents officiels, indispensable à la vie de chacun, à la reconnaissance de ses droits, aux planifications d'État, à la gestion et l'administration

Ce projet avait l'ambition d'explorer, au-delà du bilan, les ressources et les inventions possibles selon les trois entrées citées : état civil, adressage et cadastre, éducation et formation.

- ▶ Pour les documents universitaires, approche quantitative (questionnaires) puis entretiens non directifs en direction d'étudiants, de personnels enseignants et d'administratifs.
- ▶ Pour l'état civil, enquêtes auprès des officiers d'état civil et de prêtres des paroisses correspondantes, observation et entretiens aux Archives Nationales et à l'office nationale d'identification, enquêtes dans les camps de déplacés et suivi de l'action du Groupe d'Appui aux Rapatriés et Réfugiés. Les entretiens approfondis menés à Crêteil auprès d'étudiants haïtiens sur le thème état civil ont confirmé auprès de cette population mieux nantie la fréquence des erreurs d'état civil et ce pour une génération à peine trentenaire.
- ▶ Pour le cadastre, l'enquête ethnographique menée à l'ONACA ainsi qu'une enquête auprès de 19 occupants de maisons et de terrains à Delmas souligne l'instabilité foncière, résultat conforté par une série d'entretiens à Paris auprès d'Haïtiens confrontés aux difficultés d'acquisition d'un terrain en Haïti.

## — Résultats majeurs

Pour l'état civil, l'approche de REV devrait permettre de saisir des caractéristiques attachées à la notion de documents officiels et de cerner dans une dimension prospective les moyens propices à des enregistrements fiables pour tous. Pour le cadastre, le premier résultat est la remise en cause de l'idée que la sécurité documentaire assure nécessairement la sécurité foncière. Pour les « titres, diplômes et documents », seuls 50 % des personnes interrogées ont déclaré avoir subi une perte. Parmi celles-ci, la plupart sont



1) Opération de numérisation des registres de l'État civil aux Archives Nationales. (Marcel Pariat, 2012). 2) Un camp accueillant les victimes du séisme et Jou les sans-abri (Pascal Lafont, 2012). 3) L'Université de Quisqueya en reconstruction (Claudine Dardy, 2012).

parvenues à récupérer des preuves suffisantes (stockage numérique) leur permettant d'obtenir la réédition de leurs titres. Toutefois, les risques de falsification et d'usurpation persistent et posent la question de la vérification et de la centralisation des données.

## — Production scientifique et brevets

Réalisation de rencontres internationales à l'UPEC en décembre 2013 :

- ▶ communications et participation des équipes françaises et haïtiennes (UNIQ, ONACA) et de chercheurs internationaux du domaine.
  - ▶ débat d'inter-comparaison avec le porteur japonais du projet DEVAST (financé par l'NR avec le programme Flash Japon)
- Le projet a permis de faire émerger dans le cadre de l'UNIQ une jeune équipe de chercheurs formés localement.

**Le projet REV** a été mené au titre de l'équipe universitaire de recherche REV-CIRCEFT EA 4384. L'Université Quisqueya a été le partenaire principal sur place ; elle a entre autre permis le recours à des chercheurs et enquêteurs locaux. Le projet a duré 48 mois et a bénéficié d'une aide de l'ANR de 118 408 euros pour un montant global de 461 858 euros.

**CONTACT**

**Claudine Dardy** : dardy@u-pec.fr

## RGC4

## Réseaux techniques et résilience du Grand Paris face à une crue majeure de la Seine

## — Développement d'outils pour l'aide à la gestion de crise, des réseaux techniques et des transports face à une crue majeure de la Seine

**Contexte :**

Les fonctions sans cesse accrues des villes reposent sur une complexification des réseaux techniques, la quête d'efficacité menant à un grand nombre d'interconnexions, voire d'(inter) dépendances. Or ces réseaux sont très largement vulnérables aux aléas « naturels ». Le dysfonctionnement localisé d'un composant de réseau peut en impacter d'autres parfois bien au-delà des zones soumises directement à l'aléa déclencheur. Une crue équivalente à celle de 1910, elle-même d'occurrence centennale pourrait provoquer aujourd'hui jusqu'à 30 milliards d'euros de dommages directs et 58 milliards d'euros de pertes sur le PIB (OCDE, 2014, 2018).

**Objectifs :**

Développement d'outils et de méthodes d'amélioration de la gestion de crise à destination des services opérationnels (préfecture, ville, opérateurs réseaux...).

- Mieux connaître les phénomènes de défaillance en cascade et les vulnérabilités du territoire francilien.
- Proposer des méthodes et outils pour la modélisation des interdépendances, l'aide à la décision quant à la gestion de crise.

**Méthode :**

Notre approche se base sur des retours d'expérience, des entretiens, participations à des exercices de simulation de crise, de la modélisation quantitative, de la représentation spatiale et de l'aide à la décision type optimisation sous contrainte.

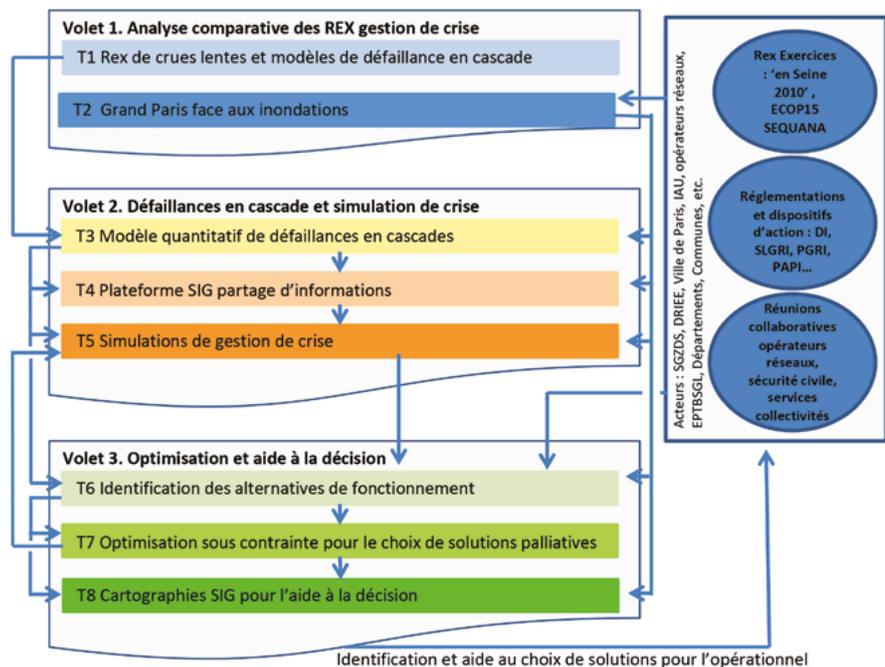
## — Résultats majeurs

- Retours d'expériences, bibliographie des approches existantes, description des vulnérabilités du Grand Paris. Des enquêtes sur les crues de 2016/2018, du point de vue des ménages et des collectivités.
- Application SIG pour la mise en œuvre de moyens de transports (partiellement) palliatifs au réseau ferré à l'arrêt.
- Simulateur multi-agents visant à estimer les phénomènes d'auto évacuation des IGH (Immeubles de Grande Hauteur) impactés par la crue.
- Application SIG pour la réaffectation des personnels dans l'impossibilité de se rendre sur leurs lieux de travail.
- Aide à la décision pour le choix de démarche de modélisation des interdépendances des réseaux en fonction des objectifs et du contexte.
- Application d'aide au choix d'actions efficace pour la remise en route des réseaux.

## — Production scientifique et brevets

- Bocquentin M., et al (2018) « étude des (inter) dépendances et des défaillances en cascade au sein des réseaux urbains : le cas d'une crue de la Seine en Ile de France » La Houille blanche, Olsvik A J., et al. (2018) « Modelling the Cascade Effect of Failing Critical Infrastructures During a Flood with Multi-Agent Simulation » 10<sup>es</sup> JFMS.
- Pottier N., et al. (2017) « Analyse des retours d'expériences d'inondations majeures pour la résilience des réseaux urbains », « Retours d'expériences post-catastrophes naturelles ». 13<sup>e</sup> Géorisques.
- Lhomme et al. (2019) « Un outil d'aide à la décision pour la mobilité des personnels en période d'inondation en Île-de-France : MOPPI » TheoQuant, Besançon.

Logigramme du projet.



**Le projet RGC4** est un projet de recherche collaborative (PRC) coordonné par le Lab'Urba, sous sa tutelle EIVP. Il a démarré en février 2016 pour une durée de trois ans et demi, soit jusqu'au 30 septembre 2019. Il réunit plusieurs autres laboratoires partenaires : Géoressources (Université de Lorraine/École des Mines de Nancy), le Lab'Urba (tutelle Université Paris Est Créteil), le Litis (Insa Rouen) et le CEMOTEV (Université de Versailles Saint-Quentin en Yvelines). La Ville de Paris, le SGZDS, la RATP et l'IAU Ile de France sont également partenaires associés. Il a bénéficié d'une aide ANR de 353 107 € pour un coût global de 991 287,32 €.

**CONTACT****Marc Vuillet :**

marc.vuillet@eivp-paris.fr,  
<https://rgc4.wordpress.com>

# RICOCHET

## Quantifier et spatialiser la dimension multirisque d'un territoire littoral

### — Mise en avant des concomitances et des chaînes d'impact, améliorer l'appropriation de la culture et la mémoire du risque

Les milieux côtiers sont des environnements complexes, sensibles aux changements environnementaux (i.e. élévation du niveau de la mer, ...) pour lesquels il faut adopter une approche pluridisciplinaire. Le projet RICOCHET s'intéresse à la gestion des territoires côtiers soumis à des aléas multiples et potentiellement concomitants, littoraux (érosion et submersion) et continentaux (inondations, crues turbides, mouvements de versants). Les acteurs sont confrontés à la nécessité de prévoir la relocalisation des personnes et des biens dans un contexte de changements environnementaux et sociétaux globaux et locaux.

Ce projet a vocation à répondre à des préoccupations scientifiques de compréhension de la dynamique des littoraux et à une demande sociétale forte (gestionnaires des territoires). Le projet s'intéresse aux côtes à falaises à reculs rapides en Normandie, soumises aux inondations continentales.

Des outils de gestion et d'aide à la décision seront proposés aux gestionnaires des territoires et élaborés à partir de données multi-sources/multi-scalaires haute résolution, ainsi que de la combinaison de méthodes, outils, modèles, et d'entretiens participatifs avec les parties prenantes.

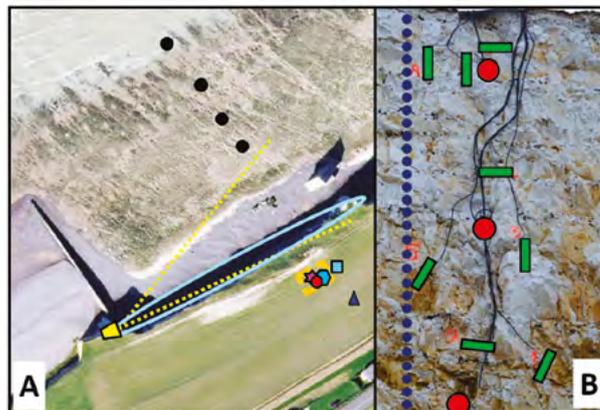
### — Approche multirisque et modélisatrice pour définir des trajectoires territoriales adaptées aux changements globaux

L'approche intègre des communautés scientifiques variées (géographes, géologues, modélisateurs, ingénieurs) pour développer et adapter des outils et des méthodes originales pour la compréhension des processus : Lidar aéroporté et terrestre, imageries aériennes et satellitaires, imageries Drone pour le suivi de la dynamique côtière ; images en mode hyper-spectrale et infra-rouge ; capteurs pression pour les conditions hydrodynamiques et les flux ; fibre-optique, caméra, accéléromètres pour le suivi en continu des processus. Des comités locaux et globaux (entretiens participatifs) permettent d'identifier et préciser les besoins et les questions des élus et des parties prenantes. Des analyses multi-sectorielles et des propositions de développements territoriaux permettront de transférer les avancées scientifiques réalisées vers les services en charge de l'aménagement afin de valoriser les stratégies de réduction/adaptation retenues. Ce transfert sera notamment réalisé par la mise à disposition d'un outil de diagnostic directement intégrable dans les schémas utilisés par les services de l'Etat. Cet outil sera réalisé de façon à ce qu'il puisse être transférable sur d'autres régions.

### — Résultats majeurs

Les retombées potentielles du projet sont :

- ▶ Développement d'une chaîne intégrée d'évaluation des risques.
- ▶ Élaboration d'outils de communication et d'aide à la décision / gestion / prévention des risques en milieu littoral à falaises.
- ▶ Amélioration de la culture du risque pour les gestionnaires et les populations.
- ▶ Renforcement de collaborations entre scientifiques et décideurs et parties prenantes sur la réduction de risque dans un contexte de changement climatique.
- ▶ Développement des territoires côtiers en transformant les contraintes du risque en de nouvelles opportunités de revitalisation.



Suivi multi-capteurs de la falaise de craie de Sainte-Marguerite-sur-Mer (76) : A) vue aérienne avec l'emprise du suivi et capteurs. B) vue de la paroi de la falaise avec implantation des géophones « horizontaux », extensomètres et capteurs de température (nov. 2018).

### — Production scientifique et brevets

- ▶ M. Medjkane, O. Maquaire, S. Costa et al. High-resolution monitoring of complex coastal morphology changes: cross-efficiency of SfM and TLS-based survey (Vaches-Noires cliffs, Normandy, France). *Landslides* (2018) 15: 1097–1108.
- ▶ P. Letortu, M. Jaud, Ph. Grandjean et al. Examining high-resolution survey methods for monitoring cliff erosion at an operational scale. *GIScience and Remote Sensing*, (2017), vol. 55 (4): 457-476.

