



OBSERVATIONS

SÉISMES ET VOLCANS : OBSERVER
POUR COMPRENDRE LES PROCESSUS
ET ÉVALUER LES ALÉAS

ÉROSION CÔTIÈRE

MESURER L'ÉROSION DES
FALAISES CÔTIÈRES DE CRAIE :
LE CAS DE DIEPPE

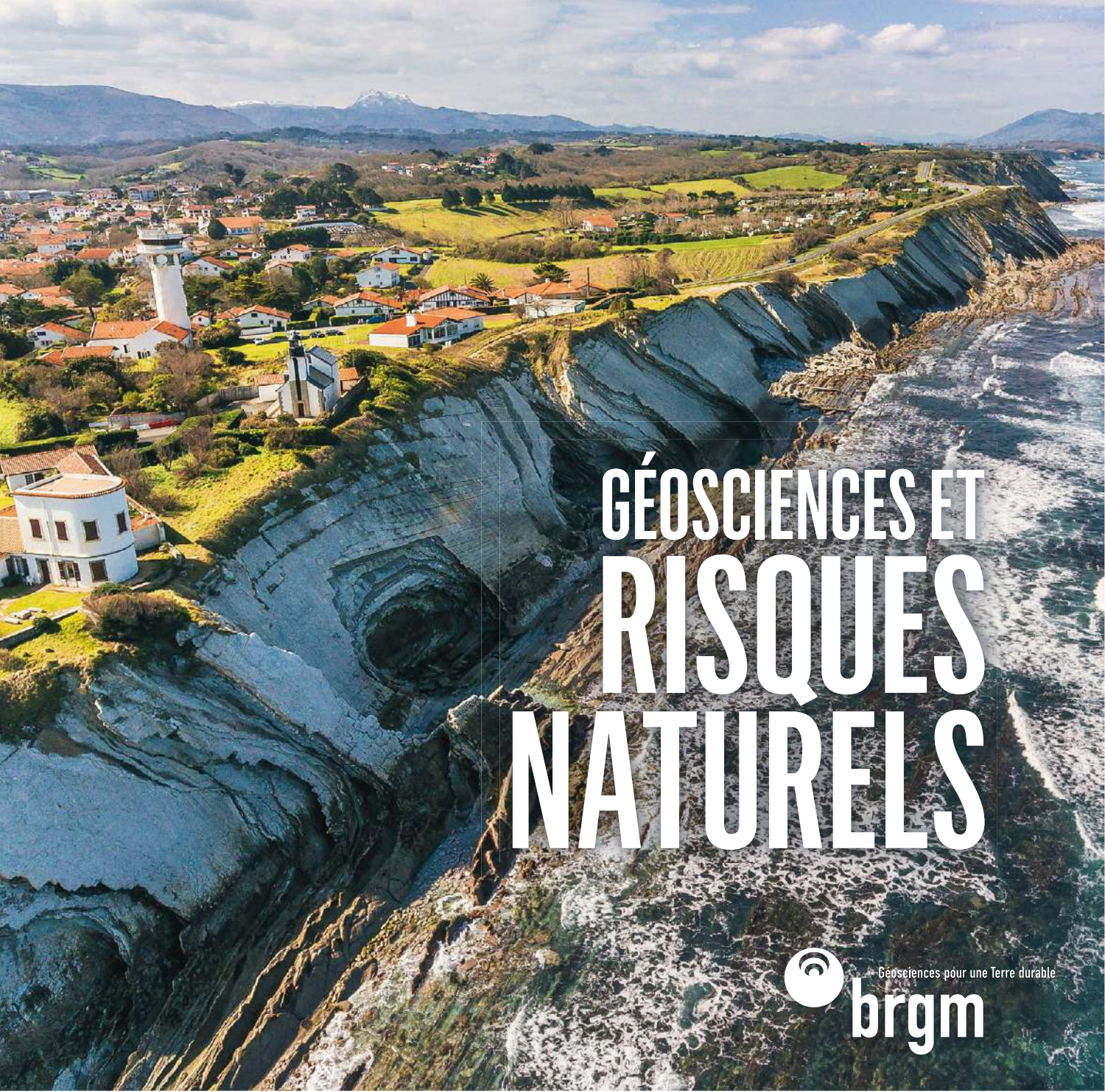
ARGILES

RETRAIT-GONFLEMENT
DES ARGILES : DE NOUVELLES
PERSPECTIVES DE DIAGNOSTIC

MARS 2019 / 12 €

géosciences N°23

LA REVUE DU BRGM POUR UNE TERRE DURABLE



GÉOSCIENCES ET RISQUES NATURELS

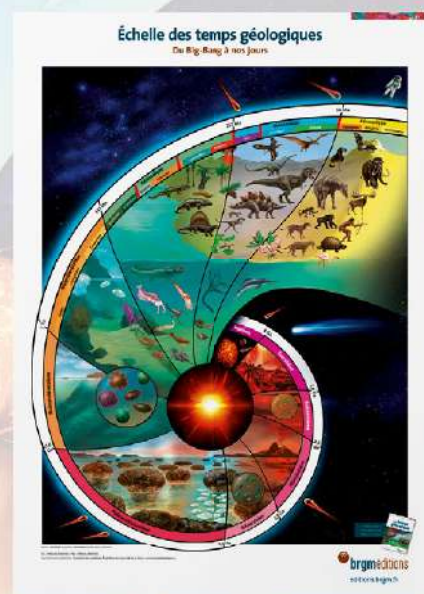
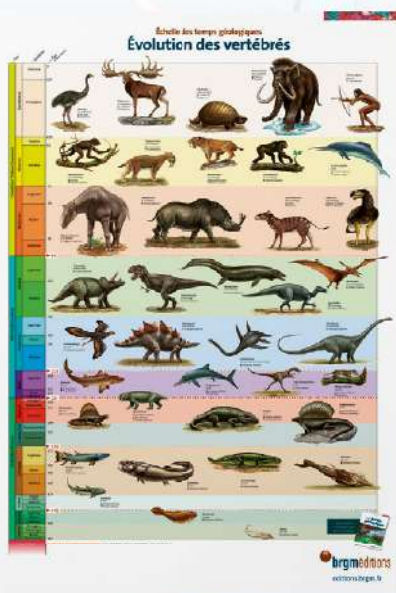


Géosciences pour une Terre durable

brgm

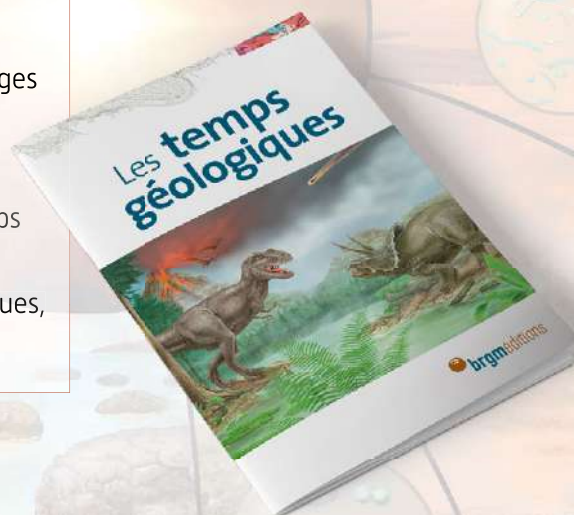
En route vers **le passé** ! Il est temps de **changer d'ère**...

Les **Éditions du BRGM** vous proposent une histoire à 4,5 milliards d'années avec un ouvrage et trois posters. L'histoire fascinante de notre planète n'aura plus de secrets pour vous.



Si les milliards d'années ont quelque chose de merveilleux et d'intrigant tant ces notions sont difficiles à appréhender, les géologues les manipulent au quotidien. La vie et les paysages des temps anciens étaient bien différents que ceux que nous connaissons.

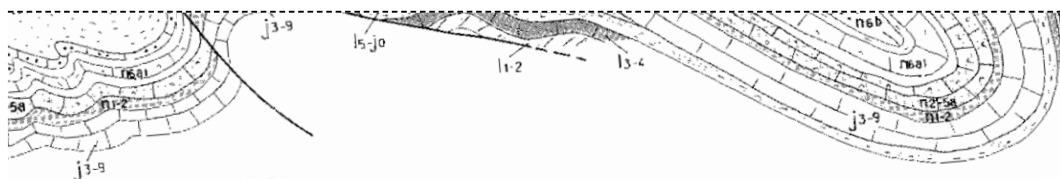
Cette collection vous permettra de naviguer à travers les temps géologiques et de franchir les jalons importants de la vie de notre planète : extinctions biologiques, changements climatiques, épisodes volcaniques majeurs, impacts d'astéroïdes, etc.



Pour commander : editions@brgm.fr



brgméditions



Cédric BOURILLET

Directeur général de
la prévention des risques,
Ministère de la transition
écologique et solidaire

L'apport de la géologie à la prévention des risques

La prévention des risques naturels repose sur un continuum d'actions qui va de la connaissance à la gestion de crise en passant par la prise en compte des risques dans l'aménagement ; elle requiert des activités de recherche et un appui à la puissance publique. Cela vaut en particulier pour les risques qui trouvent leur origine dans la géologie, les mouvements internes de la Terre générant des séismes et du volcanisme, la nature des terrains (calcaire, gypse,...) dont l'évolution peut menacer des enjeux humains.

Si l'humanité a cherché - et souvent réussi - à comprendre volcanisme et sismicité depuis l'Antiquité, le phénomène de séisme en essaim que connaît Mayotte actuellement est atypique et demande de nouvelles investigations scientifiques. Cela explique l'importance de la mobilisation requise pour identifier son origine (volcanisme, tectonique) et la source de la sismicité pour être en

mesure de proposer des mesures adaptées de réduction de la vulnérabilité.

Le changement climatique nous pose par ailleurs de nouveaux défis, par son impact sur l'érosion du trait de côte, les effondrements par ruissellement, les mouvements de terrain, les risques périglaciaires. Autre exemple : le retrait-gonflement d'argile qui impacte le bâti en périodes de sécheresse. Une évolution législative récente prévoit dans les zones les plus sensibles des études géotechniques lors de la vente du terrain et avant un projet de construction. Cette mesure devrait réduire considérablement le coût des dommages, si elle est menée sur les bons territoires.

Pour réduire la vulnérabilité de notre société, il faut progresser dans les connaissances scientifiques liées aux risques naturels.

Il faut être capable de disposer de zonages à large échelle pour identifier les parties du territoire les plus prioritaires, de cartes à l'échelle locale pour accompagner les politiques de l'État (type Plan de prévention des risques (PPR)) ou de collectivités, de diagnostics à petite échelle pour donner des garanties de succès à un projet ou mieux répondre à la survenance d'une crise.

Connaître l'aléa, c'est aussi permettre la culture du risque de chaque citoyen ou acteur économique ainsi que l'information préventive. Le site Géorisques qui met à disposition les données territoriales disponibles sur les risques permettra prochainement leur moissonnage automatisé. Il constitue le portail de référence pour contribuer à ces objectifs. ●



14



20

PHOTO DE COUVERTURE / Route de la corniche à Urrugne. L'expertise du BRGM sur le trait de côte se déploie notamment sur la côte aquitaine.

© OBSERVATOIRE DE LA CÔTE AQUITAINE, COM' BY AVM, 2018

Géosciences n°23 Mars 2019

**Service de la Communication
et des Editions du BRGM**
3, av. Claude Guillemin
45060 Orléans Cedex 2
Tél. 02 38 64 37 84
communication@brgm.fr

Directeur de la publication Pierre Vassal

Rédacteur en chef François Clin

Coordination de rédaction Agnès Noël

Coordinateurs scientifiques

Gilles Grandjean, *directeur du programme*

Risques naturels et résilience

Caroline Prognon, *Responsable de l'unité*

Géologie de l'aménagement des territoires,

direction des Géoressources

Comité de rédaction

Claudie Carnec (*Géosciences territoriales*)

Francis Garrido (*Géochimie environnementale*)

Gilles Grandjean (*Géophysique et risques naturels*)

Dominique Morin (*Géo-procédés et innovation*)

Philippe Negrel (*Métronologie et hydro-systèmes*)

Pierre Nehlig (*Données et diffusion géologiques*)

Michel Pichavant (*Pétronologie et géologie profonde*)

Jean-Philippe Rançon (*International*

et infrastructures géologiques)

Olivier Serrano (*Géologie sédimentaire*)

Pierre Touthoat (*Géochimie et ressources
minérales*)

Révision Agnès Noël,

MZ Editions, Olivier Legendre

Maquette et réalisation

EFIL – www.efil.fr

Impression Imprimerie Graphius (Belgique),
Imprimeur labellisé Imprim'vert.

Régie publicitaire

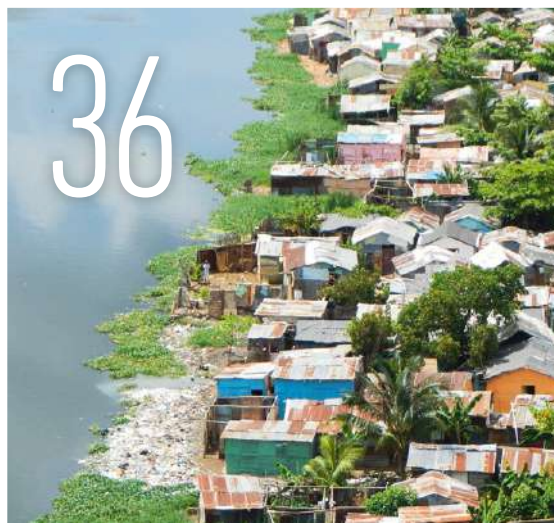
Aria Communication – 01 43 70 98 88

ISSN 1772-094X – ISBN 978-2-7159-2698-1

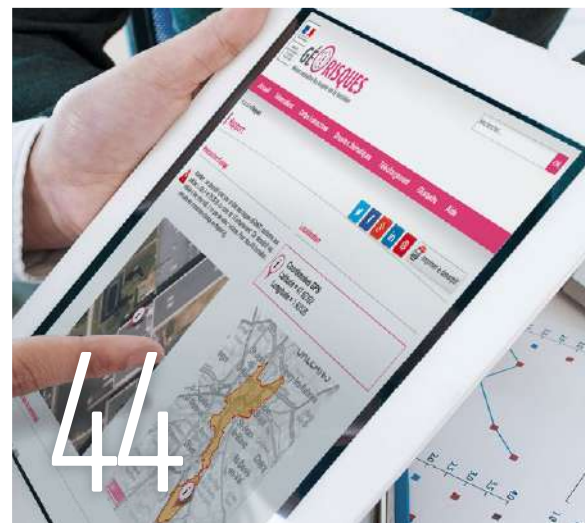
Dépôt légal à parution.

Toute reproduction de ce document,
des schémas et infographies, devra mentionner
la source *Géosciences, la revue du BRGM pour
une Terre durable*.

Le comité de rédaction remercie les auteurs
pour leur contribution.



36



44



50



58



70



78



SOMMAIRE

ÉDITO	1
INTERVIEW ROLAND NUSSBAUM	4
INTRODUCTION SCIENTIFIQUE	8
CHIFFRES CLÉS	12

MOUVEMENTS DE TERRAIN Les ruptures de versant rocheux : de l'observation à l'évaluation du risque	14
--	----

OBSERVATIONS Séismes et volcans : observer pour comprendre les processus et évaluer les aléas	20
--	----

ÉROSION CÔTIÈRE Mesurer l'érosion des falaises côtières de craie : le cas de Dieppe	28
--	----

PRÉVENTION DES RISQUES L'île d'Hispaniola face aux risques naturels : focus sur les contributions récentes du BRGM en matière de prévention	36
--	----

BASES DE DONNÉES GéoRisques : le numérique au service de la prévention des risques	44
---	----

ARGILES Retrait-gonflement des argiles : de nouvelles perspectives de diagnostic	50
---	----

RÉSILIENCE Résilience des territoires de montagne aux crues et laves torrentielles	58
---	----

CHANGEMENT CLIMATIQUE Ouranos AuRa : la science au secours des territoires de montagne	64
---	----

INONDATIONS Effondrements et inondation par ruissellement : la faute au karst ?	70
--	----

SÉISMES Les effets de site géologiques, caisson de résonance des ondes sismiques	78
---	----

TRAIT DE CÔTE Les dessous des dunes : approche pluridisciplinaire pour mieux caractériser l'évolution des édifices littoraux	84
---	----

TRIBUNES	
Le point de vue d'une élue sur le risque inondation	90
Aléas naturels et sûreté nucléaire : quelles avancées ?	90
Impacts des risques naturels sur les réseaux d'infrastructures de transport	92

CARNET DE TERRAIN	
À la recherche du bunker perdu	94

EN BREF	100
----------------	-----

INTERVIEW ROLAND NUSSBAUM

“ Pour une approche plus intégrée de la gestion des risques de catastrophes ”

Roland Nussbaum est directeur de la mission Risques naturels (MRN), une association créée en mars 2000 par les sociétés d'assurances et chargée de la connaissance et de la prévention des risques naturels. Selon lui, la culture de la prévention, présente de longue date dans la communauté scientifique, touche désormais plus globalement les décideurs. Des Assises nationales des risques naturels de mars 2019 aux accords internationaux de Sendai pour la réduction des risques de catastrophes d'ici 2030, il observe une prise en compte croissante des connaissances et avancées scientifiques sur les risques naturels à l'échelle planétaire.

La mission Risques naturels que vous dirigez depuis ses débuts, en 2000, a été créée par des compagnies d'assurances. Une instance de plus dans un paysage déjà très fourni en acteurs et événements, tant à l'échelle nationale qu'à l'échelle internationale...

— C'est vrai qu'il existe un grand nombre de parties prenantes dans les échanges qui concernent la connaissance et la prévention des risques naturels. Dans l'environnement de la MRN, au niveau national, les grands partenaires institutionnels sont notamment la Direction générale de la prévention des risques (DGPR) du ministère de la Transition écologique et solidaire et la Caisse centrale de réassurance (CCR). À trois, DGPR, CCR et MRN ont créé en 2012 l'Observatoire national des risques naturels (ONRN). Mais il faut également mentionner les diverses associations de collectivités, comme l'Association nationale des élus de bassin (ANEB). La quasi-totalité de ces acteurs institutionnels (plusieurs dizaines) est fédérée sous l'égide de l'Association française pour la prévention des catastrophes naturelles (AFPCN). Aux côtés du Conseil d'orientation pour la prévention des risques naturels majeurs (COPRNM), dont elle partage le président, cette

association fait fonction de plateforme nationale pour la réduction des catastrophes, au sens où l'entend l'ONU. Son grand forum national bisannuel, les Assises nationales des risques naturels (ANRN), dont la prochaine édition a lieu à Montpellier les 25 et 26 mars 2019, est destiné à réunir tout l'écosystème des acteurs de la gestion des risques naturels.

Vous avez cité l'ONU... À propos des processus et événements internationaux, il existe là encore une foultitude d'acteurs et de rendez-vous. Mais la conférence de Sendai, en 2015, a fixé un cadre dans lequel s'inscrivent désormais toutes les autres initiatives. Pouvez-vous nous en dire davantage ?

— Au Japon, en mars 2015, juste avant la COP 21 à Paris, les 187 États membres des Nations unies ont en effet adopté, la « Déclaration de Sendai », ainsi que le « Cadre de Sendai pour la réduction des risques de catastrophe 2015-2030 ». Ce dernier énonce sept objectifs de réduction des risques de catastrophe, assortis d'indicateurs destinés à mesurer leur réalisation au niveau mondial. Il s'agit de réduire considérablement, d'ici à 2030, les conséquences des catastrophes en termes de mortalité (100 000 morts



Roland Nussbaum,
directeur de la Mission
Risques Naturels
depuis 2000.
© CHRISTIAN ADNIN

de moins en moyenne par rapport à la période 2005/2015), le nombre des personnes touchées au niveau mondial (dans la même proportion), les pertes économiques directes, les dommages aux infrastructures et la désorganisation des services comme la santé et l'éducation.

Pour les Nations unies, c'est le bureau UNISDR (UN International Strategy for Disaster Reduction) qui est chargé du suivi de ce processus, notamment via les Global Platform for Disaster Risk Reduction, dont la sixième aura lieu du 13 au 17 mai 2019 à Genève. Il faut aussi savoir que l'Union européenne mène ses propres actions à travers une plateforme virtuelle nommée Disaster Risk Management Knowledge Center (DRMKC). Bref, les acteurs impliqués dans la connaissance des risques naturels sont aujourd'hui nombreux, tant dans la recherche que dans la société civile.

Vous qui suivez les sujets liés aux risques naturels depuis près de vingt ans, quelles évolutions majeures observez-vous ?

— À l'échelle internationale, j'ai la chance d'avoir observé les avancées du cadre d'action de Hyogo pour 2005-2015, puis, plus récemment donc, celles du cadre de Sendai pour 2015-2030. Pour ces feuilles de route, des différences sont clairement identifiables, notamment en termes de prévention, ainsi que le prévoit le septième objectif : faciliter l'accès aux systèmes d'alerte précoce multirisques et renforcer l'information sur les risques de catastrophe. Sendai incite aussi à faire et à reconstruire mieux après une catastrophe, le principe du « build back better », pour organiser les reconstructions en réfléchissant à la ville d'après et en finir avec la gestion des crises exposé. C'est une réelle avancée. Et puis il y a la question des indicateurs et du suivi, qui devrait obliger à obtenir des résultats...

Quels acteurs vous semblent aujourd'hui les plus en accord avec les préoccupations de prévention qui se font jour ?

— Je dirais que ce souci d'anticipation face aux risques naturels préexistait certainement dans la communauté scientifique, alors qu'il a tardé à se faire entendre chez

les décideurs. Toutefois, les collectivités et l'État ont beaucoup progressé dans ce domaine au cours des vingt dernières années. Nous pouvons citer ne serait-ce que les Programmes d'actions de prévention des inondations (Papi) qui existent depuis 2003, mais aussi les Établissements publics territoriaux de bassin (EPTB) ou, plus récemment, les Établissements publics d'aménagement et de gestion des eaux (Epage), créés en 2016, qui interviennent notamment dans la prévention des inondations et des submersions marines. Autre exemple : le Centre européen de prévention des risques d'inondation (Cepri), dont la MRN est membre, qui a justement été créé dès 2006 par une collectivité : le Conseil général du Loiret. Le monde de la construction, lui, reste encore trop peu présent. Certes, il est évident que toute activité de reconstruction, qu'elle soit liée à une catastrophe naturelle ou non, représente du PIB, du chiffre d'affaires pour ce secteur... Mais nous pensons qu'il aurait un rôle majeur à jouer auprès des autres acteurs. Il est déjà un peu présent dans l'AFPCN, mais nous devons trouver avec lui d'autres modes d'implication.

Qu'est-ce qui a motivé la Fédération française des sociétés d'assurances (FFSA) et le Groupement des entreprises mutuelles d'assurance (Gema) à créer la MRN dès 2000 ?

— Les assureurs, désormais réunis au sein de la Fédération française de l'assurance (FFA), ont pris cette décision au lendemain des catastrophes naturelles de l'année 1999. Il y a bien sûr eu la tempête, mais surtout les inondations dans le sud de la France, les crues les plus graves depuis le début du siècle dans les départements de l'Aude, du Tarn, des Pyrénées-Orientales et de l'Hérault, qui ont fait plusieurs dizaines de morts et des dégâts conséquents. Or, les assureurs disposaient déjà d'un tableau « CatNat » relativement inquiétant depuis les années 1990 et les dommages liés à l'impact des sécheresses géotechniques en termes de retraitements des argiles. Le régime d'indemnisation des catastrophes naturelles, comme celui de l'assurance construction, a alors été mis en danger. Et, grâce aux



travaux du BRGM pour cartographier la susceptibilité des sols à la sécheresse, nous avons su que ces aléas liés aux épisodes de sécheresse allaient se multiplier.

S'il fallait établir un palmarès des risques naturels majeurs en France aujourd'hui, quel serait-il ?

– D'après l'historique des indemnisations versées par les assureurs aléas naturels en 25 ans, entre 1988 et 2013 (près de 2 milliards d'euros par an), 50 % sont liées aux tempêtes et épisodes de grêle et de neige, tandis que 34 % concernent les inondations et 16 % la sécheresse. Pour les 25 années à venir (2014-2039), les prévisions de la FFA, qui prennent en compte les effets du changement climatique, évoquent un triplement de la charge annuelle liée à la sécheresse, un doublement de cette charge pour les inondations et un surcoût de 4 milliards d'euros pour la submersion (+12 %). Hors tempêtes atmosphériques – à défaut de consensus scientifique sur l'impact du changement climatique sur le vent – les indemnisations consécutives aux catastrophes naturelles pourraient quasiment doubler, passant de 48 milliards d'euros pour les 25 dernières années à 92 milliards d'euros en 2040 !

Et à l'échelle mondiale ?

– Selon la publication Sigma de la société de réassurance Swiss Re Institute, les catastrophes naturelles les plus fréquentes dans le monde en 2017 ont été les tempêtes (82), suivies des inondations (55), des sécheresses et canicules (14) et des séismes (12). En revanche, en nombre de victimes, les inondations (3515) dépassent de loin les tempêtes (1642) et les séismes (1184)...

Dans ce contexte, quels sont les apports potentiels des travaux de la communauté scientifique et plus globalement de la recherche ?

– Ils sont majeurs. Quand j'évoque la carte de susceptibilité à la sécheresse géotechnique ou celle qui répertorie les risques liés aux remontées de nappes, je parle d'outils capitaux pour le travail de la MRN en particulier et celui de la prévention des risques naturels en général. Notre propre mission s'est ainsi développée dès l'origine en lien avec les réalisations du BRGM : ce sont des relations qui existent et qui mériteraient certainement d'être renforcées. Et ce, même s'il y a eu quelques rendez-vous manqués, comme l'alimentation d'une base de données conjointe, avec les relevés d'experts géotechniciens missionnés, sur le terrain, par les assureurs. Des conventionnements pourraient exister pour mieux exploiter cette connaissance inédite, même si, de notre côté, nous travaillons davantage aux conséquences des aléas qu'à leur phénoménologie.

D'ailleurs, la MRN a fortement amplifié ses propres efforts de recherche au cours des dernières années...

– C'est exact. La compétence technique et scientifique de la MRN n'a cessé de s'accroître. Nous avons notamment signé plusieurs conventions Cifre (Conventions industrielles de formation par la recherche) pour permettre à de jeunes ingénieurs destinés à l'univers de l'assurance

/

« Sendai incite aussi à faire et à reconstruire mieux après une catastrophe, le principe du « build back better », pour organiser les reconstructions en réfléchissant à la ville d'après. »

/

de travailler sur des outils d'aide à l'analyse de l'exposition aux aléas naturels. Le SIG MRN, qui est aux assureurs ce que le Géorisques du BRGM a été ensuite au grand public, a vu le jour de cette manière, en croisant les productions de différents organismes sur les inondations, les séismes, la sécheresse, les mouvements de terrain, etc. Nous avons également encouragé une thèse sur la pertinence de la couverture des plans de prévention des risques (PPR), la création de la base de données à maille communale Silecc (Sinistres indemnisés liés aux événements climatiques), ou encore une étude Cat Clim Data d'analyse de l'endommagement du bâti et de ses composantes (réseaux, menuiseries, charpentes, fondations, etc.) suite à des événements climatiques en France. Les assureurs français comptent sur nous pour augmenter leur niveau d'expertise. Il n'y a pas d'équivalent de la MRN partout, même si on peut citer l'IBHS américain (Insurance Institute for Business and Home Safety) et l'ICLR canadien (Institute for Catastrophic Loss Reduction) avec lesquels nous sommes en contact.

Ces instituts, tout comme de nombreux acteurs du monde entier concernés par les risques naturels, devraient se retrouver du 16 au 18 octobre 2019 en France...

– En effet. J'ai pu contribuer à convaincre le professeur Norio Okada, son président, d'accueillir ici la prochaine conférence Idrim (Integrated Disaster Risk Management), un rendez-vous dont ce sera le dixième anniversaire et qui attire chaque année des experts de haut niveau issus de nombreux pays. Je peux d'ores et déjà dire que le BRGM sera convié à participer au comité d'organisation, comme au comité scientifique. Ce sera sans aucun doute un temps fort pour tous ceux qui travaillent ici sur la question des risques naturels. Rendez-vous en octobre, donc, à l'Imredd (Institut méditerranéen du risque, de l'environnement et du développement durable), à Nice !



La donne géologique ou le dessous des cartes

François CLIN

Rédacteur en chef

F.Clin@externe.brgm.fr

MOT DU RÉDACTEUR EN CHEF

Les connaissances géologiques étayent les démarches prédictives, que ce soit en prospection du sous-sol ou en cindynique de surface. Elles s'élaborent principalement par des approches de corroborations à la fois des différentes disciplines géoscientifiques et de retours diversifiés de constats événementiels ou techniques du terrain.

Les concepts d'objets géologiques et de leurs processus en guident la lecture des continuités et des discontinuités. Ils structurent alors les fondements de référentiels géoscientifiques thésaurisant d'importants corpus de données géo-référencées des territoires.

La fourniture de ces informations, construite sur le long terme, est un prérequis essentiel pour le développement d'une ingénierie géoscientifique du risque et son paramétrage opérationnel.

Car en effet les premiers aléas à instruire dans notre sous-sol sont ceux de la prédiction de son passé... ●

La géologie dans l'évaluation des risques

Le cadre de Sendai a été adopté par les États membres des Nations unies le 18 mars 2015 lors de la troisième conférence mondiale des Nations unies sur la réduction des risques naturels (UNISDR, 2015). Un certain nombre de recommandations et de principes, basés sur les besoins sociétaux fondamentaux, ont permis d'identifier quatre priorités à mener pour lutter contre ces risques, telles que : comprendre et mieux connaître les risques, renforcer la gouvernance et les politiques permettant de les réduire, améliorer la préparation aux futures crises pour une réponse efficace et une meilleure reconstruction. Peu après, la COP21 et les accords de Paris annonçaient des mesures phares pour lutter contre le changement climatique, notamment en proposant des mesures d'adaptation pour nos sociétés (Nations Unies, 2015). Ces deux initiatives internationales permettent d'entrevoir les challenges qui attendent les générations futures, notamment à cause de leur exposition aux risques naturels majeurs.



▼ Glissement de terrain à Sauvât (Cantal, 2014).

© GILDAS NOURY, BRGM





Gilles GRANDJEAN

Responsable du programme
Risques naturels et résilience
des territoires
g.grandjean@brgm.fr

Caroline PROGNON

Géologue, Responsable de l'unité Géologie
de l'Aménagement des Territoires,
direction des Géoressources
c.prognon@brgm.fr

Les risques naturels ont par nature une origine multiple, car ils prennent essence dans le cadre du système complexe que constitue la planète Terre. Notre planète peut être vue comme un système thermodynamique ayant deux moteurs différenciés : le moteur interne, agissant au niveau des diverses enveloppes du globe (croûte, manteau, noyau) et le moteur externe, agissant au niveau des diverses couches atmosphériques et océaniques. Ces deux moteurs ont des caractéristiques différentes de par l'origine de leurs sources thermiques (interne ou solaire), des processus de dissipation de la chaleur qu'elles engendrent, de la cinétique de ces processus et des conséquences produites à la surface du globe.

Ainsi, les conséquences dues au moteur interne généreront des risques dits telluriques comme le volcanisme, la sismicité, et celles induites par le moteur externe généreront des risques dits hydro-climatiques comme les tempêtes, les inondations, les glissements de terrains.

De ce fait, la science des risques, qui s'étend de leur compréhension à leur gestion, est un domaine scientifique typiquement multidisciplinaire ou la physique du globe, la géologie appliquée, les sciences de l'ingénieur et du numérique, de l'aide à la décision ou des comportements sociaux doivent être sollicités. Il n'en reste pas moins que les sciences de la Terre, ensemble de disciplines qui étudient les processus qui animent la Terre depuis plus de 4.5 milliards d'années, sont à la base de la compréhension des catastrophes qui touchent actuellement nos sociétés, même si la vulnérabilité de celles-ci se doit d'être abordée en raison de la démographie galopante observée au cours des dernières décennies.

L'appréhension des risques naturels est donc intrinsèquement liée à la compréhension de la physique interne et externe de la Terre. Les processus physico-chimiques qui sont observés à la surface du globe en sont la manifestation, comme ils sont les causes des principaux aléas

naturels. Si ces processus nous semblent immédiats quand l'on observe - ou l'on subit - les effets des cataclysmes naturels, nous devons garder à l'esprit qu'ils agissent depuis des millions d'années, sculptant, façonnant, impactant notre environnement. La géologie, science qui étudie les structures et les processus physico-chimiques de la Terre fournit donc des éléments essentiels pour l'évaluation des aléas, complétés par la géomorphologie, la néotectonique ou la géophysique et la géologie marine qui constituent des domaines plus spécialisés des géosciences servant directement la compréhension des risques naturels.

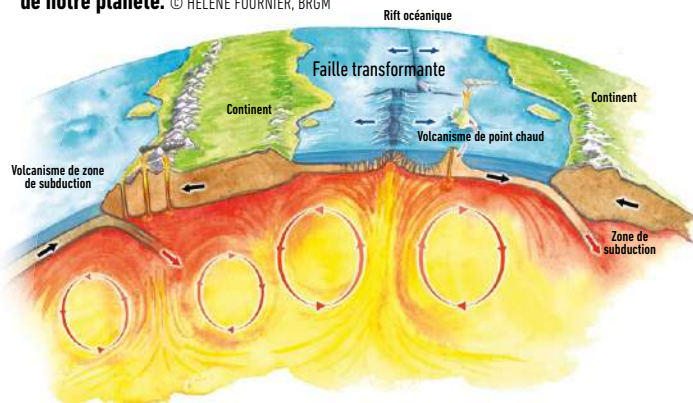
Les géosciences au cœur des risques naturels ou comment la géologie enregistre les phénomènes naturels

Les couches géologiques qui constituent les enveloppes de notre planète enregistrent donc l'activité de notre planète, à mesure que les reliefs s'érodent sous l'effet du cycle de l'eau, que les sédiments sont transportés par les fleuves et qu'il se déposent dans les bassins lacustres ou marins ; en même temps, l'activité tellurique continue à modeler les frontières des plaques tectoniques. Revenons à ces phénomènes terrestres qui ont chacun des cinétiques et des impacts qui leur sont propres :

- Les processus physiques instantanés (quelques secondes à quelques heures) se traduisent par des séismes (voir article *Le Friant et al.*) ou des tsunamis, des coulées boueuses soudaines ou « flash floods », des glissements de terrain (voir article *Thiery et al.*), des tempêtes ou des tornades ;
- Les processus à temps courts (quelques heures à quelques jours) s'illustrent dans les activités volcaniques, les cyclones, les inondations (voir *Husson et al.*), les périodes de sécheresse (voir *Gourdière et al.*) ;
- Les processus à temps longs (quelques jours à quelques années) concernent la montée du niveau marin provoquée par les effets du changement climatique, les érosions littorales (voir article *Panet et al. et Billy et al.*) et continentale.

Ces processus génèrent des phénomènes géophysiques et géologiques qui « s'impriment » dans nos paysages et y gravent leurs impacts. Ainsi, les coulées de

Schéma illustrant le processus interne de notre planète. © HÉLÈNE FOURNIER, BRGM





/

« Les processus observés à la surface du globe sont la cause des principaux aléas naturels. »

/

lave s'accumulent dans les vallées, les érosions rapides ou lentes transportent les sédiments et les déposent dans les dépressions topographiques, l'activité des failles déforme les frontières de plaques, les épisodes climatiques impriment des modifications physico-chimiques dans les écosystèmes. Chacune de ces transformations se trouve enregistrée au sein des matériaux géologiques et biologiques qui se transformeront en roches au cours des prochains millions d'années. Le géologue, en analysant rétrospectivement celles-ci, retrouve donc l'histoire perdue de ces phénomènes enregistrés au cours de l'histoire de la Terre et peut ainsi en expliquer leur origine et en mesurer leur intensité.

La connaissance géoscientifique et les données importantes pour l'évaluation des risques

La compréhension du système Terre dans ses relations avec l'activité humaine passe par la connaissance du sous-sol et donc par la capitalisation d'un certain nombre d'observations. Ces observations sont de différentes natures et portent sur des mesures (géo)physiques, comme la sismicité, les précipitations, les mouvements du sol, etc., ou sur des descriptions plus naturalistes. Depuis des décennies, la capitalisation de ces observations par les divers organismes scientifiques travaillant dans les géosciences a donné naissance à des bases de données ou sont stockées ces informations. Ces bases de connaissance permettent notamment de réaliser des confrontations entre des

données observées et des modèles conceptuels ou physiques, de façon à mieux comprendre les aléas naturels et mieux les modéliser (voir article Taillefer et al.). Nous donnons ci-après quelques exemples de bases de données, qu'elles concernent les données

renseignant sur les forçages qui provoquent les aléas, celles qui décrivent l'exposition aux aléas ou qui évaluent les impacts :

- La principale source de données sur les forçages est issue de la climatologie et de la météorologie. Ces observations sont acquises par les agences météorologiques (e.g., Météo France) qui les utilisent pour réaliser leurs prévisions. Ces données sont aussi précieuses pour anticiper les catastrophes hydroclimatiques ou projeter sur le long terme les modèles d'évolution des risques ;
- L'exposition joue aussi un grand rôle dans le niveau de risque d'un territoire, essentiellement au travers de sa situation géologique : la présence de failles actives, de formations géologiques altérées en surface et donc possiblement instables, d'édifices volcaniques, etc., expose les populations à ces aléas. Ces informations sont représentées par la banque de données du sous-sol et par les cartes géologiques fournies par le portail Infoterre (<http://infoterre.brgm.fr>) ;
- Une des grandes avancées réalisées dans les dernières décennies a été la capacité d'observer le Terre depuis l'espace. Ces images (optiques, radar, géodésiques, ...) permettent d'identifier, de surveiller et de caractériser les grands objets géodynamiques (failles, volcans, cyclones, etc.), à des échelles et résolutions variées ;



▲ Les processus à temps courts (quelques heures à quelques jours) s'illustrent dans les activités volcaniques.

© SÉVERINE BÈS DE BERG, BRGM

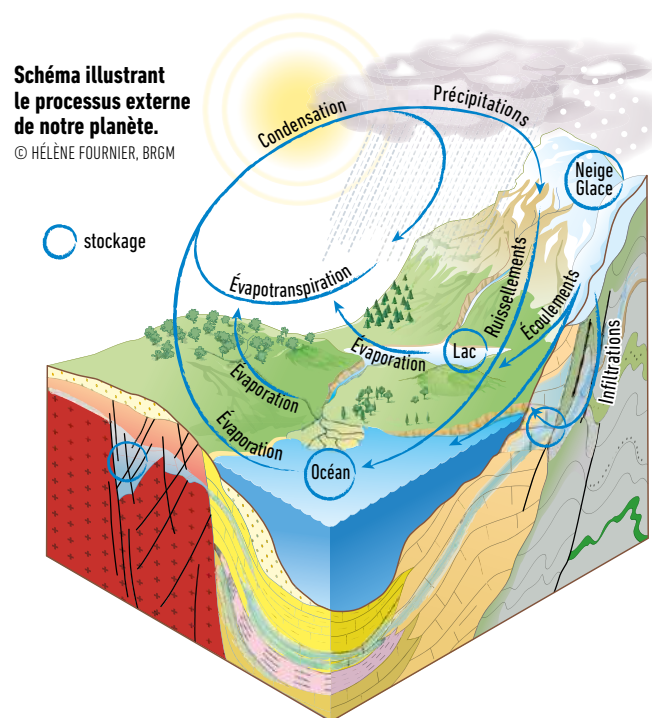
– Enfin, les processus eux-mêmes sont aussi référencés dans des bases de données qui indiquent la localisation d'un événement connu et fournissent ses caractéristiques. On citera par exemple les catalogues de sismicité, les bases de données « mouvements de terrain », « cavités souterraines » du portail Géorisques (www.georisques.gouv.fr, voir Loigerot) ;

L'objectif principal de ce travail de compilation des connaissances géoscientifiques est de pouvoir constituer des référentiels d'informations et de connaissances du sous-sol en chaque point du territoire. La science dédiée à l'analyse des données, les techniques du « big data » ou de l'intelligence artificielle permettent ensuite d'imaginer de nouvelles approches pour comprendre et prédire les phénomènes naturels, notions précieuses pour une meilleure prévention et réduction des risques.