**Le projet RICOCHET** est un projet de recherche fondamentale collaboratif - Entreprises (PRCE) coordonné par l'Université de Caen-Normandie (LETG-Caen, UMR 6554 CNRS). Il associe un organisme public (BRGM-Orléans), une association scientifique (IRD2, Normandie), une entreprise (AZUR-DRONES, Paris) ainsi que les laboratoires LGO-Brest (UMR 6538 CNRS), M2C-Rouen (UMR 6143 CNRS), LETG-Brest (UMR 6554 CNRS). Le projet a commencé en janvier 2017 pour une durée de 48 mois. Il a bénéficié d'une aide ANR de 644 326 € pour un coût global de 2 060 552 €. Le projet est soutenu par le Pôle de compétitivité Mer-Bretagne. Il bénéficie également de l'appui scientifique du réseau d'observation du littoral Normandie et Hauts-de-France (ROL), du Conservatoire du littoral et du CEREMA-Normandie.

#### CONTACT

**Olivier Maquaire** : [olivier.maquaire@unicaen.fr](mailto:olivier.maquaire@unicaen.fr),  
[www-ium.univ-brest.fr/pops/projects/anr-ricochet-2017-2020](http://www-ium.univ-brest.fr/pops/projects/anr-ricochet-2017-2020)

# RISCOPE

## Système d'alerte de submersion côtière centré sur le risque

### — Développer une méthode rapide et robuste de prédiction des submersions côtières couplée à une plateforme web

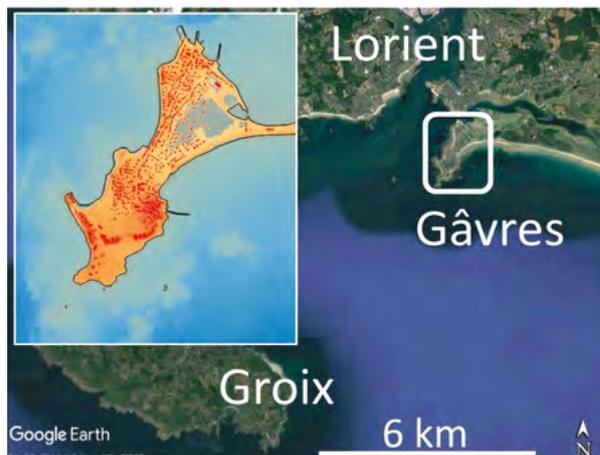
Les dernières avancées scientifiques permettent aujourd'hui de modéliser avec précision les événements de submersion côtière. Cependant les temps de calcul sont trop longs pour une utilisation de ces modèles dans des systèmes de prévision et d'alerte ou pour des calculs de périodes de retour. RISCOPE vise à lever une partie de ces verrous en développant une méthode centrée sur les risques contribuant à la prévision, l'alerte et la prévention des risques de submersions côtières.

Cette méthode s'appuie sur une approche « bottom-up » basée sur la connaissance du territoire et des besoins des acteurs locaux, l'utilisation de modèles de processus et le développement de méta-modèles. Ces développements sont réalisés et testés pour le site de Gâvres (Morbihan). Les principaux résultats attendus sont : (1) une nouvelle méthode de prévision, d'alerte et d'estimation de la submersion côtière, (2) un démonstrateur pour le site de développement, (3) des recommandations pour l'implémentation de la méthode sur d'autres sites, (4) des développements mathématiques open-source dans le domaine des méta-modèles, qui peuvent aussi être utiles à d'autres domaines (risques naturels, industrie, etc.).

### — Une approche bottom-up basée sur l'utilisation de modèles de processus et le développement de méta-modèles

L'approche développée est une approche "bottom-up" où le type d'information utile pour l'aide à la décision constitue le point de départ (exemple : hauteur d'eau sur un enjeu stratégique comme le Poste de Commandement de gestion de la crise situé à la mairie de Gâvres). Elle permet de fournir des alertes ciblées, mais aussi d'identifier les scénarios conduisant à dépasser des seuils d'inondation donnés. Un des verrous est le développement de modèles robustes et rapides prenant en compte la complexité des phénomènes (ex. franchissement, écoulement). La solution explorée repose sur le développement de méta-modèles, i.e. des fonctions mathématiques approximant avec une bonne précision les réponses du modèle numérique avec un coût de calcul négligeable (<minutes).

L'utilisation de ce type d'approche pour les phénomènes de submersions côtières soulève un certain nombre de défis traités dans le cadre du projet : prise en compte de données spatio-temporelles, phénomènes non-linéaires et à seuil, etc. Un démonstrateur orienté « système d'alerte » sera mis en place, utilisant les méta-modèles développés. Il sera utilisé en mode prévision-alerte (à quelques jours), mais aussi en mode scénario. Ce dernier mode servira comme outil de sensibilisation et pour l'estimation des périodes de retour de la submersion et des incertitudes associées (climat actuel et futur).



Localisation du site de développement (Gâvres, Morbihan) et carte des zones dont la cote altimétrique est située sous le niveau des plus hautes mers astronomiques (en bleu).

### — Résultats majeurs

Les vagues générées par le vent ont un caractère stochastique. Dans la littérature, la sensibilité de la submersion à ce caractère stochastique est encore très peu explorée. Les simulations réalisées mettent en évidence l'importance de prendre en compte cette caractéristique dans la prévision de la submersion, en particulier en zone macro-tidale. Des développements ont donc été réalisés pour prendre en compte cet aspect dans les méta-modèles. Outre des publications, des produits en accès libre et un démonstrateur (plateforme web), les retombées attendues sont : une meilleure connaissance locale ; une meilleure compréhension des processus ; des avancées méthodologiques et pratiques pour les systèmes d'alerte ; des avancées statistiques pour réduire les temps de calcul.

### — Production scientifique et brevets

► Dodet G., Melet A., Ardhuin F., Bertin X., Idier D., Almar R. (soumis) The Contribution of Wind Generated Waves to Coastal Sea Level Changes, Surveys in Geophysics.

À noter que 3 articles sont en cours de rédaction pour une soumission au premier trimestre 2019.

**Le projet RISCOPE** est un projet de recherche fondamentale coordonné par le BRGM. Il associe l'IMT (Institut de Mathématiques de Toulouse) ainsi que la société Geo-Hyd. Le projet a commencé en janvier 2017, pour une durée 48 mois. Il bénéficie d'une aide ANR de 547 k€ pour un coût global de 1 369 k€.

#### CONTACT

**Déborah Idier** : d.idier@brgm.fr,  
<https://perso.math.univ-toulouse.fr/riscope/>

# S3F pour Haïti

## Un sorgho sucré multiusage « food/feed/fuel » pour dynamiser l'agriculture haïtienne

### — Introduction de nouvelles variétés de sorgho multiusage combinant alimentation et énergie

Suite au séisme de 2010, l'une des priorités était de relancer l'agriculture, déjà fréquemment touchée par les tempêtes tropicales et les cyclones. Le choix d'introduire le sorgho sucré s'explique parce que cette plante peut répondre à plusieurs enjeux :

- Alimentaire : les grains peuvent être directement consommés par les populations ou par les animaux d'élevage et les résidus de pressage sont un fourrage de bonne qualité.
- Énergétique : la transformation des sucres en bioéthanol par pressage des tiges permet de diversifier les sources d'énergie.
- Social : l'introduction d'une plante dont chaque partie peut être valorisée, permet aux agriculteurs de diversifier et augmenter leurs revenus. De plus, le développement d'une nouvelle filière à partir du sorgho sucré sera créatrice de nouveaux emplois (culture, récolte, transport et transformation).
- Environnemental : le développement du sorgho sucré, en fournissant une nouvelle source d'énergie pourrait diminuer la pression s'exerçant sur les quelques forêts restantes.

### — Développement d'une nouvelle chaîne de valeurs à partir du sorgho sucré incluant grain, bioéthanol et fourrage

Une centaine de variétés exotiques provenant de différents programmes de sélection a été évaluée en Haïti sur la base des performances agronomiques (production de grain, biomasse, jus et alcool). Les meilleurs cultivars ont été identifiés afin d'être diffusés ensuite aux agriculteurs. Cette collection de départ a également permis d'initier un programme de sélection pour améliorer le sorgho sucré en Haïti.

Parallèlement des essais agronomiques ont été conduits afin de préciser les itinéraires techniques à suivre pour optimiser les productions tant en monoculture qu'en association (souvent avec le pois d'Angole).

La transformation des tiges ne nécessite pas de modifications majeures par rapport à la canne à sucre. L'intérêt principal du sorgho tient au fait qu'il arrive à maturité au moment où la canne n'est pas prête à la récolte. Il peut donc permettre aux industriels de démarrer leurs usines deux mois plus tôt dans la saison pour usiner du sorgho.

Une analyse socio-économique a permis de préciser les usages prioritaires afin d'orienter une filière d'innovation prioritaire et d'identifier les conditions organisationnelles et institutionnelles qui permettent d'activer cette filière.

### — Résultats majeurs

- Développement d'une nouvelle filière agricole : En 2013, 10 ha de sorgho sucré issus du projet ont été cultivés par de petits planteurs dans la zone de Cabaret en Haïti. Ces derniers ont récolté les graines pour leur consommation personnelle et approvisionné une entreprise partenaire du projet (la SIRCOSA) pour produire de l'éthanol. L'entreprise prévoyait en 2014 l'encadrement d'agriculteurs sur près de 200 ha. Les résidus de pressage seront également valorisés à travers la cogénération ou comme fourrage pour le bétail.



Évaluation de la maturité - essai variétal Chibas. Crédit photo : Gael Pressoir, Chibas, Université Quisqueya.

- Renforcement d'une équipe scientifique haïtienne : L'équipe mixte CHIBAS/UNIQ a pu développer plusieurs projets de R&D pour mieux valoriser la plante et poursuivre un travail de recherche original en agronomie, amélioration variétale et valorisation industrielle.

### — Production scientifique et brevets

Leclerc E., Pressoir G. et Braconnier S. 2014. L'avenir prometteur du sorgho sucré en Haïti, Field Actions Science Reports [Online], Special Issue 9 (2014), URL : <http://factsreports.revues.org/2801>  
 Temple L., Charles D., Leclerc E. (2010). Développement d'un sorgho sucré multi-usage (alimentation, fourrage, combustible) en Haïti. Rapport de mission : analyse agro-économique de la filière d'innovation sorgho sucré à Haïti, Cadres méthodologiques 25 p. Leclerc E. 2013. Usinage du sorgho sucré en Haïti. Document audiovisuel.

**Le projet « S3F POUR HAÏTI »** est un projet de recherche appliquée coordonné par le CIRAD (Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement), associant la Fondation CHIBAS et l'Université de Quisqueya basées en Haïti. Un partenariat a été développé avec l'entreprise privée Agriterro pour tout ce qui concerne l'extraction des jus et la production d'alcool. Le projet a commencé en juillet 2009 et a duré 48 mois. Il a bénéficié d'une aide ANR d'un montant de 396 240 € pour un coût total de 868 156 €.

#### CONTACT

**Serge Braconnier** : [serge.braconnier@cirad.fr](mailto:serge.braconnier@cirad.fr)

**Gael Pressoir** : [gael.pressoir@chibas-bioenergy.org](mailto:gael.pressoir@chibas-bioenergy.org)  
<http://s3f-haiti.cirad.fr/>

## SAMCO

## Diminuer les risques en montagne

## — Adaptation de la société aux risques en montagne dans un contexte de changement global

Le projet SAMCO a pour but de développer des outils permettant d'améliorer la résilience des territoires montagneux soumis aux risques hydro-gravitaires. Ces outils, visant à mesurer la capacité d'adaptation, ont été testés sur 3 sites pilotes représentatifs. La méthodologie est déployée selon 3 axes :

1) définition des impacts potentiels des changements globaux (changement climatique et des écosystèmes, e.g., occupation du sol, systèmes socio-économiques) sur les aléas gravitaires, 2) analyse de ces conséquences en termes de vulnérabilité et, 3) implémentation des résultats par cartographie des indicateurs de vulnérabilité des versants exposés, via une plateforme SIG servant de démonstrateur.

L'originalité de SAMCO réside dans la combinaison de différentes méthodologies (approche multirisque, scénarios, analyse de la vulnérabilité) et dans l'expertise interdisciplinaire des équipes impliquées (géosciences, sciences sociales). L'expérience de ces dernières est essentielle pour développer des approches innovantes nécessaires à l'émergence de stratégies d'adaptation efficaces des milieux montagneux.

## — Une plateforme pour évaluer les meilleures stratégies de réduction des risques

Dans le cadre du projet SAMCO, un ensemble d'outils méthodologiques a été conçu pour évaluer les risques selon plusieurs scénarios prospectifs. Ces outils ont été utilisés pour mesurer les impacts futurs de ces changements sur les écosystèmes et les sociétés sur trois sites représentatifs situés dans les Pyrénées et les Alpes françaises. Les résultats ont été mis en œuvre dans une application Web capable de gérer des scénarios et les cartes de risque associées. Les scénarios intègrent les changements climatiques (RCP4.5 et RCP8.5), mais aussi les modifications d'occupation des sols issus de différentes trajectoires socio-économiques ; celles-ci étant co-construites dans le cadre d'ateliers participatifs réunissant scientifiques et acteurs locaux. Basée sur différents modèles d'évaluation des risques (e.g., glissements de terrain, chutes de blocs, laves torrentielles), la plateforme permet d'envisager des cas « multirisques ». L'application

Web a été développée à l'aide de composants open source tels que PostgreSQL, GeoServer et des technologies PHP. Les résultats s'affichent dans une fenêtre divisée en quatre onglets : paramètres des scénarios, cartes d'aléas, de risques, comparaisons entre scénarios. Les résultats et l'application ont été présentés aux parties prenantes et aux communautés d'utilisateurs lors des réunions et des ateliers participatifs du projet. Ils ont été bien accueillis car conformes aux situations réelles. Certaines perspectives sont déjà identifiées pour mettre à la disposition des parties prenantes un outil plus orienté vers des besoins opérationnels.

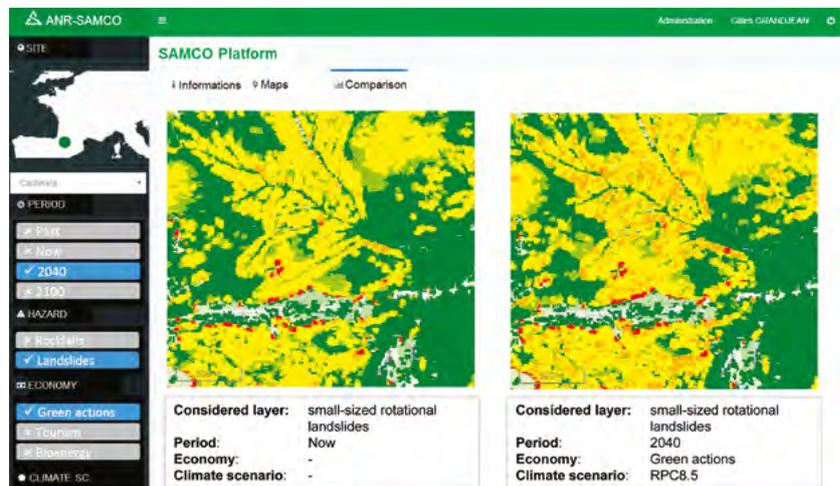
## — Résultats majeurs

Le projet SAMCO a contribué à accroître les connaissances en matière d'évaluations multi-aléas / réduction des risques. Les échanges avec les parties prenantes ont permis de définir des scénarios crédibles et des évaluations d'impact réalistes sur des enjeux physiques mais aussi sur les fonctions socio-économiques du territoire. Ces activités ont aidé les autorités locales et les acteurs économiques à prendre part aux processus de résilience. Les résultats techniques obtenus nous poussent maintenant à développer le concept de plateforme d'aide à la décision qui fonctionnerait sur les grands bassins de risque français.

## — Production scientifique et brevets

- ▶ Grandjean, G., Thomas, L., Bernardie, S. and The SAMCO Team, 2018. A Novel Multi-Risk Assessment Web-Tool for Evaluating Future Impacts of Global Change in Mountainous Areas. *Climate* 2018, 6(4), 92.
- ▶ Houet T., Grémont M., Vacqué L., Forget Y., Mariotti A., Puissant A., Bernardie S., Thiery Y., Vandromme R., Grandjean G., Downscaling scenarios of future LUCC using a participatory approach: an application to mountain risk assessment in the Pyrenees (France). *Regional Environmental Change (accepted)*.
- ▶ Puissant, A., van Den Eeckhaut, M., Malet, J.-P., Hervas, J., Maquaire, O. 2014. Landslide consequence analysis: a region-scale indicator-based methodology. *Landslides*, 11(5): 843-858.

Copie d'écran de la plateforme Web SAMCO montrant la carte d'aléa « glissements de terrain » pour un scénario donné. Les endroits où le niveau de risque de glissement de terrain passe de faible à modéré sont clairement visibles.



**Le projet SAMCO** est un projet de recherche coordonné par le BRGM. Il associe les laboratoires GEODE, IPGS, LIVE PRODIG, l'IRSTEA et la société GEO-HYD. Le projet a commencé en janvier 2013 et a duré 48 mois. Il a bénéficié d'une aide ANR de 908 K€ pour un coût global de 2 414 K€.

## CONTACT

**Gilles Grandjean :**  
g.grandjean@brgm.fr,  
<http://www.anr-samco.com/>

## SEAFRONTTERA

## Estimation du risque sismique et tsunamigénique du dernier gap sismique de la zone de subduction de Sumatra

## — Comment prédire la propagation frontale et latérale des grands séismes de subduction ? Application au dernier gap sismique de Sumatra, le segment de Mentawai Nord

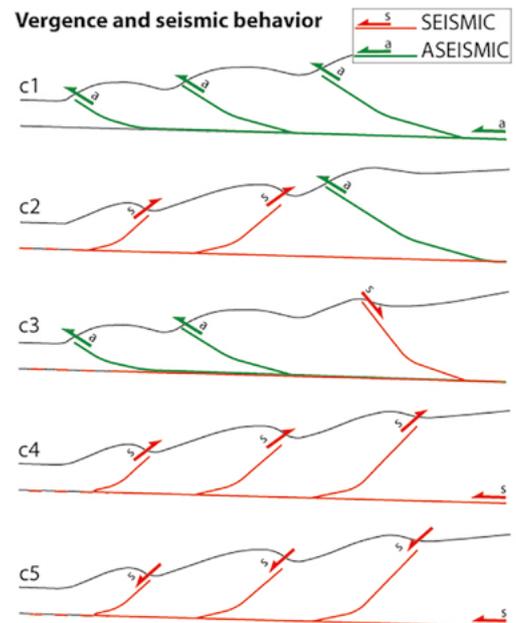
Les deux derniers grands séismes de magnitude supérieure à 9 (Sumatra 2004 et Japon 2011) ont surpris la communauté scientifique en se propageant jusqu'à la fosse de subduction, partie frontale des méga-chevauchements que l'on pensait jusqu'alors asismique. Ces ruptures frontales ont provoqué d'énormes tsunamis causant un lourd bilan humain et un accident nucléaire. Depuis deux décennies, l'ensemble de la zone de subduction de Sumatra a rompu en une série de séismes majeurs laissant tout de même un large gap sismique de 500 km de long : le segment de Mentawai Nord. D'après les données géodésiques, paléogéodésiques et historiques, ce segment est aujourd'hui prêt à rompre. Parmi la série de séismes, certains événements ont rompu jusqu'à la fosse de subduction alors que d'autres se sont limités à la partie sismogénique, moins superficielle, du méga-chevauchement engendrant de plus petits tsunamis. Certains segments de la zone de subduction ont rompu en un seul séisme majeur, alors que d'autres ont nécessité une séquence de plusieurs plus « petits » séismes pour rompre. Pour évaluer le risque sismique et tsunamigénique d'une région comme le segment encore intact de Mentawai Nord, il apparaît fondamental de mieux comprendre les paramètres contrôlant la propagation frontale et la propagation latérale des séismes. Ce projet ambitionnait de travailler sur ces deux questions afin, dans un premier temps, de proposer une estimation du risque sismique et tsunamigénique associé au gap de Mentawai Nord et dans un second temps, de proposer des outils génériques applicables à toute zone de subduction.

## — La modélisation mécanique des déformations du prisme d'accrétion : un outil pour améliorer l'estimation du risque

Pour répondre à ces questions, notre travail s'est principalement basé sur l'analyse structurale de lignes sismiques et leur modélisation mécanique. Pour étudier la propagation frontale des séismes, nous avons comparé les profils sismiques de zones ayant des comportements sismiques très différents (sismique ou asismique, tsunamigénique ou non) pour mettre en évidence un possible lien entre déformation observée et mode de glissement. Ce travail a pu être réalisé grâce aux profils sismiques de haute-qualité fournis par CGGV. La modélisation mécanique basée sur l'analyse limite a permis de contraindre les propriétés frictionnelles des différentes structures et failles. A partir de ces propriétés et à l'aide de la théorie du prisme critique, nous avons pu retrouver le mode de glissement associé à chaque structure. Nous avons ensuite étudié l'impact de la subduction de relief bathymétrique sur la segmentation latérale des séismes. De la même façon, l'analyse limite et la théorie du prisme critique nous ont permis de déterminer les conditions mécaniques favorisant le cisaillement de reliefs subductés pouvant jouer sur la segmentation latérale.

## — Résultats majeurs

De cette étude, il est ressorti que la vergence des failles dans les prismes d'accrétion pouvait révéler l'occurrence de séismes se propageant jusqu'à la surface. Les prismes avec une large étendue de failles à vergence vers la côte, comme le long de la zone de subduction des Cascades, subiraient de façon récurrente des séismes se propageant jusqu'à la surface et par conséquent de terribles tsunamis. Les prismes à vergence



Relation entre vergence et type de failles dans les prismes d'accrétion et potentiel sismique des failles. En rouge : failles potentiellement sismique, en vert : failles à comportement asismique. Adapté à partir de Cubas et al., *Geology* 2016.

vers la mer présenteraient un risque limité, et ceux présentant les deux vergences, comme le long du segment de Mentawai Nord, un comportement mixte (sismique et asismique). De plus, la modélisation mécanique nous a permis d'estimer le déplacement minimum attendu sur chaque faille du gap de Mentawai (de l'ordre du m à la dizaine de m). Finalement, nous avons déterminé les conditions mécaniques favorisant le cisaillement de reliefs entrant en subduction. Les régions présentant ces conditions semblent délimiter les séismes passés, et pourraient par conséquent servir à délimiter l'étendue des séismes futurs.

## — Production scientifique et brevets

- N. Cubas, P. Souloumiac, S. Singh (2016), Relationship link between landward vergence in accretionary prisms and tsunami generation, *Geology*, doi:10.1130/G38019.1.
- A. K. Kuncoro, N. Cubas, S. C. Singh, M. Etchebes, P. Tapponnier (2015), Tsunamigenic potential due to frontal rupturing in the Sumatra locked zone, *Earth and Planetary Science Letters*, 432, p.311-322, doi:10.1016/j.epsl.2013.07.037.

**Le projet SEAFRONTTERA** était un projet de recherche fondamentale, coordonné par Nadaya Cubas (initialement post-doc à l'IPGP puis recrutée en tant que MCF à Sorbonne-Université en 2014). Le projet a démarré en septembre 2013 et a duré au total 34 mois. Il a bénéficié d'un financement de l'ANR à hauteur de 90 k€.

**CONTACT**

**Nadaya Cubas** : nadaya.cubas@sorbonne-universite.fr

## SISCOR

## Les grands séismes de Grèce : quelle menace pour la région du Golfe de Corinthe ?

## — Aléa sismique et mécanique sismogène du Rift de Corinthe occidentale (Grèce), par une approche pluridisciplinaire

Comprendre la dynamique d'un système failles est nécessaire pour une évaluation précise de l'aléa sismique. Cette mécanique met en jeu des failles de géométrie complexe, sur une échelle de temps de la seconde à cent mille ans. Entre deux grands séismes, le chargement continu s'accompagne parfois de déformations transitoires qui déchargent certaines zones de faille, en chargeant d'autres. Ces processus transitoires, souvent révélés par des bouffées de petite sismicité, restent à interpréter en terme de glissements lents ou de diffusion de pression de pore. Le potentiel d'une faille pour générer un fort séisme dépend donc de toute l'histoire de déformation sismique et aismique du système. Dans ce projet, focalisé sur la partie occidentale du Rift de Corinthe, en Grèce, nous cherchons à comprendre la cause de la microsismicité, et à caractériser la géométrie, les dimensions, ainsi que l'histoire sismique et tectonique d'un système de grandes failles, pour en déterminer le caractère sismogène, et quantifier la probabilité d'un grand séisme dans les décennies à venir.

## — Approches sismologiques, géodésiques, géologiques, et historiques pour caractériser la sismicité du rift de Corinthe

Trois échelles de temps sont considérées. (1) long terme: évolution du système de failles depuis 200 ka, d'après leurs géométries et leur jeu; (2) moyen terme: sismicité sur plusieurs milliers d'années, par les catalogues instrumentaux, les archives historiques et archéologiques, et les turbidites; (3) court terme : mécanique du système depuis une décennie, grâce aux mesures continues des réseaux sismologiques et géodésiques (Corinth Rift Laboratory : <http://www.crlab.eu>), complétés par de nouveaux instruments. La microsismicité reflète l'activité spatio-temporelle des petites failles, forcée par des glissements lents ou des surpressions de fluide, et dévoile en partie le fonctionnement des grandes failles proches, sur lesquelles la possibilité de cascades dynamiques de rupture sismique a aussi été examinée. Un modèle numérique a été développé pour comprendre

la mécanique globale du Rift. Ces travaux ont finalement été intégrés dans une méthodologie nouvelle de calcul probabiliste d'aléa sismique dépendant du temps, suivant une approche par arbre logique.

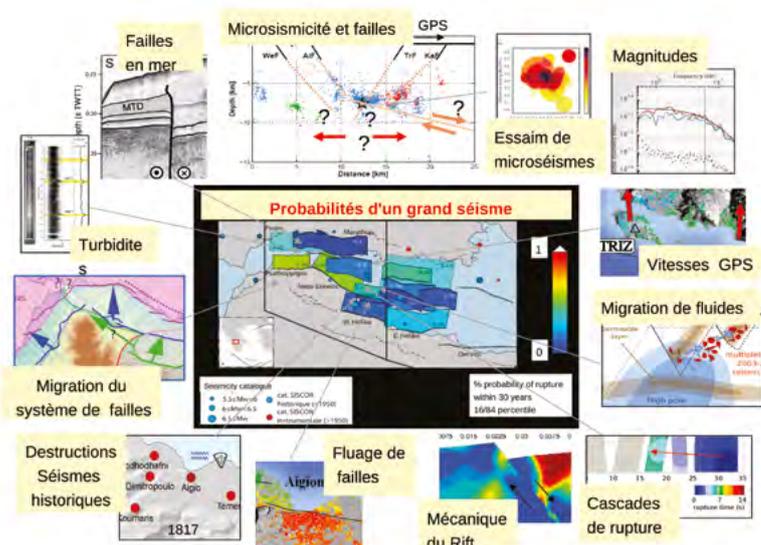
## — Résultats majeurs

L'évolution tectonique rapide du Rift dans sa partie ouest a généré un réseau de failles très segmenté, peu propice aux séismes de magnitude supérieure à 6.5-7.0. Les fréquents essaims de microsismicité sont liés à des migrations de fluides à la racine des grandes failles, sans évidence de grands glissements, et leur potentiel de déclenchement de grands séismes reste à déterminer. À moyen terme, nous trouvons une probabilité de plus de 50 % pour au moins un séisme dépassant la magnitude 6 d'ici 30 ans. Les données de CRL sont accessibles via la base de données de l'infrastructure RESIF.