Vers des modèles intégrés de connaissance pour mieux évaluer les risques

Mieux évaluer les risques suppose donc d'utiliser une grande quantité de données disponibles afin de mieux caractériser la géométrie des objets géologiques dans toutes leurs complexités, de mieux comprendre les processus de formation et de transformation au cours du temps, ainsi que les propriétés géochimiques et géophysiques qui les caractérisent. Cette compréhension des objets en 4D (e.g., événements géodynamiques et leur impact en surface en termes d'érosion, de transfert et de dépôts d'éléments solides ou en solution) est la condition d'une modélisation plus fine de rentrant dans une démarche de géoscience prédictive (voir Gehl et al.). Cette approche est une composante importante, non seulement pour évaluer les niveaux d'aléa actuels, mais aussi pour prévoir leurs évolutions probables sur le court ou moyen terme.

Une fois la compréhension des phénomènes bien acquise, son transfert vers des applications servant la réduction des risques est nécessaire. La science du risque appliquée aux risques naturels est celle de l'aide à la décision. Qu'il s'agisse de gérer une crise soudaine due à un séisme ou la gestion long terme des côtes pour faire face à la remontée du niveau marin, des décisions techniques (e.g., infrastructures géotechniques, solutions naturelles), politiques (e.g., transition énergétique), économiques (e.g., transfert du risque) et sociales (relogement) doivent permettre de réduire le risque ou d'atténuer ses effets. Les recherches scientifiques permettant de développer cette gouvernance sont en principe réparties en quatre typologies d'action : prévenir le risque par la connaissance et l'information, alerter les services de l'Etat et les populations en cas de crise, répondre à la crise par des moyens de mise en sécurité et tirer les leçons pour mieux s'adapter et rendre les territoires résilients (voir Richard et al. et Lutto et al.). Dans toutes ces actions, on comprendra que



les connaissances liées aux processus géologiques sont importantes, car elles conditionnent les scénarios sur lesquels les experts s'appuieront pour décider.

Conclusion et perspectives

La science des risques fait appel à un corpus de connaissance s'étalant de la compréhension des aléas ainsi que de leurs forçages, de l'analyse de la vulnérabilité des enjeux exposés et des stratégies de gestion permettant de rendre nos territoires plus résilients. C'est donc un domaine scientifique typiquement multidisciplinaire mêlant des données, approches méthodologiques et modèles issus de la physique du globe, de la géologie appliquée, des sciences de l'ingénieur et du numérique, et bien sûr de l'aide à la décision.

En matière de recherche, le défi des années à venir est de lier la recherche scientifique, l'innovation technologique, les politiques nationales et transnationales, les pratiques opérationnelles, tout en préservant la l'identité culturelle locale. Ces objectifs sont clairement affichés dans le rapport de prospective du projet H2020 Espresso (Zuccaro et al., 2018). Cela peut être atteint en utilisant une approche systématique multidisciplinaire dans laquelle l'ingénierie, l'architecture, les sciences sociales, les sciences de la terre, l'analyse des données, la modélisation probabiliste et l'analyse de scénarios sont focalisées sur l'identification et la communication de solutions efficaces et adaptées de réduction des risques. Dans cette optique, la communauté des risques naturels doit renforcer la coopération et les synergies pour relever ces défis, que ce soit au niveau national ou Européen. ●

BIBLIOGRAPHIE

Nations Unies, 2015 – Convention cadre sur les changements climatiques. Conférence des Parties Vingt et unième session, Paris, 30 novembre - 11 décembre 2015. <https://unfccc.int/resource/docs/2015/cop21/fre/loqf.pdf> UNISDR, 2015 – Le Cadre d'action de Sendai pour la réduction des risques de catastrophe 2015-2030. http://www.preventionweb.net/files/43291_sendaiframeworkfordrren.pdf Zuccaro, G., Leone, M.F., Martucci, C., Grandjean, G., Cedervall Laut, K. (Eds.). 2018 – ESPRESSO Vision Paper on future research strategies following the Sendai Framework for DRR 2015-2030, disponible sur, www.espressoproject.eu

CHIFFRES CLÉS

117 événements « très graves »

(au moins 10 morts et 30 M€ de dommages matériels) recensés en France entre 1950 et 2012, dont 20 % sur la dernière décennie.

SOURCE MTES



2/3

des événements très graves sont des inondations (une par an en moyenne entre 1950 et 2012, mais 3 par an depuis 1992). Dans l'Orléanais en 2016, l'équivalent de trois mois de pluie est tombé en quatre jours, inondant plusieurs localités au nord d'Orléans.

SOURCE MTES

VOIR ARTICLE 9 / PAGE 70

x 2

Le réchauffement des températures est deux fois plus important en montagne que sur le reste du territoire français.

C'est pourquoi la plateforme Ouranos AuRA a été créée afin d'améliorer la compréhension du changement climatique et de ses impacts en montagne.

VOIR ARTICLE 8 / PAGE 64

La montagne est confrontée à un autre aléas : les crues et laves torrentielles.

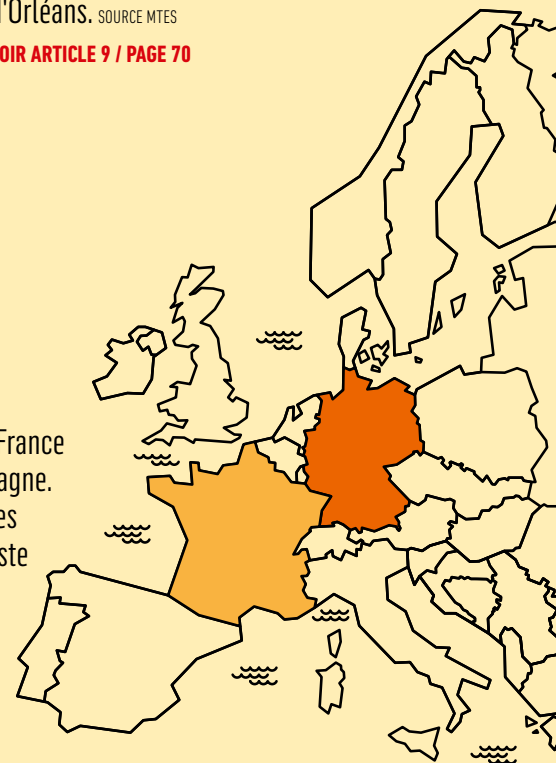
VOIR ARTICLE 7 / PAGE 58

2^e pays d'Europe

le plus touché par des catastrophes naturelles, à l'échelle européenne, la France métropolitaine se place après l'Allemagne. Pour accéder à des informations sur les risques situés près de chez vous, il existe une base de données, Géorisques, le site de référence sur les risques naturels en France.

SOURCE SWISS RE INSTITUTE

VOIR ARTICLE 5 / PAGE 44



En 2009

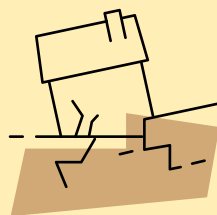
SOURCE FFA

27%

des français sont exposés au **risque de séisme modéré à fort, soit 17,1 M habitants.**

Aujourd'hui, de nouvelles approches permettent d'améliorer l'estimation de l'intensité locale d'un séisme.

VOIR ARTICLE 10 / PAGE 78



20%



C'est le pourcentage du trait de côte naturel en métropole et dans les DROM (hors Guyane) qui est en recul. Pour comprendre ce phénomène et anticiper ses évolutions, il est nécessaire de connaître le fonctionnement du littoral. C'est le but du projet SIBLES.

VOIR ARTICLE 11 / PAGE 84

200 000 m³

C'est la masse de matériaux mobilisés qui s'est écoulée de la falaise de Dieppe. Ce phénomène a été à l'origine du développement d'une nouvelle méthode de surveillance du trait de côte.

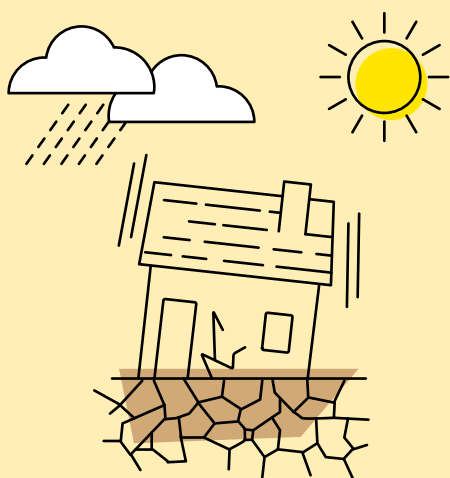
VOIR ARTICLE 3 / PAGE 28

20 000 maisons

C'est le nombre de maisons touchées tous les ans par le phénomène de retrait et de gonflement des argiles,

un aléas qui fait bouger les sols et endommage les habitations. Il s'agit du second risque naturel en terme d'impact financier en France.

VOIR ARTICLE 6 / PAGE 50



48,3 milliards d'euros versés par les assurances aux particuliers et professionnels

entre 1988 et 2013 pour les tempêtes (50%), inondations (34%) et sécheresses (16%); ce montant pourrait atteindre **92 milliards d'euros entre 2014 et 2040** (+ 90%). Et il ne prend en compte que les biens assurés...

SOURCE FFA

En 2017, dans le monde

SOURCE SWISS RE INSTITUTE

130 milliards de dollars d'indemnisation

12 séismes (1 184 victimes)



Comprendre leurs processus et celui des éruptions volcaniques, c'est le rôle des observatoires qui cherchent à améliorer la connaissance de l'histoire sismique et volcanique de la planète.

VOIR ARTICLE 2 / PAGE 20

Magnitude 7

C'est la force du séisme qui s'est abattu sur Haïti le 12 janvier 2010, C'est cet événement dramatique qui a incité l'île à lancer des études d'évaluation des risques naturels afin de s'en prémunir.

VOIR ARTICLE 4 / PAGE 36

1400

C'est le nombre de ruptures de versant rocheux (RVR) recensées dans les Alpes occidentales, un phénomène peu connu mais pouvant être à l'origine de catastrophes impressionnantes.

VOIR ARTICLE 1 / PAGE 14



Les ruptures de versant rocheux : de l'observation à l'évaluation du risque

En montagne, les glissements de terrain sont des phénomènes intenses nécessitant une réponse rapide en termes d'analyse et de prévention. Parmi ces phénomènes, les Ruptures de Versant Rocheux sont les moins connus mais aussi les plus spectaculaires. Par leur ampleur, ils demandent de multiplier les dispositifs afin de mieux les localiser, les comprendre et anticiper leur évolution.

Les instabilités de grandes masses rocheuses, appelées également ruptures de versant rocheux (RVR ; Jarman, 2006 ; Blondeau, 2018), sont peu connues du grand public, mais peuvent être à l'origine de catastrophes naturelles impressionnantes. Localisés dans les secteurs de fort relief, ce sont des déplacements gravitaires d'une centaine à plusieurs centaines de mètres d'épaisseur et de grande amplitude verticale, affectant parfois une montagne entière. Les RVR recouvrent une large gamme de formes et de processus, en général étudiés de manière sectorielle ou partielle. Plutôt lents (de l'ordre du mm/an), ces mouvements n'en mobilisent pas moins des masses rocheuses de plusieurs millions de mètres cubes. Leur vitesse de déplacement peut être accrue par des facteurs locaux d'origine interne ou externe (secousses sismiques, déglaciation d'une vallée, activités humaines). Ceci se manifeste typiquement par une augmentation diffuse de la fréquence de glissements superficiels et/ou d'éboulements localisés dans certaines portions de la zone instable et peut, à terme, aboutir à une rupture massive aux conséquences destructrices. Même si nous en avons jusqu'ici sous-évalué l'existence, les RVR ne sont pas pour autant des anomalies ou des exceptions géologiques : elles font partie du fonctionnement de purge naturelle des versants qui s'opère à la suite d'une

AUTEURS



Sylvain BLONDEAU

Université de Lyon, Département de Géographie, CNRS UMR Environnement
✉ sylvain.blondeau@univ-lyon2.fr



Yannick THIERY

Direction Risques et prévention, Unité Risque, Instabilités Gravitaires et érosion des sols et des versants, BRGM
✉ Y.Thiery@brgm.fr



Yanni GUNNELL

Professeur de géographie, Enseignant-Chercheur, CNRS UMR 5600 EVS
✉ Yanni.Gunnell@univ-lyon2.fr



David JARMAN

Mountain Landform Research, Scotland
✉ david.jarman914@virgin.net

perturbation majeure de la surface terrestre, comme une glaciation ou un soulèvement tectonique régional.

Une RVR peut engendrer de forts dégâts sur des installations humaines, comme lors de l'effondrement du mont Granier près de Chambéry (Savoie) qui a mobilisé environ 500 millions de m³ de roches en 1248 ; l'effondrement, en 2015, d'une partie du versant qui surplombe le barrage du Chambon (Dubois *et al.*, 2016) ; ou encore le glissement du Valpola (Italie) en 1987 (34 millions de m³ ; Azzoni *et al.*, 1992). Ce type de phénomène est capable d'engendrer des effets en cascade, comme le barrage temporaire d'une vallée fluviale suivi de crues brutales par vidange du lac après la rupture du barrage rocheux (glissement de Gros Ventre, dans le Wyoming) ou encore un tsunami lorsque la masse rocheuse tombe dans un lac, comme l'effondrement dévastateur de La Suiche (Suisse) dans le lac Léman en l'an 563 (Kremer *et al.*, 2012). Fin 1963, le célèbre effondrement d'un versant dans le réservoir du barrage de Vajont (Italie) a provoqué un débordement de la masse d'eau, qui a balayé la vallée en aval et tué plus de 1900 habitants.



◀ PHOTO 1
Vue sur les escarpements déstabilisés du piton de Geteu, partie aval de la Rupture de Versant Rocheux sous le Pla Troubat (Moyenne vallée d'Ossau, Pyrénées Atlantique, France).

© YANNICK THIERY, BRGM

▼ PHOTO 2
Fracture d'extension au pied de la Tête aux Vents en amont Argentières (vallée de Chamonix, Haute-Savoie, France).

© SYLVAIN BLONDEAU, UNIVERSITÉ DE LYON

Même si les volumes de matériaux mobilisables sont importants, les RVR n'entraînent le plus souvent que de simples déformations, imperceptibles à l'échelle humaine, d'où leur caractère insidieux. Leur localisation, leur identification et leur prévision sont ainsi rendues difficiles par la subtilité des indices de déformation, entraînant des confusions avec des formes de terrain caractéristiques de la structure géologique, de la tectonique, ou issues de l'érosion différentielle. Les déformations cumulées donnent néanmoins naissance à des formes relativement caractéristiques qu'il est possible d'inventorier et de cartographier, par exemple dans un but de surveillance et de prévision des risques associés.

Caractéristiques des grandes instabilités gravitaires

Les secteurs d'instabilité gravitaire produisent des formes typiques de déformation de versant. Ces dernières peuvent mesurer de quelques mètres à plusieurs kilomètres de long et ont souvent été définies, à tort, comme des escarpements



liés à des failles d'origine sismique. Les détecter par une méthode unique s'avère un exercice périlleux en raison des risques de confusion évoqués plus haut. Ainsi, c'est plutôt en analysant conjointement la topographie, la structure géologique et l'histoire glaciaire des versants et des vallées qu'il devient possible de déterminer la présence des RVR.

► Une géomorphologie particulière

L'observation des versants sur le terrain permet de définir des formes indicatrices d'une RVR. Les formes les plus

couramment observées sont des doubles crêtes (appelées crêtes bifides, encadrant un « graben de crête »). Surtout localisées dans la partie amont des versants, ces formes sont souvent observées conjointement avec des séries de contre-pentes (ou contre-escarpements) situées en milieu de versant, où la corniche regarde vers l'amont et forme une gouttière parallèle ou oblique au versant. Ces déformations se manifestent aussi par des renflements dans la partie aval du versant : bourrelets, éboulis, basculements de blocs. Il est en tout cas rare de n'avoir qu'un type de forme représentatif des RVR sur la totalité des versants affectés et la taille des indices est infiniment plus petite que la masse instable qui les engendre. Enfin, malgré les masses de matériaux mises en jeu, les contours des phénomènes sont parfois diffus et donc difficiles à délimiter cartographiquement.

► L'ÉLECTROMAGNÉTISME HÉLIPORTÉ

Améliorer la connaissance du sous-sol passe par l'utilisation d'outils d'imagerie innovants. L'ElectroMagnétisme (EM) est une méthode géophysique qui fournit une information sur les variations de la résistivité électrique des roches jusqu'à 200 à 400 m sous la surface. Cette méthode peut être mise en œuvre grâce à des moyens hélicoptères rendant ainsi possible, hors agglomération, la couverture de grandes surfaces en peu de temps, quels que soient l'occupation au sol, l'étendue du couvert végétal ou le relief.

Depuis 10 ans, le BRGM a réalisé 5 campagnes d'EM hélicoptère dans les DROM et COM (Mayotte, Martinique, Guadeloupe, La Réunion et Nouvelle-Calédonie) et une en Région Centre Val de Loire (vols à proximité de Courtenay, Vierzon et Châteauroux). Ces levés totalisent plusieurs milliers de kilomètres et représentent plusieurs centaines de milliers de mesures. Ils fournissent une donnée d'infrastructure géophysique moderne, en complément des forages et des cartes géologiques.

Le BRGM en assure la valorisation au travers de projets d'appuis aux politiques publiques, de recherche et commerciaux. Les différents levés ont ainsi donné lieu à plus de 70 études sur les thématiques de la géologie, l'hydrogéologie, la recherche de matériaux, l'enfouissement de déchets, l'étude de site pour la réalisation de grands ouvrages ainsi que l'évaluation de l'aléa aux mouvements de terrain.

Les variations de résistivité électrique du sous-sol, fournies par l'EM, sont confrontées aux autres données géoscientifiques, telles que les forages ou les observations de terrain, afin d'apporter une information sur la géométrie en 3D des roches du sous-sol. On en dérive des modèles géologiques qui constituent un support essentiel pour répondre aux questions socio-environnementales impactant directement l'aménagement du territoire. Par exemple, l'EM a aidé à l'identification de configurations géologiques critiques vis-à-vis de glissements de terrain à la Médaille et la Trinité en Martinique. —

Pierre-Alexandre RENINGER

Direction des Géoressources
✉ pa.reninger@brgm.fr

Frédéric LACQUEMENT

Direction des Géoressources
✉ f.lacquement@brgm.fr

Aude NACHBAUR

Direction des Actions Territoriales
✉ a.nachbaur@brgm.fr

► Structure géologique et texture des roches : des facteurs de prédisposition prépondérants

Dès lors que le potentiel gravitationnel, en lien avec les dénivellations topographiques, est suffisant, les RVR sont en partie contrôlées par la structure du versant, c'est-à-dire la lithologie (type de roche), les plans de stratification et les fractures préexistantes ou héritées d'anciennes déformations. D'une manière générale, les RVR se rencontrent ainsi dans des massifs dont les roches sont fortement stratifiées (schistes, gneiss, micaschistes), tandis que les massifs de roche cohérente (typiquement : granite) présentent de faibles densités de RVR. Une exception notable a lieu lorsque des roches plastiques (argiles notamment) se déforment plus rapidement que les roches massives sus-jacentes, ce qui peut entraîner une déstabilisation généralisée du versant.

► Des facteurs de préparation et de déclenchement connus, mais mal compris

Bien qu'un consensus général attribue à la majorité de ces instabilités une origine postglaciaire (Ballantyne, 2002), parce que les déplacements recoupent, décalent ou déforment des formations géologiques produites durant le Tardiglaciaire (éboulis, glaciers rocheux, formations fluvioglaciaires en aval), les mécanismes de déclenchement sont encore mal compris. La réponse des versants rocheux au recul et à l'aminçissement des glaciers a pour résultat aussi bien de déclencher des avalanches rocheuses et des éboulements divers que des déformations lentes. On qualifie de « paraglaciaires » ces cortèges d'instabilités qui se produisent dans le sillage d'une déglaciation (Jarman, 2006). Toutefois, la nature, la temporalité et la taille des instabilités rocheuses attribuables à la décompression post-glaciaire sont aussi conditionnées par la lithologie, la structure géologique et, au-dessus d'une certaine altitude, par le comportement du pergélisol. Ce dernier,

/
**« Ce sont des
déplacements
gravitaires...
affectant parfois
une montagne
entière. »**
 /

même durant une période interglaciaire, peut cimenter les enveloppes externes d'une masse montagneuse et agir en retardateur des ruptures gravitaires. En raison de cette multiplicité de facteurs, les ruptures peuvent se produire de 10 à 10 000 années après le retrait des glaciers.

› Âge des phénomènes

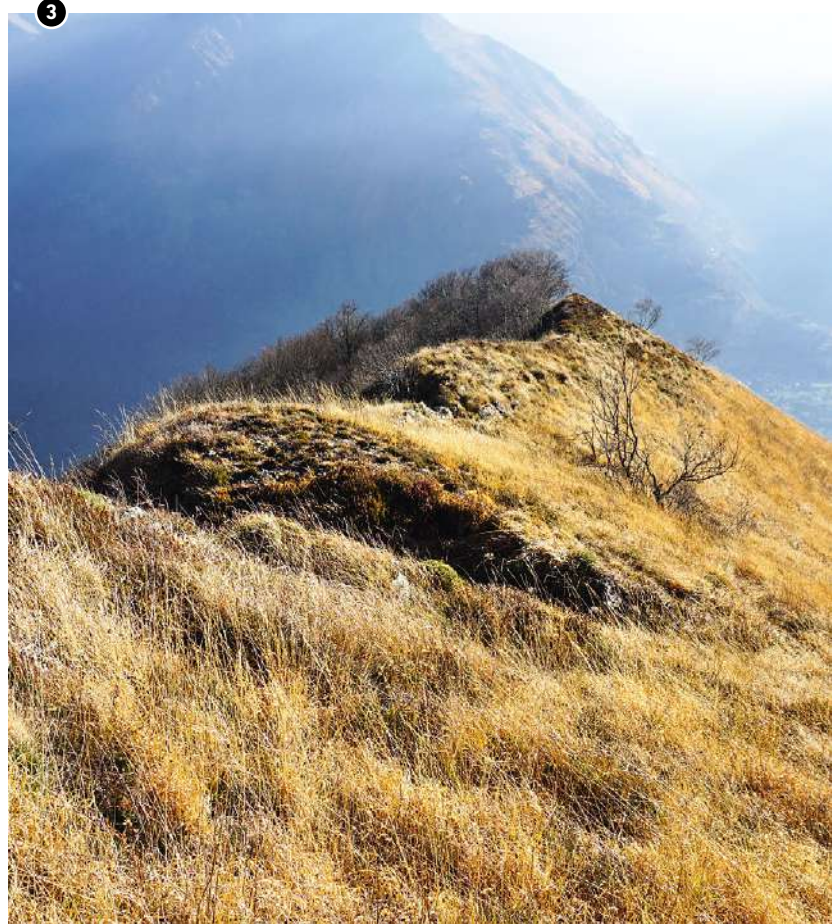
Déterminer l'âge des déformations est une question fondamentale. Des datations relatives sont parfois possibles grâce à des indices géomorphologiques. On observe, par exemple, des glaciers rocheux, aujourd'hui inactifs, dont la progression vers l'aval a été bloquée par un contre-escarpement dans le versant. Parmi les quelques tentatives de datation absolue réalisées jusqu'à présent, les âges obtenus par la mesure des concentrations de cosmonucléides (^{10}Be , notamment) ont tendance à montrer deux pics de fréquence des ruptures il y a environ 10 000 ans (fin de la dernière glaciation) et entre 3 200 et 4 800 ans (Lebourg *et al.*, 2014; Zerathe *et al.*, 2014). En France, les ruines de Séchilienne et le glissement de la Clapière ont été datés par cette méthode.

De l'observation de terrain à la compréhension des RVR

Pour caractériser les ruptures de versant rocheux, et pour mieux comprendre et préciser leur(s) mécanisme(s) d'initiation et les causes de leur activité, certains sites sollicitent une surveillance rapprochée.

› La surveillance par instrumentation

Plusieurs approches complémentaires peuvent être mises en œuvre selon la morphométrie, le degré d'activité du versant instable et les risques associés. En présence de déformations lentes ne présentant pas de danger immédiat, il est possible d'installer des extensomètres sur les sites de rupture pour en mesurer le déplacement : ainsi, sur le site de La Toura dans la vallée du Vénéon (Écrins), des ouvertures de 2 à 5 mm ont été observées en deux ans (Vengeon *et al.*, 1999). Les évolutions topographiques d'une instabilité peuvent être également mesurées à l'aide d'un GPS ou de moyens aéroportés (avion, ULM, drone) afin de produire périodiquement par photogrammétrie des modèles numériques de terrain. Ces derniers permettent alors de comparer très finement les évolutions microtopographiques survenues entre chaque campagne de mesures.



Lorsque les instabilités présentent un danger, avec parfois des déplacements de plusieurs centimètres par jour, il devient envisageable de mesurer les déformations avec des capteurs localisés sur la masse glissée grâce à des appareils installés sur le versant opposé (interférométrie radar, laser terrestre). De tels dispositifs de surveillance permettent une mise en œuvre des systèmes d'alerte. En France, il en existe à La Clapière (Alpes Maritimes) et à Séchilienne (Isère), où les masses rocheuses actives peuvent mobiliser plusieurs millions de mètres cubes de roches. Dans la vallée du Guil au pas de l'Ours (Queyras), entre Aiguilles et Abriès, des effondrements de paquets schisteux et quelques chutes de blocs depuis 2014 sont les symptômes d'une rupture en activation estimée à 10^7 m^3 . Une instrumentation a donc été décidée en 2017 et le suivi est assuré par la plateforme Observation de la Terre de l'EOST/Faculté de Géographie de l'Université de Strasbourg, qui a effectué des photographies par drone, des relevés par lidar terrestre et GPS, des mesures d'interférométrie radar-sol et implanté trois sismomètres.

› La surveillance par imagerie

Le suivi par imagerie peut se réaliser avec des navigateurs de type Google Earth, qui permettent d'accéder à des scènes satellites à des dates échelonnées. Le Géoportail de l'IGN (remonterletemps.ign.fr) permet de comparer les



▲ PHOTO 3
**Fractures
d'extension en limite
de crête du versant
est du Pla Troubat
(Moyenne vallée
d'Ossau, Pyrénées
Atlantique, France).**

© CHARLES AUBOURG,
 UNIVERSITÉ DE PAU ET
 PAYS DE L'ADOUR



▲ PHOTO 4
Fracture à proximité de la Cima di Test séparant en compartiments le replat sommital, (Ouest de Demonte, Italie).

© SYLVAIN BLONDEAU, UNIVERSITÉ DE LYON

photographies aériennes actuelles avec d'autres datant des années 1950-1960. On peut ainsi observer si certains secteurs d'intérêt ont enregistré des modifications depuis 60 ans et si ceux-ci présentent un danger pour les infrastructures humaines situées en aval.

Une méthode permettant de quantifier ces déplacements de manière systématique et régulière pour des sites potentiellement dangereux est l'analyse d'images satellites

optiques et radar (de type SENTINEL), qui permettent tous les 10 jours le calcul des déformations sur des points en planimétrie et en altimétrie. Ceci a été réalisé sur le site de Geteu dans les Pyrénées pour une période de 4 ans afin de confirmer l'activité d'une RVR en vallée d'Ossau (Thiery *et al.*, soumis).

► La géophysique : un moyen pour comprendre la structure interne et les mécanismes des RVR

Comprendre le mécanisme de fonctionnement d'une RVR nécessite de connaître la structure interne de l'objet. Les méthodes géophysiques non intrusives, comme la sismique réfraction ou la tomographie électrique, permettent d'obtenir des informations sur la géométrie et la structure des versants. Le déploiement d'un dispositif de mesure du potentiel spontané, quant à lui, permet d'analyser les circulations d'eau interne à la masse et, dans le cadre de mesure en continu, de trouver une relation entre le niveau de la nappe et les déplacements. Ces moyens sont utilisés à l'échelle du site, mais comme les RVR peuvent être plurikilométriques, ce type de dispositif peut s'avérer contraignant à mettre en œuvre. La géophysique aéroportée (comme l'électromagnétisme aéroporté), jusque-là réservée à l'analyse très profonde des structures géologiques, a connu des progrès autorisant le diagnostic de discontinuités moins profondes. Ce type d'outil a été utilisé récemment avec succès dans la détection des surfaces de glissement de quelques RVR (Baron *et al.*, 2014).

Aléas et risques associés

► Une gestion à différentes échelles

Identifier les zones d'instabilités rocheuses permet tout d'abord d'évaluer une densité générale des phénomènes. Une forte densité de RVR détectée sur un territoire suggère une forte susceptibilité à l'aléa, le territoire étant ainsi exposé aux risques de nouveaux événements. Une analyse détaillée des facteurs préparatoires, voire déclenchants, de grandes instabilités rocheuses est alors recommandée. Une approche multifactorielle et multi-échelle (spatiale et temporelle) est donc utile afin de comprendre les dynamiques géologiques et géomorphologiques de la région et d'esquisser un zonage des risques.

► La cartographie : outil d'aide à la gestion des risques associés aux RVR

Une cartographie des dynamiques élémentaires de versant (petits glissements, secteurs d'éboulis, chutes de blocs, coulées de débris, etc.), symptômes superficiels de l'instabilité gravitaire plus profonde, aide à délimiter l'étendue de la masse instable à déformation lente et permet d'acquérir une vision d'ensemble des processus susceptibles d'endommager les infrastructures.



PHOTO 5 / Vue aérienne des fractures d'extension séparant le versant est du massif rocheux du Pla Trouba en plusieurs compartiments (Moyenne vallée d'Ossau, Pyrénées Atlantique, France).
© CHARLES AUBOURG, UNIVERSITÉ DE PAU ET PAYS DE L'ADOUR

Conclusion

Bien que les RVR connaissent un intérêt croissant dans la communauté scientifique avec l'utilisation de méthodes de plus en plus pointues, le champ d'investigation pour comprendre leur origine et leur fonctionnement est encore vaste. Afin de mieux estimer les aléas qui leur sont associés, il apparaît notamment nécessaire d'apprécier leur diversité, leur taille et leur répartition spatiale à l'échelle des massifs montagneux. Un tel travail a été réalisé dernièrement dans les Alpes occidentales et centrales (Crosta *et al.*, 2013 ; Blondeau, 2018), mais il doit être étendu à d'autres massifs montagneux. C'est en procédant de cette manière que les RVR pourront être intégrés progressivement à l'analyse des risques naturels. ●

ABSTRACT

Large-scale bedrock instability or Rock Slope Failure (RSF) in mountain areas embraces a range of slope gravitational processes notable for their magnitude, depth and development over long time scales. Not well known to the public, these phenomena have led, nevertheless, to spectacular natural disasters over the past century. Their analysis, comprehension and integration in hazard and risk analysis require the combination of field investigations, diagnostic techniques and slope monitoring. This paper defines RSFs according to geological, structural and geomorphological criteria. Different methods of spatial characterization and in situ monitoring are then described to show that it is possible to better understand these phenomena and to identify their initiation mechanisms and the causes of their activity. Finally, the integration of these phenomena into risk and hazard analysis is considered, from a land and environmental management perspective.

GLOSSAIRE

Tardiglaciaire : période de réchauffement climatique accéléré et de fonte et recul des glaciers à la fin du Pléistocène et à l'aube de l'Holocène, soit entre -18 000 et -11 000 ans BP.

Post-glaciaire : qui succède à une période glaciaire.

Pergélisol : Substrat (sol et roche) gelé en permanence des régions arctiques ou de haute altitude.

Géomorphologie : étude scientifique des formes du relief terrestre et des processus qui le façonnent par redistribution des masses rocheuses dans le temps et dans l'espace.

Extensomètre : capteur d'allongement servant à mesurer une déformation (déplacement).

Lidar (laser detection and ranging) : appareil émettant et recevant un faisceau laser, afin de déterminer la distance d'un objet avec une précision d'ordre centimétrique.

Sismique réfraction : méthode géophysique fondée sur l'étude de la propagation des ondes de compression (ondes P) dans le sous-sol. Les ondes sont générées artificiellement par une secousse en surface (explosion, chute de poids, etc.) et sont captées par un réseau linéaire de capteurs appelés géophones.

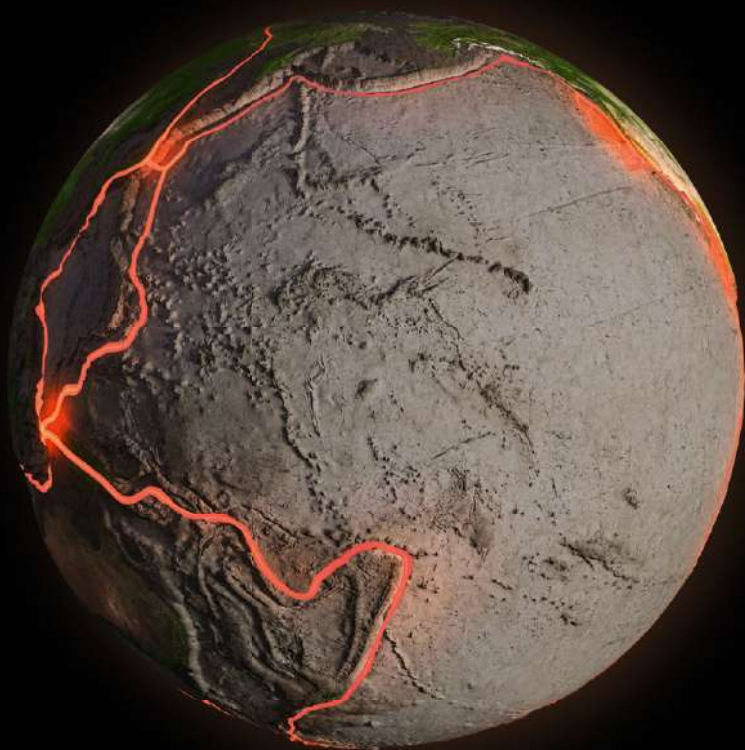
Tomographie électrique : méthode d'étude de la répartition de la conductivité des roches fondée sur la mesure des résistivités apparentes du sous-sol le long d'un dispositif rectiligne d'électrodes plantées dans le sol.

Potentiel spontané : mesure de la différence de potentiel électrique existant naturellement dans le sol et le sous-sol. Il permet d'avoir accès à une vue globale de la répartition des circulations hydrauliques du sol et du sous-sol et, par exemple, de caractériser des écoulements de fluides au sein d'une faille géologique.

BIBLIOGRAPHIE

- Azzoni, A. *et al.*, 1992. – The Valpola Landslide, Engineering Geology, 33, 59–70. Ballantyne, C.K., 2002. – Paraglacial geomorphology. Quaternary Science Reviews, 21, 1935–2017. Baron, I. *et al.*, 2004. Structure and dynamics of deep-seated slope failures in the Magura Flysch Nappe, outer Western Carpathians (Czech Republic). Natural Hazards and Earth System Sciences, 4, 549–562. Blondeau, S., 2018. – Ruptures de Versant Rocheux (RVR) à l'échelle des Alpes occidentales : inventaire systématique, analyse spatiale, perspectives patrimoniales. Thèse de Doctorat Université de Lyon 2. Crosta, G. *et al.*, 2013. – Deep-seated gravitational slope deformations in the European Alps. Tectonophysics, 605, 13–33. Dubois, L. *et al.*, 2016. – Le glissement du Chambon : évolution du phénomène et gestion de crise. Revue Française de Géotechnique, 148, 2. Jarman, D., 2006. – Large rock-slope failures in the Highlands of Scotland: characterization, causes and spatial distribution. Engineering Geology, 83, 161–182. Kremer, K. *et al.*, 2012. – Giant Lake Geneva tsunami in AD 563. Nature Geoscience, 5, 756–757. Lebourg, T. *et al.*, 2014. – A Late Holocene deep-seated landslide in the northern French Pyrenees. Geomorphology, 208, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2013.11.008>. Thiery, Y. *et al.*, soumis. New Rock Slope Failure evidences in the Ossau valley (French western Pyrenees). Geomorphology, 23 p. Vengeon, J.-M. *et al.*, 1999. – Déformations gravitaires post glaciaires en terrains métamorphiques. Comparaison des indices de déformation du versant sud de la Toura (Saint-Christophe-en-Oisans, France) avec le phénomène de rupture interne du versant sud du Mont Sec (Séchillienne, France). Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 57, 387–395. Zerah, S. *et al.*, 2014. – Mid-Holocene cluster of large-scale landslides revealed in the Southwestern Alps by 36Cl dating. Insight on an Alpine-scale landslide activity. Quaternary Science Reviews, 90, 106–127.

1



▲ Représentation des plaques tectoniques majeures qui forment l'enveloppe externe de la terre.

© GETTY IMAGES

Séismes et volcans : observer pour comprendre les processus et évaluer les aléas

Les éruptions volcaniques et les tremblements de terre menacent chaque jour des millions de personnes. En dépit de progrès considérables, il reste impossible de prévoir précisément l'ampleur et la survenue de ces événements. La recherche dans ce domaine s'appuie sur des réseaux d'observation situés dans les régions exposées aux catastrophes.

AUTEURS



Anne LE FRIANT

Directrice adjointe de l'Institut de Physique du Globe de Paris, en charge des observatoires.

✉ lefriant@ipgp.fr



Jean-Christophe KOMOROWSKI

Directeur scientifique des observatoires volcanologiques et sismologiques, Institut de Physique du Globe de Paris

✉ komorow@ipgp.fr



Martin VALLÉE

Directeur de l'observatoire GEOSCOPE, Institut de Physique du Globe de Paris

✉ vallee@ipgp.fr



Arnaud LEMARCHAND

Directeur opérationnel des observatoires volcanologiques et sismologiques, Institut de Physique du Globe de Paris

✉ arnaudl@ipgp.fr



Pascal BERNARD

Sismologue, Institut de Physique du Globe de Paris

✉ bernard@ipgp.fr

Des millions de gens et l'économie de pays tout entiers sont menacés par les risques naturels tels que les éruptions volcaniques (photos 1, 2), les tremblements de terre, les glissements de terrain ou les tsunamis. Des progrès considérables ont été faits pour comprendre leurs causes et leurs conséquences et pour améliorer leur surveillance. En revanche, même si ces progrès ont profité directement à la société, les géologues et géophysiciens ne sont pas encore en mesure de prédire précisément le moment, le lieu et la magnitude des tremblements de terre comme ils ne peuvent pas anticiper le déclenchement, l'intensité ou la durée d'une éruption. Après les séismes géants de 2004 en Indonésie et de 2011 au Japon et la caractérisation de plusieurs super éruptions (ayant probablement eu des impacts climatiques importants), les grands enjeux en sismologie et en volcanologie sont d'améliorer la connaissance de l'histoire sismique et volcanique de la terre et de comprendre en particulier les processus qui se produisent dans les zones de subduction.

« L'idée intuitive que l'occurrence d'un gros séisme sécurisera la zone touchée, est ainsi remise en question. »

D'une manière générale, les risques naturels sont le résultat de processus géologiques à grande échelle qui évoluent sur des intervalles de temps particulièrement longs. La recherche dans ce domaine s'appuie donc massivement sur des réseaux d'observation multiparamètres permanents, semi-permanents ou ponctuels situés dans les régions exposées aux catastrophes. Par exemple, l'IPGP opère des observatoires volcanologiques, sismologiques, magnétiques et des processus d'érosion, à l'échelle de toute la planète. L'IPGP a en particulier la responsabilité de l'observation permanente des trois volcans actifs français d'outremer.

Si les réseaux d'observation sont actuellement en plein essor et ont permis de franchir des caps importants en science, il sera indispensable à l'avenir de poursuivre leur développement en s'orientant notamment vers l'instrumentation en forage, l'instrumentation marine et le développement de la modélisation couplée à l'intelligence artificielle.

Les grands enjeux, les grands défis

La lithosphère, constituée de la croûte et d'une partie du manteau supérieur, forme l'enveloppe externe rigide de la Terre (figure 1). Elle est formée d'une quinzaine de plaques lithosphériques ou tectoniques majeures plus ou moins rigides et de nombreuses plaques plus petites qui sont caractérisées par des mouvements relatifs qui reflètent en surface les mouvements de convection qui affectent le manteau terrestre. Le long de leurs frontières, les plaques peuvent s'écarter et diverger au niveau des rides médio-océaniques, coulisser latéralement l'une par rapport à l'autre le long de failles transformantes, et converger en entrant en collision, passant l'une sous l'autre (c'est la subduction), ou l'une sur l'autre pour former des chaînes de montagnes. C'est au niveau de ces frontières de plaques que se produit une grande partie de l'activité sismique et volcanique de la Terre (la subduction créant des arcs volcaniques) et que se concentre aussi une très large proportion de la population mondiale.

► Les séismes

Les zones de subduction sont les endroits sur la terre où se produisent les plus grands séismes. Les séismes géants de Sumatra en 2004 et de Tohoku en 2011, à l'origine de tsunamis dévastateurs, ont amené à une prise de conscience. Un cap important a pu être atteint dans la structuration des systèmes d'alerte aux tsunamis (sous l'égide de l'UNESCO) et dans la compréhension des processus en zone de subduction (figure 1). En effet, durant le séisme de Tohoku, un comportement différencié de la faille sismique a été observé selon la profondeur, Satriano et al., 2014. À faible profondeur, et donc au large, la faille a bougé sur plusieurs dizaines de mètres ce qui a été à l'origine du tsunami géant

qui a dépassé les dimensionnements prévus. À profondeur plus grande, le glissement a été d'amplitude plus faible mais de plus haute fréquence, ce qui a provoqué des vibrations destructrices sur la côte voisine. Un enjeu essentiel serait d'intégrer dans les modèles prédictifs d'aléas cette problématique plus générale du couplage des plaques dans la subduction, avec des zones sismiques bloquées, menaçantes en termes de secousses et tsunamis potentiels, entourées par des zones qui glissent continuellement ou de manière transitoire.

En plus de cette complexité spatiale, l'organisation temporelle de la sismicité reste assez mystérieuse. Le cycle sismique régulier et idéal d'une faille « métronome » n'existe pas, en raison de l'interaction chaotique et imprévisible entre failles voisines et à l'intérieur d'une même faille, interaction qui bouscule sans cesse les processus de chargement d'une faille donnée. Ainsi, à l'échelle de milliers d'années, un séisme géant balaye de temps en temps toute une zone de failles, entre temps sollicitées par d'autres grands séismes. Les géologues ont découvert de tels super-cycles, alternant périodes d'intense activité de tout un réseau de failles, et périodes d'activité ralentie. L'idée intuitive que l'occurrence d'un gros séisme « sécurisera » la zone touchée, est ainsi remise en question, ce qui modifie grandement l'évaluation de l'aléa. Les zones de faille rompues par un grand séisme peuvent être de nouveau activées quelques années ou décennies plus tard par un séisme encore plus intense.

En plus de cette sismicité « naturelle », la sismicité « induite » est de plus en plus fréquente. Cette sismicité est provoquée par les activités humaines, lors de l'injection

FIGURE 1
Représentation
schématique de
la subduction
des Antilles.

© IPGP

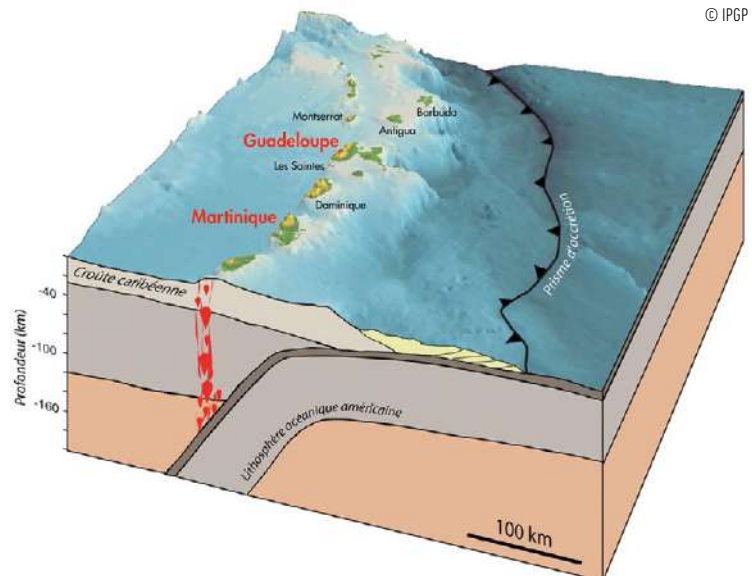
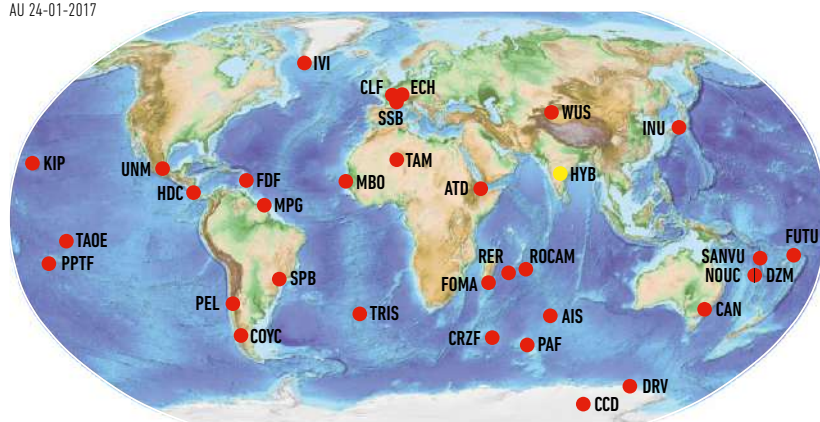


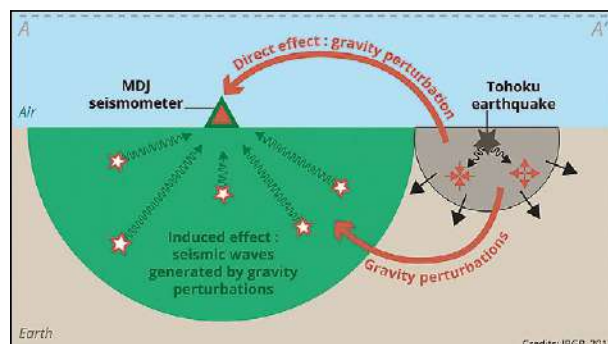
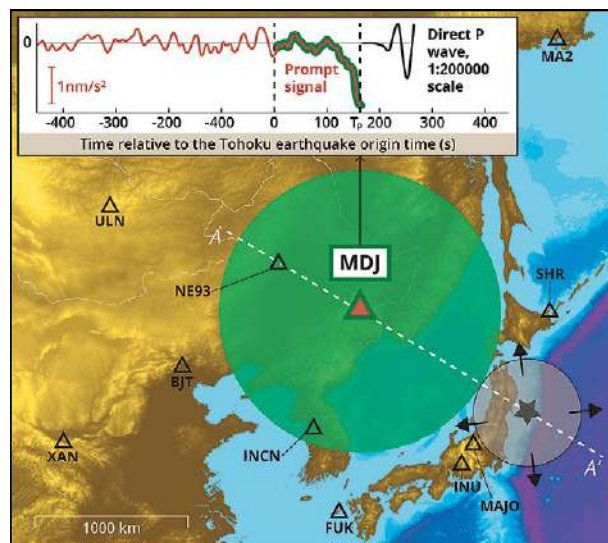
FIGURE 2 / Réseau Geoscope. © IGP M. VALLÉE

AU 24-01-2017



● stations en temps réel (ou légèrement différé)
● stations temporairement interrompues

FIGURE 3
Les effets des perturbations de gravité enregistrées par le sismomètre avant les ondes sismiques directes (d'après Vallée et al., 2017). © IGP



de fluides dans la croûte terrestre pour l'exploitation du sous-sol. Ceci a augmenté considérablement la sismicité au cœur des États-Unis, région dépourvue d'activité sismique naturelle, jusqu'à provoquer des séismes de magnitude proche de 6, donc destructeurs. Il est maintenant essentiel d'étudier le rôle de la pression et de la migration des fluides dans le déclenchement de ruptures sismiques dans les zones de failles, afin de pouvoir continuer une exploitation raisonnée, qui tout en restant efficace, modère la magnitude des séismes induits.

> Les volcans

Les zones de subduction sont aussi le lieu de genèse d'une grande partie du volcanisme sur terre. Les volcans, fascinent autant qu'ils menacent les sociétés. Un sujet majeur en volcanologie aujourd'hui concerne les super éruptions (magnitude > M7) qui ont des probabilités d'occurrence moins élevées que d'autres éruptions, mais qui peuvent avoir un impact très important sur le climat (ex : l'éruption du volcan Samalas en Indonésie en 1257 pourrait être à l'origine du petit âge glaciaire qui a entraîné une famine en Europe, Vidal et al., 2017). Malgré tous les travaux récents, nous savons encore peu de choses sur ces super éruptions et notamment sur leurs précurseurs. Des études récentes ont montré que le temps de retour d'éruptions >M8 avait été sous-estimé : une éruption tous les 5,2 à 48 ka semble plus réaliste qu'une éruption tous les 45 à 714 ka. Un des grands enjeux pour la communauté scientifique est par conséquent d'améliorer la connaissance de l'histoire éruptive des volcans car on comprend facilement que la découverte d'une nouvelle éruption >M7 change immédiatement les probabilités de retour.

Un autre changement de paradigme récent en volcanologie concerne la dynamique des processus qui semble bien plus rapide que supposée par le passé. Par exemple, les temps de résidence des magmas dans le réservoir magmatique (avant éruption) étaient considérés jusqu'à présent être de l'ordre de quelques dizaines à centaines de milliers d'années. Les données actuelles montrent qu'il s'agit plutôt de quelques dizaines de jours à quelques années. Ces travaux ont cependant leurs limites car ils sont réalisés a posteriori sur les produits des éruptions passées. Un défi dans l'avenir sera donc de trouver des modèles permettant de relier les observables aux variables internes des systèmes volcaniques afin d'améliorer les modèles prédictifs et de quantifier leurs incertitudes.

Enfin, depuis quelques dizaines d'années, les processus de déstabilisation de flanc de volcans ont été identifiés comme inhérents à l'évolution des édifices volcaniques. Ils peuvent ou non être associés à une éruption et produire des tsunamis en fonction du contexte, comme en témoigne le glissement qui a affecté le volcan Anak Krakatau en décembre 2018. De nombreuses questions



2

sont encore à résoudre concernant les événements déclencheurs et les aléas associés. Un point particulier concerne les processus en cascade dont ils peuvent découler, ou qu'ils peuvent engendrer, processus qui ne sont souvent pas pris en compte. Par exemple, les changements climatiques peuvent modifier l'état de contraintes dans un volcan et déclencher la déstabilisation de son flanc (qui peut elle-même être à l'origine d'un tsunami). De même, les liens entre séismes et volcans et la possibilité que des séismes majeurs ($>M7$) déclenchent des éruptions volcaniques, ou une réactivation de plusieurs volcans, sur des échelles de temps et d'espace variables sont des questions qui animent aujourd'hui la communauté.

Le développement des réseaux : un saut important ces 10 dernières années

Contrairement aux tempêtes et aux ouragans, les séismes et les volcans destructeurs sont liés à des processus internes, cachés, se produisant à des profondeurs atteignant plusieurs dizaines de kilomètres. Leur observation fine représente donc un grand défi. Depuis 10 ans, les réseaux ont beaucoup évolué et de grands efforts ont été faits pour installer des dispositifs d'observation de haute qualité et de haute résolution spatio-temporelle. Leur but est de mesurer tous les mouvements du sol, qu'ils soient lents et continus, ou très forts lors de séismes de grande amplitude. Actuellement, les réseaux d'observation de la Terre peuvent être continus ou temporaires et s'étendent à terre, en mer mais aussi dans l'espace (satellites avec des capteurs radar, optique, thermique et de mesure des cendres et des aérosols volcaniques tels que le SO_2 , et le CO_2). Même si les volumes de données ont considérablement augmenté, ces dernières sont maintenant transmises plus efficacement et traitées plus rapidement grâce aux

progrès de l'informatique, à la structuration des communautés scientifiques qui ont adopté des standards mondiaux et aux méthodologies du « Big data » et du « machine Learning » (intelligence artificielle).

> Des réseaux d'observation continus

Les séismes et les volcans résultent de processus géologiques se produisant à grande échelle et sur le temps long. Il est donc indispensable de disposer de réseaux d'observation permettant d'acquérir de longues séries continues de données. Ces réseaux peuvent être globaux, comme le réseau sismologique GEOSCOPE co-géré par l'IPGP et l'EOST (*figure 2*) dont le but est de contribuer à la couverture mondiale de la terre. L'amélioration des réseaux globaux depuis 20 ans a amené à la détermination rapide et systématique des caractéristiques principales (localisation, magnitude, mécanisme) des séismes de magnitude supérieure à 5. Cette magnitude est indispensable pour permettre une alerte tsunami. La sensibilité des instruments utilisés permet également la détection de nouveaux signaux, comme le montre l'observation récente des perturbations locales instantanées de la gravité, engendrées par les grands séismes (Vallée et al. 2017), une observation clef pour concevoir une alerte tsunami plus précoce (*figure 3*).

Les réseaux globaux doivent ensuite être complétés par des réseaux régionaux pour mesurer ce qui se passe à l'échelle d'un système particulier. Par exemple, le réseau d'observation de Corinthe en Grèce enregistre en continu, depuis l'année 2000, l'activité sismique de la partie ouest du rift de Corinthe. Cette zone en extension très rapide (1,5 cm /an sur 10 km) est une des plus sismiques en euro-méditerranée. En France métropolitaine, le réseau large-bande métropolitain (RLBP), composante du projet d'infrastructure RESIF, permet une meilleure

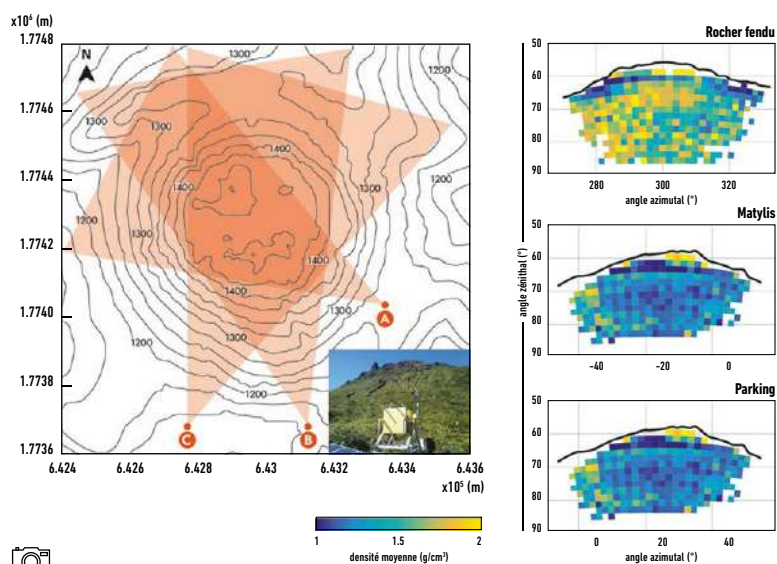


▲ PHOTO 2
Piton de la Fournaise
(Réunion) : éruption
de 2008.

© N. VILLENEUVE, OVPF IPGP

FIGURE 4 / Principe du télescope à Muons. Imagerie 3D de la Soufrière de Guadeloupe.

(MODIFIÉE D'APRÈS FIGURE ROSAS-CARBAJAL ET AL., 2017, © IPGP)



▼ PHOTO 3
L'éruption de
Soufrière Hills
à Montserrat
(1995-Présent) a
détruit Plymouth,
la capitale de l'île,
photo de 2003.

© IPGP A. LE FRIANT

caractérisation des sources sismiques et de la structure lithosphérique à l'échelle de la France. Les DOM ne sont pas oubliés, les observatoires volcanologiques et sismologiques de l'IPGP ont la charge de l'observation permanente des 3 volcans actifs (Soufrière, Montagne Pelée et Piton de la Fournaise). Les observatoires antillais, en collaboration avec le UWI Seismic Research Centre se sont équipés de moyens de communication par satellite pour le transfert des données en temps réel pour améliorer la résilience des réseaux de surveillance face aux catastrophes naturelles inhérentes aux pays tropicaux. Le réseau du consortium IPGP-SRC (Trinidad et Tobago) est quant à lui au cœur du système d'alerte aux tsunamis de la Caraïbe mis en place sous l'égide de l'UNESCO. Enfin, pour suivre l'activité volcanique soutenue du Piton de la Fournaise à la Réunion (4 éruptions et une intrusion magmatique avortée en 2016-2017), l'observatoire a densifié son réseau et développé un système d'alerte précoce (JERK) qui détecte précisément l'accélération des signaux induits par le gonflement/dégonflement du volcan. Ce système opérationnel depuis 2014 a prédit 100 % des éruptions.

► Des outils d'observation ponctuels

Parallèlement aux réseaux d'observation continus, les scientifiques développent des réseaux ponctuels afin d'imager les structures et de reconstruire la dynamique de processus naturels cachés et inaccessibles à l'observation directe. Les tomographies géophysiques (sismique, conductivité électrique, magnétotellurique, muons,



gravimétrie) sont des méthodes qui permettent d'imager les structures et d'obtenir une caractérisation 3D des circulations de fluides à l'intérieur de systèmes complexes, (figure 4), Rosas-Carbajal et al., 2017. Cette structure peut ensuite être reliée aux observations acquises par les réseaux continus afin de simuler des scénarios et d'évaluer leurs implications en termes d'aléas et de risques associés.

Enfin, pour répondre au défi de l'amélioration des connaissances des cycles sismiques et volcaniques, l'acquisition des données s'est étendue et développée en mer avec des campagnes de géophysique multi-méthodes (sismique, imagerie, bathymétrie, magnétométrie, gravimétrie) couplées à des observations *in situ*, des prélèvements, des forages profonds et l'installation de capteurs en fond de mer. Ces données fournissent des archives géologiques très anciennes sur les phénomènes telluriques (histoire éruptive, paléo-sismicité, paléo-tsunamis et paléo-glissements de terrain sous-marin) car les sédiments marins protègent et préservent les enregistrements (Le Friant et al., 2015), (photo 4). L'analyse de la croissance des coraux est une nouvelle approche qui a permis de dater les variations brutales du niveau de la mer engendrées par les paléo-séismes à l'instar des cercles de croissance des arbres qui donnent quant à eux une information climatique.

Des pistes pour le futur

La communauté scientifique n'est pas encore en mesure de prédire quand, comment et où vont se déclencher le prochain séisme ou la prochaine éruption, mais elle a considérablement progressé dans la compréhension des processus mis en jeu. Il est essentiel de continuer à observer, adapter et développer nos réseaux, en s'orientant vers le développement de l'instrumentation en forage et en mer et en poursuivant nos efforts de modélisation conjointe des données issues de différentes disciplines.

› Le développement de l'observation

Le développement de l'instrumentation multiparamètres en forages est primordial car il permet de s'affranchir des perturbations extérieures telles que celles liées aux vibrations de surface produites par l'activité humaine, et des effets environnementaux tels que les variations de température ou de pression. Il est alors possible d'avoir accès à des signaux très faibles, lents ou rapides, qui seraient indétectables en surface. En cas d'éruption volcanique, les sites de forages, implémentés sur les zones plus éloignées du volcan, et donc peu vulnérables, sont aussi extrêmement importants car ils permettent de protéger les instruments qui pourront continuer à enregistrer le signal et donc permettre d'interpréter la progression de l'activité.

En sismologie, des efforts considérables sont engagés dans le développement d'observatoires sous-marins câblés, mais jusqu'à maintenant restreints à quelques zones sismiques, dont celle du séisme japonais de 2011 avec le déploiement de câbles de milliers de km de long (S-NET). Des développements de nouveaux capteurs optiques, permettant de mesurer les vibrations, les températures

ENCADRÉ 1

► CHERCHER-OBSERVER-INFORMER-SURVEILLER-PRÉVENIR-ALERTER : COMMENT LES SCIENCES PEUVENT RÉPONDRE AUX DEMANDES SOCIÉTALES ?

Intégrer les lacunes de connaissances et les incertitudes dans la gestion du risque est une problématique complexe et difficile à résoudre. Dans les zones volcaniques, l'idée générale « on ne peut rien faire contre le volcan mais on saura quand l'éruption arrivera » est encore largement répandue. Or, pour 50% des éruptions, la phase la plus intense et potentiellement dangereuse a lieu dans les 24h qui suivent le début de l'éruption. La transmission aux autorités des informations intégrant des probabilités et leurs incertitudes ainsi que des scénarios évolutifs est un exercice délicat car les autorités en charge de la protection civile attendent des scientifiques des messages plus affirmatifs et certains. Les changements de comportement à La Soufrière de Guadeloupe et l'activité sismique récente à Mayotte sont deux exemples d'actualité particulièrement intéressants. Les phénomènes sismiques et volcaniques y sont en effet interconnectés et entraînent la nécessité de diffusion de nouvelles informations pour répondre à la demande sociétale, malgré les lacunes de connaissance. Il est nécessaire d'avancer en décrivant et en adaptant les scénarios. Cette notion d'adaptabilité et de progression dans les scénarios pour la transmission de l'information et la prévention est indispensable à prendre en compte. —

et les déformations en exploitant la sensibilité de la fibre elle-même, ouvrent de nouvelles perspectives pour utiliser des dizaines de kilomètres de câbles comme des milliers de capteurs optiques. Des techniques similaires permettraient d'exploiter les câbles optiques de télécommunication existants, apportant un maillage inédit pour la surveillance du cœur des océans.

Afin d'améliorer le seuil de détection des perturbations de la gravité engendrées par les grands séismes (qui ont un potentiel d'alerte sismique très précoce), de nouveaux concepts sont aujourd'hui explorés afin de s'affranchir du bruit sismique. Ces recherches instrumentales sont très actives car elles motivent également les physiciens qui doivent faire évoluer leurs instruments pour progresser dans la caractérisation des ondes gravitationnelles.

› De nouvelles approches de modélisation des processus

Si l'observation s'est considérablement améliorée, il est important de progresser dans la modélisation des processus. En volcanologie, le point critique sera de modéliser l'évolution des propriétés physiques et mécaniques de la roche qui contrôlent la dynamique de l'éruption. En ce qui concerne la modélisation des formes d'ondes sismiques, les codes de calcul actuels permettent de modéliser de manière réaliste, en 3D, la propagation des

► APPORTS DU BRGM À LA GESTION DE CRISE LIÉE À L'ESSAIM SISMIQUE DE MAYOTTE EN COURS DEPUIS MAI 2018

Une crise sismique en essaim localisé a débuté le 10 mai 2018 à Mayotte. Après une forte énergie libérée jusqu'à fin juin et une relative accalmie durant l'été, l'activité demeure soutenue. À fin janvier 2019, on comptait 1 590 séismes de magnitude supérieure à 3,5, 427 supérieurs à 4,0, 116 à 4,5 et 29 à 5,0. Une magnitude maximale de 5,9 a été atteinte le 15 mai 2018. Les séismes ont provoqué des dégâts modérés et quelques blessés légers. Ils ont surtout engendré une très vive inquiétude localement et souligné une forte vulnérabilité de Mayotte aux séismes. Depuis octobre et les travaux de P. Briole de l'École nationale supérieure, l'essaim sismique serait lié à une éruption volcanique de grande ampleur située en mer à l'est de l'île.

Seul organisme public géoscientifique présent à Mayotte, le BRGM a été aux côtés des autorités dès le début de la crise. À ce titre, un de ses experts a participé du 1^{er} au 7 juin 2018 à une mission interministérielle d'évaluation. Par ailleurs, disposant sur place de stations sismiques (financées par la DGPR dans le cadre du Réseau accélérométrique permanent), des informations fiables ont pu être fournies aux autorités afin qu'elles puissent gérer la crise, informer les médias et calmer l'angoisse des populations. Bien que n'ayant pas de mission de surveillance sismologique à Mayotte ni d'organisation de suivi 24h/24, le BRGM a pu mobiliser une équipe pluridisciplinaire (géologues, sismologues, informaticiens, experts en gestion de crise, spécialistes en communication...) pour répondre à une situation exceptionnelle. Un suivi quotidien de la sismicité a ainsi été assuré au plus fort de la crise. Un appui de l'IPG Paris et de l'université de Strasbourg a par ailleurs été nécessaire, de même que l'exploitation de stations sismologiques présentes dans la région, notamment aux Comores et à Madagascar.

Depuis le début de la crise, plus d'une centaine de bulletins de situation sismologiques ont été transmis régulièrement au préfet de Mayotte et aux différents ministères concernés (Intérieur/DGSCGC, Outre-mer/DGOM, Écologie/DGPR et Recherche/DGRI). Le BRGM a répondu à de nombreuses sollicitations de la presse notamment à Mayotte et des pages internet dédiées ont été élaborées et régulièrement mises à jour sur le site du BRGM.

Le suivi de la sismicité avec les stations mahoraises a permis une meilleure interprétation des signaux sismiques, une localisation et estimation de la magnitude des séismes plus précise que celle des réseaux internationaux, de même qu'un abaissement du seuil de détection à 3,5 par rapport à ces réseaux. Il en résulte une plus grande richesse des données au profit de la compréhension des phénomènes et de la lecture de l'évolution de la crise. Même si à ce stade il y a encore beaucoup d'inconnues, ce qui a été réalisé souligne l'importance d'un réseau sismologique de qualité tant du point de vue scientifique que pour la gestion de crise. Il est nécessaire à cet égard que l'ensemble des acteurs scientifiques et publics concernés se mobilise et se coordonne. L'observation pérenne est indispensable, y compris dans une zone supposée de sismicité modérée telle que Mayotte.

À l'initiative du BRGM dans un premier temps, puis devant l'ampleur du phénomène volcano-sismique en cause, la communauté scientifique (CNRS/INSU, IPG Paris, IPG Strasbourg, École nationale supérieure, université de La Réunion, université de Clermont-Ferrand, IFREMER, Observatoire du Piton de la Fournaise...) s'est mobilisée pour comprendre les phénomènes en cours et leur évolution,

à travers des projets scientifiques d'envergure : campagne océanographique hauturière « SISMAORE » (envisagée en 2020), projet ANR « COYOTES » (en cours d'instruction) et appel à projets TelluS-Mayotte lancé par CNRS/INSU. Le BRGM est associé à un des projets lauréat porté par l'IPG Paris sur le suivi instrumental de la crise, avec le déploiement de sismomètres à terre et en mer.

Enfin, en plus de la compréhension de la crise en cours, il est nécessaire de poursuivre, en les renforçant, les actions déjà entreprises pour une meilleure gestion du risque sismique à Mayotte : simulation des conséquences d'un séisme majeur, préparation à la gestion de crise, révision de l'aléa sismique local, information préventive des populations, poursuite du programme « Sismo des écoles »...

Frédéric TRONEL

Directeur régional Mayotte

✉ f.tronel@brgm.fr

Jean-Marc MOMPÉLAT

Direction des actions territoriales

✉ jm.mompelat@brgm.fr

Thierry WINTER

Direction du développement

✉ t.winter@brgm.fr

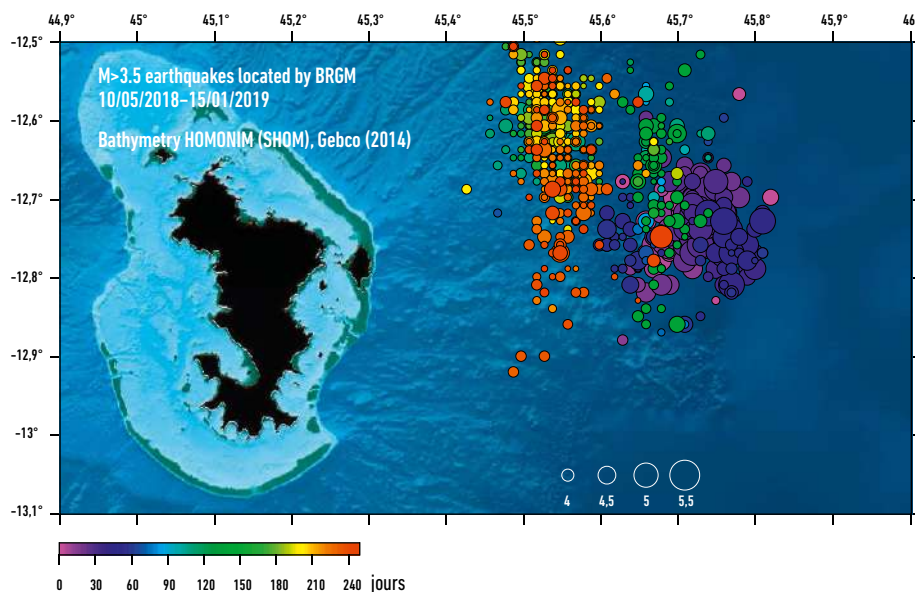
Didier BERTIL

Direction risques et prévention

✉ d.bertil@brgm.fr

Sismicité liée à l'essaim sismique de Mayotte à mi-janvier 2019

© LEMOINE, BRGM





▲ PHOTO 4
Un forage au large
de Montserrat
(expédition
IODP 340) pour
accéder à l'histoire
du complexe
volcanique de l'île.

© IPGP A. LE FRIANT

ondes aux longues périodes (quelques secondes à l'échelle locale régionale, et une vingtaine de secondes à l'échelle mondiale). Cependant, aux plus hautes fréquences, la connaissance du milieu de propagation est encore insuffisante pour des simulations fiables. Un objectif ambitieux est de développer des modèles thermo-hydro-mécaniques, des failles en sismologie, et des édifices éruptifs en volcanologie. À ce jour, nous manquons de mesures pour caler ces modèles mais nous espérons en avoir d'ici quelques années en accédant à une meilleure connaissance de la structure dans les zones de failles sismiques et dans les réservoirs magmatiques et les systèmes hydrothermaux des volcans.

Afin de répondre aux demandes sociétales et d'avoir une approche globale, il est urgent de faire un effort de modélisation « intégrée » en tenant compte de l'ensemble des mesures réalisées par les diverses disciplines impliquées. Par exemple, à Corinthe, la probabilité d'un séisme de magnitude supérieure à 6 à l'échelle de 30 ans a pu être calculée en utilisant cette combinaison d'approches, mais l'équivalent ne peut toujours pas être fait aux Antilles par manque d'information sur la sismicité passée et sur les zones couplées. Des progrès ont également permis de développer des simulations numériques complexes de la dynamique de phénomènes telluriques tels que les écoulements volcaniques, les retombées de cendres volcaniques, les tsunamis et les glissements de terrain. L'avenir est

maintenant de pouvoir modéliser un système volcanique dans sa globalité et son impact sur le système Terre pour évaluer les effets dominos, les couplages et les forçages (Machine learning).

Aujourd'hui, une partie importante de la population dans le monde vit proche de volcans actifs, de failles et de zones côtières et ce chiffre ne va cesser d'augmenter compte tenu des migrations fortement dépendantes des changements globaux. Il y a donc une véritable urgence de recherches concernant le système Terre pour aller vers une société de prévention plutôt qu'une société de réparation, et donc une société résiliente qui pourra offrir des perspectives de développement. ●

ABSTRACT

Millions of people and the economy of entire countries can be impacted by natural hazards such as volcanic eruptions, earthquakes, landslides or tsunamis. Considerable progress has been made to understand their causes and consequences and to improve their monitoring. However, even though these advances have directly benefited society, geophysicists and geologists are not yet able to accurately predict the timing, location, and magnitude of earthquakes as they cannot predict the onset, intensity, or duration of an eruption. After the giant earthquakes of 2004 in Indonesia and 2011 in Japan and the characterization of several super eruptions (having had climatic impacts), the major stakes in seismology and volcanology are to improve the knowledge of the seismic and volcanic history of the earth and to particular to understand the processes that occur in the subduction zones. In general, natural hazards are the result of large-scale geological processes that evolve over particularly long time intervals. Research in this area therefore relies heavily on permanent, semi-permanent or one-off multiparameter observation networks located in disaster-prone regions. For example, the IPGP operates volcano, seismological, magnetic observatories and erosion processes, all over the planet and is officially responsible for the permanent observation of the three active volcanoes in France. While the observation networks are currently booming and have made it possible to cross important milestones in science, it is essential to continue their development by focusing in particular on borehole instrumentation, marine instrumentation and the development of modelling coupled with machine learning. It is essential to develop research on the Earth system to impulse a society of prevention rather than foster a society of repair.

BIBLIOGRAPHIE

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. *Geochem., Geophys., Geosyst.*, 16, 2, 420-442. **Rosas-Carbajal et al., 2017** – Three-dimensional density structure of La Soufrière de Guadeloupe lava dome from simultaneous muon radiographies and gravity data. *Geophysical Research Letters*. 10.1002/2017GL074285. **Satriano, C. et al. (2014)** – Structural and thermal control of seismic activity and megathrust rupture dynamics in subduction zones : Lessons from the Mw 9.0, 2011 Tohoku earthquake, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 403, 287-298, doi 10.1016/j.epsl.2014.06.037. **Vallée, M., et al.** – Observations and modeling of the elastogravity signals preceding direct seismic waves, *Science*, 358, 1164-1168, 2017. **Vidal, C. et al., 2016** – The 1257 Samalas eruption (Lombok, Indonesia) : the single greatest stratospheric gas release of the Common Era. *Scientific Reports* 6, pp.34868 (2016), doi: 10.1038/srep34868



Mesurer l'érosion des falaises côtières de craie : le cas de Dieppe

Unique à la fois par son contexte géologique et par l'importance de l'éboulement qui y a eu lieu en 2012, le cas de la falaise de Dieppe a permis de développer une méthodologie efficace quant à l'identification et à la prévention du risque lié au recul du trait de côte.

AUTEURS



Pierre PANNET
Geomorphologue, directeur régional de la Direction régionale Hauts-de-France, BRGM
✉ p.pannet@brgm.fr



Thomas JACOB
Ingénieur gravimétricien, Direction Risques et prévention, BRGM
✉ t.jacob@brgm.fr



Thomas DEWEZ
Ingénieur chercheur, Direction Risques et prévention, BRGM
✉ t.dewez@brgm.fr



Baptiste MEIRE
Ingénieur géologue, Direction régionale Normandie, BRGM
✉ b.meire@brgm.fr



Kevin SAMYN
Géophysicien, directeur régional délégué Grand-Est, site de Strasbourg, BRGM
✉ k.samyn@brgm.fr



PHOTO 1
La falaise de Dieppe en 2017, cinq ans après l'éboulement.

© GILDAS NOURY

Dieppe, la zone littorale est marquée par d'imposantes falaises de craie. Les habitations situées au-dessus de ces falaises profitent ainsi d'un point de vue exceptionnel. Mais ce littoral est aussi marqué par l'érosion des falaises de craie qui le constituent, induisant un recul inexorable du trait de côte. Dans une région à fort enjeu touristique, l'impact du recul des falaises sur les habitations et les équipements a donc un écho important. D'un point de vue géologique, cette partie du littoral normand se distingue du reste de la côte d'Albâtre par une géologie diversifiée (couverture de sables et d'argiles sur la craie blanche), et fracturée. Cela se traduit par un aspect singulier de la falaise sur cette partie de la côte.

La problématique du recul du trait de côte¹ a déjà été souvent traitée. Les études existantes se concentrent surtout sur l'estimation des moyennes de reculs passés. Il est

¹/ Trait de côte : ligne marquant la limite jusqu'à laquelle peuvent parvenir les eaux marines.

en effet recommandé d'analyser les reculs passés pour tenter de prévoir les reculs à venir.

L'analyse du recul de la falaise dieppoise est rendue compliquée par le caractère irrégulier de l'érosion, qui peut être amplifiée par l'existence de spécificités géologiques locales, mal connues auparavant. Par ailleurs, l'homme a depuis plusieurs siècles tenté d'affronter et de ralentir l'érosion. De ce fait, l'analyse des reculs passés ne correspond pas aux dynamiques naturelles, mais à une situation artificialisée, ce qui fausse une projection dans l'avenir. Enfin, l'urbanisation à proximité de la falaise peut accélérer l'érosion, par l'intermédiaire par exemple des rejets d'eaux pluviales ou usées. Cette urbanisation étant récente, son impact n'est pas visible dans les analyses des données historiques.

Afin de mesurer cette érosion le plus précisément possible, et d'ainsi pouvoir donner des outils aux acteurs du territoire, le BRGM a donc développé une méthodologie permettant de tenir compte, du mieux possible, de l'ensemble des variables intervenant dans ce phénomène d'érosion.

L'évènement exceptionnel de décembre 2012

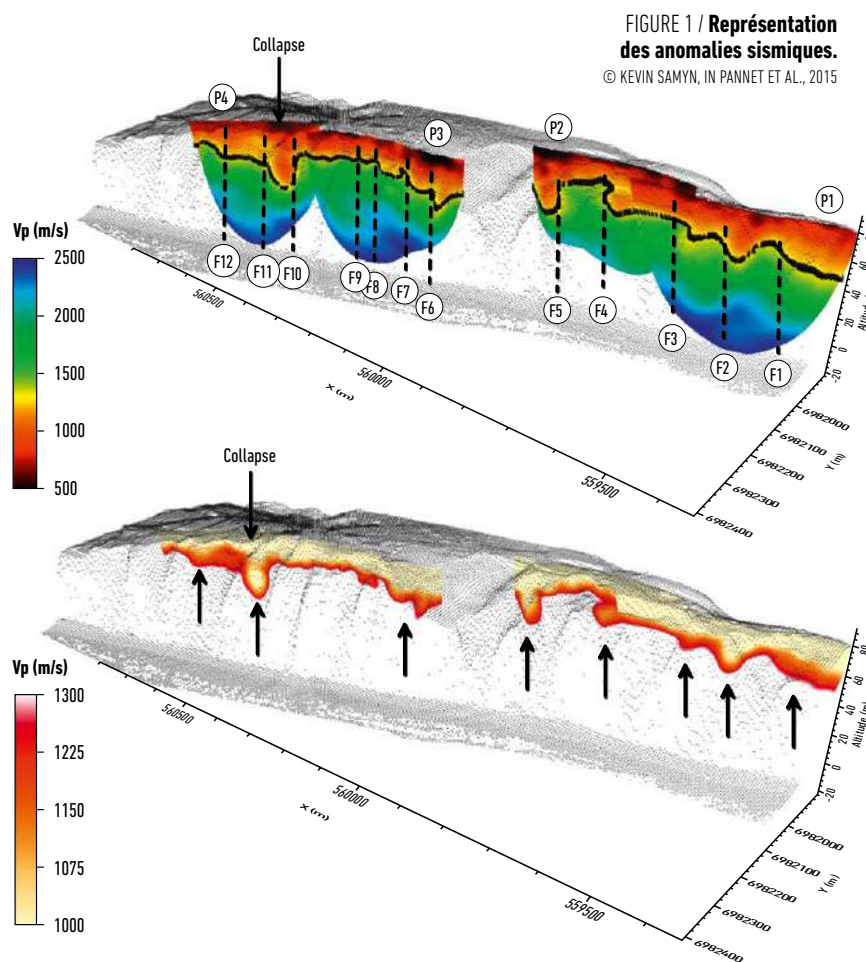
Fin 2012 s'est produit à Dieppe un évènement exceptionnel et atypique à la fois par son ampleur et par sa genèse.

De 20 000 à 30 000 m³ de craie blanche s'écroulèrent sur la plage, des blocs se déplaçant en quelques secondes jusqu'à environ 110 mètres (soit plus de deux fois la hauteur de la falaise de craie avant l'éboulement). Le déplacement des blocs sur une telle distance est très rare et nécessite une énergie considérable. Il est en effet communément admis qu'en pied de falaise de craie, la zone où il est très peu probable d'être impacté par un éboulement est située à 1,5 fois la hauteur de la falaise. Une telle énergie amena donc à s'interroger sur son origine.

Quelques jours après, plus de 100 000 m³ de matériaux argileux et sableux ont glissé. Cela a mis en évidence un contexte géologique inattendu, qui a entraîné une révision de la connaissance locale.

Le phénomène a ensuite évolué activement pendant plusieurs mois, provoquant, au final, un recul du sommet de la falaise de plus de 40 mètres. Il entraîna la destruction d'une maison et d'équipements ainsi que l'évacuation de plusieurs autres logements voisins et la fermeture de la route du littoral. Le phénomène obligea même à dévier le tour de France en juillet 2015. Il est toujours actif à ce jour.

Ces observations nous ont amenés à revoir le contexte géologique local. En effet, la présence d'une telle quantité de matériaux argileux et sableux ne peut pas s'expliquer par la seule couverture de la craie. Or, bien que le littoral dieppois ait un faciès particulier, avec notamment par endroits un aspect très ciselé dû à des remplissages argileux ou la présence visible de karsts (cavités naturelles) comblés, des poches de plusieurs dizaines de milliers de m³ n'étaient pas décrites. Il est donc apparu nécessaire



d'approfondir nos connaissances sur le sous-sol à proximité du littoral afin de bien appréhender le comportement de la falaise face à l'érosion.

L'actualisation des données géologiques locales

Le premier objectif de notre étude a été d'analyser la nature des terrains afin de savoir si d'autres phénomènes du même genre étaient possibles et pouvaient occasionner d'autres dégâts sévères.

La zone étant urbanisée, il est difficile de réaliser des investigations géologiques visant à identifier des poches de sables et d'argiles de grande taille dans la craie. Le BRGM a donc imaginé une méthodologie d'investigations géophysiques innovantes, en couplant deux méthodes : sismique et microgravimétrie.