## — Production scientifique et brevets

15 articles publiés dans des revues internationales à comité de lecture, et 7 thèses.

- ▶ Beckers et al. 2015, Marine Geology ;
- ▶ Campos et al. 2013, Annals of Geophysics
- ▶ Canitano et al., 2013, Journal of Geodetic Science
- ▶ Canitano et al., 2013, PAGEOPH,
- ▶ Dublanchet et al., 2013, JGR.
- ▶ Dublanchet et al, 2013, JGR.
- ▶ Dublanchet et al., 2015., JGR.
- ▶ Duverger, et al., 2015, GRL.
- ▶ Ford et al., 2013, Basin Research
- ▶ Godano et al., 2014, GJI.
- ▶ Godano et al., 2015, JGR.
- ▶ Hemelsdael and Ford, 2015, Basin Research
- ▶ Kapetanidis et al., 2015, GJI.
- ▶ Lambotte et al., 2014, GJI.
- ▶ Pérouse et al., 2016, GJI.



**Le projet SISCOR** est un projet de recherche fondamentale coordonné par l'IPGP (P. Bernard). Il associe l'ENS (Paris), l'IRSN, Géosciences Azur (Nice), le CRPG (Nancy), ISTERRE (Grenoble), EOST (Strasbourg), avec comme sous-contractants principaux l'INGV de Milan et l'Université de Liège. Le projet a commencé en janvier 2011 et a duré 42 mois. Il a bénéficié d'une aide de 660 k€ de l'ANR, pour un coût global de l'ordre de 2 670 k€.

## CONTACT

**Pascal Bernard** : [bernard@ipgp.fr](mailto:bernard@ipgp.fr), [crlab.eu](http://crlab.eu)

## SlideVOLC

## Caractériser et comprendre les déstabilisations de flanc sur les volcans

## — Vers une meilleure compréhension des déstabilisations volcaniques : de l'observation à un modèle global des déformations actives

De part leur capacité à pouvoir générer de larges déstabilisations et glissements de terrain, les instabilités de flanc des édifices volcaniques sont parmi les phénomènes volcaniques les plus dangereux. L'action continue de la pression du magma est à l'origine de grandes déformations qui contrôlent la structure et la topographie d'un volcan avec des flancs plus ou moins mobiles. À La Réunion, une déstabilisation majeure du flanc est du Piton de la Fournaise aurait des conséquences catastrophiques, avec le déclenchement d'un tsunami. En effet, 80 % des 840 000 habitants de l'île et la majorité de l'activité économique sont localisés en bordure côtière. Il est donc d'intérêt majeur pour la communauté scientifique de comprendre les déformations à grande échelle et les instabilités de flanc en domaine volcanique, et pour la société d'éduquer le grand public sur cet aléa. Notre capacité à prédire de tels événements repose à la fois sur notre compréhension du lien complexe existant entre le champ de contraintes et les processus magmatiques et hydrothermaux, et sur notre capacité à interpréter les signaux précurseurs. Ce projet vise à intégrer de nouvelles observations dans un modèle global, cohérent et réaliste pour mieux comprendre et anticiper les instabilités de flanc en domaine volcanique.

## — Un ensemble de données unique issu d'études pluridisciplinaires

Ce projet est particulièrement innovant car il combine plus de 35 ans de données de surveillance et de nouvelles données issues d'avancées scientifiques et techniques provenant d'études pluridisciplinaires. La caractérisation de la déformation par des méthodes au sol (GPS) et satellite (interférométrie radar) a permis de mettre en évidence un glissement du flanc et des zones de fractures, qui ont ensuite été caractérisées plus finement par de la cartographie thermique et 3D issue de traitement stéréo-photogrammétrique, et par tomographie de résistivité électrique à haute résolution et grande profondeur. La rhéologie du milieu (porosité, perméabilité, etc) a pu être caractérisée par des analyses en laboratoire sur des échantillons. L'intégration de l'ensemble de ces données permettra d'améliorer les modèles numériques et de produire un volcan numérique réaliste. Cette intégration n'avait jusqu'alors jamais été réalisée du fait de l'évolution récente des connaissances sur le Piton de la Fournaise grâce à l'apport de nouvelles techniques. Une telle étude nécessite de nouvelles technologies pour apporter des contraintes robustes aux modèles, comme celles qui ont été validées en domaine volcanique par les équipes de ce projet : à savoir la tomographie de résistivité électrique haute résolution, et l'imagerie infrarouge à haute résolution par drone.

## — Résultats majeurs

L'identification d'une zone de glissement du flanc et la nouvelle « imagerie » du volcan issue des données géophysiques et géochimiques ont permis de mettre en évidence les zones « instables » du volcan. Ces résultats et les modélisations numériques aideront à mieux cibler les observables géophysiques à acquérir et à surveiller, afin de détecter rapidement des processus subtils d'initiation de déstabilisations. En effet, nos modèles devraient montrer où la déformation s'accroîtra avant un

## LOS velocities (mm/yr)

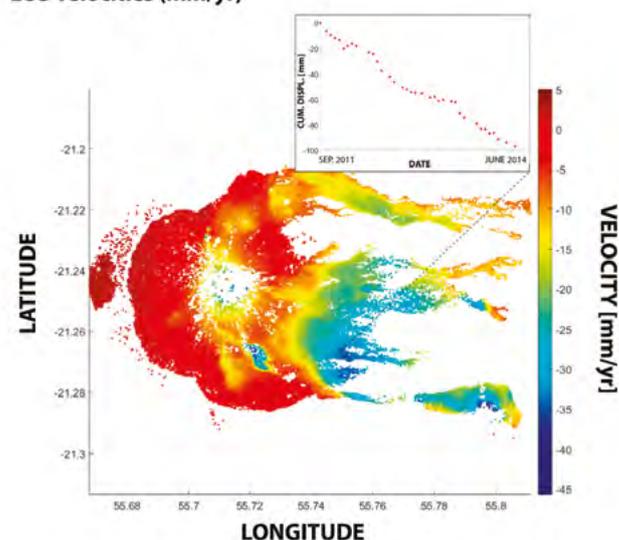


Illustration du déplacement du flanc est du Piton de la Fournaise. Carte des vitesses moyennes (mm/an) des déplacements (dans la direction de visée du satellite : LOS), à l'intérieur de la caldera de l'Enclos Fouqué au Piton de la Fournaise. L'encart détaille une série temporelle de l'évolution du déplacement en un point.

événement catastrophique. Les connaissances acquises sur le Piton de la Fournaise seront également exportées vers d'autres volcans du monde entier, notamment vers l'Etna et le Kilauea, qui partagent des caractéristiques communes.

## — Production scientifique et brevets

- Poland et al. (2017), The spectrum of persistent volcanic flank instability: A review and proposed framework based on Kilauea, Piton de la Fournaise, and Etna, J. Volcanol. Geotherm. Res., 339, 63-80.
- Boudoire et al. (2018), Small-scale spatial variability of soil CO<sub>2</sub> flux: implication for monitoring strategy. J. Volcanol. Geotherm. Res. 366, 13-26.
- Derrien et al. (2018), Multi-temporal airborne Structure-from-Motion on caldera rim hazard, visitor exposure and origins of instabilities at Piton de la Fournaise, Progress in Physical Geography: Earth and Environment.
- Peltier et al. (2018), Changes in the long-term geophysical eruptive precursors at Piton de la Fournaise: Implications for the response management. Front. Earth Sci. 6:104.

**Le projet SlideVOLC** est un projet de recherche fondamentale coordonné par l'IPGP (Institut de Physique du Globe de Paris). Il associe les laboratoires de GéoSciences Réunion (Université de la Réunion) ainsi que le laboratoire LMV (Laboratoire Magmas et Volcans, Université Clermont Auvergne), le Céréma, ainsi que les universités d'Arizona et de Munich. Le projet a commencé en Octobre 2016 pour une durée de 36 mois. Il a bénéficié d'une aide ANR de 285 k€.

**CONTACT**

Aline Peltier : peltier@ipgp.fr

## SPICy

## Anticiper les inondations marines et fluviales d'origine cyclonique

## — Travailler sur un système de prévision expérimental des inondations marines et fluviales d'origine cyclonique pour les Territoires d'Outre-Mer

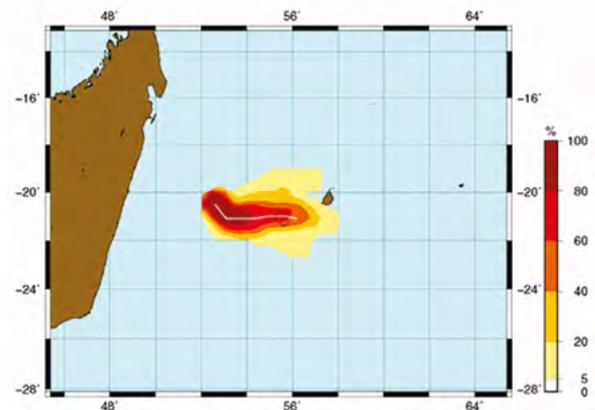
Avec ses Territoires d'Outre-Mer, la France est présente dans trois des sept bassins d'activité cyclonique (Atlantique Nord, Pacifique Sud et Océan Indien). Les autorités de l'Etat régionales et locales sont donc régulièrement confrontées à des situations de gestion de crise cyclonique dont la fréquence est susceptible d'augmenter avec le changement climatique. Néanmoins, à l'heure actuelle, ils ne disposent pas d'outils dédiés à la prévision des inondations liées aux cyclones tropicaux. L'objectif du projet SPICy est de travailler sur un système de prévision expérimental des inondations marines et fluviales d'origine cyclonique pour les Territoires d'Outre-Mer à travers le développement de briques technologiques et la réalisation d'un démonstrateur pour l'île de La Réunion. Au-delà de la prévision des inondations, la finalité de SPICy est aussi de formaliser des outils d'aide à la décision pour différentes échelles territoriales, de la commune à la zone de défense. Les développements du projet visent ainsi à compléter les informations de vigilance transmises par les services de l'État et à mieux anticiper la mise en œuvre d'actions préventives.

## — Une approche transdisciplinaire pour aborder simultanément les différents challenges de la prévision cyclonique

Pour atteindre ses objectifs, le projet aborde certaines limites du système de prévision actuel et contribue aux efforts internationaux de recherche sur la prévision cyclonique, à savoir : (1) l'estimation des incertitudes grâce à la génération d'ensembles de trajectoires possibles (2) la modélisation météorologique à haute résolution avec prise en compte de l'orographie et assimilation de données (3) la mise en place de modèles permettant la fourniture d'informations et/ou de prévisions sur les risques d'inondation en zone urbaine (4) la gestion des temps de calcul et les techniques d'optimisation (5) la création d'outils d'aide à la décision. L'approche générale est basée sur le retour d'expérience, l'évaluation des Plans Communaux de Sauvegarde (PCS) et les besoins exprimés par les utilisateurs en début de projet. Deux exercices de crise impliquant des opérationnels des communes pilotes et de la sécurité civile ont rythmé le projet pour familiariser l'équipe aux problématiques et contraintes des gestionnaires de crise et tester les outils les plus matures du projet.

## — Résultats majeurs

Certains développements du projet relatifs à la prévision d'ensemble font désormais partie de chaînes expérimentales ou pré-opérationnelles permettant de fournir aux prévisionnistes des prévisions probabilistes et des informations plus précises sur l'évolution des systèmes dépressionnaires évoluant dans l'Océan Indien. Les modèles et bases de données de vagues et de niveaux marins seront quant à eux valorisés pour l'établissement de la Vigilance Vagues Submersion à La Réunion. Les atlas cartographiques et Plans d'Intervention Gradués réalisés sur les communes pilotes sont désormais utilisés de manière opérationnelle.



En haut : Salle de gestion de crise de la commune de Saint-Paul (exercice SPICy – 2017). En bas : Prévision d'ensemble de trajectoire pour le scénario de l'exercice SPICy 2017.

## — Production scientifique et brevets

Outre les applications directes des résultats du projet, 7 articles ont été soumis dans des revues internationales à comité de lecture, 2 dans des revues nationales et 10 présentations à des conférences ont été réalisées. Par ailleurs l'année 2017 a été marquée par la tenue du workshop de restitution du projet à La Réunion qui a réuni scientifiques, services de l'État et collectivités. La transposition des résultats de SPICy au contexte antillais se poursuivra à travers la participation de partenaires de Spicy dans l'ANR Ouragan TIREX.

**Le projet SPICy** est un projet de développement expérimental coordonné par le BRGM. Il associe Météo-France Océan-Indien, le LACY, les Mines d'Alès et BRL Ingénierie. Le projet a commencé en octobre 2014 et a duré 48 mois. Il a bénéficié d'une aide ANR de 640 k€ pour un coût global de l'ordre de 1 500 k€.