Les poches recherchées étant de nature différente que la craie encaissante, cela devait constituer une hétérogénéité visible en imagerie géophysique (matériaux de remplissage présentant un contraste de vitesse de propagation des ondes sismiques et un contraste de densité pour la microgravimétrie, par rapport à la craie encaissante).

La mise en place de cette méthode innovante a permis d'obtenir une image géologique du massif situé à l'arrière de la falaise avec une grande précision. Une vingtaine(19)



PHOTO 2

Glissement de terrain sur la côte crayeuse à Dieppe. Une poche d'argile et de sable a été éventrée par l'érosion des falaises. Elle se vide progressivement sur la plage. Le recul de la tête d'escarpement menace la route départementale Dieppe Pourville. Panorama aérien oblique photographié le 16 avril 2014 depuis un avion (Haute-Normandie, 2014).

© THOMAS DEWEZ, BRGM

d'anomalies interprétées comme des poches de matériaux meubles (*voir figure 2*) ont été ainsi identifiées et nous avons pu mettre en évidence la géométrie du toit de la craie. Ces données ont été confirmées grâce à des forages descriptifs ciblés.

Le second objectif concernait la définition de la dureté et de la fracturation du trait de falaise. Ces deux paramètres jouent un rôle majeur sur la genèse des éboulements. Un travail sur la lithologie susceptible de générer des différentiels d'érosion est notamment nécessaire.

Quantification des vitesses de recul et de leur évolution

Les campagnes historiques de photos aériennes verticales de l'IGN, puis plus récemment les méthodes 3D permettent de retracer l'évolution du recul de falaise depuis environ un siècle.

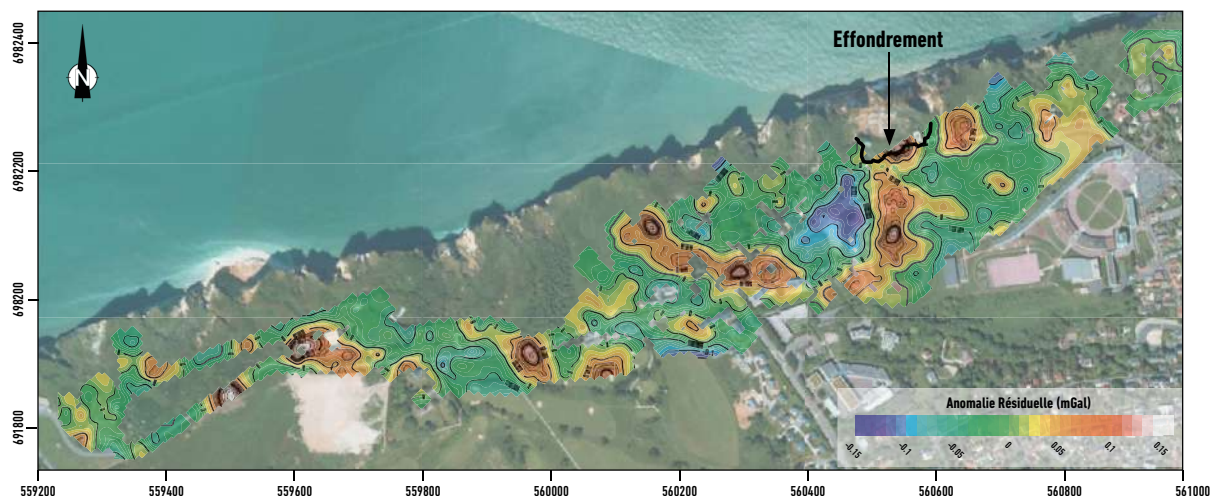
Plusieurs études ont traité par le passé de ce paramètre. Elles utilisent des techniques variées, principalement basées sur une analyse de l'imagerie existante, et notamment des vues aériennes. Ces méthodes donnent une bonne idée des moyennes de recul au 20^e siècle dernier (de l'ordre de 0,4 m/an en moyenne à Dieppe).

Des éléments anciens plus singuliers peuvent aussi apporter des informations quant à la typologie des phénomènes, aux dynamiques d'érosion de la falaise ou à l'impact d'infrastructures de protection aujourd'hui disparues : il s'agit des cartes postales anciennes ou des articles de presse. Il a ainsi pu être mis en évidence qu'un phénomène majeur, comparable à celui de 2012, s'était déjà produit en 1896 à proximité.

Au 21^e siècle, la technologie permet d'obtenir des mesures très précises du relief, que ce soit via des techniques laser, ou encore du traitement 3D de photographies.

FIGURE 2 / Carte des anomalies gravimétriques de la zone étudiée. En tons rouges, les anomalies lourdes, marqueurs des "poches" de sable et d'argile.

© T. JACOB IN PANNET ET AL, 2015, BRGM





Pour compléter la compréhension du site de Dieppe, il manquait des données permettant de quantifier les dynamiques de recul actuel. Le BRGM a donc réalisé plusieurs campagnes de prises de vue obliques, se prêtant à un calcul photogrammétrique 3D et à la quantification du taux de recul actuel, depuis la survenance du glissement de terrain de 2012.

L'analyse de l'imagerie passée et récente permet donc aussi d'identifier des dynamiques.

Aussi, concernant le secteur de Dieppe, une augmentation des vitesses d'érosion a été constatée ces dix dernières années, indépendamment du phénomène de décembre 2012. L'érosion s'est accélérée quelques années avant cette occurrence, suggérant une mise en place du phénomène dans le temps, et donc laissant la possibilité d'éventuelles prévisions. Par ailleurs l'accélération du taux d'érosion annuel est observé sur un temps court. La brièveté de l'intervalle d'observation empêche cependant la validation statistique nécessaire à l'extrapolation au futur ; il est donc nécessaire de s'intéresser aux variables dynamiques régissant le recul de la falaise.

Étude des différentes variables intervenant dans les dynamiques d'érosion

Les variables régissant l'action érosive de la falaise sont nombreuses. On peut distinguer les variables marines, climatiques, continentales et anthropiques.

› Variables marines

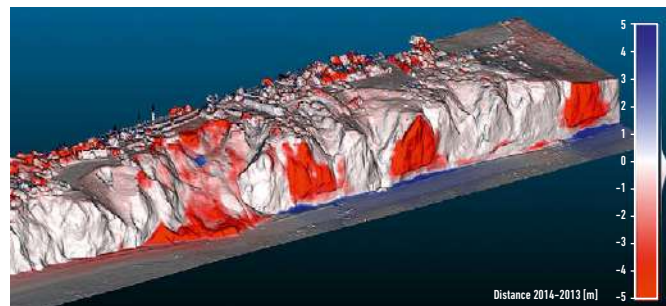
Ce sont les facteurs les plus évidents quand on pense à l'érosion côtière. Il s'agit d'abord de l'impact de la houle. À Dieppe, le marnage (différence de hauteur d'eau entre basse mer et pleine mer) peut dépasser 9 mètres : le pied de falaise est ainsi directement soumis à l'impact de la houle en période de pleine mer, notamment de vive eau, pendant près de 8 heures par jour. Cette houle, parfois

ENCADRÉ 1

► PHOTOGRAMMÉTRIE PAR DRONE

Afin de comprendre l'érosion des falaises côtières, le BRGM utilise depuis 2011 la photogrammétrie en structure-from-motion (SfM), une technique permettant de reconstruire le relief en 3D à partir de photos 2D stéréoscopiques.

« Cette technique est une révolution pour la compréhension en géomorphologie. Cela permet d'avoir une vision très détaillée du relief, un aperçu au centimètre près sur des hectares entiers au moment où on en a besoin, explique Thomas Dewez, ingénieur chercheur en mouvements de terrain.



Changement de relief de la falaise de Dieppe reconstruit à partir de photos aériennes obliques du 22 juillet 2013 et du 16 avril 2014 (photo 2 ci-contre). Les tons rouges montrent les zones en érosion entre 2013 et 2014. © T. DEWEZ, BRGM

Concrètement, une série de photos prises depuis un avion ou un drone permettent de recréer la surface observée via des nuages de points en trois D. Si la photogrammétrie est née presque en même temps que la photographie, vers 1850, l'apport du numérique a changé la donne dans les années 2010 en augmentant considérablement la quantité de photos traitées et donc la précision des résultats obtenus. « Cette nouvelle technique permet d'obtenir une meilleure compréhension de l'évolution du phénomène observé et des processus à l'œuvre. Dans le cas d'une falaise, il peut s'agir de la présence de fractures dans la roche, du suivi de la quantité de blocs qui s'érode, de l'endroit et du moment où ceux-ci tombent, de la relation avec la lithologie ».

En complément de prises de vues depuis un avion ou un hélicoptère, l'utilisation de drone, depuis 2015, permet en outre d'obtenir une imagerie à plus haute résolution, permettant de localiser chaque centimètre carré de surface visible. La structure-from-motion a permis d'obtenir des résultats sans précédent concernant l'érosion de la falaise de Dieppe, fournissant aux gravimétriciens une image du relief à jour, indispensable à leurs calculs.

La structure-from-motion trouve également des applications pour le suivi des littoraux sableux, pour l'identification de minéraux cibles dans les carrières mais aussi en géothermie, voire sur les sites pollués. —



PHOTO 3
Aménagements
anthropiques
piégeant les galets
sur la plage devant
Pourville-sur-Mer.
© JEAN DECAUX



violente, notamment lors des tempêtes hivernales, joue un rôle d'érosion mécanique sur le pied de falaise.

Cette érosion peut être atténuée par des cordons de galets présents en pied de falaise, qui absorbent une partie de l'énergie transmise par la houle. Mais elle peut aussi être accrue lorsque les galets ne sont pas assez nombreux en pied de falaise et qu'ils sont repris par la houle lors des épisodes de tempêtes, jouant alors le rôle de projectiles accélérant l'érosion mécanique.

Ce constat nécessite de s'intéresser au déplacement des sédiments, notamment à l'évolution de la géométrie des cordons de galets. Or sur la côte d'Albâtre, on constate une très forte diminution des cordons de galets en pied de falaise pour trois raisons principales. Ils ont tout d'abord été fortement exploités durant le XX^e siècle, avant que ce ne soit interdit. Ensuite, les tentatives de lutte contre l'érosion (épi, digues, jetées de port) ont eu pour conséquence de bloquer les galets, naturellement transportés par la dérive littorale. Dans la région de Dieppe, on estime aujourd'hui que plus de 70 % des galets sont bloqués par des aménagements anthropiques. Enfin, ces galets sont naturellement manquants. En effet, la plupart d'entre eux proviennent de la forte période d'érosion, de transport et de dépôt de la dernière période glaciaire (-90 000 à -10 000 BP). Ils ont été transportés par les cours d'eau, déposés, notamment en baie de Seine, repris par la dernière remontée du niveau marin, ont été plaqués contre la falaise puis transportés par la houle. On estime aujourd'hui qu'il n'existe plus de réserve naturelle de galets pouvant réalimenter les cordons : ceux produits par l'érosion actuelle des falaises sont en nombre insuffisant pour compenser le phénomène d'érosion.

Nous sommes donc aujourd'hui en situation de crise sédimentaire (Costa, 1999). L'absence de perspective de retour d'un cordon de galets puissant en pied de falaise laisse désormais le champ libre à la houle.

► Variable climatique

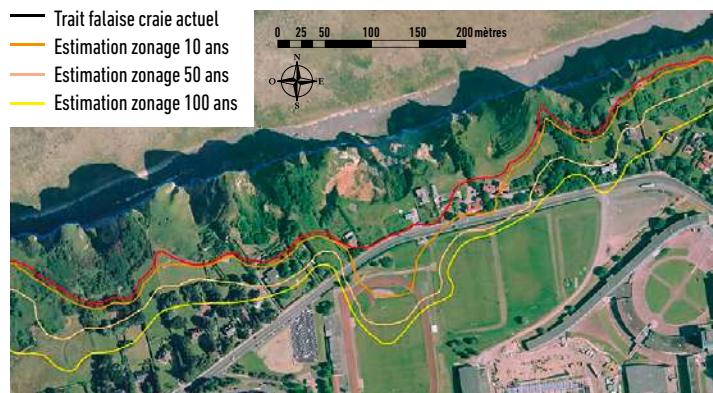
Le climat joue un rôle important dans l'érosion, pour plusieurs raisons : l'arrivée d'eau continentale, les phénomènes de gel/dégel ou encore les tempêtes occasionnant de fortes houles ou de fortes précipitations.

Aussi, bien que difficilement quantifiable en l'état actuel des connaissances, l'impact du changement climatique peut jouer un rôle non négligeable sur l'évolution du recul du trait de côte.

Les scénarios du GIEC montrant une élévation du niveau des mers estimée entre 18 et 38 cm pour le plus favorable et 26 à 59 cm. Cela aura pour conséquence de renforcer l'impact de la houle sur le pied de falaise dans la région de Dieppe, comme ailleurs. La probable augmentation des phénomènes climatiques extrêmes renforcera encore ce phénomène. On pense donc forcément à la répétition des tempêtes et à l'impact des eaux continentales lors d'événements pluvieux intenses ou anormalement longs, comme en 2012, à Dieppe, juste avant le phénomène d'éboulement majeur.

FIGURE 4 / Carte indiquant le zonage de péril imminent estimé à différents termes.

© PANNET ET AL., 2015, BRGM



> Variable continentale

Les eaux continentales circulant dans le massif crayeux le font préférentiellement via la fracturation ou les réseaux existants. C'est particulièrement vrai à Dieppe, où le contexte est faillé et karstique. L'eau circulant dans les fractures a pour conséquence de les agrandir et de les rendre plus vulnérables aux assauts de la houle.

> Variable anthropique

L'action de l'homme a également un impact important sur les dynamiques d'érosion.

C'est le cas dans un milieu urbain comme à Dieppe, où la gestion de l'eau peut jouer un rôle prépondérant, notamment en raison des poches contenant des matériaux sableux, et qui peuvent se charger d'eau à l'arrière du trait de falaise. Une mauvaise gestion des eaux (drainage, eaux pluviales, usées...) pourra donc avoir un impact sur la cohérence de la falaise (dissolution chimique, surtout en cas de présence d'eaux acides) ou sur l'occurrence de phénomènes majeurs.

On peut enfin citer une dernière variable, biologique, qui peut avoir un impact à long terme. Bien qu'anecdotique, l'action des algues et de la faune (coquillages) fait baisser régulièrement la surface de l'estran (de l'ordre du mm/an ; Andrew et Williams, 2000), ce qui, à long terme, a pour conséquence d'augmenter l'énergie de la houle, et donc son impact sur la falaise.

Vers une meilleure prévention

L'étude des vitesses et des dynamiques de recul, des facteurs de prédispositions et des variables dynamiques régissant l'érosion des falaises a permis de sectoriser la falaise en secteurs homogènes. Chacun de ces secteurs s'est vu attribué un phénomène maximal de référence, ainsi qu'une prévision de vitesses de recul à court, moyen et long terme, prenant en compte les différentes variables identifiées et étudiées. La caractérisation d'un phénomène maximal possible et de ses conséquences permet d'identifier une zone pour laquelle la sécurité des biens

ENCADRÉ 2

▶ ÉTUDE HISTORIQUE

S'il est parfois insuffisant de s'arrêter à l'étude historique (images, presse...) pour extrapoler les vitesses d'érosion futures, l'analyse de ces éléments permet cependant d'identifier des phénomènes d'érosion passés, la morphologie de la zone littorale à différentes époques ou l'effet de certains aménagements anthropiques.

Ainsi, concernant Dieppe, l'imagerie ancienne, et notamment les photographies de la fin du XIX^e siècle et de la première moitié du XX^e siècle, a permis de mettre en évidence plusieurs facteurs impactant les dynamiques d'érosion.

Il a par exemple pu être identifié que des pêcheurs peu aisés ont pu vivre dans des habitats troglodytes établis dans des cavités du bas de la falaise, protégées par des aménagements de fortune (levées de terre), ou qu'au début du XX^e siècle, le pied de falaise semblait protégé par



Carte postale du littoral de Dieppe du tout début du XX^e siècle.

un épais cordon de galets ou bien encore qu'un phénomène exceptionnel, similaire à celui de 2012, s'était déjà produit, probablement en 1896 (presse locale). Il est d'ailleurs parfaitement visible en arrière-plan sur une carte postale du tout début du XX^e siècle. —

et des personnes ne peut plus être assurée, une zone dans laquelle les enjeux doivent être considérés en situation de péril grave et imminent (voir figure 4). La prévision des vitesses de recul permet d'estimer l'évolution de cette zone de péril à différents termes.

Grâce à ces travaux, il a donc pu être proposé des scénarios d'évolution, notamment sous forme de cartographies prédictives du trait de la falaise à différents termes (du court terme jusqu'à 100 ans).

Ces outils permettent aux acteurs du territoire d'avoir les informations nécessaires pour réfléchir à un aménagement à long terme de la frange littorale. ●



▼ PHOTO 4

Falaise de craie et platier à Dieppe, à proximité (SW) de la zone de glissement.

© GILDAS NOURY

ABSTRACT

The chalk cliffs on the Dieppe coastline are being severely eroded, and the coastline is retreating inexorably as a result. This erosion is due to the friable geological context in combination with factors of erosion, primarily the force of the sea and the powerful swells crashing against the foot of the cliffs each day. Humans have tried for centuries to cope with these hazards, by adapting their habitat and attempting to protect the shore by erecting dykes or breakwaters. But these human actions do not always achieve the desired result and can sometimes even exacerbate the risks arising from natural hazards, by erecting ill-suited coastal defences or housing in inappropriate locations. Erosion as a consequence of unregulated urban development in the second half of the 20th century is now threatening cliff-top houses and amenities to the south-west of Dieppe. In late 2012, erosion triggered an exceptional phenomenon, in terms of the volume of falling rock (over 100 000 m³), but also because it uncovered a geological context that did not correspond to the known data. These unusual conditions required the BRGM to implement new methods in order to understand the context and dynamics of erosion, and thus to identify the risks. The studies undertaken have made it possible to predict the risks at different timescales and to provide the public authorities with tools to ensure the safety of people and property.



BIBLIOGRAPHIE

Dewez, T., Rohmer, J., Regard, V., and Cnudde, C., 2013. – Probabilistic coastal cliff collapse hazard from repeated terrestrial laser surveys: case study from Mesnil Val (Normandy, northern France). *Journ. Coast. Res.*, Sp. Iss. 65, DOI:10.2112/SI65-119. Costa S. (1999) – Sédimentologie des plages de galets des côtes françaises de la Manche : application à la défense contre la mer / The sedimentology of shingle beaches on the French Channel coasts : its application to sea defence. In : *Revue de géographie de Lyon*. Vol. 74 n°1, 35-43 p. Letortu P. (2013) – Le recul des falaises crayeuses haut-normandes et les inondations par la mer en Manche centrale et orientale : de la quantification de l'aléa à la caractérisation des risques induits. *Thèse de doctorat*. Université de Caen. 414 p. Jacob T., Samyn K., Bitri A., Quesnel F., Dewez T., Pannet P., Meire B. (2018) – Mapping sand and clay-filled depressions on a coastal chalk cliff-top using gravity and seismic tomography refraction for landslide hazard assessment, in Normandy, France. *Engineering Geology* 246, 262-276. Pannet P., Meire B., Boulet M., Quesnel F., Jacob T., Samyn K., Bitri A., Dewez T., coll. Lasseur E., Ardito L., Barbier R., François B., Guizouarn G., Dupuis C., D. Idier, Raymond L., Branellec M., Leroi M., Chesne A.. (2015) – Détermination de l'aléa recul de la falaise. Application à la région dieppoise. *Rapport final*. BRGM/RP-65008-FR, 102 p., 74 ill., 5 ann., 1 CD. Regard, V., Dewez, T., Cnudde, C. and Hourizadeh, N., 2013. – Contribution of step backwearing to shore downwearing and the shielding by cliff collapse debris on a coastal chalk platform: example from Normandy and Picardy (northern France). *Journ. Coast. Res.*, Sp. Iss. 65, DOI: 10.2112/SI65-286



L'île d'Hispaniola face aux risques naturels : focus sur les contributions récentes du BRGM en matière de prévention

De par sa position géographique et géodynamique, et en raison de la vulnérabilité de ses constructions, l'île d'Hispaniola est exposée à des risques naturels majeurs. Depuis le séisme catastrophique de 2010 à Port-au-Prince, le BRGM s'est engagé en Haïti et en République dominicaine dans plusieurs projets d'envergure visant à réduire le risque sur ces territoires.

Hispaniola (figure 1), île la plus peuplée de l'archipel des Grandes Antilles, est constituée par la République d'Haïti, qui occupe son tiers occidental (27 750 km² ; 10,98 millions d'habitants en 2017), et la République dominicaine située à l'est (48 730 km² ; 10,77 millions d'habitants en 2017). En Haïti, où la densité de population est de 422 hab./km², la surexploitation du couvert végétal a conduit à une déforestation dramatique du territoire (la couverture forestière actuelle est estimée entre 1 % et 3 % de la superficie du pays), entraînant, outre une perte considérable de terres arables, une exposition particulière aux menaces naturelles (érosion, mouvements de terrain, inondations).

L'île se trouve sur la trajectoire des météores générés dans l'Atlantique Nord. Ces 20 dernières années, plusieurs cyclones dévastateurs ont frappé l'île. Les pluies diluviennes provoquées par le passage des dépressions et cyclones tropicaux engendrent des inondations de grande ampleur, s'accompagnant de mouvements de terrain souvent meurtriers. Ces événements peuvent aussi donner lieu à la destruction massive des récoltes (ce fut le cas du cyclone Matthew en 2016 qui a détruit 80 % de la production d'Haïti), provoquant famines et/ou épidémies de choléra.

Située à la frontière des deux plaques tectoniques Caraïbe et Amérique du Nord, l'île se trouve dans une zone sismique active. Le 12 janvier 2010, Port-au-Prince, capitale d'Haïti, a été détruite par un séisme de magnitude 7,0 ; l'épicentre se trouvait à 25 km. Le séisme a causé la mort d'environ 220 000 personnes. Près de 176 000 maisons

AUTEURS



Monique TERRIER
Géologue, Experte en risques naturels, BRGM
✉ m.terrier@brgm.fr



Didier BERTIL
Sismologue, BRGM
✉ d.bertil@brgm.fr



Jean-Philippe RANÇON
Géologue, Directeur géographique Caraïbe
✉ jp.rancon@brgm.fr



Nicolas TAILLEFER
Ingénieur structure, BRGM
✉ N.Taillefer@brgm.fr

ont été très endommagées et 2,1 millions de personnes ont été déplacées. Écoles, hôpitaux et autres infrastructures de la ville ont été lourdement affectés. Plus récemment, le 6 octobre 2018, le nord-ouest d'Haïti a été frappé par un séisme de magnitude 5,9, causant 12 victimes, plus de 200 blessés et de nombreux dégâts.

Le dernier grand séisme destructeur localisé en République dominicaine est celui du 4 août 1946. D'une magnitude de 7,6, il a été enregistré sur la côte nord. La secousse a tué près d'une centaine de personnes. Le tsunami qui a suivi a été encore plus meurtrier, puisqu'il est à l'origine du décès de 1600 à 1800 personnes et que 20 000 habitants se sont retrouvés sans abri. Aujourd'hui, si un tremblement de terre de telle magnitude devait se reproduire, il serait bien plus ravageur, étant donné la très forte croissance du tourisme de bord de mer depuis 20 ans dans cette région.

Les données GPS et les reconstitutions géologiques indiquent que la convergence des plaques Caraïbe et Amérique du Nord atteint une vitesse de $2 (\pm 0,1)$ cm/an. La zone de contact est caractérisée par un système de fracturation diffus. Sur Hispaniola, parmi les failles majeures capables de produire des séismes de très forte magnitude, on distingue : la zone de la faille septentrionale et la faille

d'Enriquillo-Plantain-Garden, la zone de subduction de la plaque Amérique du Nord sous la plaque Caraïbe (ou faille Nord-Hispaniola) et le chevauchement de Muertos (au sud-est d'Hispaniola). Les données historiques indiquent au moins treize séismes de magnitude supérieure à 7,0 localisés le long de ces accidents majeurs, dont huit depuis 300 ans (1562, 1615, 1673, 1684, 1691, 1751, 1770, 1842, 1887, 1911, 1946, 1948, 2010), sans compter 1918 et 1943 dans le passage de Mona, à l'est de l'île.

Prévention des risques naturels et développement durable du territoire

Des événements naturels dangereux se produisent partout dans le monde, mais pour les pays les plus pauvres, leur impact est nettement plus important. La dangerosité des événements n'est pas uniquement due à des facteurs géographiques, mais aussi – et surtout – à la vulnérabilité des populations touchées. S'agissant d'Hispaniola, l'état économique et environnemental d'Haïti rend le pays beaucoup plus vulnérable que son voisin en cas de phénomène naturel de forte intensité. Cela s'est vérifié largement au cours des dernières décennies.

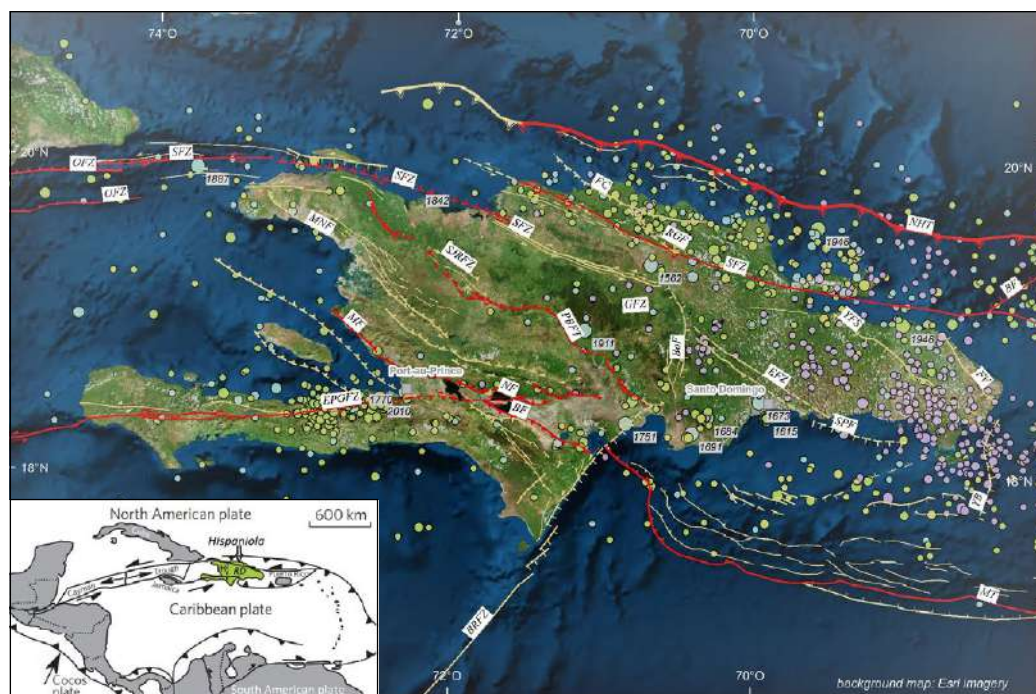
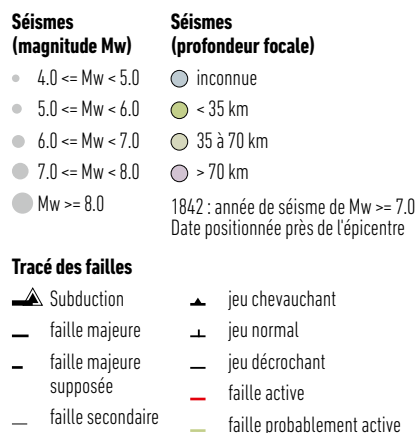
Après la catastrophe engendrée par le passage du cyclone Jeanne en 2004, plusieurs études d'évaluation du



PHOTO 1
Vue du quartier Domingo sur les rives du fleuve Ozama. Dans le cadre des études d'évaluation des risques naturels, l'une des missions du BRGM consiste à localiser et évaluer la vulnérabilité des zones habitées face aux aléas, comme les séismes et les glissements de terrain (Santo Domingo, République Dominicaine, 2014).

© DANIEL MONFORT, BRGM

FIGURE 1
Carte sismotectonique d'Hispaniola (Terrier *et al.*, 2016) et localisation d'Hispaniola dans l'arc des Antilles.



BRFZ : système de failles de la ride Beata ; CGF : faille de Cerro-Goden ; FBw : faille de Bowin ; FC : faille de Camus ; FRG : faille de Rio Grande ; FV : faille de la Vacama ; GSPRZ : Great Northern Puerto Rico Fault Zone ; MT : fosse de Muertos ; SPBF : faille du bassin de San Pedro ; ZFB : zone faillée de Bahoruco ; ZFBz : zone faillée de Boneo ; ZFEPG : zone faillée Enriquillo - Plantain - Garden ; ZFGB : zone faillée Bonao-La Guacara ; ZFLE : zone faillée de la Española ; ZFS : zone faillée septentrionale ; ZFO : zone faillée orientale ; ZFNH : zone faillée Nord Hispaniola ; ZFSJR : zone faillée San Juan - Restauración ; ZFY : zone faillée de Rio Yabon.



PHOTO 2
Transport/accumulation dans une rue de blocs rocheux provoqués par des fortes pluies.

© MONIQUE TERRIER, BRGM

risque d'inondation ont été réalisées en Haïti. Mais c'est surtout à la suite du traumatisme provoqué par le séisme du 12 janvier 2010 que des efforts pour évaluer les risques naturels et les faire connaître et s'en prémunir ont été déployés. La première synthèse nationale a été réalisée en 2010-2011 (Projet NATHAT d'analyse des menaces naturelles multiples en Haïti).

Depuis 2011, le BRGM s'est engagé dans plusieurs projets scientifiques d'envergure, menés en Haïti et en République dominicaine (Belvaux *et al.*, 2017), visant tous *in fine* à réduire le risque sur ces territoires. Ces études sont toutes des maillons de la chaîne d'évaluation du risque et de sa prévention.

Cartographie des aléas et des risques

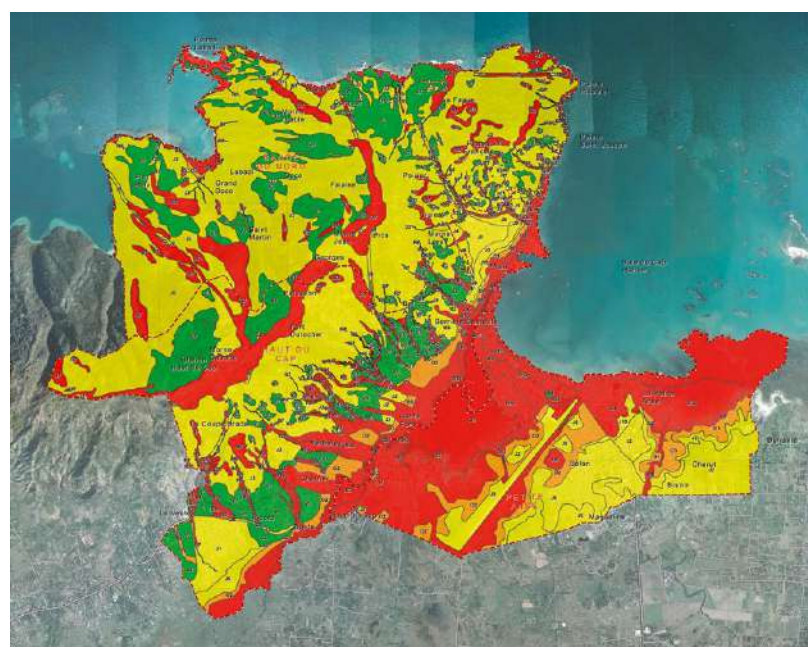
Dans le cadre d'un projet de recherche sur fonds propres, le BRGM a conduit une révision du catalogue des séismes et produit une carte des failles actives sur l'ensemble d'Hispaniola (Terrier *et al.*, 2016), ce qui constitue une première cartographie sismotectonique. Les résultats ont permis une ré-évaluation de l'aléa sismique régional. À moyen terme, grâce aux connaissances nouvelles apportées par les travaux de la recherche (intégration du catalogue OSPL, analyse du MNT lidar, études paléosismiques, etc.), la carte

sismotectonique mise à jour devrait donner lieu à une évaluation actualisée de l'aléa sismique régional utilisable sur l'ensemble d'Hispaniola. Dans les régions où les données de sismicité historiques sont incomplètes et où il y a un manque de recul temporel, la modélisation des sources sismiques basées sur la description la plus complète possible des failles potentiellement actives est essentielle.

Les microzonages sismiques permettent de préciser la réponse des sols et du sous-sol aux trains d'ondes et de fournir des indications nécessaires à la prise en compte du risque dans la construction et l'aménagement urbain. La première partie du travail consiste en des levés géologiques (formations superficielles et proche sous-sol) à grande échelle, 1/5 000 à 1/10 000 (Terrier *et al.*, 2014), accompagnés de mesures géophysiques et géotechniques. Ensuite, les zones de réponse sismique homogène et de capacité des terrains à la liquéfaction sont identifiées et délimitées (Bertil *et al.*, 2015 ; Gilles *et al.*, 2013). Les études de microzonage sismique financées par des bailleurs de fonds multilatéraux (Fonds pour la reconstruction d'Haïti, PNUD...) ont concerné plusieurs communes d'Haïti : région métropolitaine de Port-au-Prince, Cap-Haïtien, Port-de-Paix, Saint-Louis-du-Nord, Ouanaminthe et Fort-Liberté (Bertil *et al.*, 2015). En République dominicaine, Santiago

FIGURE 2
Carte des risques naturels extraite du PRRU de Cap-Haïtien.

© BRGM



Zones
 Zones rouges "R" de contrainte forte
 Zones orange "O" de contrainte moyenne à forte
 Zones jaunes "J" de contrainte moyenne
 Zones vertes "V" de contrainte faible
 Limite des sections communales
 Routes secondaires
 Routes nationales

Échelle 1:25 000
 0 0.25 0.5 1 1.5 2 km
 Fond de carte : © IMAGE SPOT 2010





de los Caballeros, seconde agglomération du pays, et la capitale, Santo-Domingo, ont aussi fait l'objet d'un microzonage sismique sur financement de l'Union européenne (Belvaux *et al.*, 2017).

En Haïti, les plans de prévention des risques naturels urbains (PPRU) conduits sous la direction du PNUD évaluent les différents types d'aléas naturels (inondations, mouvements de terrain, séismes, submersions marines, tsunamis). Puis en fonction des enjeux présents, le PPRU présente un zonage des risques associé à des règles de bon usage du sol. Grâce au modèle numérique de terrain obtenu par des levés Lidar en 2015 sur l'ensemble d'Haïti, des cartes multi-aléas ont été établies à l'échelle du 1/10 000. La première étude pilote, en 2016-2017, sur le département de la Grande Anse, a été suivie en 2017 par les PPRU des communes de Cap-Haïtien et de Ouanaminthe réalisés par le BRGM et le bureau d'études Signalert (Terrier *et al.*, 2018). Chacun des deux plans de zonage multirisques est accompagné par un cahier de recommandations portant sur les mesures nécessaires d'information préventive, d'aménagement du territoire, d'alerte et de gestion de crise. Ces deux communes étant exposées aux aléas inondations, mouvements de terrain, séismes et vents cycloniques, la cohérence des recommandations entre chaque aléa a été soigneusement vérifiée. Il s'en est suivi une démarche participative avec l'animation d'un groupe de travail dans chacune des deux communes, composé d'acteurs locaux en charge de la prévention des risques.

« L'information et la formation sur les risques naturels et les moyens de prévention à mettre en œuvre concernant toutes les couches de la société. »

Le BRGM s'est fortement impliqué dans une démarche de coopération et de transfert de compétences auprès des scientifiques haïtiens. Ainsi, les études de microzonage et les PRRU ont été réalisés en étroite collaboration avec les ingénieurs du LNBTP (Laboratoire national du bâtiment et des travaux publics), du BME (Bureau des mines et de l'énergie) et du CNIGS (Centre national d'information géospatiale). Destiné aux décideurs, aux aménageurs, aux ingénieurs structure, aux architectes... les microzonages sismiques et les PRRU sont des outils qui favorisent la prise en compte des risques naturels dans l'aménagement du territoire. Ils s'inscrivent dans une politique de prévention dont le cadre réglementaire reste encore à affiner dans ces deux pays.

Évaluation de la vulnérabilité du bâti

La sensibilité des enjeux construits (bâtiments et infrastructures routières, ponts, réseaux...) aux aléas naturels s'apprécie en estimant la capacité des enjeux à supporter sans défaillance les sollicitations induites par les aléas naturels (Monfort-Climent *et al.*, 2019). Dans une politique de prévention volontariste, il est donc important de connaître la vulnérabilité des enjeux exposés aux aléas naturels. Cela favorise la prise de conscience du risque et prépare les stratégies de mitigation. Si, en particulier pour les événements sismiques ou cycloniques, il n'est pas possible de diminuer l'intensité de l'aléa, par contre, la réduction de la vulnérabilité des ouvrages est un levier essentiel des politiques



PHOTO 3
Vue de la chapelle
depuis le palais
Sans-Souci à Haïti.
© MONIQUE TERRIER, BRGM

de prévention. Par ailleurs, la connaissance de la vulnérabilité, à l'échelle d'un ouvrage, d'un ensemble d'enjeux stratégiques, voire d'un territoire est nécessaire à la mise en œuvre des réponses les plus adaptées aux crises. C'est un préalable au renforcement de la résilience des territoires et des populations.

L'évaluation de la vulnérabilité du bâti peut être conduite par une approche, soit statistique avec une évaluation moyennée sur un ensemble de bâtiments par quartiers de type homogène, soit déterministe avec une évaluation propre à un bâtiment (de nature stratégique, en général). Des évaluations de vulnérabilité des bâtiments à usage d'habitation du *Distrito Nacional*, centre

urbain de Santo-Domingo, riche en monuments anciens très vulnérables, ont été réalisées en complément du microzonage sismique de la capitale dominicaine. Sur cette base, la simulation d'un séisme majeur montre que les dommages pourraient être très conséquents, avec un grand nombre de bâtiments inhabitables et des milliers de sans-abri. Le BRGM et ses partenaires ont proposé des mesures de prévention, en y associant les autorités dominicaines de la sécurité civile. Ce type d'étude aboutit à des outils précieux non seulement pour la préparation d'exercices de crise mais aussi pour la communication et la sensibilisation sur les risques naturels auprès d'un très large public.

► UN BÂTIMENT DURABLE EST UN BÂTIMENT ADAPTÉ À SON ENVIRONNEMENT...

Le site de la citadelle La Ferrière fait partie d'un réseau de fortification global édifié pour la défense du territoire aux premiers jours de l'indépendance d'Haïti (1804). Les techniques de construction et les partis architecturaux de la citadelle relèvent du génie militaire de l'époque. Dépassant les principes théoriques développés par Vauban au XVII^e siècle, ceux-ci font preuve de pragmatisme et de modernité. Au-delà du savoir-faire bâtiminaire académique, on remarque une adaptation de la forme architecturale et des techniques de construction aux contraintes liées aux aléas naturels (protection solaire, humidité, séisme, cyclone, topographie...). Les bâtisseurs de l'époque, conscients des effets dévastateurs des séismes, ont développé certains dispositifs de renforcement. L'empilement parfait des ouvertures, sans doute conditionnée par des nécessités architecturales (esthétique classique) et techniques (portée limitée des linteaux et distribution régulière de la lumière dans le bâtiment), constitue déjà un point positif vis-à-vis de la stabilité au séisme. Particulièrement visible sur le site de la citadelle, on notera également une recherche constante d'amélioration des chaînages qui renforcent les maçonneries aux points singuliers : à l'origine constitués de simples empilements de briques, les modénatures se sont complexifiées, passant d'une alternance [5 briques/1 pierre

taillée – 1 brique/1 pierre taillée...] à une alternance [5 briques/1 pierre taillée – 2 briques/1 pierre taillée...]. Là aussi, il est indéniable que l'objectif principal des bâtisseurs de ce bâtiment stratégique n'était pas esthétique mais structurel. Le séisme majeur de 1842 ébranla la batterie (sa fissure frontale en Y inversé est désormais associée à l'imagerie du monument), mais son socle a toujours tenu bon, le préservant d'un effondrement immédiat.