**CONTACT**

**Sophie Lecacheux** : [s.lecacheux@brgm.fr](mailto:s.lecacheux@brgm.fr), [spicy.brgm.fr](http://spicy.brgm.fr)

## STORISK

## Trajectoires de risque et d'adaptation des petites îles au changement climatique

## — Les petites îles tropicales face aux risques liés à la mer (érosion, submersion) et à l'élévation du niveau de la mer

Les littoraux bas des îles tropicales sont particulièrement exposés aux risques liés à la mer dans le contexte du changement climatique. Deux préoccupations majeures sont l'érosion côtière et la submersion marine, avec des conséquences temporaires ou permanentes selon qu'elles sont liées à des événements extrêmes (cyclones par ex.) ou à des modifications plus graduelles (élévation du niveau de la mer par ex.). STORISK analyse la nature de ces risques et de leurs facteurs d'influence, à la fois environnementaux et anthropiques, au travers de l'analyse de « chaînes d'impacts » d'événements extrêmes et de la reconstruction de « trajectoires de vulnérabilité » sur les dernières décennies. Sur ces bases, STORISK vise à identifier les trajectoires d'adaptation les plus pertinentes pour ces territoires, en s'appuyant plus particulièrement sur deux Territoires d'Outre-Mer français, la Polynésie française (Pacifique) et l'île de La Réunion (océan Indien). STORISK cherche donc à renseigner le passé pour mieux informer l'avenir en identifiant des stratégies concrètes de réduction des risques actuels et futurs, qui tiennent compte du problème posé par les incertitudes climatiques.

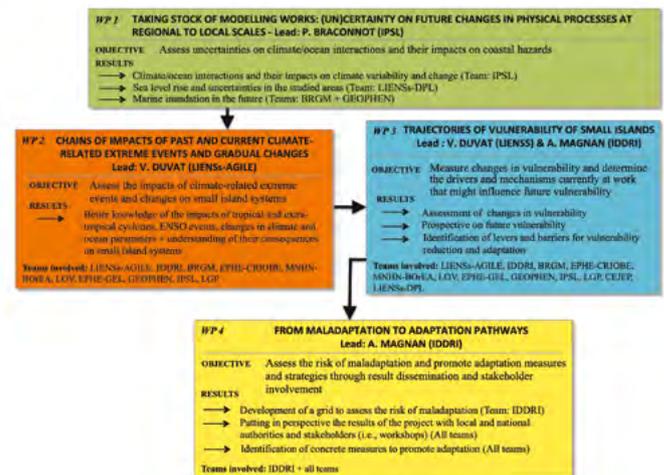
## — Les trois piliers de la démarche méthodologique : chaînes d'impacts, trajectoires de vulnérabilité et trajectoires d'adaptation

STORISK propose de dépasser les verrous scientifiques qui contraignent l'élaboration de scénarios prospectifs régionaux à locaux par trois approches méthodologiques :

- (1) Le couplage de travaux de modélisation (régionalisation climatique multi-modèles, facteurs de contrôle de l'élévation régionale du niveau de la mer, modélisation de la submersion et de la croissance corallienne) avec la reconstruction de trajectoires de vulnérabilité passé-présent (évolution physique et humaine des systèmes insulaires, reconstruction des impacts d'événements passés). L'objectif est d'ancrer les travaux de modélisation dans la réalité des contextes locaux en vue de traiter deux grandes questions, la détection-attribution des changements et l'incertitude.
- (2) La construction d'indicateurs synthétiques transdisciplinaires, par ex. en termes de risque d'impact climatique (agrégation de données climatiques, écologiques et géomorphologiques) et d'évaluation multicritères de l'efficacité du droit face aux perturbations anthropiques du système île-récif.
- (3) La tenue d'ateliers transdisciplinaires d'analyse des résultats et de construction de scénarios d'adaptation.

## — Résultats majeurs

- Mise en évidence de la diversité des profils de vulnérabilité au changement climatique des petites îles tropicales ;
- Élaboration de scénarios d'adaptation (identification de solutions et construction de trajectoires contextualisées) ;
- Auditions de plusieurs membres de STORISK par la Mission d'Information sur la gestion des événements climatiques majeurs (2018) de l'Assemblée Nationale ;
- Participation de 5 membres de STORISK aux rapports du GIEC (SROCC, 6ème rapport d'évaluation) ;
- Nouveaux contrats : projet européen InSEAption (ERA4CS ; 2017-2020) et ANR OURAGANS TIREX (2018-2021).



L'approche STORISK consiste à comprendre les facteurs physiques de contrôle du risque dans un contexte de changement climatique (WP1), à analyser la cascade d'impacts des événements extrêmes et des changements graduels, en s'appuyant sur des événements récents (WP2) ; à reconstituer les trajectoires de vulnérabilité des territoires depuis 1950-1960, afin de mettre en évidence les facteurs et les processus de contrôle (WP3) ; pour, en dernier lieu, évaluer si le territoire est dans une démarche favorable à l'adaptation sur le long terme ou s'il emprunte la voie de la maladaptation et, sur ces bases, proposer des pistes concrètes et des scénarios d'adaptation (WP4).

## — Production scientifique et brevets

En novembre 2018, la production STORISK s'élevait à 16 articles dans des revues scientifiques nationales (3) et internationales (13), 7 contributions dans des ouvrages et chapitres d'ouvrages nationaux (3) et internationaux (4), et à 22 communications dans des conférences nationales (13) et internationales (9), et une vingtaine d'actions de vulgarisation à destination du grand public et des acteurs locaux et nationaux. Production à venir : 25 articles, 1 chapitre d'ouvrage et 6 conférences au minimum.

**Le projet STORISK** est un projet de recherche coordonné par l'UMR LIENSs 7266 (Littoral, Environnement, Sociétés ; CNRS, Université de La Rochelle ; 2 équipes). Il associe 9 autres partenaires : IDDRI (Institut du Développement Durable et Relations Internationales ; 1 équipe), BRGM (Bureau de Recherches Géologiques et Minières ; 1 équipe), IPSL (Institut Pierre Simon Laplace ; 1 équipe), LETG-Caen et LETG-Dinard (Littoral, Environnement, Télédetection, Géomatique ; 2 équipes), EPHE-CRIOBE (Centre de Recherches Insulaires et Observatoire de l'Environnement ; 1 équipe), MNHN-BORéA (Biologie des Organismes et Ecosystèmes Aquatiques ; 1 équipe), LOV (Laboratoire d'Océanographie de Villefranche-sur-Mer ; 1 équipe), LGP (Laboratoire de Géographie Physique ; 1 équipe), CEJEP (Centre d'Études Juridiques et Politiques ; 1 équipe). Le projet a commencé en Octobre 2015 pour une durée de 60 mois. Il a bénéficié d'une aide ANR de 972 478 € pour un coût global de 3 512 612 €.

## CONTACT

Pr. Virginie Duvat : virginie.duvat@univ-lr.fr,  
<https://lienss.univ-larochelle.fr/Projet>

## STRAP

## Volcanologues et physiciens de l'atmosphère au chevet du Piton de la Fournaise

## — STRAP : Synergie Transdisciplinaire pour Répondre aux Aléas liés aux Panaches volcaniques

Le contexte est celui des risques associés aux éruptions volcaniques effusives. L'objectif principal de la recherche fondamentale est une meilleure compréhension et une amélioration de la modélisation de la distribution, du vieillissement physico-chimique des panaches volcaniques et des dépôts superficiels. À terme, le programme devrait permettre des retombées sociétales par l'amélioration des schémas de représentation du transport des aérosols et des gaz volcaniques dans les modèles opérationnels de dispersion des panaches volcaniques qui sont gérés par les VAAC (Volcanic Ash Advisory Centers). Les problèmes traités sont de déterminer la composition des émissions et les flux de masse éruptifs à la source, de déterminer les hauteurs d'injection des panaches volcaniques (cendres et gaz), de mieux comprendre et de modéliser les interactions gaz/particules en atmosphère complexe, ainsi que les processus de transport et de dispersion des produits acides secs et humides à l'échelle régionale. Les observations des aérosols et gaz (in-situ et par télédétection) sont les éléments clés à acquérir pour valider les modèles de recherche sur simulation de cas réels.

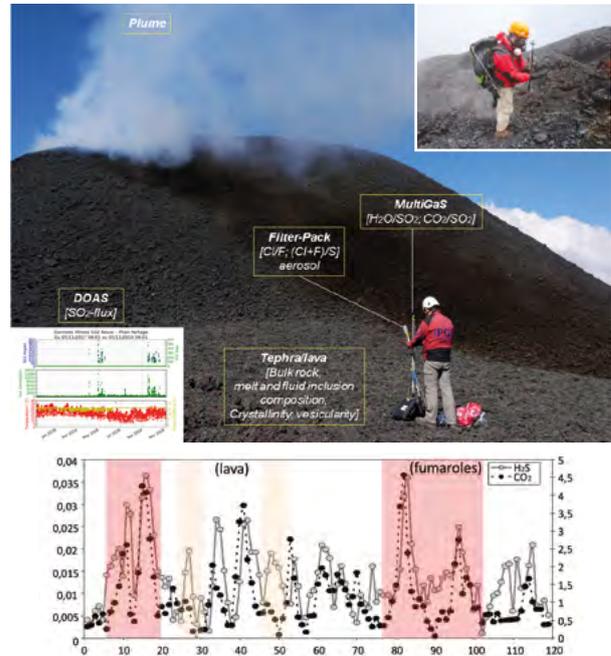
## — Observations volcanologiques et atmosphériques, modélisation couplée volcan - atmosphère

Plusieurs méthodes d'observations du panache volcanique sont utilisées pour mesurer la température, la distribution spatiale et le flux massique des émissions et caractériser le cycle de vie du panache résultant. Ce sont des prélèvements in-situ (analyses de la composition des gaz, des laves et des cendres), de la télédétection proche avec des instruments mobiles, des mesures in-situ aéroportées dans le panache et des mesures de télédétection spatiale. Les mesures sont utilisées pour mieux comprendre les processus physico-chimiques à l'événement, l'évolution physico-chimique, de transport, et de dispersion notamment de la phase aérosol. Une des méthodologies utilisées sur le terrain est de coupler des mesures de télédétection (Differential Optical Absorption Spectroscopy) et des mesures in-situ (analyseur MultiGaS ; filtres « Filter-Pack »). Les mesures DOAS du flux de  $\text{SO}_2$ , couplées avec les mesures des rapports  $\text{CO}_2/\text{SO}_2$ , et  $\text{H}_2\text{O}/\text{SO}_2$  et  $(\text{Cl}+\text{F})/\text{S}$  permettent ensuite de quantifier les flux de des composants principaux du panache gazeux pour les simulations météorologiques du panache.

Plusieurs cas d'études de la campagne STRAP ont été simulés par le modèle méso-échelle MesoNH afin d'étudier la représentativité de plusieurs paramétrisations de la nucléation binaire de l'acide sulfurique et les principaux mécanismes de grossissement (coagulation, condensation) conduisant à la formation de noyaux de condensation (CCN) qui est un paramètre clefs d'entrée dans les modèles de climat.

## — Résultats majeurs

- Dégazage précoce important du  $\text{CO}_2$  du manteau supérieur : suggère la sous-estimation de la contribution volcanique au bilan du carbone atmosphérique (impact climatique).
- Nature évoluée et dégazée des laves du Piton de la Fournaise (PdF) : explique le paradoxe de la faiblesse des émissions gazeuses inter-éruptives.
- Mesures aéroportées originales : analyse fine de la composition et de l'évolution spectrale des nanoparticules (PdF, Etna).



Mesures directes (méthodes MultiGaS et Filter-Pack) de la composition chimique du panache émis sur le volcan. Ces mesures sont intégrées avec les mesures de flux de  $\text{SO}_2$  (DOAS) pour contraindre le bilan des émissions gazeuses de haute température.

- Modélisation réaliste des aérosols sub-microniques et bilan de formation de noyaux de condensation nuageux : amélioration de la représentation de l'effet indirect des aérosols volcaniques dans les modèles de climat.

## — Production scientifique et brevets

- Boudoire et al., 2017, *J of Volc and Geo Res.* ; 2017, *GRL* ; 2018, *Geo et Cosmo Acta*. ► Coppola et al., 2017, *EPS Letters*. ► Gurioli et al., 2018, *Solid Earth*. ► Harris et al., 2017, *Appl Volc*. ► Rhéty et al., 2017, *G-Cubed*. ► Soldati et al., 2018, *Bul of Volc*. ► Tulet, et al., 2017, *Atm. Chem and Phys*.

**Le projet STRAP** est un projet de recherche fondamentale coordonné par l'OSU-R (Observatoire des Sciences de l'Univers à La Réunion) avec le LACy (Laboratoire de l'Atmosphère et des Cyclones) et l'Unité Mixte de Service de l'OSU-R. Il associe l'IPGP (Institut de Physique du Globe de Paris) et l'OVFP/IPGP (Observatoire du Volcan du Piton de la Fournaise), l'OPGC (Observatoire de Physique du Globe de Clermont-Ferrand) avec le LMV (Laboratoire Magma et Volcans) et le LAMP (Laboratoire de Météorologie Physique), l'OMP (Observatoire Midi-Pyrénées) avec le LA (Laboratoire d'Aérodynamique) et le CNRM (Centre National de Recherches Météorologiques). Le projet a commencé en octobre 2014 pour une durée de 54 mois. Il a bénéficié d'une aide ANR de **398 840 €** pour un coût complet de 2 393 602 €.

## CONTACT

Jean-Pierre Cammas :

<http://osur.univ-reunion.fr/recherche/strap/>

<http://lacy.univ-reunion.fr/activites/programmes-de-recherche/anr-strap/>

## APPEL SPÉCIFIQUE

PROGRAMME « ACCOMPAGNEMENT SPÉCIFIQUE DES TRAVAUX DE RECHERCHES ET D'INNOVATION DÉFENSE : MATURATION ET VALORISATION (ASTRID MATURATION) », 2016

## STRATEGIC

## Contre le déluge informationnel dans les cellules de gestion de crise

### — Aider les décideurs à comprendre et expliquer une situation complexe au moyen d'une analyse intelligente des informations

La numérisation grandissante des systèmes risque de conduire à un déluge informationnel. En effet, avec la multiplication des capteurs à tous les niveaux et la possibilité pour tous et à tous les échelons de produire de grandes quantités de données et dans tous les formats, le défi est désormais de pouvoir absorber ces flux d'information. Si la théorie voudrait que la numérisation permette à chacun d'avoir la bonne information au bon moment, et donc aboutir à une réduction du temps de la boucle de décision, en pratique chaque individu se retrouve avec une masse grandissante de données et d'informations à traiter et à intégrer. Il devient dès lors de plus en plus difficile de trouver les éléments recherchés parmi le « bruit » environnant.

Face à ce constat, il nous est apparu intéressant de proposer un outil d'aide à la gestion des connaissances et à leur partage afin de disposer d'une vue métier enrichie.

Nous nous proposons donc de concevoir un ensemble d'outils de travail visant à :

- faciliter la compréhension de la situation par l'utilisation d'un outil de Sensemaking pour les événements passés ;
- proposer une vision métier/fonctionnelle de la situation de crise.

### — Simulation constructive et storyfication au service de l'explication de situations complexes

Les travaux sont basés sur la simulation SWORD, simulation constructive dotée d'agents autonomes et adaptatifs, pour générer un ensemble de données simulées réalistes et cohérentes et pour en exploiter les capacités d'abstraction du monde réel. Ils sont envisagés suivant deux axes :

Un premier axe de travail concerne l'application de techniques de storyfication issues du domaine de l'Intelligence Narrative au sein de l'outil de Sensemaking : une synthèse de la situation compréhensible par un opérateur humain, qui pourra soutenir le travail ultérieur de décision ou de debriefing. Nous travaillons à l'établissement assisté d'une structure causale sous-jacente aux faits bruts, en utilisant des outils issus de l'intelligence narrative, afin de faciliter (1) la compréhension de la situation, (2) la communication et le debriefing entre les différents métiers.

Un deuxième axe réfléchit à une représentation synthétique et intelligente de la situation complexe, adaptée aux besoins informationnels de chaque métier en exploitant les capacités de la simulation, en particulier la modélisation par les effets et la couche basse d'intelligence à la base de la prise de décision des agents simulés.



Diversité et multiplicité des informations dans les cellules de gestion de crise. Crédit photo : MASA Group).

### — Résultats majeurs

Les crises sont de plus en plus dynamiques, imprévisibles et complexes et il faut filtrer et analyser des flux massifs d'informations. Les modifications induites sur la doctrine et l'organisation témoignent de l'importance d'avoir l'avantage du savoir sur l'évolution de la situation.

La découverte de la signification, la résolution de problèmes et la prise de décision sont plus complexes et plus essentielles que jamais. De nouvelles dimensions s'ajoutent au commandement et au contrôle, et le rôle des décideurs est en train d'évoluer pour devenir celui d'un « travailleur du savoir ».

### — Production scientifique et brevets

- Introducing Temporal Stable Models for Linear Dynamic Logic, Bosser, Cabalar, Dieguez, Schaub, KR Conference, 2018.
- Co-constructing Subjective Narratives for Understanding Interactive Simulation Sessions, Bosser, Dieguez, Bitoun, Legras, Joint INT - WICED Workshop at AIIDE 2008, Edmonton, 2018.
- An intuitionistic axiomatization of 'eventually', Dieguez, Fernández-Duque, AiML, Bern, 2018.
- Here and There modal logic with dual implication, Balbian, Dieguez, AiML, Bern, 2018.
- Smart simulation for decision support at headquarters, Bitoun, Garmendia-Doval, Hubervic, NATO IST160, 2017.

**Le projet STRATEGIC** est un projet de recherche coordonné par MASA Group. Il associe le laboratoire Lab-STICC ainsi que la société Deev Interaction en sous-traitance. Le projet a débuté en mars 2017 pour une durée de 40 mois. Il est issu du programme ASTRID Maturation, mis en œuvre par l'ANR, et bénéficie d'une aide de l'ANR/DGA de 496 000 € pour un coût global de 1 092 000 €.

#### CONTACT

**Ariane Bitoun** : [ariane.bitoun@masagroup.net](mailto:ariane.bitoun@masagroup.net),  
<https://masasim.com/projects/strategic/>

## APPEL À PROJETS GÉNÉRIQUE

PROGRAMME « FLASH HAITI : POUR UNE RECONSTRUCTION DURABLE », 2010

SUTRA<sup>2</sup>

## Enquête sur le suivi des victimes du séisme de Port-au-Prince à Haïti

## — Objectif

Les situations de très grande catastrophe sont peu documentées. Des difficultés et des controverses sur les modes opératoires peuvent apparaître, comme ce fut le cas lors du tremblement de terre de Port-au-Prince qui provoqua un afflux massif de blessés graves des membres.

L'évaluation a posteriori de cette recherche indique que le projet apporte une meilleure connaissance des victimes, de leur suivi et de leur qualité de vie selon le type de soins médicaux effectués en chirurgie d'urgence et surtout, il apporte des éléments tangibles sur la compatibilité entre les souhaits des patients de préserver un membre atteint, autant que faire se peut, et les coûts réels des amputations en termes socio-économiques, psychologiques et médicaux. Ce projet apporte des bases de procédure normative pour une meilleure prise en charge des besoins lors d'actions humanitaires dans des contextes similaires.

L'étude permet aujourd'hui d'émettre des réflexions quant à la promotion d'une gestion raisonnée du suivi des victimes d'un séisme.

## — Méthodologie

Réalisée à partir d'un suivi sur deux ans d'une cohorte de 305 blessés graves — amputés ou ayant bénéficié d'un traitement alternatif de chirurgie de sauvegarde — la base de données Sutra<sup>2</sup> permet d'évaluer les conséquences des choix de traitement pour la prise en charge des traumatismes des membres.

Cette étude est basée sur la comparaison de deux cohortes de victimes du tremblement de terre : d'un côté, les patients ayant fait l'objet d'un traitement de chirurgie en dehors de l'amputation ; de l'autre, les amputés en première intention.

L'étude comprend deux vagues d'entretiens avec les victimes, réalisées pour la première un an après le séisme et pour la seconde, au moment du deuxième anniversaire, en janvier 2012.

L'échantillon se compose des données médicales, fonctionnelles, psychologiques et socio-économiques. Tous les âges sont représentés. Le genre féminin est mieux représenté (57,5%), ce qui résulte sans doute à la fois de caractéristiques démo-économiques (émigration masculine) et des conditions du séisme.

L'étude SUTRA<sup>2</sup> est enregistrée dans le site ClinicalTrials.gov (Identifiant : NCT01779011).

## — Résultats majeurs

Bien que les données aient été collectées dans un lieu unique, les 305 victimes ont été prises en charge par une grande diversité d'équipes médicales. En moyenne, les personnes amputées en première intention étaient, au moment du séisme, dans des situations susceptibles de provoquer des blessures graves (en hauteur) et dans un état infectieux plus avancé (restés plusieurs heures enfouis sous les décombres). Les victimes elles-mêmes ont émis le souhait d'une reconstruction et donc d'un suivi à long terme. Aussi, le consentement à payer montre que le soin est une priorité pour la majorité de la population. Seulement la moitié des patients atteints de lésions sévères des membres a jugé satisfaisant son état fonctionnel à deux ans. Le point de vue des patients encourage une gestion prudente et de sauvegarde dans la mesure du possible.

## Des dynamiques différentes d'inclusion selon l'âge



Il peut être constaté qu'en Haïti le taux d'inclusion à un an des blessés graves ayant suivi un traitement de chirurgie de sauvegarde n'est atteint qu'à deux ans par les amputés. La jeunesse de la population induit des prises en charge médicale répétées en cas d'amputation. Ces résultats plaident pour une professionnalisation des acteurs de l'humanitaire.

## — Production scientifique et brevets

Les principaux résultats de cette étude ont fait l'objet d'une publication : Delauche M.C., Blackwell N., Le Perff H., Khallaf N., Müller J., Callens S., Allafort Duverger T. (2013) A Prospective Study of the Outcome of Patients with Limb Trauma following the Haitian Earthquake in 2010 at One- and Two- Year (The Sutra<sup>2</sup> Study). *PLOS Currents Disasters*, doi: 10.1371/currents.dis.931c4ba8e64a95907f16173603abb52f.

**Le projet SUTRA<sup>2</sup>** a été coordonné par l'ONG Alliance for International Medical Action (ALIMA) et a associé l'UMR 9221 Lille-Economie et Management (LEM). Le projet a débuté en juillet 2010 pour une durée de 30 mois. Il a bénéficié d'une aide ANR de 404 000 € pour un coût global de 1 033 000 €.

## CONTACT

**Nikki Blackwell** : nikki@alima-ngo.org  
**Stéphane Callens** : s.callens@sfr.fr

## TO\_EOS

## L'imagerie de l'ionosphère, une approche nouvelle et prometteuse pour l'alerte rapide aux tsunamis

## — Les données du séisme M9.0 de Tohoku-Oki, Japon : une clé pour mieux anticiper les futurs grands séismes et tsunami ?

Le début du XXI<sup>e</sup> siècle a été marqué par plusieurs méga-séismes (dont Sumatra-Andaman en 2004 de magnitude 9.2, Chili en 2010 de 8.8). Un des derniers en date, le séisme de magnitude 9.0 de Tohoku-Oki qui a eu lieu au nord-est du Japon en mars 2011, nous a rappelé par l'ampleur des dégâts à quel point il est encore difficile d'anticiper ce type de catastrophe naturelle. Mais contrairement aux autres grands séismes, ce séisme s'est produit dans une des zones les mieux instrumentées qui soit, offrant une occasion unique d'étudier en détail les différentes phases de la catastrophe, pré-, co- et post-rupture, et ainsi de progresser dans l'anticipation des grands séismes et tsunami. L'originalité du projet TO\_EOS est de se focaliser sur cet enjeu via l'analyse croisée des enregistrements terrestres, océaniques et spatiaux.

## — Analyse des mesures terrestres, océaniques et spatiales du séisme M9.0 de Tohoku-Oki

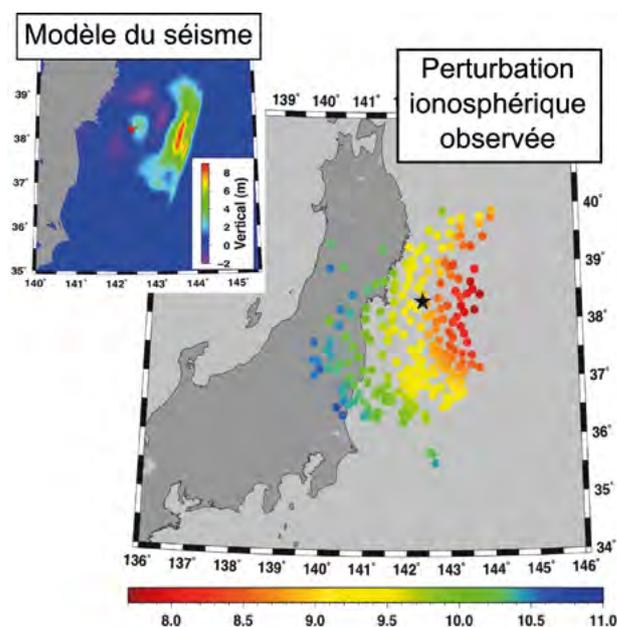
En croisant les informations apportées notamment par les capteurs géodésiques, sismologiques et tsunami, nous avons cherché à obtenir la description la plus détaillée possible du glissement sur le plan de faille au cours de la rupture sismique. Ce type d'information permet d'améliorer la compréhension des conditions de contrainte et de friction qui ont mené à un tel séisme, mais aussi d'avoir une base pour l'interprétation des phénomènes associés au séisme : lien avec de possibles mouvements de déformation observés avant ou après le séisme, avec des perturbations observées dans la haute atmosphère ou dans les données de tsunami.

Pour la mise en évidence de ces phénomènes associés, les efforts se sont notamment concentrés sur l'exploitation des données fournies par le très dense réseau terrestre de stations GPS japonais GEONET (environ 1 200 stations permanentes et haute performance réparties sur l'archipel), qui permet de sonder à la fois les mouvements fins de la Terre solide mais aussi les perturbations qui se propagent dans l'atmosphère via l'analyse des perturbations du signal satellitaire.

## — Résultats majeurs

Le principal résultat scientifique est la démonstration que les ondes générées par le séisme de Tohoku-Oki laissent une empreinte dans la haute atmosphère (ionosphère) de l'étendue spatiale de la rupture et que cette information peut être utilisée pour améliorer de façon significative l'alerte rapide aux tsunamis, en précisant l'estimation fournie classiquement par les réseaux sismologiques.

La démonstration a été faite pour Tohoku-Oki en extrayant les perturbations de la haute atmosphère enregistrées en moins de 10 minutes par le réseau de stations GPS japonais. Un tsunami du type de Tohoku-Oki met en général 20-30 minutes à atteindre les côtes les plus proches, ce qui laisse une marge de temps importante pour prendre les mesures idoines et évacuer les populations les plus directement exposées.



Comparaison du mouvement vertical causé par le séisme de Tohoku-Oki, déduit des données sismologiques, géodésiques et tsunami (figure en haut à gauche) et de la perturbation observée dans la haute atmosphère (ionosphère) grâce au réseau de stations GPS japonais (figure en bas à droite). La première image résulte d'un important travail d'analyse et de croisement des données alors que la deuxième image est obtenue en 10 min par un simple travail de traitement de données.

## — Production scientifique et brevets

À la fin du financement du projet TO\_EOS (mars 2013), les travaux réalisés ont été valorisés à travers plusieurs articles dans des revues internationales à comité de lecture (6 à ce jour) et un grand nombre de communications dans des congrès internationaux (18 à ce jour).