Ainsi, si l'art de bâtir est universel car lié aux contraintes de la physique des matériaux, la qualité technique et architecturale d'un bâtiment demeure

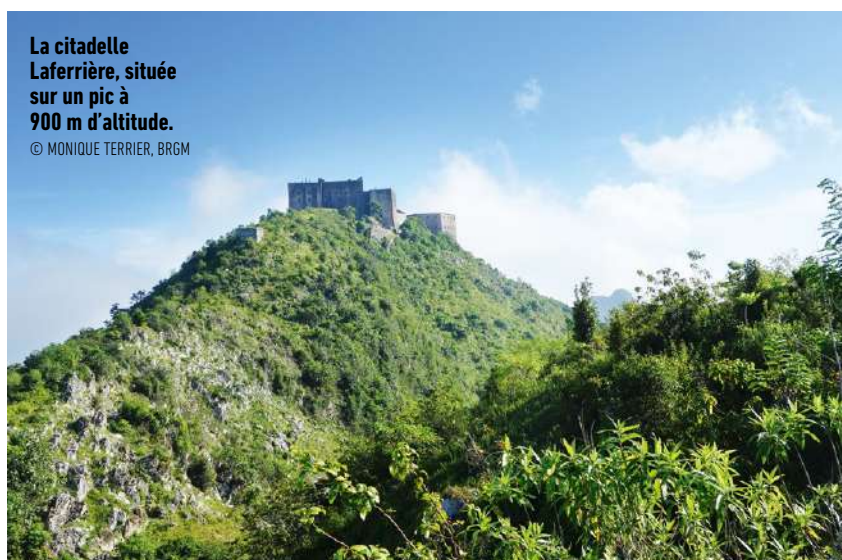
indissociable du soin qu'ont mis ses bâtisseurs à prendre en compte son environnement et tout particulièrement les agressions naturelles liées à sa situation. Prise en compte des reliefs et de la nature des sols, matériaux issus du lieu, optimisation des moyens, adaptation au climat, prise en compte des aléas naturels... : les grands principes actuels du « développement durable » et de la « qualité environnementale » ne sont qu'une redécouverte de ces nécessités. —

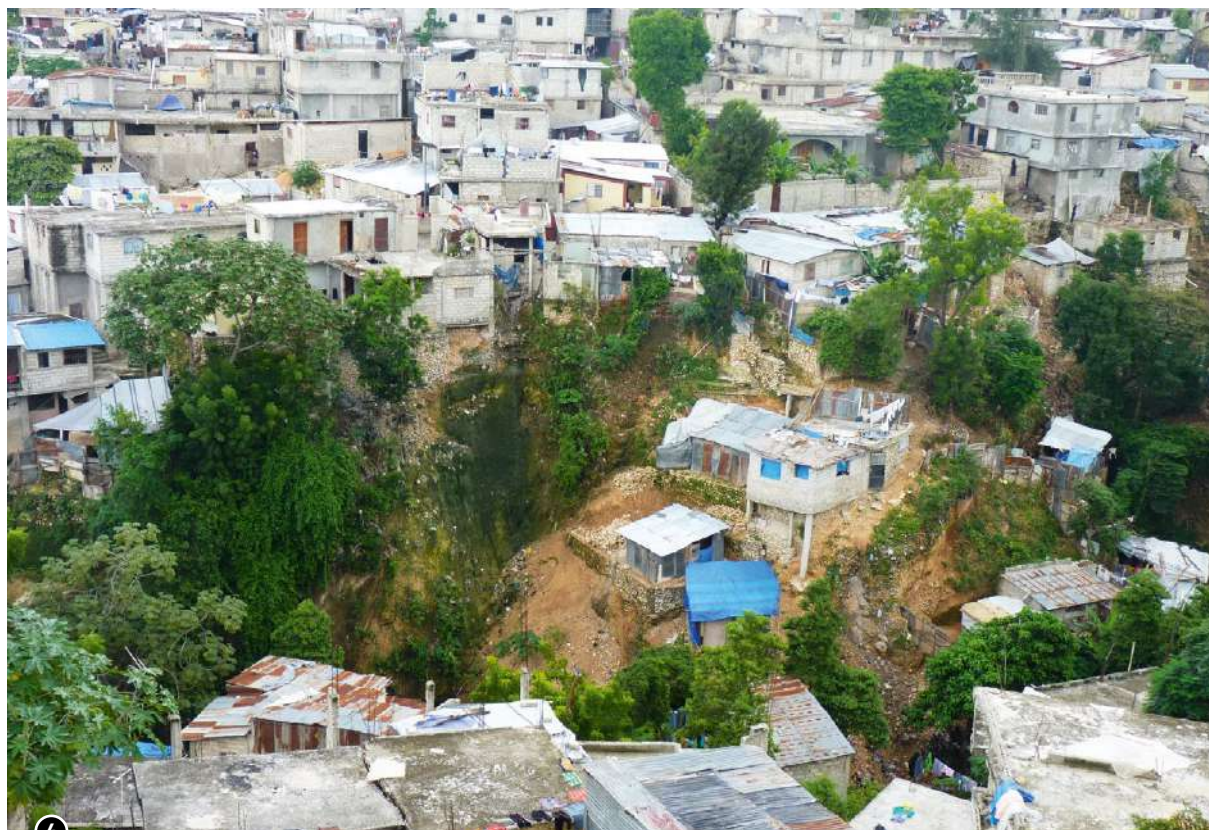
Véronique PHALENTE

Architecte DPLG, Ingénieur ESTP

La citadelle Laferrière, située sur un pic à 900 m d'altitude.

© MONIQUE TERRIER, BRGM





Dans le cadre du projet « Plan Nord » mis en place par le PNUD, un groupement conduit par le BRGM (avec le LNBTP et SOCOTEC International) a mené des diagnostics sur un ensemble de bâtiments stratégiques situés dans quatre villes du nord d'Haïti. Il s'agit d'établissements scolaires, de postes de police, d'hôpitaux et de bâtiments indispensables à la gestion de crise. Le diagnostic a eu pour but d'identifier la structure participant à la résistance des bâtiments au séisme et d'en évaluer les forces et les faiblesses. Il a permis de conclure sur le comportement probable du bâtiment en cas de séisme et de proposer des mesures d'amélioration. Des solutions de renforcement, sélectionnées parce qu'elles sont bien adaptées au savoir-faire local, en ont découlé avec la collaboration du bureau d'études Antilles Études pour réduire la vulnérabilité des bâtiments. Parallèlement, les principales infrastructures (routes, réseaux d'eau et d'électricité) des quatre villes ont également fait l'objet d'un examen détaillé. L'objectif a été d'identifier les facteurs de vulnérabilité des ouvrages et des réseaux et d'évaluer les conséquences potentielles d'une défaillance. Dans le cadre de ces études, plusieurs professionnels Haïtiens de la construction (architectes, ingénieurs, maçons) ont bénéficié d'une formation sur l'évaluation de la vulnérabilité d'un bâtiment et sur les mesures de confortement possibles. Des chantiers pilotes doivent être mis en œuvre pour former les acteurs locaux à ces techniques.

Pour soutenir le développement de l'activité touristique en Haïti, un projet d'envergure portant sur la valorisation des sites historiques du nord du pays a été lancé sur financement de la Banque mondiale. Cela

concerne en particulier les sites historiques de la citadelle Laferrière et du Palais de Milot, classés à l'inventaire mondial de l'Unesco. La période de construction des bâtiments s'étend de 1806 à 1820. Les études concernant la sismicité historique ont révélé la survenance de séismes pendant la période de construction. En préalable aux travaux de confortement avant l'ouverture du site à une fréquentation touristique plus importante, une étude des aléas (séisme, mouvements de terrain) a été conduite par le BRGM et le LNBTP sur la base de mesures géotechniques et géophysiques in situ et d'expertises naturalistes, ainsi que d'un diagnostic approfondi des structures, en collaboration avec un architecte spécialisé (*voir encadré*).

Information et formation préventive

L'information et la formation sur les risques naturels et les moyens de prévention à mettre en œuvre concernent toutes les couches de la société. Il s'agit de l'un des axes majeurs de la prévention. En ayant connaissance du risque et des moyens pour s'y préparer, l'information constitue l'un des outils de réduction de la vulnérabilité en cas de survenance d'un événement naturel de grande ampleur. La population haïtienne dispose aujourd'hui de plusieurs documents très pédagogiques (plaquettes, bandes dessinées sur le risque de tsunami ou sismique) ou, au contraire, très techniques destinés aux professionnels de la construction. Parmi ce panel de documents, l'Atlas des menaces naturelles en Haïti (BRGM/CIAT, 2017) constitue une synthèse des études réalisées sur les risques naturels entre 2000 et 2015 pour chaque type de menace (inondation, séisme, tsunami, cyclone, érosion, mouvement de terrain),



PHOTO 4
Construction sur les versants instables de Port-au-Prince à Haïti.

© MONIQUE TERRIER, BRGM



5

décrit le phénomène, fait l'historique des événements les plus intenses et présente des cartes à grandes et petites échelles. Il argumente et promeut les actions de prévention mises en œuvre ou qui pourraient l'être. Ce document pédagogique s'adresse à un large public (citoyens, scolaires, élus, décideurs...).

Encourager une véritable prise de conscience du risque sur un territoire passe nécessairement par un effort important de pédagogie auprès des élus de proximité et des acteurs locaux du développement. Que ce soit pour les plans de zonage des risques ou les plans d'actions pour la réduction de la vulnérabilité de bâtiments à enjeux, le succès de ces études (c'est-à-dire la mise en application des recommandations formulées) dépend en grande partie de la capacité des parties prenantes locales à s'approprier les concepts et techniques pour les transférer dans les décisions d'aménagement et dans des actions opérationnelles. Ainsi, de façon systématique, au-delà de la réalisation des études techniques, une attention particulière a été apportée au transfert de compétences envers ces relais indispensables.

Discussion

Une bonne gestion des risques naturels doit avant tout s'appuyer sur une bonne compréhension des risques de catastrophes, c'est-à-dire la compréhension : 1) de l'occurrence et de la dynamique des aléas naturels, mais aussi 2) de la vulnérabilité des sociétés. Hispaniola a fait l'objet de plusieurs travaux scientifiques ; ceux-ci sont restés focalisés sur des objets géographiques spécifiques. La mise en place d'un programme scientifique fédérateur mené sur l'ensemble de l'île marquerait un progrès significatif pour une évaluation pertinente et cohérente des aléas naturels. Quelques travaux ont été engagés en ce sens (catalogue des séismes, failles actives) ; il est nécessaire de les poursuivre.

Aujourd'hui, il existe des outils destinés à guider les acteurs locaux dans leur politique d'aménagement et de développement urbains. Renforcer la gouvernance des risques de catastrophes apparaît comme étant l'effort le plus important à faire pour chacun des deux pays constituant Hispaniola.

En 2011, la République dominicaine a mis à jour son règlement parasismique qui datait de 1979. En Haïti, la réglementation parasismique est très récente. C'est le Code national du bâtiment d'Haïti (CNBH) de 2012 qui sert de référence. L'application effective de règles de construction adaptées, y est, comme dans de nombreux pays, un enjeu de taille. De plus, ce qui peut être imposé pour les gros bâtiments ou les bâtiments à enjeux peut se révéler inapplicable pour l'habitat courant. À noter néanmoins qu'il existe des programmes de formation sur la construction parasismique dans les deux pays. En outre, en Haïti, plusieurs guides de construction pour l'habitat individuel existent.

La culture du risque procède d'un travail constant. Les techniques évoluent, les professionnels et les élus changent, les générations se succèdent et la mémoire s'entretient. Outre le fait qu'un gros travail de pédagogie auprès des élus reste à faire pour véritablement intégrer la dimension « risques » dans l'aménagement du territoire et mettre en place les actions de remédiation, l'implication de la population à la prévention est aussi l'un des facteurs majeurs pour la réduction du risque de catastrophe. ●



PHOTO 5
La cathédrale de Santo-Domingo (1521), la plus ancienne des Amériques, témoigne de la capacité à construire durablement dans un environnement fortement exposé aux séismes et cyclones.

© JEAN-PHILIPPE RANÇON, BRGM

ABSTRACT

Natural risk prevention involves a series of complementary activities geared to averting dangerous phenomena and/or limiting their consequences. It is relevant to the logic of sustainability, because the purpose of prevention in a country is also to reduce the economic, social and environmental consequences of unwise development and to lay the foundations for better post-disaster management.

This is the context in which BRGM and its local institutional partners (LNBTP, BME and CNIGS in Haiti; SGN in the Dominican Republic) have been undertaking numerous studies in Hispaniola since 2011, with two main aims: 1) to develop and share knowledge on natural risks, 2) to include natural risk management as an integral component in planning and crisis management policies. These studies focus on furthering knowledge and risk mapping, especially for seismic hazard: seismogenic sources, regional assessments of seismic hazard, seismic microzoning in several cities, mapping of slope instability hazard, synthesised preventive information on natural hazards across Haiti, earthquake vulnerability assessments, recommendations for the reinforcement of strategic buildings, city centre damage scenarios, training and skills transfers to local scientists, awareness-raising in the planning and construction professions.

Despite the major efforts deployed by many different players, funding agencies and technical staff, in particular since the traumatic effects of the earthquake of 12 January 2010, the level of seismic risk in Haiti and the Dominican Republic is still very high. A great deal remains to be done, especially to acquire more scientific knowledge and to deploy awareness raising and preparedness exercises in anticipation of major natural disasters.

PHOTO 6

Cartographie des aléas naturels lors de la réalisation du PPRU de Cap-Haïtien.

© DIDIER BERTIL, BRGM



6

BIBLIOGRAPHIE

Belvaux M., Bertil D., Terrier M., Taillefer N., Rançon J.-P. (2017) – From seismic hazard assessment to seismic risk prevention in the island of Hispaniola. The 11th Asian Regional Conference of International Association for Engineering Geology and the Environment (IAEG) 28-30 November 2017. Kathmandu, Nepal. **Bertil D., Roullé A., Noury G., Abad J., Gilles R., Jeudy B. (2015)** – Microzonages sismiques en Haïti : Comparaison des spectres de réponse spécifiques et des spectres forfaitaires du code IBC. 9ème Colloque National AFPS 2016 – 30 Novembre-2 Décembre 2015. IFSTTAR, Marne-La-Vallée. **BRGM et CIAT (2017)** – Atlas des menaces naturelles en Haïti, Editions de la Banque mondiale, ISBN 978—99970-4-871-4. **Gilles R., Bertil D., Prépétit C., Belvaux M., Roullé A., Jean-Philippe J., Noury G. (2013)** – Seismic microzoning in the metropolitan area of Port-au-Prince - complexity of the subsoil. American Geophysical Union Fall Meeting, San Francisco 9-13 December 2013. **Monfort D., Negulescu C., Belvaux M. (2019)** – Remote sensing vs. field survey data in a post-earthquake context: Potentialities and limits of damaged building assessment datasets, Remote Sensing Applications: Society and Environment, v.14, April 2019, pp46-59, <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2019.02.003>. **Terrier M., Bialkowski A., Nachbaur A., Prépétit C., Joseph Y.-F. (2014)** – Revision of the geological context of the Port-au-Prince metropolitan area, Haiti: implications for slope failures and seismic hazard assessment. Nat. Hazards Earth Syst. Sci. 14, 2577–2587. www.nat-hazards-earth-syst-sci.net/14/2577/2014/ doi:10.5194/nhess-14-2577-2014. **Terrier M., Bertil D., Belvaux M. (2016)** – Seismic zonation of Hispaniola Island for hazard assessment purposes. 35th International Geological Congress: IGC 2016, August 2016, Cape Town, South Africa. hal-01314288v1. **Terrier M., Bertil D., Guillaude R. (2018)** – Zonage multirisque des phénomènes naturels : exemple sur deux communes haïtiennes, Séance technique commune AFPS/CFG, Paris, CNAM, 11 octobre 2018.

1



GéoRisques : le numérique au service de la prévention des risques

En s'appuyant sur des bases de données nationales et des fonds de cartes, GéoRisques est devenu en quelques années un site de référence sur les risques naturels en France. Désormais, l'utilisateur est sensibilisé à la présence des risques et aléas de proximité. À l'avenir, la cartographie web collaborative permettra à chacun d'entre eux d'enrichir la carte des risques.

La fréquence et l'impact des risques naturels et technologiques en font un enjeu planétaire dans un contexte de changement climatique. Le cadre d'action de Sendai préconise l'amélioration de la compréhension de tous les facteurs de risques de catastrophe (exposition, vulnérabilités, caractéristiques des aléas, etc.). La priorité à la compréhension des risques est préconisée dans toutes leurs dimensions : la vulnérabilité, les capacités et les expositions des personnes et des biens, les caractéristiques des aléas et l'environnement.

Pour parvenir à ces objectifs (qu'ils soient de dimension nationale et/ou locale), que sont le recueil et la mise à jour des informations, sont ciblées comme vecteurs de diffusion de l'information, la carte des zones à risques, et, par extension, les technologies d'information géospatiales.

Il est indiqué qu'il faut « promouvoir l'accès en temps réel à des données fiables, d'utiliser l'information spatiale... et d'avoir recours aux nouvelles technologies informatiques pour améliorer les outils de mesure et la collecte, l'analyse et la diffusion des données ». Sont concernées les données/informations relatives à l'exposition aux dangers, la vulnérabilité, les risques, les catastrophes et les pertes subies. De plus, en complément de la convention d'Aarhus

AUTEUR



Stéphane LOIGEROT

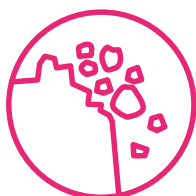
Responsable d'unité,
Unité Information et Services
pour les Risques, Direction des
Infrastructures et des Services
Numériques, BRGM
✉ S.Loigerot@brgm.fr



PHOTO 1 / GéoRisques est un site qui vous permet d'accéder à des informations sur les risques, quelque soit l'endroit où vous êtes.

© ADOBE STOCK

1/ https://www.unisdr.org/files/43291_frenchsendaiframeworkfordisasterris.pdf

Mouvements
de terrain

Séismes

Cavités
souterrainesPollution des sols
et anciens sites
industrielsRisque
inondationRetrait/
gonflement
des argiles

qui avait ouvert la voie, une quinzaine d'années avant, le cadre de Sendai insiste sur le libre accès à des informations (à la condition qu'elles soient classées comme « non sensibles »). Il est important de former et d'informer les différents publics sur les risques ; les technologies géospatiales et le numérique de façon plus globale, est un vecteur qui modifie d'ores et déjà profondément ces notions.

Cartographie et information préventive en France

En France, l'information dite préventive auprès des populations sur la problématique des risques s'appuie principalement sur des représentations cartographiques issues d'expertises et regroupant de nombreux zonages et autres plans. Ces documents dits de « porter à connaissance » ont pour périmètre des échelles territoriales en lien avec les compétences des administrations.

Deux documents principaux structurent l'information du public en France : les dossiers départementaux des risques majeurs (DDRM), dossiers dits d'information et de sensibilisation sur les risques majeurs naturels et technologiques et leur déclinaison à l'échelle communale, le dossier d'information communal sur les risques majeurs (DICRIM), qui reprend les éléments de connaissance et les cartographies existantes, complété par des mesures prises au niveau communal dans le cadre de la prévention : consignes de sauvegarde pour le citoyen, plan de secours communal. Ces documents sont soit téléchargeables sur le site des préfectures, soit dans le cas du DICRIM, mis à disposition des citoyens en mairie et souvent envoyés par la Poste aux administrés.

Autre domaine nécessitant les informations sur les risques, l'information obligatoire dans le cadre de transactions immobilières : depuis le 1^{er} juin 2006, les vendeurs et bailleurs de biens situés dans une commune où un plan de prévention des risques naturels et/ou technologiques est prescrit (ou approuvé) doivent remettre une fiche sur l'état des risques à l'acheteur ou au locataire. Dans les communes où un plan de prévention des risques naturels prévisibles a été prescrit ou approuvé, le maire doit informer par des réunions publiques ou tout autre moyen approprié ses administrés au moins une fois tous les deux ans sur les risques que connaît la commune et les mesures prises au niveau communal.

Pour les communes concernées par un plan particulier d'intervention (PPI), le maire doit distribuer les brochures d'information aux personnes résidant dans cette zone (communes concernées par la rupture des lacs réservoirs notamment). L'information s'appuie sur le support cartographique, avec des zonages dont les contours sont intégrés dans les servitudes d'utilité publique.

Le numérique au service de l'accès à l'information sur les risques : du plan papier à la cartographie numérique dynamique

Ce tour d'horizon des principaux documents mis à la disposition des citoyens afin de les informer sur l'état des risques démontre que l'information est fortement spatialisée et disponible sur un ensemble de supports initialement produits par les sphères scientifiques et administratives.

Le BRGM contribue fortement, parfois depuis plusieurs décennies et au travers de ses missions, à la connaissance sur les aléas et risques naturels et technologiques. Le BRGM pilote et réalise des inventaires, notamment sur le territoire national, tel l'inventaire des anciens sites pollués ou potentiellement pollués (Basias), l'inventaire des cavités (BD Cavité), la cartographie du phénomène de retrait-gonflement des argiles (BD Argiles), des mouvements de terrain (BD Mvt), des remontées de nappes phréatiques, l'inventaire historique des tsunamis, les séismes historiques ressentis (SIS France). Des bases de données qui ont nécessité parfois plusieurs décennies de collecte d'informations et qui sont toujours alimentées par le renouvellement de nombreux inventaires et par des dispositifs de recueil de données sur le terrain. Systématiquement, ces bases ou banque de données ont été proposées au travers de sites internet dédiés et ce, dès le début des années 2000, avec l'explosion de l'usage d'Internet par les citoyens, l'avènement de la cartographie dynamique sur internet (*Webmapping*) et le renforcement des obligations légales de diffusion. L'ère de l'information géographique accessible au plus grand nombre s'est formalisée par l'émergence de plateformes de diffusion de données sur Internet, transposant ces bases de données métiers par une existence numérique publique.

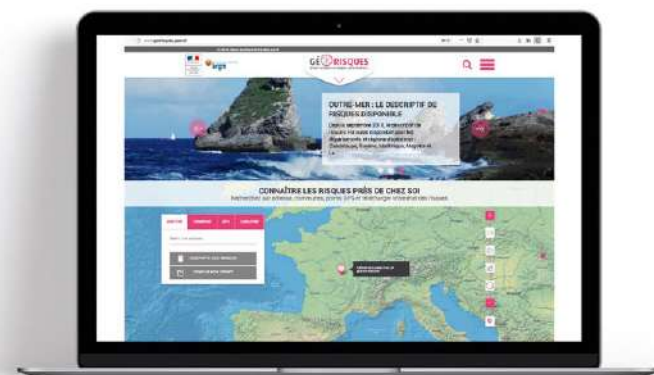
Le constat de la grande multiplicité des sites thématiques sur les risques naturels et technologiques a été le point de départ d'une réflexion globale, partagée par le ministère en charge de l'Environnement et le BRGM, qui a abouti à la création de GéoRisques. L'objectif de GéoRisques n'est pas tant d'interroger les nombreuses

bases de données géographiques et hétérogènes que de proposer un visualiseur cartographique pour naviguer dans un univers de données (Elwood, 2008 ; Joliveau, 2011). En ce sens, GéoRisques est l'aboutissement d'un ensemble de travaux visant à l'ouverture et à la normalisation des données spatiales produites par les services de l'État et les établissements publics dont le BRGM, qui a été un acteur précurseur, dès le début des années 2000, en s'appuyant sur l'interopérabilité, les services web, la gestion des différents systèmes de géolocalisation, les serveurs cartographiques.

Ce sont désormais de gros volumes de données (*big data*), qui sont stockées dans des bases de données, devenues les matrices initiales du stockage d'une information spatiale (Méricskay, 2016). L'information géographique y est gérée comme un simple attribut. Ce changement de paradigme concernant la donnée géolocalisée, du support et de stockage ; de la carte papier à l'information stockée en format SIG jusqu'à la base de données, s'est opérée sur un temps assez court (une quinzaine d'années), qui n'est pas sans poser bon nombre de problèmes (notamment l'historisation des données produites) sur les supports actuels.

Mon environnement, mes risques

Mise à disposition en juillet 2014 dans un paysage en pleine expansion de plateformes géographiques (GéoPortail, Géoportail de l'urbanisme, entre autres), GéoRisques, en tant que plateforme geoweb² est devenu,



 [WWW.GEORISQUES.GOUV.FR](http://www.georisques.gouv.fr)

en quelques années, le site internet de l'*open data* sur les risques en France, s'appuyant sur des bases de données nationales, des fonds de cartes issus d'autres plateformes (on parle alors de *mashup*³ cartographique) et alimentées par des flux d'informations permettant un niveau de mise à jour proche de celui de la base métier. La mise à disposition des données a été privilégiée afin de permettre à des usagers plus ou moins experts de réutiliser les informations proposées (les données sont sous licence ouverte Etalab).

L'originalité de GéoRisques sur un service s'appuyant sur une logique de géolocalisation choisie, qui consiste à interpellier l'utilisateur – en intitulant le rapport sur les risques « Ma Maison, Mes Risques » –, en lui proposant de se positionner au centre de l'information disponible selon une logique égocentrée (Halik, 2012). En replaçant l'utilisateur au centre de son besoin, la donnée est elle-même recontextualisée, ce qui lui donne un caractère de proximité autre que celui proposé par la carte. En effet, au même titre que l'ensemble des applications mobiles qui s'appuient sur la géolocalisation pour positionner l'individu au centre de la donnée, GéoRisques propose, au travers de ce service de sensibiliser l'utilisateur à la présence de risques et d'aléa chez lui. Outre le caractère obligatoire de la mise à disposition de l'information acquéreur locataire (IAL), l'utilisateur bénéficie d'éléments contribuant à qualifier la qualité de vie, la qualité environnementale. Il est fort probable que ces informations bénéficient d'un tout autre impact sociétal une fois mises en corrélation avec d'autres informations, comme le prix de l'immobilier par exemple.

Le service proposé a trouvé un public, notamment le notariat et les professionnels de l'habitat. Au même titre que les sites web commerciaux qui analysent le comportement de leurs usagers, il est nécessaire dès à présent d'explorer les traces numériques laissées par les internautes afin de connaître leurs motivations et leurs pratiques. Il est

^{2/} Le *geoweb* est un terme usuellement employé pour désigner la convergence entre le web et les technologies géospatiales. On y inclut les applications cartographiques en ligne, les applications mobiles, les globes virtuels, etc., ce qui comprend donc toutes les applications géographiques accessibles via le web. ^{3/} Un *mashup* cartographique est une application composite visant à agréger et combiner des contenus provenant de différentes sources, derrière une interface unifiée, afin de proposer un service hybride (thème OpenStreetMap associé à des référentiels IGN, par exemple).



▼ PHOTO 2
Éboulement de la falaise Miramar à Biarritz (2010).

© OBSERVATOIRE DE LA CÔTE AQUITAINE, M. LE COLLEN

►► PHOTO 3
Le ZEB-REVO permet d'acquérir des informations précises sur la dimension réelle des cavités et donc du risque encouru par les bâtiments situés au dessus.

© THOMAS DEWEZ, BRGM



3



désormais indispensable de cerner les manières dont les utilisateurs s'approprient les données, les utilisent et les rendent opérantes (Mericskay et Roche, 2016).

Cette « mise en lumière » d'informations géolocalisées, qui parfois n'étaient pas représentées cartographiquement dans leur précédent site internet (bases Gaspar et Basol par exemple), révèle un manque de qualité, notamment lié à des erreurs ou à un manque de précision de la géolocalisation. La question de la qualité des données est prépondérante aujourd'hui : nous sommes devenus des utilisateurs de supports cartographiques où les notions d'échelles disparaissent (imageries et données disponibles sur GoogleMap, Géoportail, OpenStreet). On parle désormais de société de l'information géographique, tant la géomatique s'est immiscée dans notre quotidien par le biais de nouvelles pratiques spatiales. Le bond numérique concernant l'accès à ces données dites « grande échelle » ne s'est pas réalisé à la même vitesse pour les données produites sur les risques : il y a un véritable différentiel entre des données historiquement produites « à l'échelle de la commune », donc à des niveaux de précision désormais

décorrélés des fonds cartographiques, issus d'images satellitaires ou d'autres référentiels de grande précision, supports devenus familiers.

GéoRisques, plateforme géoweb 2.0 ?

La cartographie web collaborative ou communautaire, où chacun des utilisateurs peut intervenir pour enrichir ou modifier une carte, ouvre des perspectives intéressantes afin de permettre à des inventaires de continuer à s'enrichir, en bénéficiant de l'emprise et l'expertise de communautés. Cette contribution d'expertise de communautés, s'appuyant sur la cartographie numérique, existe d'ores et déjà au travers d'outils de saisie, employés dans le cadre d'inventaires sous la responsabilité du BRGM (applications de saisie des mouvements de terrain, des cavités, des secteurs d'information sur les sols par exemple) et dont les fonctionnalités de traitements des données s'avèrent être très semblables à celles proposées par un SIG bureautique.

La participation collective, au sens d'une carte web ouverte aux non-spécialistes, est encore peu fréquente



PHOTO 4
Les inondations
constituent un des
risques naturels
majeurs en France.

© GILDAS NOURY, BRGM

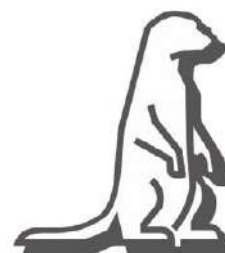
► SURICATE-NAT, UTILITÉ DES RÉSEAUX SOCIAUX PENDANT UNE CATASTROPHE NATURELLE

Difficile de percevoir rapidement l'étendue des conséquences d'une catastrophe naturelle lorsque les routes sont coupées, la téléphonie mobile saturée, et les informations parcellaires en provenance du terrain arrivant au compte-gouttes. C'est pourtant sur la base de ce diagnostic que doit s'organiser la gestion de la catastrophe, l'organisation des secours, l'assistance aux sinistrés...

L'expérience montre cependant que la survenue de catastrophes naturelles se traduit le plus souvent par la diffusion rapide et massive de messages sur les réseaux sociaux, et tout particulièrement sur la plateforme Twitter dont le principe de messages courts est particulièrement bien adapté à l'expression instantanée de témoignages sur le vif. Ce sont ainsi près de 150 000 tweets qui ont été échangés en Italie en 2016 dans les 48 premières heures après le séisme d'Amatrice, plus de 110 000 tweets échangés en France lors des inondations du printemps 2016, etc. Lorsque tout est à terre et que les moyens

de communication avec la zone impactée sont réduits, les réseaux sociaux demeurent parfois la seule source d'information *in situ*, comme ce fut le cas juste après le séisme dévastateur d'Haïti en 2010. Si tous les messages ainsi échangés n'apportent pas des informations pertinentes, certains permettent au contraire de se faire une idée précise des conséquences via des témoignages, des photos ou des vidéos. Cette mine potentielle d'information est cependant difficile à exploiter.

Fort de ce constat, le BRGM développe, en collaboration avec l'UTT¹ et avec le soutien de la Fondation MAIF, une plateforme participative d'analyse semi-automatique des messages en lien avec les catastrophes naturelles émis sur le réseau social Twitter. Dénommée « SURICATE-Nat » (www.suricatenat.fr), cette plateforme a pour objectif à court terme d'exploiter les témoignages immédiatement après une catastrophe naturelle dans le but de favoriser une rapide remontée d'informations depuis le terrain par les « citoyens capteurs », considérant



chaque individu comme un capteur doué de 5 sens capables de restituer ses « enregistrements/témoignages » de manière spontanée et rapide. De surcroît, répondant à la volonté « d'engagement » actif des internautes dans l'analyse des données les concernant directement, SURICATE-Nat proposera une fonctionnalité participative reconnaissant la valeur de « l'expertise citoyenne », qui permettra à chaque internaute de prendre part à l'analyse manuelle des Tweets. Cette approche vise à compléter les algorithmes d'intelligence artificielle utilisés pour l'analyse automatique des messages. —

Samuel AUCLAIR

Sismologue au BRGM et coordinateur
de la plateforme SURICATE-Nat

^{1/} Université de technologie de Troyes



à l'heure actuelle sur les problématiques en lien avec la connaissance d'aléas. À titre d'exemple, la plateforme SuricatNat, projet développé par le BRGM et soutenu par la Fondation Maif, permet d'identifier la survenue de catastrophes sur le territoire national, en analysant le flux public d'informations issues du réseau social Tweeter (voir encadré). Cette démarche, assez récente, est bien la démonstration qu'il est possible, dans certains cas et sur des sujets bien précis, de faire appel à tout un chacun pour améliorer la connaissance de certains phénomènes et, probablement par effet induit, d'impliquer les utilisateurs et contributeurs aux enjeux des phénomènes observés. La question de l'emploi de la cartographie collaborative se pose dans le cadre d'inventaires faisant appel à des connaissances locales précises, voire historiques. Le géoweb participatif ouvre de nouvelles pratiques et de nouvelles potentialités, notamment pour les pouvoirs publics.

Comment cette approche de la géographie (dite néogéographie) peut-elle s'intégrer dans les pratiques des

professionnels et l'aménagement du territoire, puisque c'est de ça qu'il s'agit dans les enjeux liés aux risques naturels et technologiques ? La compréhension des risques, de la caractérisation des aléas, des vulnérabilités passe aussi par une appropriation par la population. Tel est l'enjeu des sites de diffusion tels que GéoRisques. ●

ABSTRACT

In the field of spatialization of natural and technological hazards, mapping is the main communication platform to illustrate these phenomena and understand the areas which are potentially impacted/at risk. The BRGM (the French Geological Survey) helps produce content extracted from information systems technologies. To this end, GéoRisques offers a set of services which spans well beyond the scope of mapping but opens new perspectives in terms of the public's access to information. Society today has higher expectations, demanding more specific and detailed information especially as it relates to quality of life, encouraging the State and data producers to rethink the scale of production of natural and technological risk data.

BIBLIOGRAPHIE

Mericskay, B. et Roche, S. (2010), "Cartographie numérique nouvelle génération : impacts de la néogéographie et de l'information géographique volontaire sur la gestion urbaine participative", in Zreik, K (dir.), *HyperUrbain II, nouvelles cartographies, nouvelles villes*, Paris: Europia, pp.41-56/. **Joliveau Thierry, Noucher Matthieu, Roche Stéphane**, « La cartographie 2.0, vers une approche critique d'un nouveau régime cartographique », *L'Information géographique*, 2013/4 (Vol. 77), p. 29-46. DOI : 10.3917/lig.774.0029. URL : <https://www.cairn.info/revue-l-information-geographique-2013-4.htm-page-29.htm> **Halik L., 2012**, « The analysis of visual variables for use in the cartographic design of point symbols for mobile Augmented Reality applications », *Geodesy and Cartography*, 61(1), p. 19-30. **Joliveau T., 2011**, « le géoweb, un nouveau défi pour les bases de données géographiques », *L'espace géographique*, 40(2), p.154-163. **Elwood S., 2008**, « Geographic Information Science: new geovisualization technologies – emerging questions and linkages with GIScience research », *Progress in Human Geography*, 33(2), p.256-263. **Mericskay B.** La cartographie à l'heure du Géoweb : Retour sur les nouveaux modes de représentation spatiale des données numériques. *Cartes & géomatique*, Comité français de cartographie, 2016, La sémiologie dans tous les sens – Temps, Art & Cartographie 229-230, pp.37-50.



Retrait-gonflement des argiles : de nouvelles perspectives de diagnostic

Le phénomène de retrait et gonflement des argiles (RGA) est à l'origine d'un mouvement physique des sols qui provoque d'importants dommages sur le bâti individuel. En France, il est le second risque naturel en termes d'impact financier, et l'importance du phénomène ne va cesser de croître sous la pression du changement climatique. Pour répondre à ce défi, le BRGM soutient la mise au point d'une innovation qui permettra de réaliser un diagnostic rapide et précis de la présence d'argiles gonflantes dans les sols.

« Votre maison se fissure ? Faites votre déclaration en mairie ! » Ce message a fleuri dans de nombreuses communes françaises à la fin de l'été 2018. En effet, à la suite d'une période de sécheresse particulièrement longue dans de nombreuses régions, le bâti a considérablement souffert du phénomène de retrait-gonflement des argiles (RGA). Porté à la connaissance du grand public après l'épisode climatique de 2003, ce phénomène touche en moyenne 20 000 maisons individuelles par an. Il représente ainsi le second risque en termes d'impact financier en France métropolitaine.

Les phénomènes de retrait-gonflement de certains sols argileux et de formations géologiques argileuses induisent des tassements différentiels (mouvements du sol non uniformes) qui entraînent des désordres affectant à la fois les structures construites en surface (bâtiment, fondation superficielle, ouvrage de soutènement, remblais, etc.) et les ouvrages enterrés (tunnels, pieux, canalisation, fondation profonde...).

AUTEURS



Sébastien GOURDIER

Ingénieur chef de projet Risques naturels, direction Risques et prévention BRGM
✉ s.gourdier@brgm.fr



François PROGNON

Géologue, chargé des relations Entreprise, France et International, direction des Géoressources, BRGM
✉ f.prognon@brgm.fr



PHOTO 1 ▲
Illustration de rétraction des argiles dans le bassin de Tassili (Algérie).

© FRANÇOIS MICHEL, BRGM

/

**« Le coût des
sinistres imputés
au phénomène de
retrait-gonflement
est très élevé :
11,2 milliards d'euros
indemnités entre
1989 et 2017 dans
le cadre du régime
des catastrophes
naturelles. »**

/

Les exemples de désordres liés à la présence d'argiles gonflantes sont nombreux, variés et posent des problèmes aux constructions sur tous les continents (Nowamooz, 2007). Ces variations de volume sont liées à la présence de minéraux argileux, mais il existe aussi des roches gonflantes, tels que l'anhydrite ou les schistes cartons. Les sols gonflants sont présents sur tous les continents et ce sont pour l'essentiel des sols argileux, que l'on connaît souvent sous des noms locaux, tels que *black cotton soils* en Inde, « terres noires » en Australie ou encore *karal* au Cameroun.

Les sols gonflants ont été cartographiés dans plusieurs pays. On estime qu'ils représentent 10 % des sols de l'Afrique. Aux États-Unis, les *expansive soils* (la nomenclature nord-américaine désigne sous ce terme le soulèvement dû au gel et les sols soumis aux RGA) causent des dommages plus importants aux structures construites par l'homme que tout autre danger naturel. Le ministère de l'Agriculture des États-Unis estime que la moitié des maisons sont construites sur des sols expansifs et l'American Society of Civil Engineers estime qu'un quart de toutes les maisons ont subi des dommages causés par ces sols.

Ce type de dommage n'est pas aussi soudain et traumatisant que celui causé par les tremblements de terre, les tornades ou les ouragans, mais les impacts financiers sont considérables : aux États-Unis, les pertes ont été estimées

à sept milliards de dollars par an. En France, ces phénomènes ont été mis en évidence à l'occasion de la sécheresse exceptionnelle de l'été 1976 et ils ont pris de l'ampleur lors des périodes sèches suivantes. Depuis, le coût des sinistres imputés au phénomène de retrait-gonflement est très élevé : 11,2 milliards d'euros indemnités entre 1989 et 2017 dans le cadre du régime des catastrophes naturelles (ce qui en fait le second

poste d'indemnisation après les inondations) et plus de 8 000 communes françaises reconnues Cat Nat pour le seul été 2003 (Vincent *et al.*, 2008).

Les minéraux argileux

Les argiles et les minéraux argileux sont présents dans une gamme très variée de contextes géologiques. La plupart des minéraux argileux primaires se forment lorsque les roches sont en contact avec un fluide (eau, air, vapeur, voire roche en fusion), générant des processus d'altération. La diversité des contextes et des environnements pouvant conduire à la formation de minéraux argileux explique leur importance, en particulier à la surface de la croûte terrestre, et leur grande variété.

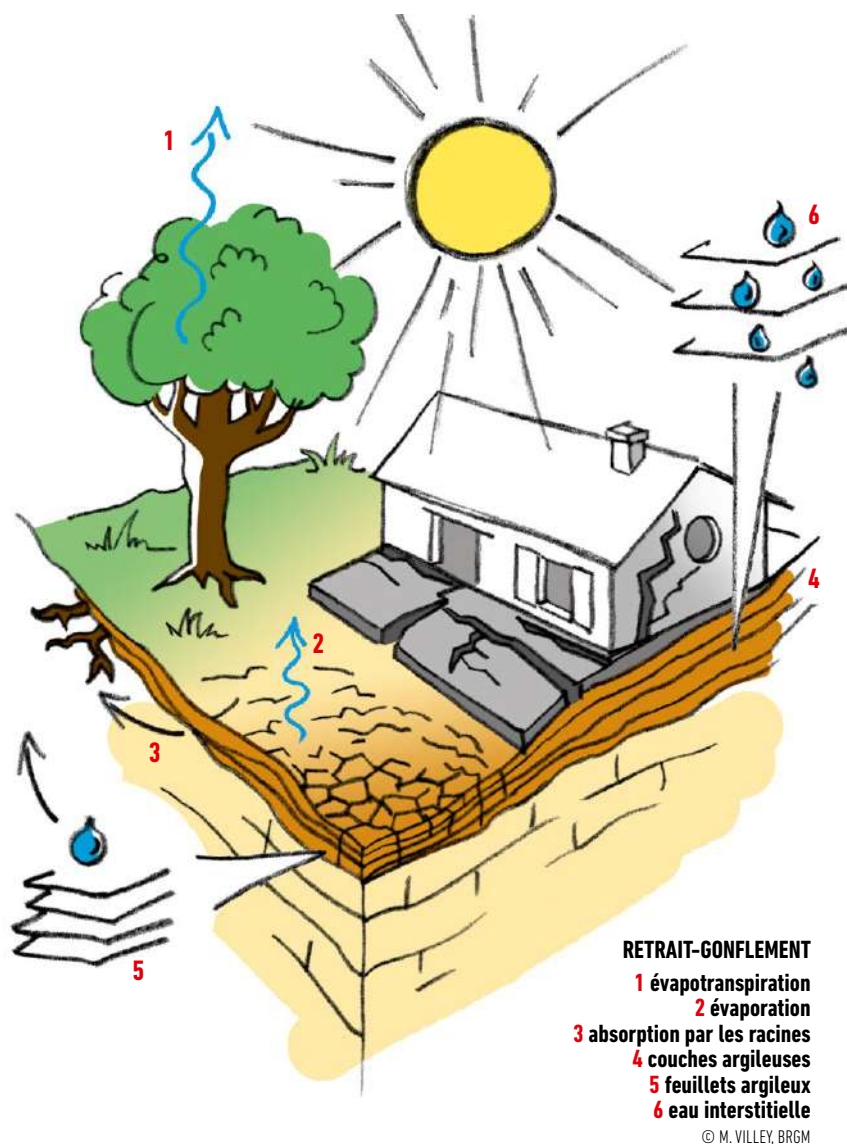
Les argiles sont formées par l'association de feuillets élémentaires qui s'accrochent entre eux pour former des éléments dénommés empilements par certains auteurs ou cristallites par d'autres. L'espace entre deux feuillets



▼ PHOTOS 2, 3
**Exemples de
fissurations du
bâti liées au
phénomène de
retrait-gonflement
des argiles.**

© ALAIN-FRANCK BECHADE





est appelé espace interfoliaire. Le nombre de feuillets par particule est variable suivant le type d'argile considéré. Les trois types d'argile les plus couramment rencontrés sont la kaolinite, l'illite et la smectite.

Ce sont les minéraux appartenant à famille des smectites qui sont principalement à l'origine du phénomène de RGA. Ces minéraux sont composés de feuillets à trois couches. Le feuillet élémentaire est composé d'une couche d'alumine comprise entre deux couches de silice. Il n'existe pas de liaison hydrogène entre les feuillets élémentaires ni de cation interfoliaire capable de maintenir fortement les feuillets entre eux. Les liaisons entre les feuillets étant très faibles, ces minéraux sont très sensibles à la teneur en eau et ont donc un fort potentiel de gonflement.

Pour ces raisons, les minéraux argileux de type smectite sont parmi les plus gonflants. Par comparaison, les illites et la kaolinite gonflent peu.

Il faut noter que l'incorporation d'eau au sein de l'espace interfoliaire est réversible, à pression atmosphérique, et dépend de la température et de la pression de vapeur. Plus l'air est humide, plus l'argile pourra incorporer d'eau. Cette réversibilité est à l'origine du processus et des dommages qu'il provoque.

Rôle des minéraux argileux dans le risque

Le retrait-gonflement des argiles est à l'origine de dégâts importants au bâti à la suite de périodes de sécheresse prolongées (*photos 2 et 3*). En climat tempéré, les argiles sont souvent proches de leur état de saturation, si bien que leur potentiel de gonflement est relativement limité.

ENCADRÉ 1

► IMPACT DU CHANGEMENT CLIMATIQUE

Les projections climatiques sur la métropole, basées sur les modèles globaux du GIEC, montrent qu'au cours du premier tiers du XXI^e siècle la probabilité de sécheresse des sols s'accroît ; au milieu du siècle apparaissent des sécheresses inhabituelles en termes d'expansion spatiale ou d'intensité et touchent des régions qui ne connaissaient pas ces phénomènes auparavant (zones

montagneuses en particulier) ; à la fin du siècle, les sécheresses des sols pourraient devenir extrêmes sur la majeure partie du territoire : un été sur trois, voire un été sur deux serait au moins aussi chaud que l'été 2003 en métropole.

Le BRGM a développé un modèle de coût de la sinistralité liée au retrait-gonflement des argiles (Gourdière & Plat, 2018) en s'appuyant sur ces projections

climatiques, sur la sinistralité actuelle et en tenant compte de l'évolution attendue de la population et du parc immobilier au cours du siècle.

Les premiers résultats de ce modèle montrent que l'impact du changement climatique sur la sinistralité liée au retrait-gonflement des argiles se traduirait par un coût moyen annuel 2 à 2,5 fois plus important qu'aujourd'hui. —



4

À l'inverse, elles sont éloignées de leur limite de retrait, c'est pourquoi les mouvements les plus importants sont observés en période sèche. La sécheresse, résultant d'un déficit pluviométrique marqué associé à de fortes températures, se traduit par une importante évaporation de l'eau contenue dans le sol, jusqu'à deux mètres de profondeur. Il en résulte un retrait des argiles, qui se manifeste par un tassement du sol et par l'ouverture de fentes de dessiccation, classiquement observées dans le fond des mares asséchées.

L'amplitude du tassement est d'autant plus importante que la couche de sol argileux concernée est épaisse et qu'elle est riche en minéraux gonflants. Par ailleurs, la présence de drains ou d'arbres (dont les racines pompent l'eau du sol jusqu'à 3 voire 5 m de profondeur) accentue l'ampleur du phénomène, en augmentant l'épaisseur de sol impacté par le front de dessiccation.

En France, le coût total des sinistres liés au phénomène de retrait-gonflement des formations argileuses, indemnisés depuis 1989 dans le cadre de la procédure sur les catastrophes naturelles, est évalué à plus de 11 milliards d'euros par la Caisse Centrale de Réassurance pour la période 1989-2017 (figure 1). Ainsi, près de 8 500 communes ont été reconnues en état de catastrophe naturelle pour la sécheresse géotechnique, avec un peu plus de 23 000 arrêtés pris depuis 1989.

Cartographie des argiles

Devant l'ampleur du coût de la sinistralité liée au retrait-gonflement des argiles, le ministère en charge de l'Écologie a souhaité engager dès le début des années 2000 une politique de prévention. Dans le cadre d'un

programme pluriannuel cofinancé par le Fonds de prévention des risques naturels majeurs, il a confié au BRGM la mission de cartographier l'aléa associé au phénomène, autrement dit de délimiter les secteurs *a priori* sensibles pour y diffuser certaines règles de prévention à respecter (plans de prévention des risques naturels prévisibles, par exemple).

Le terme d'aléa désigne la probabilité qu'un phénomène naturel d'intensité donnée survienne sur un secteur géographique donné et dans une période de temps donnée. Cartographier l'aléa retrait-gonflement des argiles revient donc à évaluer, en tout point du territoire, la probabilité qu'une maison individuelle soit affectée par un sinistre en période de sécheresse.



PHOTO 4
Vue rapprochée de fentes de dessiccation dans l'argile (2003).

© FRANÇOIS MICHEL, BRGM

FIGURE 1 / Coûts annuels du RGA pour le régime d'indemnisation des catastrophes naturelles entre 1989 et 2017. SOURCE CCR

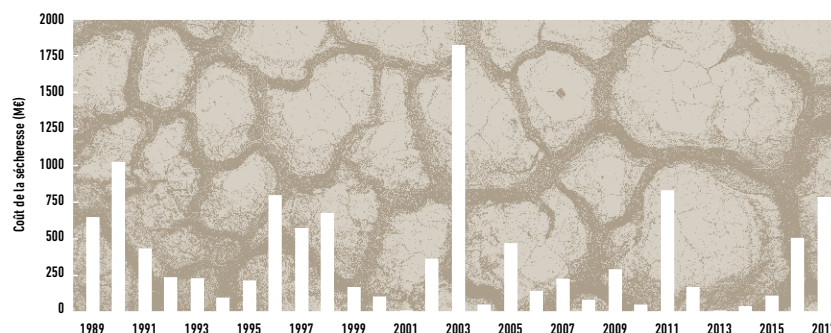
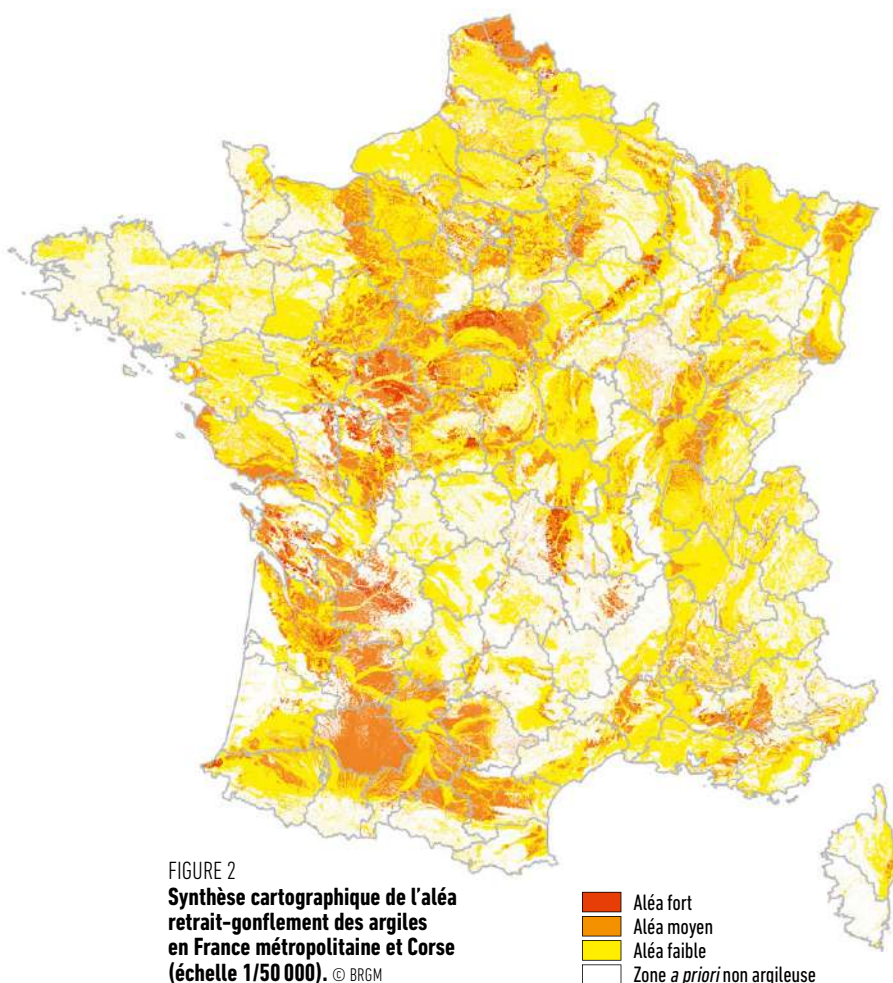




PHOTO 5
Exemple de réalisation
de diagnostic RGA chez
un particulier à l'aide
d'un spectromètre gamma.

© ALAIN-FRANCK BECHADE



Les cartes produites par le BRGM (figure 2) définissent l'aléa de manière qualitative à l'échelle départementale pour l'ensemble du territoire métropolitain. Ces cartes ont pour but de délimiter toutes les zones qui sont *a priori* sujettes au phénomène de retrait-gonflement et de hiérarchiser ces zones selon un degré d'aléa croissant.

Les zones où l'aléa retrait-gonflement est qualifié de fort sont celles où la probabilité de survenance d'un sinistre sera la plus élevée et où l'intensité des phénomènes attendus la plus forte. Dans les zones où l'aléa est qualifié de faible, la survenance de sinistres est possible en cas de forte sécheresse, mais ces désordres ne toucheront qu'une faible proportion des bâtiments, principalement ceux qui présentent des défauts de construction ou un contexte local défavorable, avec par exemple des arbres proches ou une hétérogénéité du sous-sol. Les zones d'aléa moyen correspondent à des zones intermédiaires entre ces deux situations extrêmes.

Quant aux zones où l'aléa est considéré comme *a priori* nul, il s'agit des secteurs où les cartes géologiques actuelles n'indiquent pas la présence de terrain argileux en surface. Il n'est cependant pas exclu que quelques sinistres s'y produisent, car il peut s'y trouver localement des placages d'argiles, des lentilles intercalaires, des amas glissés en pied de pente ou des poches d'altération de nature argileuse, non identifiés sur les cartes géologiques, mais dont la présence peut suffire à provoquer des désordres ponctuels.

Limite de validité des cartes d'aléa

L'échelle de validité des cartes départementales d'aléa est celle de la donnée de base utilisée pour leur réalisation, à savoir les cartes géologiques au 1/50 000^e. Le degré de précision et de fiabilité des cartes d'aléa est limité en partie par la qualité de l'interprétation qui a permis leur élaboration (identification et hiérarchisation des formations à composante argileuse). De plus, les concepts et les choix de représentation qui prévalaient lors de la réalisation de la carte géologique n'étaient pas focalisés sur la lithologie des formations de surface. Il en découle que les hétérogénéités lithologiques qui caractérisent de nombreuses formations géologiques n'ont pas toujours été représentées.

Le travail d'harmonisation et de correction des cartes géologiques, en vue d'établir une carte départementale des formations à composante argileuse, permet de rectifier certains contours pour intégrer la connaissance issue de sondages récents. Il n'en demeure pas moins que la carte ainsi élaborée reflète l'état des connaissances au moment de sa publication. Des investigations complémentaires permettraient probablement de corriger certaines limites d'affleurement, voire d'identifier de nouvelles poches ou placages argileux non représentés sur les cartes actuelles.

Ces considérations expliquent pourquoi les cartes d'aléa ainsi élaborées ne peuvent en aucun cas prétendre représenter en tout point l'exacte nature des terrains présents en surface ou subsurface. En particulier, il n'est pas exclu que, sur les secteurs considérés en aléa a priori nul, se trouvent localement des zones argileuses d'extension limitée de nature à provoquer des sinistres isolés à l'échelle de la parcelle constructible. Inversement, il est possible que certaines parcelles situées en zone d'aléa non nul soient, en réalité, constituées de terrains non sensibles au phénomène, voire non argileux.

Ces écarts ne peuvent être mis en évidence qu'à l'occasion d'investigations géotechniques spécifiques, dans le cas d'un nouveau projet d'aménagement par exemple.

Développement de nouvelles méthodes de cartographie et détection

Au sein des bassins sédimentaires, les minéraux argileux sont généralement les principaux porteurs de la très faible radioactivité naturelle.

Les recherches conduites par le BRGM ont permis de définir un abaque (graphique servant à déterminer visuellement des résultats obtenus par calculs) permettant de convertir les données de teneurs naturelles en uranium (U), potassium (K) et thorium (Th) acquises par spectrométrie gamma aéroportée (mesure de la radioactivité naturelle), en termes de nature du substrat du premier mètre de la subsurface. Aujourd'hui, la méthode n'est applicable que sur des formations géologiques d'origine sédimentaire (sables, argiles, calcaires ; Lacquement *et al.*, 2015).

ENCADRÉ 2

► IMAGERIE HYPERSPECTRALE

Poursuivant le même objectif d'amélioration du diagnostic et de la cartographie des sols gonflants, le BRGM utilise des techniques de spectroscopie visible/infrarouge pouvant permettre d'identifier et quantifier rapidement, économiquement, parfois sans destruction, les minéraux argileux recherchés.

Tout matériau possède une signature spectrale bien spécifique, correspondant à la quantité d'énergie émise ou réfléchie en fonction de la longueur d'onde. La spectroscopie étudie les rayonnements électromagnétiques émis, absorbés ou diffusés par la matière. On peut ainsi obtenir des signatures spectrales d'espèces végétales ou de sols permettant leur identification.

Cette technique, déjà utilisée en laboratoire, peut aussi être utilisée sur le terrain. Le BRGM développe actuellement une méthode opérationnelle de localisation et de quantification des zones riches en argiles gonflantes, en apportant une information homogène et continue aux différentes échelles (échelle communale, échelle cadastrale) intéressant les décideurs locaux.

L'appareil utilisé sur le terrain est un spectroradiomètre portable. On peut l'utiliser à distance de la cible, en source de lumière naturelle, à l'aide d'une fibre optique. « Son intérêt est qu'il permet de définir rapidement et facilement la composition de la surface que l'on étudie, explique Audrey Hohmann, ingénieur risques naturels, qui travaille régulièrement avec cet appareil. Autre avantage, les techniques de spectroscopie visible/infrarouge peuvent être déployées sur drone via des caméras hyperspectrales et couvrir rapidement de grandes surfaces. Et il s'agit d'un procédé économique ». —



6



PHOTO 5
Figures de dessiccation
(Province de Dornogovi,
Mongolie, 2012).
© FRANÇOIS MICHEL, BRGM

Dans la continuité de ces travaux, le projet CARGO a permis de contraindre le signal géophysique des zones géologiques où de nombreux sinistres RGA avaient été déclarés aux assurances. Cette étude basée sur des données de faible résolution a permis de proposer une méthode prospective d'évaluation des zones exposées au risque RGA et de déposer une demande de brevet en PCT sous la référence WO2016092210 A1.

Les modélisations réalisées à partir de données aéroportées permettent une cartographie au 1/100 000e au mieux et non un diagnostic à l'échelle du bâti individuel. Ainsi, de nouveaux projets de recherche se sont attachés à réaliser puis valider ce saut d'échelle. Les algorithmes d'étalonnage ont été implantés dans des appareils portatifs afin d'acquérir une mesure représentative d'un volume de terrain d'une surface d'environ 1 m² sur une profondeur de 30 à 50 cm. Ce transfert vers les appareils au sol a permis d'envisager de passer des applications cartographiques vers celui des diagnostics individuels.

Les tests destinés à évaluer la pertinence de la méthode ont été réalisés en collaboration avec un expert indépendant en assurances (société AFB expertise) dans la région de Bordeaux, l'Aquitaine étant une région particulièrement touchée par le phénomène RGA. Les tests ont été réalisés en conditions réelles, dans les jardins des particuliers ayant subi des dommages (*photo 5*). Les premiers résultats montrent que la méthode est prometteuse, puisque 86 % des mesures indiquent la présence d'argiles gonflantes.

Moyennant quelques améliorations d'ergonomie de l'appareil et des applications dédiées de mise en œuvre et de reproductibilité, cette méthodologie de diagnostic correspondrait aux attentes des acteurs du milieu (rapport AFB). Elle permettrait de disposer d'une méthode de détection préventive d'argiles gonflantes de l'échelle d'une parcelle individuelle à celle d'un territoire. Elle remplacerait la lourde méthodologie conventionnelle de sondages, d'analyses d'échantillons et de diffraction X.

Aujourd'hui, cette innovation, pur produit de la recherche BRGM, est éprouvée techniquement dans le cadre d'un projet de maturation soutenu par le COSI (Comité d'orientation stratégique de l'innovation) du BRGM composé d'experts internes et externes. L'objectif de cette démarche est d'optimiser le transfert de l'innovation vers une sphère socio-économique qui devra répondre, à court terme, à l'évolution du cadre réglementaire proposée par l'État (*voir encadré 3*).

Conclusion

La radiométrie, ou spectrométrie gamma, appliquée à la géologie fait l'objet de nombreux travaux de recherche depuis plusieurs années au BRGM. Les besoins exprimés par les pouvoirs publics concernant la connaissance et

ENCADRÉ 3

► ÉVOLUTION DU CADRE LÉGISLATIF

La loi ELAN (Évolution du logement, de l'aménagement et du numérique), publiée au Journal officiel du 24 novembre 2018, ajoute au Code de la construction et de l'habitation une nouvelle sous-section consacrée à la prévention des risques de mouvement de terrain différentiel consécutif à la sécheresse et à la réhydratation des sols. Elle rend obligatoire la réalisation d'une étude géotechnique à la vente d'un terrain constructible dans les zones exposées au retrait-gonflement des argiles. Au moment de la construction, le maître d'ouvrage, c'est-à-dire le futur propriétaire, transmet l'étude au constructeur qui doit suivre ses recommandations ou respecter des techniques particulières définies par voie réglementaire. Le zonage réglementaire et le contenu de l'étude de sol seront fixés par décret en 2019. —

la prévention du phénomène de retrait-gonflement des argiles ont été l'occasion d'approfondir ces travaux et de les appliquer sur ce sujet plus particulièrement. Les résultats se sont montrés prometteurs et ont encouragé les équipes du BRGM à déposer un brevet pour cette nouvelle méthode de cartographie des formations argileuses. Au fil des ans, le sujet est passé du stade de la recherche fondamentale et de la formulation des concepts à celui du projet de maturation qui devrait bientôt aboutir à un prototype, puis à une technologie opérationnelle. Celle-ci devrait répondre aux besoins d'investigations suscités par les nouvelles contraintes réglementaires qui ont été mises en œuvre pour prévenir un risque naturel particulièrement coûteux pour la collectivité. ●

ABSTRACT

Clay soil shrinking and swelling causes physical ground movements that can seriously damage individual housing. In France, it is the second most important natural risk in terms of financial impacts. On request from the Ministry for the environment, the BRGM has produced and published the first reference map for clay shrinking and swelling risks in each département, for the years from 2000 to 2010. According to forward scenarios from the Caisse centrale de réassurance (CCR) and the BRGM, which are based on IPCC reports, the scale - and hence the impacts - of this phenomenon will continue to increase with the pressures of climate change. Furthermore, the ELAN Act (on planning, housing and the digital economy), published in November 2018, has laid the groundwork for a major overhaul of regulations in this area. The BRGM has taken up the challenge by supporting the finalisation of an innovation capable of rapidly producing realistic diagnoses of the presence of expansive clays in soils, with the capacity to deliver forward diagnoses suited to the needs of private individuals.

BIBLIOGRAPHIE

Hossein Nowamooz – Retrait/gonflement des sols argileux compactés et naturels. Sciences de l'ingénieur [physics]. Institut National Polytechnique de Lorraine - INPL, 2007. Français. <NNT: 2007INPL107N>. <tel-01752833v2> Rapport AFB. Lacquement F., Prognon F., Tourlière B., Martelet G., Deparis J., Tissoux H., Reninger P.-A. & Perrin J., 2015 – Méthodologie de cartographie du régithe à partir de données radiométriques aéroportées en région Centre - Etablissement de cartes lithologiques. Rapport BRGM, Orléans, BRGM/RP-64932-FR, 130 p Vincent et al., 2008. Gourdière S. & Plat. E., 2018 – Impact du changement climatique sur la sinistralité due au retrait-gonflement des argiles. Dans : Delage P., Chevalier C., Cui Y.J. & Semblat J.F. (Eds.), 2018. Actes des 9^{èmes} Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'Ingénieur, 13-15 juin 2018 (online). Marne-la-Vallée : IFSTTAR-ENPC, 2018. Collection Actes Interactifs de l'ifsttar, All3. 978-2-85782-742-9. En ligne à l'adresse www.ifsttar.fr/collections/ActesInteractifs/All3.



Résilience des territoires de montagne aux crues et laves torrentielles

Compte tenu de leur relief marqué, les territoires de montagne sont soumis à des aléas naturels gravitaires de diverses natures. C'est le cas des crues torrentielles, qui se caractérisent par des transports intenses de sédiments à l'origine de dégâts spécifiques. Le relief de ces territoires leur confère des particularités en matière d'aménagement du territoire et de développement des activités, qui doivent être intégrées aux différentes phases de la gestion des risques naturels, notamment celles qui contribuent à en améliorer la résilience.

AUTEUR



Didier RICHARD

Délégué à l'expertise
Irstea

✉ didier.richard@irstea.fr

En France, de nombreux territoires sont exposés au risque d'inondation. Selon les secteurs géographiques, le relief, la nature et l'occupation du sol, ces inondations ont des caractéristiques variées : soudaines au pied des reliefs dans les zones méditerranéennes (crues « éclair »), plus progressives avec des durées de décrue longues le long des rivières à faible pente (comme la Marne, en janvier 2018), etc.

Les zones de montagne sont concernées par des formes de crue très spécifiques. Prenant leur naissance au contact des sources sédimentaires dans les hauts bassins versants, les torrents de montagne ont loisir de se charger en sédiments de toutes tailles lors des pluies intenses et/ou prolongées. Ils sont aussi capables de transporter des charges sédimentaires importantes jusque relativement loin en aval.

Particularités des crues de montagne

› Des cours d'eau particuliers

On distingue trois grandes familles de cours d'eau dans les régions de montagne, en fonction de leur pente longitudinale. Cette classification forcément réductrice a le mérite de fixer les ordres de grandeur et de mettre en évidence l'importance du facteur pente dans le comportement

de ces cours d'eau. Cette distinction est importante, car selon les pentes et les modes de transport de sédiments les conséquences sur les évolutions morphologiques ou sur les enjeux exposés peuvent être très différentes.

De façon très schématique, on appelle *rivières* les cours d'eau qui s'écoulent dans les grandes vallées, à des pentes significativement inférieures à 1%, comme on en trouve dans les régions de plaine. En amont, on réserve le terme de *torrent* aux cours d'eau de pentes supérieures à 6%. Entre les deux, les *rivières torrentielles* reçoivent les torrents et leurs apports sédimentaires avant de se jeter à leur tour dans les rivières.

► Des transports sédimentaires intenses

Les *torrents* et *rivières torrentielles* se distinguent surtout par l'importance des volumes de sédiments transportés en raison de leurs fortes pentes. On rencontre principalement trois types d'écoulement avec transport solide dans ces cours d'eau : des écoulements avec transport solide par charriage et/ou en suspension, et les laves torrentielles.

Les particules sédimentaires transportées par charriage sont déplacées par roulement ou par glissement sur le fond du cours d'eau, ou encore par saltation, c'est-à-dire par une succession de petits sauts au cours desquels les particules se séparent du fond du lit durant de très courtes périodes. Les matériaux les plus fins, légers, sont transportés en suspension.

Des transports sédimentaires par charriage et suspension se rencontrent dans tous les types de cours d'eau, y compris les rivières. Néanmoins, la charge solide étant

corrélée à la pente, elle peut atteindre des valeurs très élevées dans un torrent.

Les laves torrentielles sont un phénomène spécifique des torrents. Elles se forment généralement à la faveur de fortes pluies, sur des pentes fortes permettant la formation d'un mélange concentré d'eau et de matériaux solides de granulométrie variée allant des argiles à des blocs de dimensions métriques. Contrairement au charriage dont le débit moyen varie de façon graduelle, l'écoulement des laves torrentielles est transitoire et constitué de bouffées successives indépendantes. La concentration en matériau solide peut atteindre 80% en volume (alors qu'elle ne dépasse pas 20 à 40% pour les écoulements dits hyperconcentrés).

► Des dommages spécifiques

Les désordres susceptibles d'être produits par les écoulements hyperconcentrés sont de deux types. Certains résultent des engravements provoqués par le dépôt des sédiments, entraînant des débordements, des divagations, des coupures de voies, l'obstruction de ponts, un envahissement massif par des sédiments de toutes tailles. Les forts débits liquides de ces crues et leur dynamique sédimentaire engendrent également des désordres à la suite d'affouillements, localisés ou sur de longs tronçons, entraînant des déstabilisations de berges ou de versants, la ruine d'ouvrages ou d'habitations.

Le front d'écoulement des laves torrentielles peut avoir plusieurs mètres de hauteur, être chargé en gros blocs et se déplacer à plusieurs mètres par seconde. Leur densité est



◀ PHOTO 1
Retenue des
Banchets, La Plagne
(Savoie).

© D. RICHARD, BRGM

▶ PHOTO 2
Haut bassin versant
du Salso-Moreno
(Alpes-Martinites).

© F. LIÉBAULT



PHOTO 3
Torrent de la Béoux (Drôme).

© C. BIGOT

PHOTO 4 & 5
Crue du Vorz du 23 août 2005 à Saint-Agnès (Isère).

© G. LOYRION

de l'ordre de deux fois celle de l'eau. L'ensemble est donc susceptible d'engendrer de très fortes pressions dynamiques lors de chocs sur les obstacles. Dans toute la zone atteinte par l'écoulement, il peut y avoir mise en danger de la vie humaine, y compris à l'intérieur des bâtiments.

Particularités des territoires de montagne

Au-delà de leur grande diversité, tous les massifs montagneux ont la particularité de présenter de fortes pentes pouvant être le siège de phénomènes naturels qui n'existent pas dans les zones au relief plus doux. Les crues torrentielles font partie de ces phénomènes dits « gravitaires », comme les avalanches, les chutes de blocs, les écroulements, etc. Tous possèdent une forte capacité d'endommagement ou de destruction.

Le relief des zones de montagne contraint aussi fortement l'occupation et l'exploitation de l'espace. Les zones les plus escarpées sont inaccessibles pour l'habitation, l'exploitation forestière, l'agriculture et constituent des barrières physiques à la circulation. Traditionnellement, les villages de montagne se sont installés sur les cônes de déjection des torrents, entre les versants trop pentus et les fonds de vallées régulièrement inondés par les divagations des rivières. Cela les expose toutefois aux caprices des torrents, voire à d'autres dangers naturels gravitaires. Les voies de communication se sont quant à elles plutôt développées dans les fonds de vallées, avec des infrastructures et des aménagements conséquents (viaducs, tunnels, etc.). Ces contraintes constituent autant de limites au développement économique.

Les régions de montagne possèdent en contrepartie certains atouts. L'utilisation de l'énergie hydro-électrique à partir du XIX^e siècle a favorisé le développement d'activités industrielles consommatrices d'énergie dans les vallées de montagne. Plus récemment, les activités touristiques ou sportives spécifiques à la montagne, notamment hivernales, ont permis le développement d'une économie souvent vitale pour ces territoires.

Les zones de montagne française présentent aussi une particularité assez préoccupante. Le réchauffement moyen des températures y est en effet deux fois plus important que sur le reste du territoire national. Les impacts sur la capacité de stockage de la « montagne château d'eau » et sur l'équilibre général des hydrosystèmes, sur le potentiel hydro-électrique, sur l'activité agricole et l'avenir des peuplements forestiers, sur la qualité et la durée de l'enneigement, sont autant de questions qui interpellent les acteurs et les gestionnaires de ces territoires.

Les principes de gestion du risque

› Définition du risque

Le *risque* est couramment défini, dans le domaine des risques naturels, comme la combinaison de l'*aléa* (phénomène source de danger caractérisé par son intensité et sa probabilité d'occurrence) et de la *vulnérabilité* des enjeux exposés (traduisant la valeur des pertes qui résulteraient

de l'occurrence de l'aléa considéré). Un phénomène naturel dangereux ne constitue en effet pas un risque en tant que tel s'il ne menace pas des enjeux auxquels les sociétés humaines sont attachées, qu'il s'agisse d'activités (touristiques, agricoles, industrielles...), de biens (infrastructures, bâtiments, réseaux...) ou, bien entendu, de vies humaines. Le terme de *vulnérabilité* est employé pour désigner ces enjeux au travers de la valeur qui leur est accordée, potentiellement menacée par un caprice de la nature.

› La gestion intégrée du risque

La gestion des risques naturels recouvre un certain nombre d'étapes, couramment représentées sous la forme d'un cycle dit de « gestion intégrée du risque ». La gestion de crise juste après la survenue de l'événement concerne l'engagement des moyens de secours ou de mesures immédiates pour éviter d'autres dommages. La crise passée, des mesures doivent être engagées avec une certaine urgence pour remettre en état de fonctionnement, même dégradé ou à titre provisoire, les installations de base et l'approvisionnement de première nécessité. La reconstruction consiste à transformer ensuite ces mesures provisoires en solutions définitives et durables. Cela nécessite une analyse et un retour d'expérience approfondis de l'événement et de la crise. Sur cette base seront aussi révisées et améliorées les mesures de prévention destinées à éviter les dommages et de préparation à une prochaine catastrophe.

Résilience

Depuis plusieurs années, une notion a émergé et s'est plus ou moins imposée dans le processus de gestion des risques naturels, aux côtés des plus traditionnelles notions d'aléa et de vulnérabilité : il s'agit de la notion de *résilience*, déjà fortement promue par le « cadre d'action de Hyogo 2005-2015 : Pour des nations et des collectivités résilientes face aux catastrophes » adopté en 2005 par l'UNISDR (United Nations International Strategy for Disaster Reduction) et remise à l'agenda dans les priorités du cadre de Sendai 2015-2030 pour la réduction du risque de catastrophes, approuvé en 2015 par les Nations Unies. Initialement définie en résistance des matériaux, puis adoptée et adaptée par l'écologie et la psychologie, cette notion a donc plus récemment été étendue au champ de la prévention des accidents, des catastrophes et des crises. Pour autant, sa définition n'est pas parfaitement stabilisée parmi les différents acteurs qui y ont recours dans ce champ d'utilisation.

› Définitions

Compte tenu de son origine dans le champ de la gestion des risques de catastrophe, nous nous en tiendrons ici à la définition proposée par les Nations Unies : « *La capacité d'un système, d'une communauté ou d'une société exposés à des dangers de résister, d'absorber, de s'accommoder de, de s'adapter à, de se transformer et de se remettre des effets d'un danger en temps opportun et d'une manière efficace,*





en préservant et restaurant notamment ses structures et fonctions essentielles de base à travers la gestion du risque ».
(www.unisdr.org/we/inform/terminology)

En regard des phases principales de gestion intégrée des risques présentées précédemment, la notion de résilience définie de la sorte intègre l'ensemble des registres d'action. On y retrouve non seulement la capacité à se remettre, se relever, « rebondir », après la survenue du sinistre, mais aussi tous les champs d'action permettant de mieux « faire face », en s'y étant suffisamment préparé, en s'étant mis en capacité d'éviter l'exposition au danger redouté ou de résister à ses impacts potentiellement dommageables.

On peut aussi noter que cette définition, qui évoque des capacités du système concerné à se transformer ou à s'adapter, ne limite pas la résilience au retour à l'état initial, à quoi on aurait quelquefois tendance à la réduire. La résilience doit en effet être comprise plus largement comme la capacité d'un système à redevenir capable d'assurer les fonctions qui sont attendues de lui.

Il est important d'avoir en tête également que la résilience peut renvoyer à des mesures ou dispositions d'ordre technique, mais aussi organisationnel, et même plus largement d'ordre social. On pressent également très vite une question d'échelle. Quelle est celle du système dont on souhaite assurer ou améliorer la résilience ? La résilience à une échelle n'implique en effet pas nécessairement la résilience à d'autres échelles. Même à une échelle donnée, les parties prenantes peuvent avoir des enjeux différents, pas nécessairement immédiatement compatibles. Au niveau temporel, l'évaluation de la résilience suppose aussi d'avoir choisi à quel terme il est pertinent de faire référence.

› Résilience des territoires de montagne

Ces considérations générales étant posées et pour en revenir au contexte des territoires de montagne soumis aux crues et laves torrentielles, arrêtons-nous à quelques spécificités, qui posent peut-être cette question de la résilience en des termes spécifiques eux aussi. Comme nous l'avons vu plus haut, les phénomènes gravitaires rapides, en particulier les laves torrentielles, sont susceptibles d'imposer de façon assez systématique des dégâts importants aux enjeux atteints, jusqu'à leur destruction. La prévention est par conséquent un maillon essentiel de la construction d'une résilience à ces phénomènes pour les territoires concernés. On préférera « faire face » aux événements plutôt que d'être obligé de se « remettre », obligatoirement difficilement, de leurs effets. Le principal instrument actuellement utilisé à cette fin est le plan de prévention des risques naturels prévisibles, ou PPR, dont l'objectif est de réduire la vulnérabilité en réglementant la construction, en l'interdisant dans les zones à risque fort et en lui imposant des prescriptions dans les zones à risque modéré. La délimitation de ces zones à risque fort, modéré

ou faible repose sur le choix et la caractérisation d'aléas de référence. Le cadrage méthodologique national demande, pour la zone d'aléa fort, de se référer au plus fort événement connu ou à celui de fréquence moyenne centennale si ce dernier lui est supérieur en intensité. On touche là aux limites de la portée de cet instrument réglementaire pour répondre à des objectifs de résilience, dans la mesure où être résilient, c'est aussi savoir « réagir à l'imprévisible », ce qui ne peut se limiter à raisonner sur la base de scénarios prédéfinis. D'autres instruments de la politique de prévention des risques naturels peuvent prendre en partie le relais, dans les champs de l'information préventive ou de mise en sécurité des populations, par exemple.

Cela confronte cependant à la question de jusqu'où pousser les scénarios, de surcroît de plus en plus incertains qu'ils seront improbables. Une alternative consiste sans doute à identifier les enjeux, tant en termes d'objets vulnérables que de fonctions à assurer ou rétablir au plus vite, puis de se demander à quoi sont vulnérables ces enjeux. Remarquons à ce stade que les crues torrentielles ne seront souvent pas les seules menaces à considérer. L'identification des enjeux impose d'impliquer les acteurs, les « porteurs d'enjeux » du territoire ou du système concerné, qui sont les mieux à même de les définir. Des processus adaptés de concertation multiacteur, multi-risque, multienjeu et multiéchelle doivent pour cela être mobilisés. On peut citer à ce titre les expériences conduites dans le cadre du programme « Territoires alpins de gestion intégrée des risques naturels » (TAGIRN), animé par le Pôle alpin des risques naturels (PARN) : <http://risknat.org/girn/>.

Certaines caractéristiques propres aux territoires de montagne peuvent fortement influencer la hiérarchisation des enjeux par les acteurs de ces territoires. Les questions d'accessibilité sont par exemple très sensibles en bien des endroits desservis par une unique route ou pour des voies « stratégiques » (transfrontalières, d'accès à des stations de ski, par exemple). Par des effets en cascade, un événement localisé peut entraîner des conséquences et donc générer des risques à distance, éventuellement différés dans le temps. Une illustration emblématique en est l'épisode du tunnel du Chambon, même si le phénomène déclencheur n'était pas de nature torrentielle. En avril 2015, un glissement de terrain a déstabilisé ce tunnel, imposant sa fermeture, ainsi que celle de la route reliant Grenoble à Briançon. La fermeture prolongée de cette route, jusqu'à la reconstruction et la réouverture du tunnel, et malgré l'ouverture d'une voie de secours à gabarit réduit, a significativement et durablement impacté la commune de la Grave, pourtant située à plusieurs kilomètres en amont, son activité économique, ainsi que la vie quotidienne de ses habitants.



Conclusion

Même si tous les aspects n'ont pas pu être développés ici, on comprend bien que la résilience des territoires de montagne requiert la mobilisation de démarches entre acteurs très intégratrices, tenant compte de multiples enjeux et risques, et articulant efficacement les différentes phases du cycle de gestion intégrée des risques. Cela n'est pas spécifique à ces territoires, même si certaines de leurs caractéristiques induisent autant de spécificités sur certains aspects. Des expérimentations de gestion intégrée des risques naturels sur ces territoires sont mises en œuvre et prometteuses. L'enjeu suivant sera sans doute d'intégrer complètement la composante gestion du risque dans la gestion intégrée des territoires. ●



◀ PHOTO 6
Torrent du Réal
à Péone (Alpes-
Maritimes).

© D. RICHARD

▲ PHOTO 7
Station de
La Plagne (Savoie).

© D. RICHARD

ABSTRACT

Mountain areas are characterised by their relief and by their steep gradients from mountain tops to valley bottoms. These conditions are liable to trigger natural gravity-related phenomena with particular characteristics due to these steep gradients. Floods in mountain streams can for example carry far greater quantities of sediment than rivers in floodplains, producing very particular effects in extreme cases. Besides the specific hydraulic behaviour of sediment-laden flows, they can cause particular kinds of damage. Other characteristics of mountain areas arise from their relief. Land use and planning have always been subject to the particular constraints of usable space and accessibility. On the other hand, mountain reliefs, gradients and altitudes also favour activities that have strongly influenced development in these areas. These various particularities determine the nature of risks in mountain areas in terms of both underlying hazards and vulnerability to risks, which also have to be taken into account at the different stages in risk management. For example, the question of improving local area resilience, which has become a priority for natural risk management, has to be addressed in specific ways.

BIBLIOGRAPHIE

Recking, A., Richard, D., Degoutte, G., coord. (2013) – *Torrents et rivières de montagne – dynamique et aménagement*. Editions Quae, 333 p. Naaim-Bouvet, F., Richard, D., coord. (2015) – *Les risques naturels en montagne*. Editions Quae, 392 p. UNISDR (2015) – *Cadre d'action de Sendai pour la réduction des risques de catastrophe 2015 - 2030*.