**Le projet TO\_EOS** «Tohoku-Oki earthquake from Earth, Ocean and Space» est un projet de recherche fondamentale coordonné par le laboratoire Géoazur, Sophia-Antipolis. Le projet associe également l'Institut de Physique du Globe de Paris (IPGP), le laboratoire de l'École Nationale des Sciences Géographiques (ENSG) et le Laboratoire de Détection et de Géophysique (LDG) du CEA. Le projet a commencé en octobre 2011 et a duré 18 mois. Il a bénéficié d'une aide ANR de 100 000 €.

**CONTACT**

**Anthony Sladen** : sladen@geoazur.unice.fr

# TOLTECA

## Un système de communication satellite pour la surveillance climatique et la prévention des désastres

### — Un système de communication satellite pour la surveillance climatique basé sur un émetteur-récepteur radiofréquence reconfigurable

Selon un rapport émis par l'ONU, le Mexique est le pays où les pertes économiques dues aux catastrophes naturelles sont les plus importantes. Au cours des 10 dernières années, le Mexique a perdu 18 milliards de dollars, dont 92% à cause d'inondations et d'ouragans. Le changement climatique résultant de l'exploitation non mesurée des ressources naturelles a accru la prévalence et la force de ces phénomènes au cours des dernières années.

Le projet TOLTECA vise à développer un système de communication par satellite pour la surveillance du climat et la prévention de catastrophes naturelles. Ce nouveau système de communication permettra l'exploitation de nano-satellites dédiés à la surveillance de zones sensibles de la Terre afin de détecter rapidement des inondations ou des incendies de forêt.

Le système de communication est principalement basé sur plusieurs nouveaux circuits intégrés. Ces circuits sont dotés d'importantes capacités de configuration aussi bien dans la partie Radio Fréquence (RF) analogique que le traitement en bande de base numérique. Ces puces doivent également être durcis pour résister aux rayonnements spatiaux.

### — Un émetteur-récepteur hautement numérisé basé sur des convertisseurs Sigma-Delta Passe-bande et un circuit numérique programmable

Le circuit proposé est installé dans les nano-satellites. Il reçoit les signaux d'une caméra, traite les images et transfère les images compressées vers la station terrestre. Il peut également communiquer avec les autres nano-satellites pour agir en tant qu'essaim et améliorer la qualité des données surveillées. Les communications inter-satellites et les communications entre les satellites et les stations terrestres nécessitent différents standards fonctionnant à différentes fréquences. Les principaux composants du système proposé dans le projet TOLTECA sont les suivants :

► 1. Sorbonne Université :

La chaîne de transmission RF reconfigurable est basée des convertisseurs analogique-numérique et numérique-analogique de type Sigma-Delta Passe-bande.

► 2. NanoXplore :

Un circuit numérique reconfigurable (FPGA) fournit le matériel nécessaire pour développer les différents standards de communications satellites.

► 3. CINVESTAV :

Les algorithmes de traitement numérique en bande de bases sont différents selon le standard de communication utilisé.

► 4. UAZ :

Logiciel de traitement des images transmises pour détecter les risques d'inondation et des feux de forêt.

### — Résultats majeurs

► Licences d'exploitation : Un contrat de licence entre Sorbonne Université et la société Seamless Waves.

► Créations d'entreprises : Création de la société « Seamless Waves », spin-off de Sorbonne Université.

► Nouveaux projets collaboratifs : Projet DGA/DGE RAPID : FLEXyRADIO «Flot de conception Et composants innovants dédiés à l'IoT et auX systèmes RADIOcom ».

► Fabrication de 3 puces électroniques : Conception, fabrication et mesure de 2 récepteurs RF et un convertisseur numérique-analogique pour un émetteur RF.

► Deux brevets et une publication ont déjà été publiés.

### — Production scientifique et brevets

► US PATENT: US-9306594 [Sorbonne Université/CNRS], D. Belfort, A. Ashry, N. Beilleau and H. Aboushady.

EUROPEAN PATENT : EP3261258A1, [Sorbonne Université / CNRS], A. Sayed, T. Badran and H. Aboushady.

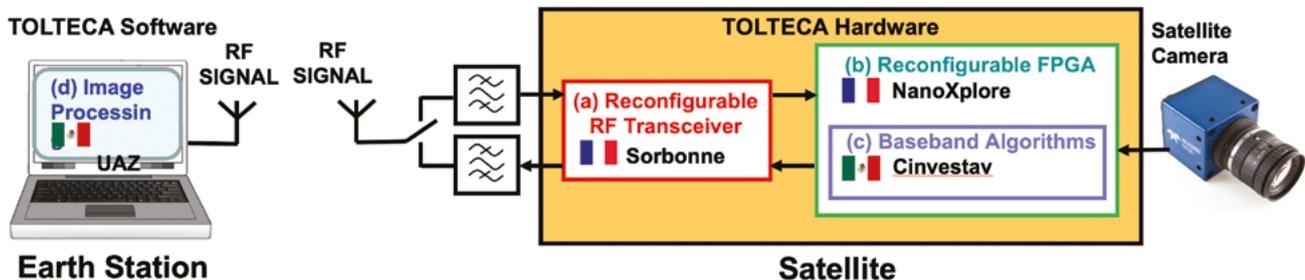
► D. Haghightalab, D. Belfort, A. Kilic, A. Benlarbi-Delai and H. Aboushady, « A 2.4 GHz ISM-band Highly Digitized Receiver based on a Variable Gain LNA and a Subsampled Sigma-Delta ADC », Journal of Analog Integrated Circuits and Signal Processing, Springer, Volume 95, Issue 2, Pages 259-270, May 2018.

**Le projet TOLTECA** est un projet de recherche industrielle Franco-Mexicain ANR-CONACyT coordonné par Le Laboratoire LIP6, Sorbonne Université, Paris, France et CINVESTAV, Guadalajara, Mexique. Il associe la PME Française NanoXplore ainsi que l'Université Autonome de Zacatecas (UAZ), Mexique. Le projet a commencé en janvier 2017 et a duré 22 mois. Il bénéficie d'**une aide ANR de 249 787 €** pour un coût global de 1 099 189 €.

#### CONTACT

**Hassan Aboushady** : hassan.aboushady@lip6.fr,  
www-soc.lip6.fr/hassan/tolteca

Les principaux composants du système TOLTECA : (a) Émetteur-récepteur RF reconfigurable réalisé par Sorbonne Université, (b) Circuit numérique reconfigurable (FPGA), développé par NanoXplore, (c) Traitement numérique en bande de base, développé par CINVESTAV et (d) Logiciel de traitement d'images, développé par UAZ.



# TRANSADAPT

## Une recherche européenne sur les initiatives locales de gestion multiusage des risques d'inondation

### — Accompagner et adapter les territoires inondables aux enjeux sociaux et économiques

Le risque, sous l'influence du changement climatique et des mutations urbaines, questionne les pouvoirs publics sur de possibles solutions innovantes. Les politiques publiques de gestion des risques favorisent désormais la diversification des stratégies et attribuent plus de poids aux collectivités et aux citoyens. TRANSADAPT se concentre sur les dynamiques ascendantes de gestion alternative des risques d'inondation. Ces initiatives n'ont pas pour but de transformer la société, mais de répondre à des problèmes locaux. Elles proposent des leviers pour faciliter le changement vers des politiques marquant ainsi une distance vis-à-vis des pratiques étatiques.

L'utilisation multifonctionnelle d'un lieu (parc, loisirs, festival, sport, jardinage, pêche...) présente un intérêt pour la prévention d'inondation. La combinaison de plusieurs fonctions dans l'espace, sur différentes parcelles d'un même site ou dans le temps sur un même site permet au moins une utilisation territoriale de terres qui servent avant tout à gérer les inondations. La multifonctionnalité propose ou impose l'implication d'acteurs et d'intérêts qui pour dépasser les conflits, invente des formes de gouvernance de l'inondation.

### — Analyser et évaluer des initiatives locales de gestion alternative des risques

TRANSADAPT analyse les initiatives locales de multiusage des sites inondables en éclairant les leviers qui définissent les initiatives multifonctionnelles locales en zones inondables. Les connaissances présentent les pratiques d'usage multifonctionnel des espaces et développent des recommandations pour impulser d'autres initiatives. Nous cherchons en quoi les approches multifonctionnelles à la réduction des risques sont prometteuses pour résoudre des problèmes de gestion des risques d'inondation et pour tirer des enseignements sur la gouvernance locale. TRANSADAPT s'intéresse à des cas d'études en Autriche, France, Irlande et Pays-Bas.

Un cadre d'évaluation est composé de huit critères qui permettent d'évaluer les initiatives ascendantes, les mesures d'atténuation, les processus et les résultats liés aux usages multifonctionnels. Nous utilisons un ensemble multidisciplinaire de critères : efficacité, efficacité, légitimité, responsabilité, justice, capacité, vulnérabilité, faisabilité. Un second cadre d'analyse est basé sur l'Analyse Formative de Scénarios permet une analyse exploratoire. L'objectif est d'élaborer des scénarii de mise en oeuvre d'initiatives locales.

### — Résultats majeurs

- ▶ 1. Les aménagements multifonctionnels donnent une polyvalence aux zones inondables qui fournissent alors un espace public de grande qualité, pour les espaces riverains et pour la biodiversité.
- ▶ 2. La mise en place de solutions innovantes multifonctionnelles redynamise une gouvernance locale.
- ▶ 3. La mise en place de solutions innovantes multifonctionnelles permet aussi de tisser des synergies entre les règles environnementales et les règles de gestion des crues. Ainsi, les parties prenantes peuvent tenter d'aligner différentes législations pour atteindre leurs objectifs.

### — Production scientifique et brevets

- ▶ 2 posters présentés en juillet 2015 à l'UNESCO (*Our Common Future under Climate Change*, Paris).
  - ▶ 3 articles académiques :
    - Bonnefond M., Fournier M., Servain S., Gralpeois M., *La transaction foncière comme mode de régulation en matière de protection contre les inondations*. Revue Risques Urbains, Vol 17- 2, 2017.
    - Mees H.; Alexander M.; Gralpeois M.; Matczak P.; Mees H., *Typologies of citizen co-production in flood risk governance*, Environmental Science and Policy, vol. 89, november 2018, pp. 330-339.
- Mais aussi des communications orales (AESOP.), une réunion d'experts et d'élus (octobre 2017 au Sénat) et un ouvrage en préparation.

**Le projet TRANSADAPT** est un projet de recherche fondamentale coordonné par PD Dr. Sven Fuchs, Université des Ressources naturelles et des Sciences de la vie de Vienne. Il associe les laboratoires de Austrian Federal Ministry of Science, Research and Economy (BMWF), the Ireland Environmental Protection Agency (EPA) and the Netherlands Organisation for Scientific Research (NWO). Le projet a commencé en novembre 2014 et a duré 48 mois. Il a bénéficié d'une aide ANR de 86 453 € pour coût global de 297 582 €.

#### CONTACT

PD Dr. Sven Fuchs : sven.fuchs@boku.ac.at, [www.jpi-climate.eu/projects/transadapt](http://www.jpi-climate.eu/projects/transadapt)

Ensemble de critères multidisciplinaires (Gatien-Tournat, Gralpeois, 2015).

TRANSADAPT		Bottom-up initiatives for non traditional flood management	
		Process	Outcome
Evaluation criteria	Governance criteria	Efficiency; Effectiveness; Accountability; Legitimacy; Social Justice; Social Capacity	
	Design-oriented criteria	Technical Feasibility; Vulnerability	

## TRANSRISK<sup>2</sup>

# Géohistoire transnationale de la gestion des risques d'inondations dans le Rhin Supérieur

### — Pourquoi reconstituer l'histoire des inondations et de leur gestion dans le Rhin Supérieur ?

En discutant avec les acteurs des territoires et le public, il est apparu que le Fossé Rhénan et l'Alsace en particulier souffraient d'un profond déficit en matière de culture du risque d'inondation (mémoire défaillante, connaissance mal partagée, etc.), entraînant une sous-évaluation des phénomènes extrêmes et des vulnérabilités.

Le projet TRANSRISK<sup>2</sup> s'est donc fixé pour objectif de répondre à ces questionnements et aux attentes des acteurs des scènes locales du risque (DDT, DREAL, etc.), en réalisant, pour le Rhin Supérieur, la Sarre et la Moselle, une base de données transnationale sur les inondations historiques depuis 1480. Les administrations compétentes ont été d'autant plus vivement intéressées, que cela s'inscrivait dans les objectifs de la Directive européenne « Inondations ». Mais, pour reconstituer les inondations majeures, les hiérarchiser et les utiliser pour améliorer la prévention, il faut comprendre leur évolution dans le temps et dans l'espace (une « géohistoire »). Le projet TRANSRISK<sup>2</sup> a donc également étudié le rôle des changements dans l'occupation des sols, des aménagements et des politiques de gestion à toutes les échelles, notamment à travers une comparaison franco-allemande.

### — Démarche historico-progressive pour reconstituer les inondations et leur gestion dans le Rhin Supérieur

L'essentiel du travail a porté sur des dépouillements d'archives variées, afin de reconstituer la chronologie hiérarchisée des inondations pour les principaux cours d'eau du Fossé Rhénan. Il s'agissait d'obtenir des informations exhaustives depuis 1480, en essayant de combler les pertes, les destructions, liées à l'histoire compliquée de cette région. La même démarche a permis de reconstituer l'évolution de l'occupation du sol pour en évaluer le rôle dans l'évolution des inondations. La reconstitution des inondations s'est faite à travers une démarche historico-progressive, associant témoignages, images, etc. pour retrouver les hauteurs anciennes et les transposer dans la période actuelle.