1



Ouranos AuRa : la science au secours des territoires de montagne

Ouranos AuRA, organisme frontière entre science et société dont l'objectif est de mettre en lien les acteurs de la recherche et des territoires à l'échelle de la région Auvergne Rhône-Alpes. L'objectif est d'améliorer la compréhension du changement climatique et de ses impacts, et de faire émerger des solutions d'adaptation, notamment au sein des territoires de montagne.

Le changement climatique fait couler beaucoup d'encre parmi les chercheurs depuis les années 1980. Aujourd'hui, il constitue également un problème pour les gestionnaires des territoires (entreprises, collectivités, associations citoyennes, etc.). L'évolution progressive de la problématique vers les décideurs incite à réinterroger le rôle de la science et l'utilisation possible des connaissances produites par la recherche pour trouver des solutions opérationnelles face aux effets du changement climatique. Ouranos AuRA, structure d'interface entre science et société, permet de répondre aux défis que le changement climatique fait peser sur les territoires.

Le changement climatique s'exprime très durement en montagne : parmi les multiples impacts observés, c'est aujourd'hui tout un pan de l'économie de montagne qui est remis en cause. Que deviendra l'industrie du tourisme hivernal dans les prochaines décennies si l'enneigement devient régulièrement déficitaire ? Comment des territoires de moyenne montagne, ayant investi dans l'industrie des sports d'hiver à la fin du XX^e siècle, peuvent aujourd'hui envisager un avenir sans neige ?

AUTEURS



Céline LUTOFF

Géographe sociale, Maître de conférences à l'UGA, membre fondatrice de Ouranos AuRA.
✉ celine.lutoff@univ-grenoble-alpes.fr



Aurélie CHAMARET

Économiste de l'environnement, Ingénieur de recherche à l'UGA, membre de Ouranos AuRA.
✉ aurelie.chamaret@univ-grenoble-alpes.fr



Sandrine ANQUETIN

Hydroclimatologue, DR-CNRS, Directrice adjointe de IGE, membre fondatrice de Ouranos AuRA.
✉ sandrine.anquetin@univ-grenoble-alpes.fr



Magali DE GOUVILLE

Économiste, chargée de mission au GIS Envirhonalp, membre fondatrice d'Ouranos AuRA.
✉ envirhonalp@univ-grenoble-alpes.fr

2

Face à ces situations inédites, l'intermédiation entre science et société est aujourd'hui une nécessité. Elle passe par le développement de ce que certains auteurs nomment des organisations frontalière. Nous revenons ici sur celles qui ont servi de modèle à Ouranos AuRA.

Le PARN : un précurseur sur les risques

C'est sur la thématique des risques naturels que l'intermédiation science-société s'est structurée, dès 1988, au sein de l'université de Grenoble¹. Le PGRN (Pôle grenoblois des risques naturels) vise alors deux objectifs principaux :

- aider les organismes impliqués sur les risques naturels à coordonner le développement d'outils opérationnels ;
- contribuer à améliorer la prévention et la prévision des risques pour les services opérationnels et les pouvoirs publics (PGRN, 2006).

La structure élargit son périmètre en 2012 pour devenir le PARN². Si la question du changement climatique est aujourd'hui présente dans l'activité du PARN, elle est traitée spécifiquement en termes de risque naturel, laissant de côté d'autres types de risque que le changement climatique fait peser sur les territoires de montagne.

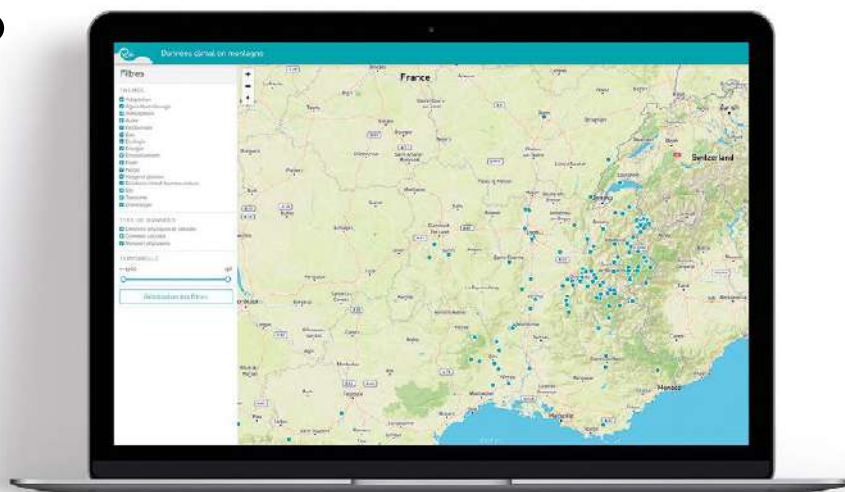
Ouranos Québec : un modèle sur le changement climatique

Concernant ces autres risques liés au changement climatique, le Québec a un temps d'avance depuis la mise en place du consortium Ouranos au début des années 2000. Cette société à but non lucratif regroupe des spécialistes du climat, d'études socio-économiques, et peut mobiliser la communauté des chercheurs des établissements académiques québécois sur des questions posées par les acteurs publics ou privés.

L'activité d'Ouranos est d'abord de produire des projections climatiques à l'échelle du Québec. Elle vise par ailleurs la mise à disposition de services climatiques à l'attention des membres du consortium : scénarios à l'échelle régionale, données et connaissances sur les impacts possibles dans différents domaines (agriculture, santé, biodiversité, tourisme...) et accompagnement des territoires dans une perspective d'adaptation.

Ouranos AuRA : application du modèle québécois à la région Auvergne Rhône-Alpes

Ouranos AuRA a été créé en 2012 dans le cadre du GIS Envirhônalp (groupement d'intérêt scientifique), en tant que plateforme d'interface science-société. Son nom lui a été donné en 2014, en accord avec le consortium Ouranos Québec, qui a vu là une occasion de déployer son modèle à l'international. En 2012-2013, un recensement des recherches a permis d'identifier les laboratoires et



 [HTTPS://PANORAMA.PLATEFORME-OURANOS.FR](https://panorama.plateforme-ouranos.fr)

observatoires travaillant sur le climat en région Rhône-Alpes, les thèmes étudiés, les ressources et les enjeux sociétaux associés.

Ce travail initial a permis de structurer la plateforme et d'identifier les besoins des chercheurs, mais aussi des acteurs des territoires. Ces derniers s'accordent sur la nécessité de :

- fournir un meilleur accès aux données de la recherche ;
- faciliter les échanges entre acteurs académiques et opérationnels sur des questions liées au changement climatique ;
- former certains acteurs pour faciliter l'action ;
- et constituer un point d'entrée vers le monde académique pour co-construire des solutions adaptées. Répondre à ces besoins est notre objectif central, c'est pourquoi nous avons structuré notre activité autour de quatre piliers.

➤ Favoriser l'accès aux données et connaissances

Le portail internet Ouranos-AuRA a été développé pour recenser les métadonnées, offrir un premier panorama des données multidisciplinaires, acquises et gérées par les acteurs académiques de la région sur la question climatique. Son objectif est de porter à la connaissance des gestionnaires, des acteurs économiques et du grand public l'existence de ces données. Le portail permet ainsi d'avoir une vision globale des données multidisciplinaires disponibles à l'échelle de la région et renvoie directement vers les plateformes spécifiques pour télécharger les données qui y sont recensées.

L'enjeu actuel est d'intégrer dans ce panorama des données non académiques pour mieux comprendre les dynamiques des territoires. L'intégration de ces connaissances nécessite cependant de résoudre au préalable certaines questions d'interopérabilité des sources³.

^{1/} Elle a été initiée dans le cadre de l'opération Isère Département Pilote, mise en œuvre par le ministère de l'Environnement et Haroun Tazieff. ^{2/} Pôle alpin d'études et de recherche pour la prévention des risques naturels. ^{3/} Le portail Ouranos AuRA est aujourd'hui en passe d'être remplacé par un système d'information plus performant, intégrant des données venant de sources multiples. Cet outil est en cours de développement dans le cadre du projet Trajectories (<https://trajectories.univ-grenoble-alpes.fr/>).



◀ PHOTO 1
De plus en plus
d'hivers sans neige :
un risque sur
l'industrie du ski !
© SANDRINE ANQUETIN

▲ PHOTO 2
Panorama des
données sur
le climat produites
par les chercheurs
de Rhône-Alpes.

► RÉSILIENCE DU TERRITOIRE MAHORAIS FACE AU RISQUE D'ÉROSION DES SOLS

Déchaussement d'un mangroier
en zone urbaine sous l'action
de l'érosion des sols.

© VALENTIN LANDEMAINE, BRGM



Si l'île de Mayotte est un des joyaux de l'océan Indien avec sa double barrière de corail, il s'agit d'un joyau menacé par une densité de population très importante (690 habitants/km²) et en pleine croissance, à laquelle s'ajoute une forte immigration clandestine. Dans ce département français, devant une telle pression démographique, de nombreux logements insalubres sont construits sur des terrains pentus difficiles d'accès, le plus souvent non connectés à un système d'évacuation des eaux usées et de collecte des déchets. À cet étalement urbain anarchique s'ajoutent de profondes mutations du milieu naturel, la déforestation ouvrant des espaces cultivables et l'arrachage de la mangrove permettant de gagner de l'espace sur le lagon.

Ces transformations entraînent une érosion accélérée des sols sur un territoire déjà fragile en raison de sa morphologie (63 % de l'île occupent des pentes supérieures à 15 %), de ses sols volcaniques facilement érodables et de son climat tropical. À cela s'ajoute un contexte de changement climatique susceptible d'augmenter l'intensité et la fréquence des événements pluviométriques. L'érosion accélérée des sols entraîne un apport excessif

de sédiments et de déchets vers le lagon, provoquant un envasement et une pollution progressive de la frange littorale de l'île et mettant en péril un écosystème marin unique au monde.

Face à ces enjeux environnementaux, la DEAL de Mayotte a engagé une réflexion collective en 2012 qui déboucha sur une « feuille de route érosion ». Ce document stratégique propose un ensemble d'actions permettant de limiter l'érosion hydrique des sols en milieux agricole et urbain et de préserver ainsi l'atout économique et touristique de Mayotte : son lagon.

Le projet LESELAM (2015-2020), piloté par le BRGM, s'inscrit dans le cadre de cette feuille de route. Le BRGM apporte son expertise dans la compréhension et la quantification multi-échelles des processus d'érosion, de la genèse jusqu'au transfert de l'eau et des sédiments jusqu'au lagon au travers d'un observatoire « Érosion ». Un suivi hydrosédimentaire est ainsi réalisé sur trois bassins pilotes et sur un réseau de parcelles expérimentales avec et sans mesures de protection des sols. Ce projet est appuyé par le projet EROMAY (DEAL-BRGM). Ses objectifs sont de définir et

► POUR EN SAVOIR PLUS WWW.LESELAM.COM

de cartographier les formations géologiques, leur niveau d'infiltration et leur degré d'érodabilité. Les connaissances acquises servent de base à une modélisation de l'érosion des sols sur l'ensemble de l'île, permettant un zonage du risque érosion et la mise en place de programmes d'actions considérant les évolutions possibles de l'île sur le long terme. Le transfert des connaissances, tant en zone rurale qu'urbaine, est assuré par des ateliers de sensibilisation des acteurs locaux et de la population et des ateliers d'appropriation des techniques de protection des sols. —

Valentin LANDEMAINE

Ingénieur risques naturels, Direction Risques et prévention
✉ v.landemaine@brgm.fr

Olivier CERDAN

Responsable de l'unité Risques Instabilités Gravitaires et érosion des versants et des sols, Direction Risques et prévention
✉ o.cerdan@brgm.fr

Jean-François DESPRATS

Ingénieur agronome, Direction Eau, Environnement et Ecotechnologies
✉ jf.desprats@brgm.fr

ENCADRÉ 1

► DÉCLINAISONS RÉGIONALES DU GIEC

Fondés sur le modèle du GIEC, des groupes d'experts s'organisent aussi à l'échelle régionale. Il en existe trois en France aujourd'hui : **AcclimaTerra**, depuis 2011 en Nouvelle Aquitaine, le **GREC Sud** depuis 2015 en PACA et **RECO** (Réseau d'experts du changement climatique en Occitanie) depuis 2017. S'appuyant sur un réseau de chercheurs, ils évaluent à la fois les effets possibles du changement climatique dans les régions, les vulnérabilités spécifiques des territoires et leurs ressources pour faire face à des situations jusque-là inédites. Visant le transfert des connaissances, ils s'appuient sur la publication régulière de synthèses scientifiques et organisent des rencontres regroupant chercheurs et acteurs opérationnels pour permettre une meilleure compréhension des impacts et favoriser ainsi l'émergence de solutions d'adaptation pertinentes à l'échelle locale. —

► Favoriser le partage des savoirs

Ouranos AuRA propose des « climat-DataLabs », des rencontres entre chercheurs et acteurs des territoires sur un thème spécifique en lien avec le changement climatique. Ces rencontres, généralement d'une journée, sont rythmées en deux temps. Un premier temps est destiné à des présentations orales des connaissances existant tant du côté des chercheurs que des acteurs des territoires. Un deuxième temps s'organise autour d'ateliers mêlant les différents acteurs sur des questions particulières. Depuis 2016, deux climat-DataLabs ont été organisés et ont rencontré un franc succès⁴.

► Former les acteurs des territoires

Répondre au besoin de formation de certaines catégories d'acteurs (notamment les élus) nécessite de travailler en interaction étroite avec les établissements universitaires et avec d'autres organismes⁵ afin d'identifier les formations existantes, de repérer les champs non couverts et d'aider à la construction de nouvelles formations.

En outre, une réflexion est en cours sur les formes pédagogiques à mobiliser pour ce public particulier. L'utilisation d'outils innovants (comme les vidéos) constitue des pistes que nous travaillons actuellement dans le cadre du projet Artacim (voir encadré 2).

⁴ Voir <https://plateforme-ouranos.fr> ⁵ Météo-France et EDF, par exemple, dispensent d'ores et déjà des formations de ce type.



PHOTO 3
Recul rapide
et problématique
des glaciers (ici en
Alaska, USA).
© GETTY IMAGES

3





► Coproduire les connaissances par une recherche partenariale

La co-production des connaissances sur le changement climatique passe par le développement de projets de recherche partenariaux. Ouranos AuRA contribue d'une part à faire émerger de nouvelles thématiques de recherche en facilitant la mise en relation des acteurs, en proposant des outils méthodologiques pour faciliter les relations entre chercheurs (interdisciplinarité), entre acteurs académiques et non académiques (transdisciplinarité) ; d'autre part, elle accompagne les acteurs dans l'élaboration de projets partenariaux au travers notamment de la recherche de financements.

Aujourd'hui, Ouranos AuRA est impliquée dans plusieurs projets de recherches partenariales, dont trois sont décrits succinctement dans l'encadré 2.

Ouranos AuRA : une structure en devenir

Malgré les actions mises en œuvre, l'interaction avec les structures similaires (Ouranos Québec, GREC Sud, AcclimaTerra et RECO) a mis en évidence des freins, partagés par tous⁶. Afin de gagner en stabilité, certains points nécessitent ainsi d'être questionnés, notamment le statut, la pérennité du financement et la forme juridique des structures.

Par ailleurs, la volonté affirmée de porter une recherche utile pour la société est confrontée à certains freins académiques. Bien que l'implication d'équipes

ENCADRÉ 2

► TROIS PROJETS DE RECHERCHE PARTENARIALES

Le projet Trajectories s'intéresse aux trajectoires d'interactions entre les sociétés alpines et leur environnement dans un contexte de changement global, avec trois territoires pilotes : la vallée de l'Arve, la vallée de la Maurienne et le Pays de la Meije. Ouranos AuRA est impliquée à deux niveaux. D'une part, elle intervient sur le volet animation de l'interdisciplinarité dont l'objectif est de renforcer cette approche au sein d'une communauté académique grenobloise et chambérienne d'une centaine de chercheurs. À ce titre, Ouranos AuRA a accompagné et favorisé la constitution d'un groupe interdisciplinaire de jeunes chercheurs au sein du consortium réuni sur le projet. D'autre part, Ouranos AuRA aide au déploiement de la co-construction des connaissances, au travers notamment de la création de collectifs intégrant chercheurs et acteurs sur les différents sites.

Le projet Artaclim, financé par le programme Interreg Alcotra, vise à développer des outils pour faciliter l'intégration de l'adaptation au changement climatique dans la planification des territoires de moyenne montagne. Trois territoires sont partenaires du projet : du côté français le PNR (parc naturel régional) des Bauges et la Communauté de communes du Haut-Chablais, du côté italien le territoire du Pignerol (métropole de Turin). L'action d'Ouranos AuRA se situe ici à trois niveaux : i) contribuer à une synthèse des données sur le changement climatique et ses impacts en montagne et sur les outils de planification territoriale existants, ii) identifier des besoins des territoires (outils, formations) pour faciliter l'intégration de l'adaptation dans la planification et iii) faciliter le transfert des connaissances sur le changement climatique et les moyens de s'y adapter en moyenne montagne par

le biais notamment de l'élaboration de supports de formation innovants pour les acteurs des territoires.

Le projet Climat Métro est élaboré dans le cadre d'une convention de recherche entre l'UGA (Université Grenoble Alpes) et La Métro (Grenoble Alpes Métropole, GAM) autour de la sensibilité de la métropole face aux extrêmes de précipitations dans la perspective du changement climatique. Ouranos AuRA s'est tout d'abord impliqué dans la réalisation d'un diagnostic de la sensibilité du territoire, puis dans la traduction de celui-ci en problématiques de recherches doctorales en géosciences et en sciences humaines et sociales à déployer en parallèle. Ouranos AuRA s'est également investie dans la quête de soutiens financiers complémentaires pour la mise en œuvre de ces actions de recherche. —

5



interdisciplinaires de chercheurs auprès de la société civile soit encouragée dans les discours, ces démarches sont peu valorisées dans les publications et dans la carrière des chercheurs. Certains sont alors réticents à s'orienter dans cette voie. Afin de surmonter ces difficultés, le devenir de ces organisations frontalière sur le climat repose en partie sur notre capacité de structuration collective à l'échelle nationale ou internationale.

Malgré ces limites, les quelques années d'activité d'Ouranos AuRA soulignent son intérêt. La rencontre entre acteurs, favorisée par la mise en réseau, a permis des échanges de connaissances dans les deux sens : ainsi, l'observation faite par les acteurs opérationnels d'une augmentation des événements venteux pourrait venir enrichir les paramètres retenus par les modélisateurs climatiques. Par ailleurs, face à l'impact économique



◀ PHOTO 4
**Nécessaire
enneigement
artificiel des pistes
de ski de l'Alpe
d'Huez.**

© MÉTÉO FRANCE /
GILBERT GUYOMARC'H

▲ PHOTO 5
**Recul des glaciers
(Pays de la Meije,
Hautes-Alpes)
et nécessaire
adaptation de
l'agriculture.**

© SANDRA LAVOREL

spécifique du changement climatique dans les stations de moyenne montagne, Ouranos AuRA a facilité la structuration d'un projet, financé par la région AuRA, regroupant IRSTEA et l'université de Clermont-Ferrand, et qui explore la diversification touristique comme moyen d'adaptation des territoires de moyenne montagne face au changement climatique (projet AMORCE). ●

ABSTRACT

Facing the challenges of climate change impact on mountain regions, the knowledge broker, Ouranos AuRA, proposes to improve the links between science and society in order to find adapted responses. Indeed, mountains regions are specifically impacted by climate change, through the ski industry, the necessary adaptation of agriculture and forestry, the emergence or amplification of natural risks. Like other structures emerging in different regions in France and all over the world, Ouranos AuRA, based on the regional researchers community working on climate change, aims at helping local decision makers (public or private) in managing the different impacts and risks that emerge at their scale.

6/ Une table ronde organisée dans le cadre du colloque national sur l'adaptation au changement climatique à Marseille en décembre 2018, animée par Ouranos AuRA, a permis de rassembler les différentes organisations frontalières existant en France aujourd'hui sur la question climatique et d'identifier des attentes, mais aussi des freins partagés (voir les actes du colloque, bientôt disponibles auprès du GREC Sud, organisateur du colloque).

BIBLIOGRAPHIE

GREC Sud (2019) – Le GREC Sud. Quel objectif ? <http://www.grec-sud.fr>, consulté le 19/01/2019. **Hidalgo J., Salas Y Melia D., Simonet G. (2018)** – Réseau d'expertise sur les changements climatiques en Occitanie, www.labex-cemeb.org **Huard, D., Chaumont D., Logan T., Sottile M., Brown R.D., St-Denis B.G., Grenier P., and Braun M., (2014)** – A Decade of Climate Scenarios: The Ouranos Consortium Modus Operandi. Bull. Amer. Meteor. Soc., 95, 1213–1225, <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-12-00163.1> **PGRN (2006)** – Pôle Grenoblois Risques Naturels. Un lien original entre gestionnaires et scientifiques, http://risknat.org/wp-content/uploads/2015/02/Flyer_PGRN_2006.pdf **Salles D. et Le Treut H. (2017)** – Comment la région Nouvelle Aquitaine anticipe le changement climatique ?, Sciences Eaux & Territoires, vol. numéro 22, no. 1, 2017, pp. 14-17.

1



Effondrements et inondation par ruissellement : la faute au karst ?

Début juin 2016, un épisode pluvieux intense a entraîné l'inondation de plusieurs localités au nord d'Orléans, provoquant de nombreux dommages, ainsi que de spectaculaires effondrements de terrain. Une première analyse du contexte géologique a été menée pour comprendre l'origine de ces désordres, en suivre l'évolution et chercher à en anticiper les éventuelles conséquences.

AUTEURS



Églantine HUSSON

Géologue,
Direction des Géoressources, BRGM
✉ e.husson@brgm.fr



Gildas NOURY

Ingénieur géologue spécialisé
en géotechnique, Direction Risques
et Prévention, BRGM
✉ g.noury@brgm.fr



Damien SALQUEBRE

Hydrogéologue, Direction régionale
Centre-Val de Loire, BRGM
✉ d.salquebre@brgm.fr



▲ PHOTO 1
Survol en drone de
l'inondation de la
vallée de la Retrève,
le 9 juin 2016 (après
le pic de crue) : partie
ouest de la commune
de Cercottes.

© THOMAS DEWEZ, BRGM

Début juin 2016, la moitié nord de la France est touchée par un épisode pluvieux intense. Dans l'Orléanais, suite à un mois de mai déjà bien arrosé, l'équivalent d'environ 3 mois de précipitations tombe en 4 jours. Alors que ni la Loire ni ses principaux affluents ne menacent de déborder, de multiples inondations se produisent, surtout au nord d'Orléans. La plus sévère, celle de la vallée – habituellement « sèche » – de la Retrève, va durer environ 2 semaines. C'est ce secteur qui est traité dans le présent article.

L'inondation va paralyser pendant plusieurs jours les accès habituels à l'agglomération (coupure de l'A10, de plusieurs routes départementales) et causer de multiples et coûteux dommages. Au retrait des eaux, de nombreux effondrements de terrain sont observés aux abords des routes et des bâtiments. Mobilisés, avec d'autres entités, les agents du BRGM ont fourni aux autorités publiques une première analyse du contexte géologique pour comprendre l'origine des inondations et des effondrements, en suivre l'évolution et chercher à en anticiper les possibles dommages.

Contexte géologique de l'Orléanais

> Histoire géologique

Le substratum rocheux de la région d'Orléans est constitué par le calcaire lacustre de Beauce. Cette formation carbonatée s'est déposée au fond d'un grand lac à l'Aquitainien (étage du Miocène datant d'il y a 20 millions d'années

environ). Puis le lac s'est progressivement comblé au cours du Miocène pour laisser place à de grandes plaines d'inondation, dont les marnes de Blamont, les sables de l'Orléanais et les sables et argiles de Sologne sont issus.

À la fin du Miocène et au Pliocène, la compression alpine a entraîné une surrection à l'origine d'une période d'altération généralisée au sud du bassin parisien (Wyns, 2014). Puis, au Quaternaire, l'érosion est devenue prédominante ; les formations miocènes ont été progressivement décapées. Dans la région d'Orléans, la Loire a entaillé son lit jusqu'aux calcaires de Beauce, lesquels sont recouverts par des alluvions quaternaires (figure 1).

► La karstification

Le calcaire de Beauce est karstifié comme en attestent les circulations souterraines et les effondrements karstiques qui se produisent régulièrement dans le Val de Loire. Si le comportement hydrogéologique de l'aquifère du calcaire de Beauce est déjà bien étudié et documenté au sein du Val de Loire, l'origine de la karstification et son fonctionnement dans le reste de l'Orléanais l'est beaucoup moins.

Dans les zones où le calcaire de Beauce est encore recouvert (par les formations de l'Orléanais, les sables et argiles de Sologne...), il est souvent difficile d'accès. Mais, lorsqu'à l'occasion de travaux (routiers ou carrières), on peut observer le toit du calcaire de Beauce, on découvre une surface très chaotique, avec des creux et des bosses, couverte de sédiments détritiques. Cet aspect est dû à l'altération du calcaire, alors qu'il est encore sous recouvrement sédimentaire. On appelle cette altération une karstification sous couverture (voir encadré).

Cette karstification du calcaire de Beauce est à l'origine de sa perméabilité, en raison de la présence de conduits qui permettent aux eaux superficielles de s'infiltrer vers la nappe. L'altération sous couverture des sables et argiles de Sologne donne en revanche naissance à une couche de résidus argileux de nature peu perméable qui, elle, freine l'infiltration. Les altérites et ces sables et argiles sont par ailleurs soutirés, de manière progressive et localisée, dans le karst et évacués par celui-ci, ce qui donne naissance à des gouffres (« bîme » est le terme local) et à des affaissements.

Dans les zones situées entre les plateaux et le val d'Orléans, l'incision a créé un gradient altitudinal et donc un potentiel hydraulique amont-aval. Ce potentiel a permis l'évacuation et la purge des conduits karstiques, avec la mise en place de circulations d'eaux souterraines parfois rapides. Sur les plateaux, dans les zones encore sous recouvrement, le potentiel hydraulique est plus faible. Il est contenu entre la surface topographique et la nappe

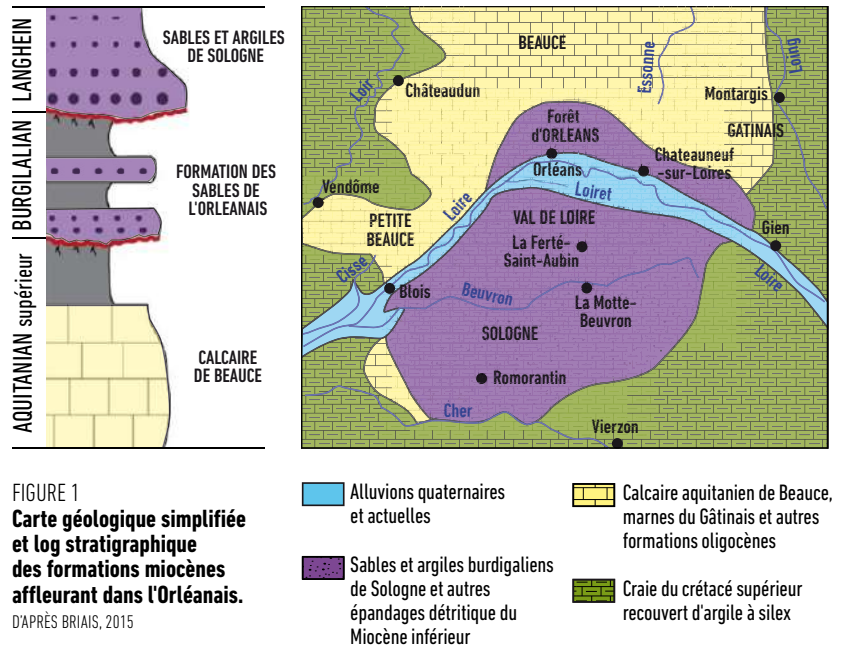


FIGURE 1
Carte géologique simplifiée et log stratigraphique des formations miocènes affleurant dans l'Orléanais.
D'APRÈS BRIAIS, 2015

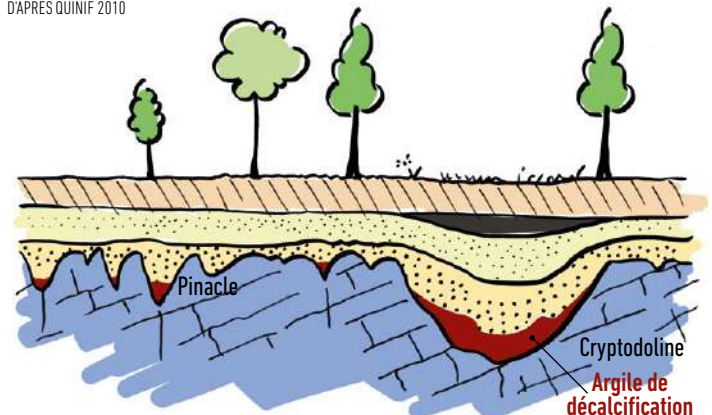
► LA KARSTIFICATION SOUS COUVERTURE

La karstification sous couverture est un concept développé dans les années 1980 par J.L. Gendon, J.N. Salomon et J. Nicod (1987). Décrite en premier lieu dans le sud de la France, elle est définie comme une dissolution du toit des calcaires, présentant des reliefs résiduels arrondis séparés de dépressions en entonnoir, et recouverts d'une frange superficielle de calcaire altéré et pulvérulent. L'approfondissement des poches de dissolution provoque le tassement puis l'effondrement du remplissage.

La karstification sous couverture, appelée aussi cryptokarstification, se développe au cours de périodes d'altération, majoritairement dans des contextes d'aquifère captif sous une couverture perméable à semi-perméable (non karstifiable). L'échelle de temps nécessaire à l'aboutissement de ces processus est de plusieurs centaines de milliers d'années. —

Coupe schématique présentant les morphologies en creux (cryptodolines) et bosses (pinacles) d'un cryptokarst se formant sous couverture sédimentaire.

D'APRÈS QUINIF 2010



« Les inondations auraient affecté à Gidy plus de 400 bâtiments sur les 700 que compte la commune. »

située à faible profondeur. L'évacuation de la couverture par soutirage se fait plus difficilement (voir figure 2).

Le phénomène est bien visible sur le terrain, comme en témoignent les nombreux gouffres et dolines de la forêt d'Orléans (photo 2). Suivant la dynamique du milieu, certaines zones sont plus ou moins actives et donnent des morphologies plus ou moins spectaculaires, mais les conduits karstiques restent colmatés en profondeur.

La vulnérabilité de l'Orléanais face aux aléas inondations et cavités

> Inondations

La Beauce orléanaise, zone de plateau située au nord de la Loire relativement plane, peut sembler en première approche préservée des inondations. Pourtant, les vallées dites « sèches », telles que celles de la Retrêve et du Nant, sont de véritables particularités géologiques, connues pour leur comportement atypique.

Dans sa partie amont, en forêt d'Orléans, la Retrêve peut être temporairement en eau lors d'épisodes pluvieux, alors que sa partie aval reste sèche (sauf cas exceptionnel), jusqu'à rejoindre la rivière – celle-ci permanente – de la Conie, à Villeneuve-sur-Conie.

Sur le terrain, la vallée de la Retrêve est peu marquée, mais un modèle précis du relief (un modèle numérique de terrain) permet de la visualiser. On observe ainsi que le lit aérien de la Retrêve découle tout d'abord d'une histoire géologique en lien avec le Loir et

non la Loire. Le réseau hydrographique Retrêve-Conie s'est mis en place lorsque la zone était encore complètement recouverte par la formation des sables et argiles de Sologne (Berger & Desprez, 1969). Au cours de l'érosion, lorsque l'épaisseur de la couverture diminue et que le fond du cours d'eau se rapproche du calcaire de Beauce sous-jacent, le calcaire se karstifie, en particulier à l'aplomb du cours d'eau. Lorsque le calcaire de Beauce est complètement mis au jour par l'érosion, l'infiltration au sein du calcaire préalablement karstifié prend le dessus sur le ruissellement. Dans la partie amont de la Retrêve, les sables et argiles de Sologne sont encore très présents et permettent une circulation aérienne ponctuelle ; dans sa partie aval, l'eau se perd au contact des calcaires et rejoint la nappe de Beauce.

Dans ce contexte, la présence de gouffres dans le bassin de la Retrêve conduit une partie des eaux à s'infiltrer vers la nappe souterraine. Leur capacité d'infiltration a cependant été largement dépassée lors de la crue de 2016, par la quantité exceptionnelle d'eau écoulee en surface.

FIGURE 2 / Coupe schématique N-S entre Beauce et Sologne, présentant le fonctionnement global du système karstique de l'Orléanais. La couverture sédimentaire est progressivement entraînée dans le karst. Aux abords de la Loire, le gradient hydraulique devient suffisamment important pour exporter cette charge sédimentaire et purger les réseaux karstiques. Dans les zones en amont, les vitesses de circulations au sein de la nappe sont relativement faibles ; le soutirage et l'évacuation de la couverture sont beaucoup plus lents. © EGLANTINE HUSSON, B

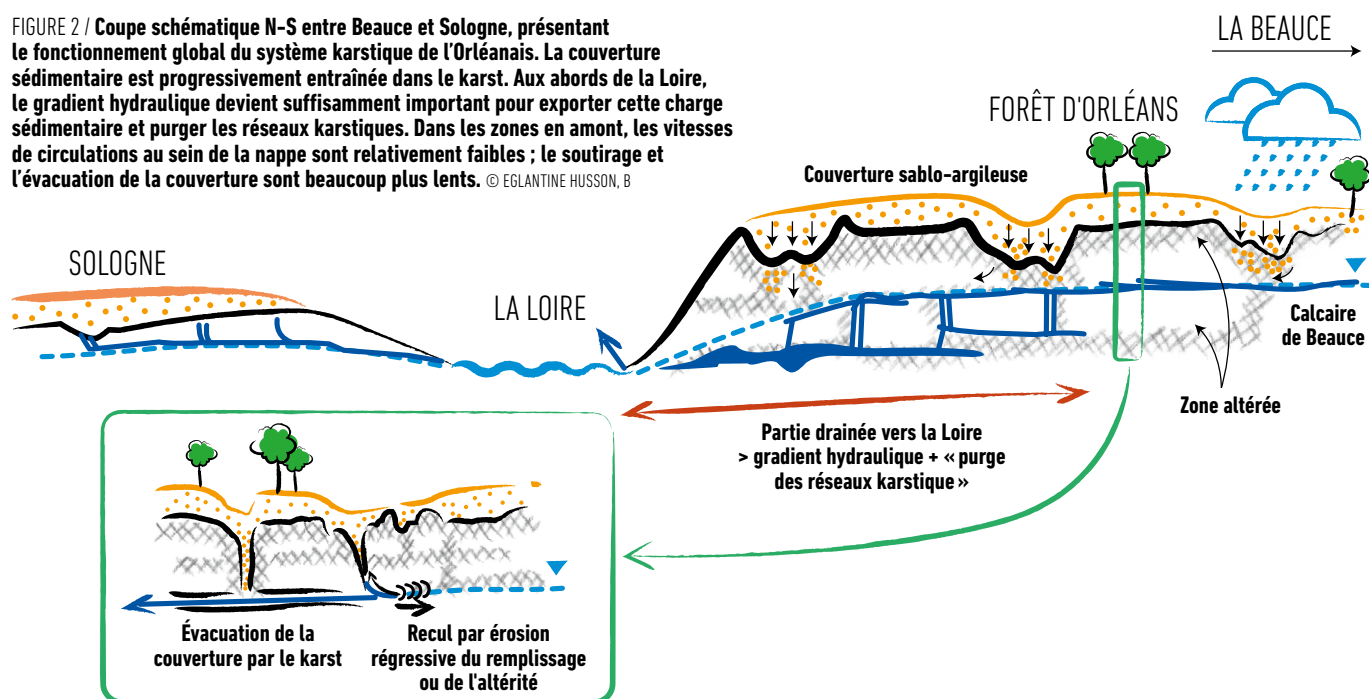




PHOTO 2
Dolines parsemant
le bassin de la Retrève
en forêt d'Orléans.
© GILDAS NOURY, BRGM

2

Le centre-bourg de Gidy est en partie construit dans le lit de la « rivière fantôme » de la Retrève. Seuls d'anciens petits ponts sont les témoins d'écoulements liés à d'anciennes crues de la Retrève. Avant 2016, la dernière apparition notable de la Retrève datait de 1983 : à l'époque, l'autoroute A10 avait été coupée dans le sens Province-Paris pendant quelques heures (Boizard et Ricard 2016).

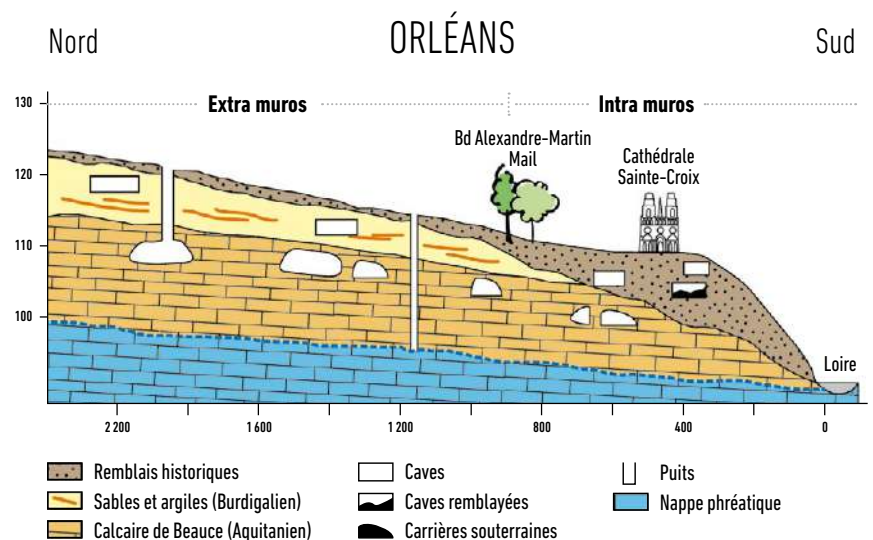
> Cavités

La nature calcaire du substratum géologique orléanais explique à elle seule la présence de deux des trois types de cavités présentes sur le territoire. Les cavités karstiques naturelles « cohabitent » avec les carrières qui, elles, n'ont rien de naturel puisqu'elles ont été aménagées par l'homme : certains faciès du calcaire de Beauce constituaient à l'époque un matériau pour la construction, les voiries et l'amendement agricole. Le troisième type de cavité est la cave associée aux habitations : ces espaces de stockage des aliments et boissons étaient courants dans la plupart des fermes et habitations de la région (figure 3).

L'usage ancien de ces cavités a été totalement bouleversé par les évolutions liées à l'époque contemporaine.

FIGURE 3 / Coupe géologique d'Orléans montrant
l'emplacement des caves et des carrières dans le sous-sol.

SOURCE : CHARLES, 2015





▼ PHOTO 3
L'inondation de la
vallée de la Retrève
le 9 juin 2016 (après
le pic de crue) :
partie ouest de
la commune de Gidy
– survol réalisé par
le BRGM.

© THOMAS DEWEZ, BRGM

Les caves sont peu à peu condamnées et oubliées. Devenus inutiles, les accès aux carrières ont pour la plupart été comblés. Quant au karst, à l'exception des naturalistes, il reste inconnu du grand public.

Malgré son apparente stabilité, cette configuration souterraine complexe constitue un risque pour la sécurité des biens et des personnes : les maçonneries des caves fatiguent ; même comblés, les puits d'accès aux carrières finissent par céder ; et pour ce qui concerne les karsts, des phénomènes complexes peuvent aboutir à l'apparition d'effondrements (fontis/bime) ou d'affaissements en surface. Jusqu'à la crise de 2016, ces mouvements de terrain étaient plutôt recensés dans l'agglomération d'Orléans (carrières et caves) et dans le lit majeur de la Loire (karst), mais pas en Beauce.

La crise météorologique de 2016 sur le secteur de la Retrève

Des pluies exceptionnelles suivies d'inondations...

Après un mois de mai déjà bien arrosé et les fortes précipitations du mois de juin (près de 140 mm de pluie sont enregistrés entre le 28 mai et le 1^{er} juin à la station d'Orléans

– source : Météo France), plusieurs secteurs de l'Orléanais sont inondés plus ou moins durablement.