Nous avons également utilisé les logiques floues pour convertir des informations qualitatives en données quantitatives. Le rôle des facteurs anthropiques a été mis en évidence à travers une démarche géohistorique théorisée durant le projet, en confrontant les géo-chronologies (chronologies comparées des faits et de leur facteurs explicatifs). Pour comparer l'action des politiques publiques en termes de prévention des inondations (France – Allemagne), on a rajouté à l'étude historique, une enquête sur la perception et la mémoire des inondations.

### — Résultats majeurs

Les principaux résultats portent sur la reconstruction d'une culture du risque par la mise à disposition et le partage d'une information historique méconnue, oubliée, niée (les inondations extrêmes) via la plate-forme TAMBORA et le site internet participatif ORRION. Ces actions ont permis de développer des collaborations autour de la gestion des risques d'inondation avec les collectivités territoriales (Conseil Départemental du Haut-Rhin, DDT du Haut-Rhin, DDT du Bas-Rhin, DREAL Alsace, Eurométropole de Strasbourg, Syndicat des Eaux et de l'Assainissement Alsace-Moselle) et avec le bureau d'étude MAYANE.

Dix années de recherches appliquées se concrétiseront en 2020 à travers la co-organisation avec les acteurs des territoires, des commémorations régionales et transnationales du centenaire des grandes inondations de décembre 1919 et janvier 1920.

### — Production scientifique et brevets

Les équipes participantes ont publié 23 articles et réalisé 47 communications lors de colloques nationaux et internationaux, et de séminaires de vulgarisation. Ces productions se poursuivent bien au-delà de la fin du programme. En matière de recherche appliquée, le projet a permis de travailler en collaboration avec des bureaux d'étude et des collectivités territoriales en charge de la gestion préventive des risques d'inondation, dans les départements du Haut-Rhin, du Bas-Rhin et de la Moselle. Ces actions continuent après la fin du projet car elles reposent désormais sur les liens solides et durables.

**Le projet TRANSRISK<sup>2</sup>** est un projet franco-allemand de recherche fondamentale et appliquée coordonné par Brice MARTIN (CRESAT) pour la partie française, Rüdiger GLASER (IPG) pour la partie allemande. Il associe aussi le laboratoire GESTE – IRSTEA, Strasbourg. Le projet a commencé en février 2014 et a duré 44 mois. Il a bénéficié d'une aide ANR de 239 855 € pour un coût global de 1 267 178 €.

#### CONTACT

**Brice Martin** : brice.martin@uha.fr, www.orrion.fr



Repères de crue posés par le SDEA Alsace – Moselle sur le pont du Giessen à Sélestat. Action réalisée dans le cadre d'une convention avec les chercheurs ayant participé au programme TRANSRISK<sup>2</sup>. (Crédit photo : Jean Gerling, SDEA, 2018).



## TWIST

## Résistance de l'arbre aux vents forts

## — Risques tempêtes en forêt et ancrage des arbres

Les dégradations liées au vent s'élèvent actuellement à 50 % du volume des dégâts dans les forêts européennes et vont doubler voire même quadrupler avant la fin du siècle en raison du changement climatique (Gardier et al., 2010). Ces dommages ont un impact considérable sur la filière bois et sur le fonctionnement écologique et la survie des forêts en Europe. La majorité des arbres sont détruits par arrachement lors des tempêtes. D'importants efforts ont été consentis cette dernière décennie pour modéliser la réponse des parties aériennes à des sollicitations turbulentes. En revanche, l'interaction mécanique racines-sol et le rôle de l'humidité et de la fatigue du sol sont encore mal connus.

Le projet TWIST s'articule en trois parties. La première vise à estimer les effets des conditions de sol sur la stabilité des arbres, notamment le niveau de saturation en eau du sol lors des épisodes de tempêtes. La deuxième partie a pour but d'établir une méthode pour prévoir l'occurrence de ruine de l'arbre par arrachage (chablis) à l'échelle de l'arbre en fonction des conditions microclimatiques (conditions de turbulence, humidités du sol contrastées). La troisième partie de TWIST concerne le développement d'un modèle simplifié de déracinement sous le vent incluant les connaissances acquises par notre approche mécanistique. Ce modèle simple pourra alors être utilisé pour estimer des risques à une échelle régionale.

## — Modéliser et mesurer le mouvement de l'arbre sous le vent

TWIST s'est focalisé sur le pin maritime cultivé en sol sableux, représentatif de la forêt des Landes en région Aquitaine. Ce massif forestier joue un rôle économique, social et écologique majeur et il a été fortement endommagé par les tempêtes ces 15 dernières années.

L'Aquitaine est une région particulièrement dynamique dans le domaine de la recherche sur le bois et les forêts, avec le développement de modèles d'écoulements turbulents et de biomécanique, ainsi que des bases de données sur le pin maritime. TWIST comporte 3 axes méthodologiques : (i) le développement de modèles de biomécanique de l'arbre dans le sol (collaboration avec T. Fourcaud, CIRAD, UMR AMAP, Montpellier), (ii) le développement d'un modèle d'écoulement turbulent basé sur des paramètres facilement accessibles (iii) la réalisation d'essais de laboratoire pour mesurer la résistance du système sol-racines, (iv) la mise en place d'expérimentations de terrain pour étudier les effets des conditions d'humidité du sol et des sollicitations dynamiques sur la résistance globale du système sol-arbre (collaboration avec F. Danjon, INRA, UMR BIOGECO, Bordeaux).

## — Résultats majeurs

Les résultats majeurs du projet sont : (i) une méthode pour hiérarchiser les facteurs d'ancrage (racines, sol) impliquant un nouveau modèle d'ancrage (ii) une méthodologie pour prévoir l'occurrence de l'arrachement par le vent à l'échelle de l'arbre en fonction des conditions climatiques locales (iii) la simplification des relations entre l'ancrage et les propriétés du sol et des racines pour aboutir dans le futur à un modèle d'ancrage dont les paramètres sont facilement accessibles et l'intégrer dans les modèles de risque au vent à plus grande échelle.



Mesure de l'ancrage des arbres par des essais de flexion in situ : système racinaire d'un pin maritime adulte (hauteur de l'arbre 26 m) après renversement. Crédit photo : D. Garrigou (INRA).

## — Production scientifique et brevets

Ces résultats scientifiques font actuellement l'objet de 11 publications et communications internationales et 5 communications en France. La valorisation de l'ensemble des résultats est encore en cours. Les résultats ont également été diffusés auprès des professionnels de la filière bois-forêt lors de journées et de table ronde organisées au cours du projet. Ils seront diffusés auprès du grand public en 2019 lors de documentaires télévisuels.

**Le projet TWIST** est un projet de recherche fondamentale Jeune Chercheur/Jeune Chercheuse coordonné par Pauline Défossez (UMR ISPA, INRA). Le projet a commencé en octobre 2013 et a duré 48 mois. Il a été labellisé par le pôle de compétitivité Xylo-futur. Le projet a bénéficié d'une aide ANR de 224 981 € pour un coût global de l'ordre de 1 554 k€.

**CONTACT**

**Pauline Défossez** : pauline.defossez@inra.fr,  
<http://www6.inra.fr/anr-twist>

## VOLCPLUME

## Impacts des panaches volcaniques sur l'atmosphère et le climat

## — Les émissions de gaz et de particules volcaniques, inconnues majeures

Ces dernières années, deux volcans islandais ont attiré notre attention. L'éruption explosive de l'Eyjafjallajökull en 2010 a émis d'abondantes quantités de cendres perturbant les échanges aériens et entraînant des pertes économiques considérables. Dans un registre différent, l'éruption Holuhraun du volcan Bárðarbunga en 2014-15 a émis en continu durant 6 mois des quantités prodigieuses de soufre engendrant une pollution massive de l'air à l'échelle européenne. Le projet VOLCPLUME vise à caractériser les émissions volcaniques de gaz et de particules (cendres et aérosols riches en soufre) à l'aide de procédures de modélisation inverse qui combinent l'exploitation d'un large panel d'observations des panaches volcaniques, depuis le sol et l'espace, ainsi que des outils de modélisation chimie-transport. Outre une meilleure évaluation des aléas volcaniques, l'objectif de ce projet est d'améliorer nos capacités de modélisation et de prévision de l'évolution physico-chimique d'un panache volcanique dans l'atmosphère pour mieux évaluer son impact potentiel sur la qualité de l'air, le trafic aérien et à plus long-terme sur le climat.

## — Exploitation d'un vaste panel d'observations sol/satellite à l'aide de modèles chimie-transport du panache volcanique

Nous cartographions le voyage du SO<sub>2</sub> volcanique à partir des observations satellitaires OMI, OMPS, IASI et TROPOMI. Les mesures satellitaires MODIS et IASI nous informent quant à elles sur l'abondance et la taille des particules volcaniques, tandis que les observations polarimétriques POLDER nous renseignent aussi sur leur composition chimique. Pour décrire la distribution verticale et la forme de ces particules, VOLCPLUME exploite également des mesures de télédétection LIDAR depuis le sol et l'espace (CALIOP). Conjointement, nous analysons les mesures de télédétection par photométrie du réseau AERONET pour déterminer les propriétés optiques, microphysiques et radiatives des particules volcaniques. Enfin, nous évaluons l'intensité de la pollution et la signature chimique des aérosols responsables de cette dégradation de la qualité de l'air à l'aide de mesures par spectrométrie de masse ACSM et des réseaux de surveillance de la qualité de l'air. Ce panel d'observations, exploité à l'aide du modèle de chimie-transport CHIMERE et de procédures de modélisation inverse, permet d'améliorer nos capacités de modélisation de l'évolution physico-chimique d'un panache volcanique et de ses impacts sur l'atmosphère.

## — Résultats majeurs

En rassemblant mesures de télédétection sol/satellite et observations in situ, VOLCPLUME a documenté la pollution de l'air à l'échelle européenne engendrée par l'éruption islandaise Holuhraun (2014-15). Il a montré que les aérosols sulfatés volcaniques ont des propriétés optiques, microphysiques, radiatives et chimiques très spécifiques qui nous permettent de les distinguer des aérosols troposphériques fins de fond dans des environnements variés. VOLCPLUME a également mis en lumière les difficultés rencontrées pour modéliser fidèlement une pollution de l'air d'origine volcanique, un exercice qui requiert de décrire le transport de panaches volcaniques sur de très longues distances mais aussi des processus atmosphériques locaux.

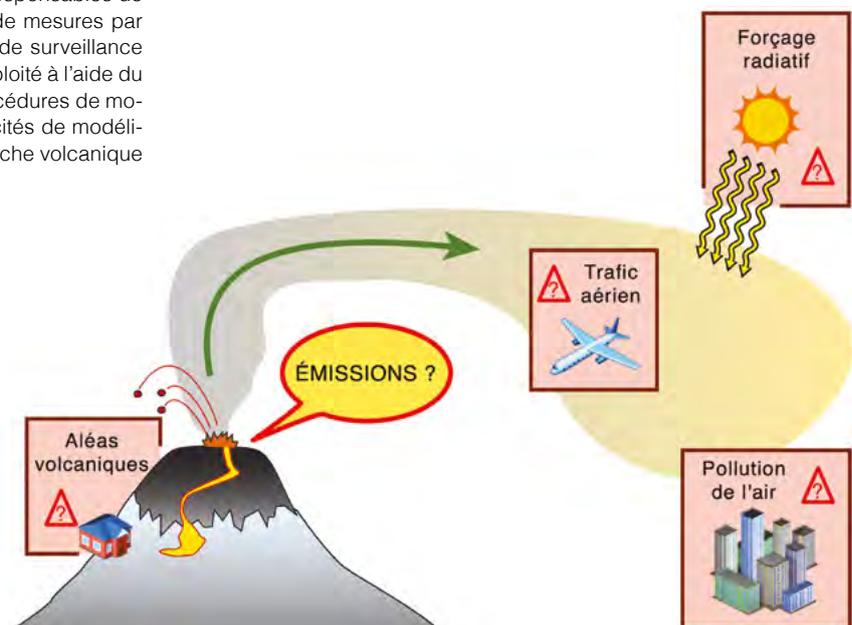
## — Production scientifique et brevets

- Boichu, M., Chiapello, I., Brogniez et al. (2016). Current challenges in modelling far-range air pollution induced by the 2014–2015 Bárðarbunga fissure eruption (Iceland). *Atmos. Chem. Phys.*, 16(17), 10831-10845. 10.5194/acp-16-10831-2016.
- Boichu, M., Favez, O., Riffault, V. et al. (2019). Large-scale particulate air pollution and chemical fingerprint of volcanic sulfate aerosols from the 2014–15 Holuhraun flood lava eruption of Bárðarbunga volcano (Iceland). *Atmos. Chem. Phys. Disc.*

**Le projet VOLCPLUME** est un projet de recherche fondamentale coordonné par le LOA (Laboratoire d'Optique Atmosphérique) à l'Université de Lille. Ce projet a débuté en Mars 2016 pour une durée de 62 mois. Il bénéficie d'une aide ANR de 244 k€ pour un coût global de 1,3 M€.

## CONTACT

Marie Boichu : [marie.boichu@univ-lille.fr](mailto:marie.boichu@univ-lille.fr)



Impacts des panaches volcaniques étudiés par le projet VOLCPLUME. Crédit : Marie Boichu (LOA).



Nous suivre sur :  @agencerecherche  ANR

[www.anr.fr](http://www.anr.fr) - [www.anr.fr/en](http://www.anr.fr/en)

**Conception et coordination éditoriale :**

Anne Lieutaud, Mélanie Pateau et Céline Billiere en collaboration  
avec la Direction de l'Information et de la Communication

**Conception et réalisation graphique :**

[www.ba-ba.fr](http://www.ba-ba.fr)

**Crédits photos :**

Adobe Stock