Le mardi 31 mai, la Retrève en eau commence par inonder les lotissements situés à l'orée de la forêt d'Orléans, à Cercottes. Elle passe ensuite sous les ouvrages de la RD2020, puis submerge l'A10 avant d'atteindre une zone industrielle (laboratoires pharmaceutiques Servier, entre autres) et la commune de Gidy. Le pic de l'inondation est atteint vers le 2-3 juin. L'autoroute est remise en service à partir du 10 juin, après des travaux entrepris par Cofiroute pour pomper l'eau, la stocker, dégager les véhicules et remettre en état la chaussée. Les eaux de la Retrève continuent de s'écouler en surface, dans le secteur de Gidy, jusqu'au 16 juin (Salquèbre *et al.*, 2016). Au total, les inondations auraient affecté à Gidy plus de 400 bâtiments sur les 700 que compte la commune.

Les pertes financières pour ce qui concerne l'habitat individuel ne sont pas précisément connues. Celles causées à l'autoroute A10 et à l'entreprise Servier sont de l'ordre de 12 millions d'euros (Boizard et Ricard 2016).

Lors de la crise, des explications ont été données par le BRGM au service de la préfecture du Loiret (Salquèbre





et al., 2016) : l'inondation du secteur de Cercottes-Gidy est liée à un afflux d'eaux de ruissellement venant de la forêt d'Orléans, provoqué par un cumul de précipitations exceptionnel sur des sols déjà saturés en eau. La nappe souterraine de la Beauce, habituellement située à 15-20 m de profondeur, n'est montée « que » de 1 mètre lors de la crise et est donc restée très éloignée de la surface. La durée, visiblement exceptionnelle, de l'inondation pour la commune de Gidy peut quant à elle s'expliquer par une conjonction de facteurs dont il reste à préciser les parts relatives : cumul de précipitations exceptionnel, rôle de la nappe superficielle « perchée », colmatage des gouffres karstiques, effet « entonnoir » au niveau d'une topographie particulièrement plate, aménagements pouvant limiter l'écoulement des eaux, etc.

À noter que, lors de la crise, l'entreprise Servier a réussi à limiter les effets de l'inondation, grâce à l'utilisation d'un bassin tampon et à l'injection des eaux dans trois gouffres présents sur son emprise (Boizard et Ricard, 2016 ; Salquèbre *et al.*, 2016).

... et suivies d'effondrements liés à des cavités souterraines

Dès le 4 juin, la fin de l'épisode pluvieux, puis la décrue sont marquées par de nombreux mouvements de terrain. Dans le Loiret, près de 90 sites sont affectés par de tels désordres (Noury *et al.*, 2016), la majorité se concentrant dans deux zones inondées, dont celle de Cercottes-Gidy.

À Gidy, les 34 sites touchés par des désordres en surface se répartissent principalement dans la zone inondée (30 sites), plus exactement sur les bords de cette zone, ce qui laisse penser que cette inondation, apparemment l'une



▲ PHOTO 4
Effondrements de terrain ayant suivi l'inondation de la Retrève. L'analyse a montré qu'il s'agissait d'une ancienne carrière souterraine.

© THIERRY LEBLAY

des plus fortes connues à cet endroit, serait venue déstabiliser des terrains et des ouvrages jusqu'alors épargnés par les événements précédents.

Dans un champ, une série d'effondrements/affaissements a marqué les esprits au moment de la crise du fait de la concentration (14 mouvements sur une surface d'un demi-hectare, voir photo 4), de la taille des désordres (trois d'entre eux font 10 mètres de diamètre pour des profondeurs de 7-8 mètres) et de leur origine, au début inexpliquée. Les témoignages d'habitants, des documents d'archive et une exploration spéléologique ont permis de montrer qu'une ancienne carrière souterraine avait été en partie détruite par l'inondation. Ailleurs, d'autres effondrements ont été associés à des cavités karstiques naturelles : la pression de l'eau aurait fait « débourrer » les « bouchons » masquant ces gouffres. Un autre type de désordre est lié à la dégradation, par l'eau, du mortier jointoyant les moellons d'anciennes caves.

La précision du diagnostic revêt ici toute son importance pour la prise de décision. Si les 14 mouvements observés dans le champ avaient été de nature karstique, la possibilité que se produisent de nombreux autres effondrements/affaissements à proximité, et donc sous des habitations, aurait imposé des mesures de sécurisation contraignantes pour les habitants (évacuation et surveillance).

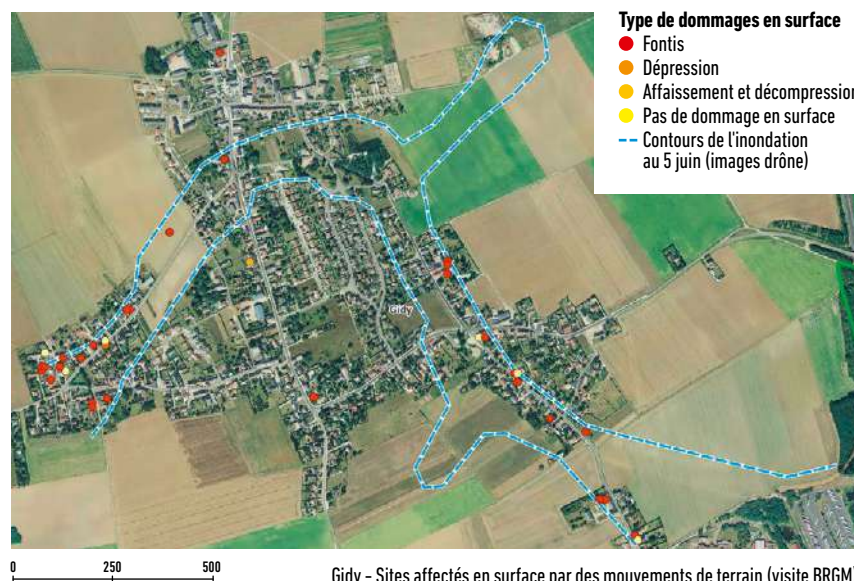
Les recommandations effectuées au cas par cas ont abouti, pour Gidy, à des interdictions temporaires d'accès pour huit habitations. La circulation des véhicules sur la RD 702 a par ailleurs été coupée pendant plusieurs semaines : des investigations géophysiques et géotechniques y ont été entreprises pour préciser le niveau de risque (celui-ci s'est

**Intervention
des services de
Secours du Loiret
dans les rues
inondées de Gidy.**

© GILDAS NOURY



FIGURE 5
Localisation des
effondrements ayant
suivi l'inondation de
la Retrève à Gidy.
© GILDAS NOURY



Gidy - Sites affectés en surface par des mouvements de terrain (visite BRGM)

finallement révélé suffisamment faible pour que la circulation reprenne normalement).

Perspectives

Les inondations de 2016 du secteur de Cercottes-Gidy ont non seulement rappelé la présence d'une menace en partie oubliée, mais, par leur caractère exceptionnel (hauteur atteinte et durée de l'événement), ont également révélé les difficultés à pouvoir les anticiper avec les éléments disponibles à l'époque. Elles ont enfin mis en évidence l'aléa particulier lié aux cavités souterraines, d'un niveau jusqu'alors insoupçonné à cet endroit.

Les dégâts causés ainsi que les enjeux d'urbanisation et la nécessaire prise en compte des conséquences du changement climatique (multiplication attendue des pluies intenses) ont incité les décideurs à améliorer la connaissance et l'évaluation des aléas inondations et cavités dans ce secteur. Deux retours d'expérience ont été édités par le BRGM à la suite de ces événements (Salquèbre *et al.*, 2016 ; Noury *et al.*, 2016). Une étude d'envergure, regroupant le BRGM et le Cerema, est par ailleurs prévue en 2019-2020. Il s'agira de préciser les spécificités karstiques, hydrogéologiques et hydrodynamiques du système de la Retrève afin de définir la relation infiltration/ruissellement sur ce bassin versant et de tenter une cartographie des zones les plus menacées en cas de crue.

La nécessaire cartographie de la nature géologique des formations superficielles et du substratum, et sa qualification en termes de capacité de ruissellement ou d'infiltration pourraient par ailleurs profiter des enseignements d'une étude prospective comparant les résultats d'un levé géophysique aéroporté (spectrométrie gamma) réalisé par le BRGM et les analyses physico-chimiques du sol sur ce secteur. L'inventaire et la caractérisation des gouffres émaillant la forêt d'Orléans devraient par ailleurs permettre de savoir dans quelle mesure ces zones d'infiltration naturelles peuvent ou non contribuer à limiter les inondations. La combinaison de ces informations fournira ensuite les données utiles pour quantifier les flux d'eaux aboutissant au réseau hydrologique de surface et, par là même, les données indispensables au dimensionnement d'éventuels nouveaux aménagements de lutte contre les inondations. ●

ABSTRACT

Early June 2016, an intense rainfall event led to multiple floods north of Orleans, paralyzing access to the city and its surrounding area for several days, and causing extensive damage. Several occurrences of sinkholes were observed along roads and alongside buildings. This is due primarily to the local geological configuration of the land, but is also explained by the area's planning history.

The Beauce limestone, covered by Sologne sands and clay, went through a particular alteration process (cryptokarstification) causing conduits to appear, and allowing surficial water to infiltrate towards the groundwater table. This process also transformed the limestone roof into a layer with low permeability which slows down the infiltration process. Additionally, the cover is down-washed, progressively and on some localized site, into the karstic caves causing sudden sinkhole or slow surface subsidence. Infiltration and subterranean drainage absorb rainfall up to a certain threshold beyond which runoff becomes predominant. In 2016, existing installations did not prove sufficient to prevent flooding; in fact, some of them may have even contributed to exacerbating the problem. The ground movement causes are varied: some are linked to karst, others are caused by the existence of anthropogenic cavities (caves, subterranean tunnels, decommissioned quarries).

Several analyses have come to complete the information gathered, all of which will form the basis of studies to better understand the hydrological and hydrogeological function of the drainage basin, and to provide recommendations in terms of future installations.

BIBLIOGRAPHIE

- Charles N., « Guide géologique du Val de Loire », éd. Omniscience-BRGM, 2015. Berger G., Desprez N. (1969) – Carte géologique détaillée de la France – Orléans. BRGM. Boizard P., Ricard F. (2016) – Coupure de l'autoroute A10 et autres infrastructures lors des inondations de fin mai 2016. Rapport final n°010735-01. Conseil Général de l'Environnement et du Développement Durable, 86 p. Briaux J. (2015) - Le Cénozoïque du bassin de Paris : un enregistrement sédimentaire haute résolution des déformations lithosphériques en régime de faible subsidence. Thèse de doctorat, Université de Rennes, 450pp. Guendon J.L., Salomon J.N., Nicod J. (1987) – Karstification sous couverture, comparaison entre karst tropical actuel et paléokarst. Annales de géographie, n 537, 557-563p. Noury G., Perrin J., Gourdier S., Raucoules D., avec la collaboration de : Masson F., Greffé C., Negulescu C., Peter M., Langlois D., Munerot J., Cantaloube O., Mathon D., Ksibi I. (2016) – Retour d'expérience sur les mouvements de terrains liés à des cavités survenus dans le Loiret suite à la crise météo du printemps 2016. Rapport final. BRGM/RP-66462-FR, 111 p., 73 fig., 5 ann. Quinif Y. (2010) – Fantômes de roche et fantômisisme : Essai sur un nouveau paradigme en karstogenèse. Karstologia Mémoires, 18, 196 pp. Salquèbre D., Perrin J., Stollsteiner P., Gutierrez A. (2016) – Contexte hydrogéologique du bassin de la Retrève : bilan de l'inondation de début juin 2016. Rapport d'expertise. Rapport BRGM/RP-66019-FR, 58 p., 21 ill., 5 ann. Wyns R. (2014) – Le bassin parisien du Tertiaire à l'Actuel, in : Gély JP. & Hanot F. (Eds), Le bassin de Paris, un nouveau regard sur la géologie. AGBP, 85-93p. Berger G. & Desprez N. (1969) – Notice explicative et carte géologique de la France (1/50 000), feuille d'Orléans. BRGM, Orléans, 8pp.

1



Les effets de site géologiques, caisson de résonance des ondes sismiques

Les couches géologiques superficielles (0-100 m) provenant de l'érosion des roches ont un impact considérable sur l'intensité locale d'un séisme, car les ondes sismiques y sont piégées et amplifiées. Ces effets locaux, dits « effets de site », sont généralement modélisés par des équations empiriques dont la précision stagne en dépit d'une augmentation des données de séismes observés. Aujourd'hui, de nouvelles approches liant des réseaux bayésiens aux équations empiriques permettent d'améliorer l'estimation de l'intensité sismique locale, à l'aide d'observations de terrain ou de simulations numériques modélisant la propagation des ondes en milieu géologique complexe.

Les séismes constituent un aléa naturel doté d'un pouvoir destructeur soudain sur une large étendue géographique, menaçant potentiellement des millions d'individus dans des zones densément peuplées. La France métropolitaine est située dans une région de sismicité modérée à moyenne ; cependant, il n'est pas impossible de vivre un événement similaire à la crise sismique d'Emilie-Romagne (Italie) en mai 2012, qui a entraîné la mort d'une trentaine de personnes et généré plusieurs centaines de millions d'euros de pertes économiques. Dans les instants qui suivent la survenue d'un séisme, il est impératif pour les autorités et les acteurs de la protection civile de disposer d'informations fiables sur l'intensité et l'étendue des secousses sismiques autour de l'épicentre.

L'enjeu des « effets de site »

Un séisme se produit généralement lorsqu'une faille située à plusieurs kilomètres de profondeur se rompt en raison d'une accumulation de contraintes. Lors de cette rupture, un déplacement s'opère entre deux blocs attenant et engendre des ondes qui se propagent de la faille

AUTEURS



Pierre GEHL
Expert Risque Sismique,
Direction Risques et Prévention, BRGM
✉ p.gehl@brgm.fr



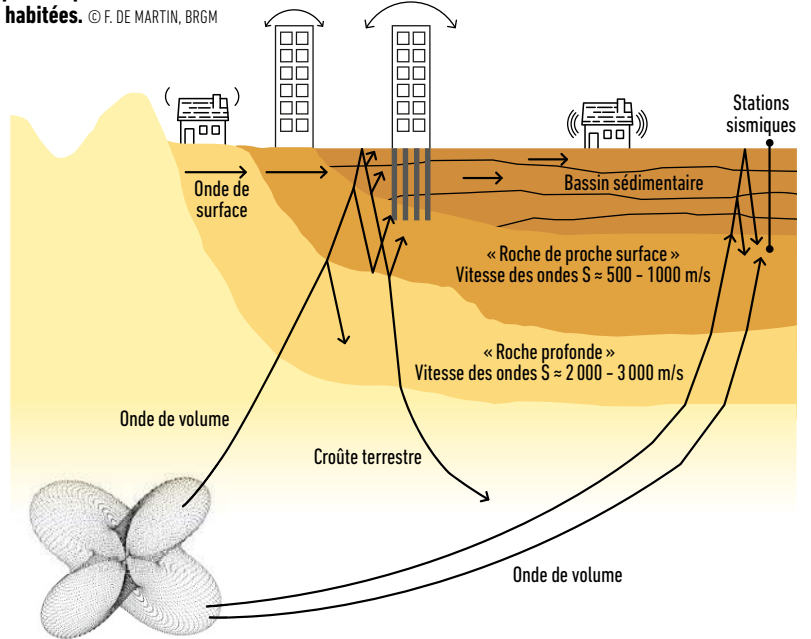
Florent DE MARTIN
Sismologue expert en méthodes numériques,
Direction Risques et Prévention, BRGM
✉ f.demartin@brgm.fr



PHOTO 1 / Séisme d'Haïti,
12 janvier 2010. Centre-ville de Port-au-Prince
fortement endommagé.

© JEAN-MARC MOMPÉLAT, BRGM

FIGURE 1 / **Genèse, propagation et amplification des ondes sismiques, du plan de faille aux zones habitées.** © F. DE MARTIN, BRGM



jusqu'à la surface du sol. Alors que le ressenti d'un séisme par l'homme n'est qu'une simple vibration du sol sous ses pieds, sa réalité physique correspond au passage d'un train d'ondes complexes, qui suscitent la passion des sismologues depuis des siècles. L'intensité de ce train d'ondes peut être représentée par une série d'indicateurs :

- des mesures quantitatives à partir des signaux enregistrés par des stations sismologiques, comme l'accélération maximale du sol (ou *PGA – Peak Ground Acceleration*) ;
- des descriptions qualitatives des effets du séisme sur les personnes et les infrastructures, à l'aide d'une échelle macrosismique.

Qu'elle soit ressentie ou mesurée, l'intensité d'un séisme dépend de processus physiques complexes qu'il est communément admis de représenter par la combinaison de trois phénomènes : (i) la génération du signal par la rupture dynamique d'une faille, (ii) la propagation et l'atténuation des ondes dans le manteau et la croûte terrestre, et enfin (iii) la modification locale des ondes due à des phénomènes de réfraction/diffraction lors de leur passage au travers des couches géologiques (*figure 1*). Pour ce dernier phénomène localisé proche de la surface, on parle alors « d'effets de site », dans le sens où l'intensité sismique peut être très fortement amplifiée (ou plus rarement dé-amplifiée) localement par la géologie de surface (ex : alluvions quaternaires en fond de vallée).

Considérons un cas typique : les ondes qui voyagent dans la roche (vitesses de propagation élevées) sont amplifiées, piégées et converties lors de leur arrivée dans les sols



PHOTO 2
San Francisco en ruine suite au séisme de 1906. Le séisme, puis l'incendie qui suivit détruisirent plus de 80 % de la ville.

© GEO. R. LAWRENCE CO.

plus meubles (vitesses de propagation faibles), en raison du contraste marqué des propriétés mécaniques. Ces effets contribuent aussi à l'allongement de la durée du signal. Les conséquences sont potentiellement dramatiques pour les structures bâties en surface, qui peuvent alors être soumises à des excitations dans des gammes de fréquences propices à l'entrée en résonance du système structural. Ces effets ont été observés, entre autres, lors des séismes de Mexico (1985), de Kobé (1995) et d'Haïti (2010).

En complément d'une remontée d'informations récoltée sur le terrain par la sécurité civile, l'utilisation d'outils



de modélisation réalistes et précis de ces effets de site est primordiale ; elle permet de fournir des données fiables sur l'intensité et l'étendue des secousses sismiques. Néanmoins, cette modélisation de l'intensité sismique est compliquée par la grande variabilité de la géologie des terrains.

Quels outils pour modéliser l'intensité sismique ?

Pour des régions à sismicité élevée (par ex. Japon, Californie, Iran, Italie) bénéficiant d'un grand nombre d'observations de séismes passés, il est possible de construire des relations empiriques pour quantifier l'intensité sismique atteinte sur un site donné : il s'agit d'équations de prédiction du mouvement du sol. Il en existe à ce jour plusieurs centaines de versions, selon la zone géographique visée ou le type de séisme considéré (Douglas, 2018). Ces équations reposent sur des formes de régression mathématique entre des paramètres d'entrée décrivant le séisme et le site (par ex. magnitude, type de rupture, classe de sol, distance épacentrale) et des paramètres de sortie caractérisant l'intensité (par ex. PGA ou accélération spectrale à différentes périodes). En raison de leur relative facilité d'application, les équations de prédiction se sont imposées comme des outils de choix dans un contexte de gestion de crise : en effet, il est possible d'estimer quasi instantanément l'intensité sismique qui sera atteinte dans la zone entourant l'épicentre.

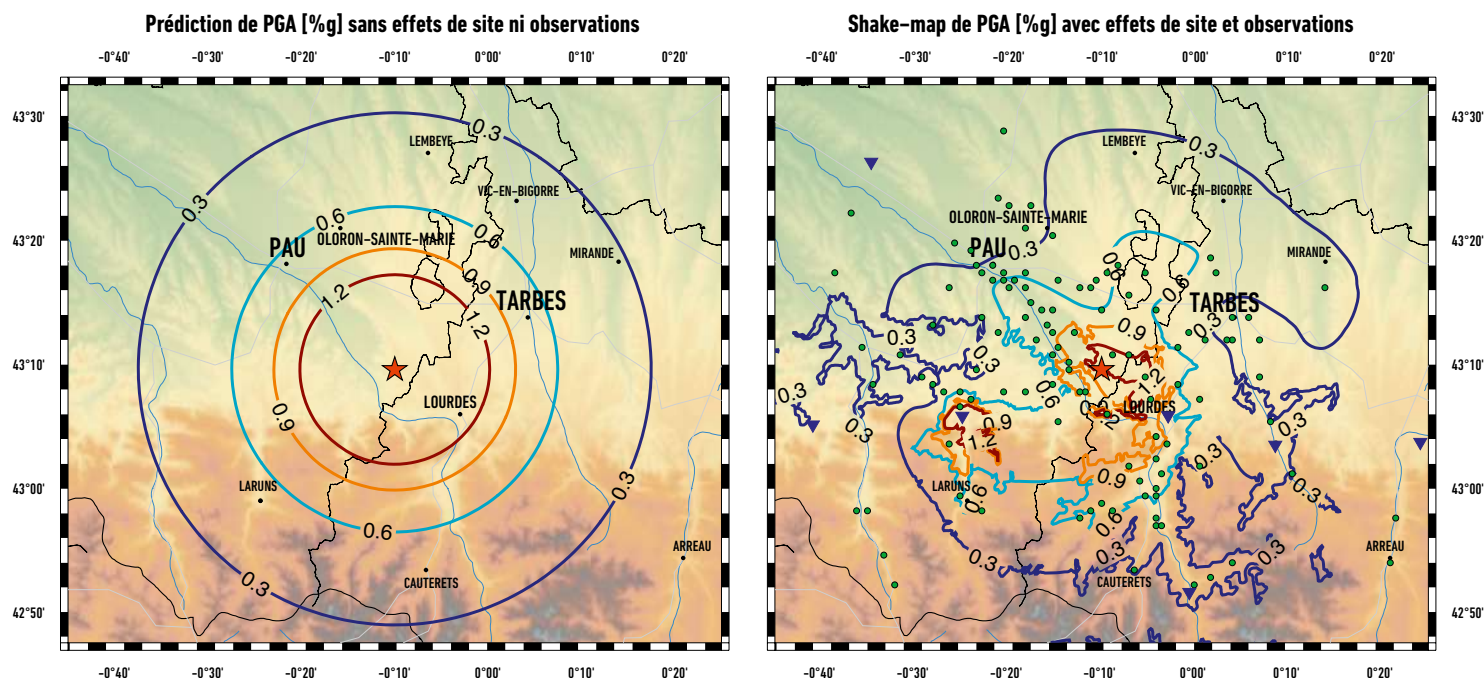
Pour des régions à sismicité modérée (par ex. France, Allemagne), ces modèles de prédiction fournissent des valeurs moyennes accompagnées d'incertitudes souvent

élevées, d'une part à cause du manque de données passées et d'autre part à cause d'approximations excessives dans les modèles de prédiction. Par exemple, pour la France, il est souvent nécessaire d'utiliser des équations développées pour d'autres contextes sismotectoniques, comme ceux propres à l'Italie. Les divergences entre les modèles des différentes zones géographiques induisent des biais importants dans l'estimation de l'intensité. Localement, les équations de prédiction modélisent les effets de site à l'aide de paramètres reposant sur des classes géotechniques de sol ou sur la vitesse des ondes de cisaillement dans les trente premiers mètres du sol : des retours d'expérience ont mis en évidence les larges approximations commises par l'utilisation de tels paramètres. Ceci est notamment dû à la complexité de certains phénomènes d'amplification de site abordés précédemment (ex : complexification du champ d'ondes dans des bassins sédimentaires).

Afin de pallier ces lacunes, les équations prédictives du mouvement (estimation *a priori*) peuvent être combinées avec les mesures de terrain (enregistrement de signaux ou intensités ressenties) pour générer des cartes d'intensité *a posteriori* caractérisant un événement sismique donné. Ces cartes, appelées « *shake-maps* » en anglais, permettent d'ajuster l'intensité sismique localement en fonction des informations collectées, affinant ainsi l'estimation de l'ampleur du phénomène. Ces *shake-maps* sont développées depuis une quinzaine d'années par l'USGS (United States Geological Survey), à partir de mécanismes statistiques d'interpolation reposant sur la corrélation spatiale de l'intensité (Worden *et al.*, 2010).

Plus récemment, une méthode alternative utilisant la mise à jour bayésienne (combinaison des connaissances *a priori* et des observations, ou *évidences*) est développée et expérimentée au BRGM (Gehl *et al.*, 2017). La théorie

FIGURE 2 / Génération de cartes de PGA à l'aide d'équations de prédiction pour le séisme du 30 décembre 2012 (M 4,3) près de Lourdes (65). L'étoile rouge représente l'épicentre, les triangles bleus les stations sismologiques et les points verts les observations macrosismiques. © P. GEHL, BRGM





3

bayésienne fournit en effet des outils mathématiques particulièrement adaptés au problème des *shake-maps*, en générant des distributions de probabilités pour les intensités sismiques attendues en tout point d'une zone. D'abord abordée de manière très exploratoire au sein de projets internes, cette approche a été intégrée courant 2018 à l'architecture *SeisComp3*, qui récolte et traite les flux en temps réel des stations sismiques du BRGM. Une quarantaine de stations installées dans les Pyrénées permet ainsi de localiser un événement sismique et de générer automatiquement une *shake-map* en quelques minutes (figure 2). Ces développements, toujours en phase de test, constitueront la clé de voûte du projet européen TURNkey récemment accepté : ce projet collaboratif, coordonné par l'institut de recherche norvégien NORSAR, permettra entre autres une implémentation systématique des *shake-maps* bayésiennes. L'application de tels modèles et la comparaison avec les observations devraient déboucher à terme sur un meilleur étalonnage des paramètres physiques intervenant dans la propagation des ondes sismiques (ex : taux d'atténuation des ondes, facteurs d'amplification dus aux effets de site, corrélation spatiale entre les intensités).

Finalement, quel que soit l'algorithme utilisé, la *shake-map* permet de mieux estimer (i) l'intensité « globale » sur la zone (liée au type de rupture et au modèle d'atténuation des ondes) et (ii) l'intensité locale à proximité d'une zone ayant fait l'objet d'une observation pour affiner les effets de site éventuels. La carte d'intensité ainsi produite peut directement alimenter des modèles d'endommagement

des structures et infrastructures bâties, afin de fournir aux autorités un instantané des dommages potentiels, en vue d'une meilleure gestion de crise.

La piste des simulations numériques

Alors que les *shake-maps* se bornent finalement à corriger des biais statistiques entre prédictions et observations, une autre philosophie consiste à intégrer les processus physiques au sein des modèles prédictifs, afin d'améliorer notre compréhension des phénomènes d'amplification. Les simulations numériques font partie de cette approche. Elles ont connu un réel essor depuis l'avènement du « calcul haute performance » dont les architectures de calcul les plus puissantes atteignent plusieurs millions de microprocesseurs (en novembre 2018, le supercalculateur IBM « Summit » hébergé par le laboratoire national d'Oak Ridge, États-Unis, est numéro 1 au Top 500 des supercalculateurs avec 2 397 824 cœurs de calcul). Ces architectures permettent aux sismologues de simuler des séismes en résolvant les équations tridimensionnelles de la physique qui gouvernent la rupture de la faille, la propagation des ondes sismiques et la complexification du champ d'ondes par les effets de site (figure 3). Le réalisme de ces simulations dépend néanmoins fortement de la compréhension de la sismogenèse, de la connaissance de la structure de la Terre sur les premières dizaines de kilomètres et de la connaissance de la structure des bassins sédimentaires. Lorsque ces informations sont insuffisantes, la puissance délivrée par les architectures de calcul actuelles ouvre la



PHOTO 3
Exemple de dommages suite au séisme de L'Aquila le 6 avril 2009 dans les Abruzzes en Italie. Préfecture de la région de L'Aquila (travaux de consolidation en cours) (L'Aquila, 2009).

© JULIEN REY, BRGM

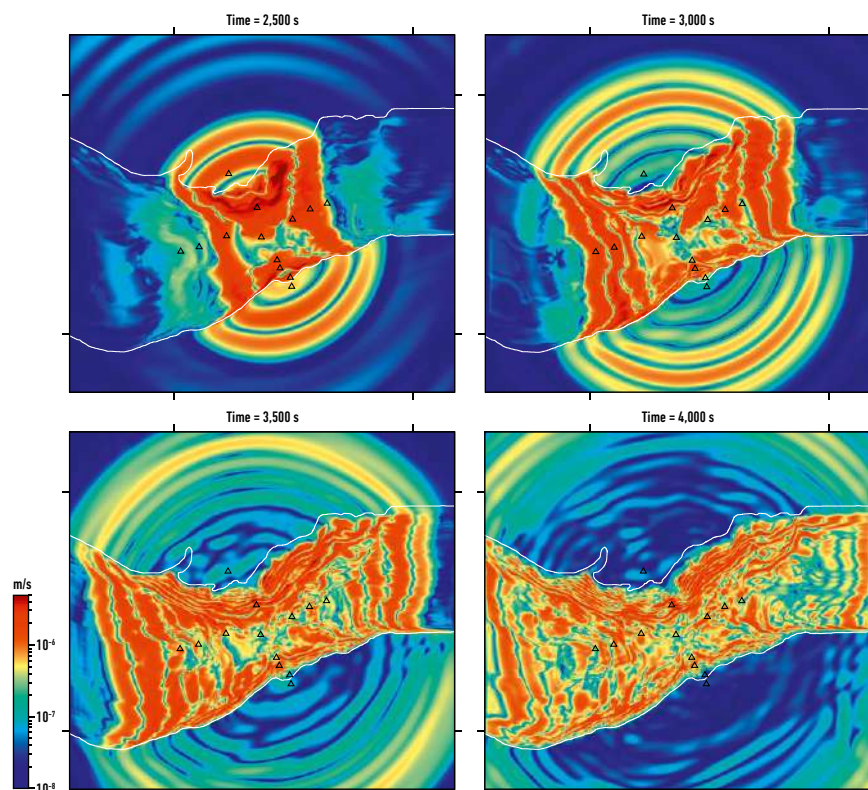


FIGURE 3

Arrêts sur image montrant l'amplitude des ondes sismiques suite à la rupture d'une faille à 5 km de profondeur.

Simulation d'un séisme réalisée sur un domaine de 10 x 10 km avec le code EFISPEC3D

(De Martin 2011, <http://efispec.free.fr>)

en partenariat avec l'infrastructure de calcul CIMENT

(<https://ciment.ujf-grenoble.fr>).

Les structures géologique et sismologique proviennent de l'expérimentation EUROSEISTEST

(Pitilakis *et al.*, 2013 ; Maufroy *et al.*, 2015).

© F. DE MARTIN, BRGM

voie aux études de quantification d'incertitudes autrefois réservées à des problèmes de taille plus restreinte. C'est le cas d'un projet mené en collaboration entre l'Institut des Sciences de la Terre de Grenoble, Intel France, l'université des sciences et technologies du roi Abdallah (KAUST), le Grand Équipement national de calcul intensif et le BRGM : les ingénieurs-chercheurs de ces cinq organismes ont mis en commun leurs savoir-faire pour quantifier les incertitudes liées à la prédiction de l'intensité sismique dans le bassin sédimentaire de Volvi (Grèce) en maîtrisant au mieux les sources d'incertitudes présentes dans le modèle numérique du bassin. Les supercalculateurs Occigen 2 (CINES) et Shaheen II (KAUST) ont permis de réaliser plus de 1 000 simulations pour un total de 10 millions d'heures de calcul, ce qui équivaut à 1140 années de calcul si ces simulations avaient été lancées sur un seul cœur. Les résultats attendus sont nombreux : une quantification probabiliste du mouvement sismique ou encore des analyses de sensibilité de l'intensité par rapport aux paramètres incertains du modèle.

Autorisons-nous à espérer que les simulations numériques, en tant qu'ossature de modèles prédictifs probabilistes, intégreront les normes européennes d'évaluation de l'aléa sismique d'ici les prochaines décennies ! ●

ABSTRACT

Of all natural hazards, earthquakes possess a sudden destructive power over a widespread geographic area, potentially threatening millions of people in densely populated regions. Mainland France is mostly located in a moderate seismicity area; however, it is not unlikely to witness events such as the seismic crisis in Emilia-Romagna (Italy) in May 2012, which caused around thirty human casualties and economic losses amounting to several hundreds of millions of euros. Therefore, in the moments following the occurrence of an earthquake, civil protection agencies are in dire need of accurate information on the intensity and spatial distribution of the seismic ground motions around the epicentre.

In high seismicity regions (e.g. Japan, California, Iran) where numerous observations are available, empirical relations between the characteristics of an earthquake and the ground-motion intensity (i.e. ground-motion prediction equations) have established themselves as straightforward tools for the rapid estimation of the level of shaking at a given site. However, in moderate seismicity areas (e.g. France, Germany), these predictive models provide mean values with high levels of uncertainty, mostly because of a lack of past observations and of excessive approximations. For instance, the modelling of the ground-motion amplification due to superficial geological deposits (quaternary) usually neglects: (i) the geological variability within the ground, requiring a 2-D or 3-D model of the site (e.g. sedimentary basins or valleys); or (ii) seismic waves trapped in rugged reliefs, at the origin of topological amplifications.

Therefore, for a given seismic event, ground-motion prediction equations (i.e. prior estimation) may be combined with field measures (i.e. observations) in order to generate posterior spatial distributions of intensity. Such maps, referred to as shake-maps, allow for a local adjustment of the seismic intensity according to incoming information, thus refining the prediction of the expected level of the phenomenon. In parallel, due to recent developments in the capacity of numerical computations (i.e. high performance computing), it is becoming possible to perform earthquake simulations based on physical equations governing the generation of seismic waves near the faulting area and their propagation within the Earth's crust. Site effects can then be accurately modelled thanks to a representation in three dimensions of the geological medium and of the velocity structure of related seismic waves. The outcome of such simulations eventually leads to a physical and quantitative evolution of the level of ground shaking.

BIBLIOGRAPHIE

- De Martin, F. (2011) – Verification of a spectral-element method code for the Southern California Earthquake Center LOH. 3 viscoelastic case. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 101(6), 2855-2865. Douglas, J. (2018) – Ground Motion Prediction Equations 1964-2018 (Available at: www.gmpe.org.uk). Gehl, P., Douglas, J., & D'Ayala, D. (2017) – Inferring earthquake ground-motion fields with Bayesian networks. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 107(6), 2792-2808. Maufroy, E., Chaljub, E., Hollender, F., Kristek, J., Moczo, P., Klin, P., Priolo, E., Iwaki, A., Iwata, T., Etienne, V., De Martin, F., Theodoulidis, N. P., Manakou, M., Guyonnet-Benaize, C., Pitilakis, K., & Bard, P.-Y. (2015). Earthquake ground motion in the Mygdonian basin, Greece: The E2VP verification and validation of 3D numerical simulation up to 4 Hz. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 105(3), 1398-1418. Pitilakis, K., Roumelioti, Z., Raptakis, D., Manakou, M., Liakakis, K., Anastasiadis, A., & Pitilakis, D. (2013) – The EUROSEISTEST strong-motion database and web portal. *Seismological Research Letters*, 84(5), 796-804. Worden, C. B., Wald, D. J., Allen, T. I., Lin, K., Garcia, D., & Cua, G. (2010) – A revised ground-motion and intensity interpolation scheme for ShakeMap. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 100(6), 3083-3096.

À LIRE, GÉOSCIENCES N°4: « LES RISQUES TELLURIQUES »



**Déformations
d'un tronçon de
route consécutives
à un séisme.**

© FOTOLIA

1



Les dessous des dunes : approche pluridisciplinaire pour mieux caractériser l'évolution des édifices littoraux

Les plages et les dunes qui constituent les littoraux sont des systèmes dynamiques en constante adaptation. Le fonctionnement de l'intérieur de ces systèmes et leurs propriétés géophysiques sont peu connus. Pourtant ces connaissances sont essentielles pour anticiper l'aptitude des littoraux sableux à résister ou s'adapter face aux aléas, comme les tempêtes ou l'élévation du niveau de la mer. C'est dans cette optique que le projet de recherche SIBLES, mené par le BRGM en région Pays de la Loire, a été initié.

Le sable que nous observons sur les plages et les dunes n'est que la carapace visible du littoral. Sous cette enveloppe se cache un univers mal connu qui respire et s'adapte face aux forçages météo-marins qui le contraignent. En effet, même si le littoral est naturellement une zone en constante évolution, les aléas érosion et submersion marine l'impactent particulièrement (recul du trait de côte, perte de sédiment, fragilisation du milieu, inondation des zones basses, etc.). Le sujet est d'autant plus crucial que ce territoire est associé à de forts enjeux sociaux, économiques et environnementaux, et n'accueillait pas moins de 8 millions d'habitants en France en 2010, auquel s'ajoute une capacité d'accueil touristique du même ordre de grandeur. Face à ces enjeux, comprendre l'histoire du littoral et anticiper son évolution apparaissent donc comme des thématiques primordiales pour mieux interagir avec ce milieu.

On appelle « système littoral » un espace qui regroupe la partie marine (l'avant-côte), l'estran (la zone du littoral qui est alternativement couverte et découverte par la mer), la plage, les dunes et l'arrière-dune (e.g. marais, lagunes ; figure 1). La majorité des littoraux sableux présents le long

AUTEURS



Julie BILLY

Ingénieure-Chercheuse en géomorphologie
et dynamique littorale
✉ j.billy@brgm.fr



Angélie PORTAL

Ingénieure Géophysicienne
✉ a.portal@brgm.fr



Vivien BAUDOUIN

Ingénieur géologue spécialisé en littoral
et Chef de projet SIBLES
✉ v.baudouin@brgm.fr

Collaborateurs du Projet SIBLES :
**V. BAUDOUIN, J. BILLY, A. BITRI,
G. BODERE, J. DEPARIS, M. GARCIN,
E. PLAT, A. PORTAL, J. SALOMERO.**

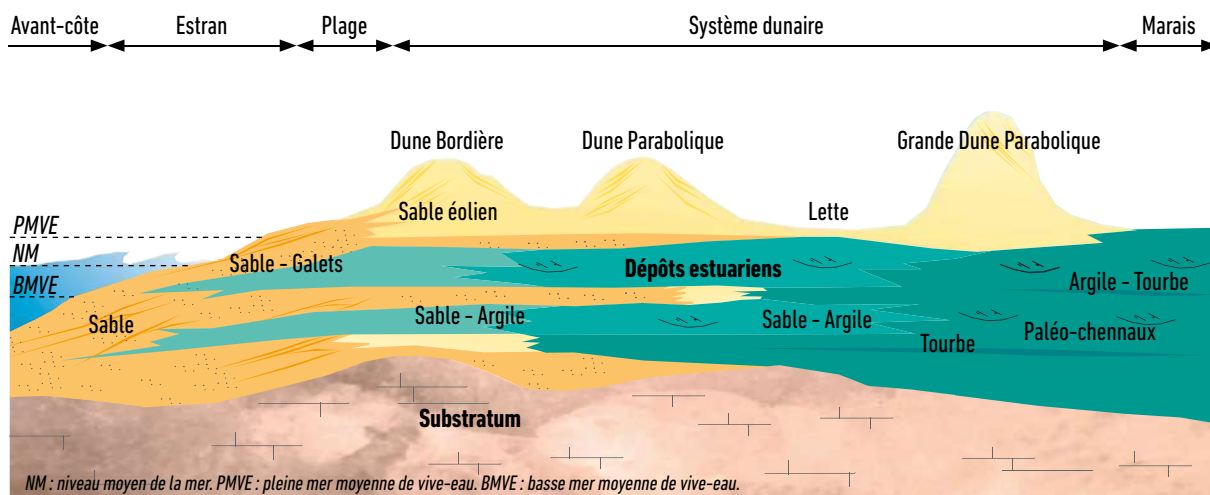


FIGURE 1
Coupe schématique
transversale
d'un littoral.

© J. BILLY D'APRÈS J. BRIAIS
ET V. BAUDOUIN

de nos côtes se sont formés et développés au cours des 6 000 dernières années. Leur édification est le résultat du remaniement des sédiments (sables, graviers, galets) par l'action des vagues sur la plage et l'avant-côte (Roy *et al.*, 1994 ; Proust *et al.*, 2013). Une partie de ce sédiment est emportée par le vent pour former les dunes (*photo 1*). En considérant une section transversale, de la partie marine vers la partie terrestre (*figure 1*), tous ces différents domaines qui constituent le système littoral sont connectés les uns aux autres et forment un continuum sédimentaire de plusieurs mètres ou dizaines de mètres d'épaisseur. Cependant, leur enchevêtrement et les connexions entre chaque domaine sont peu connus, mal compris et nécessitent davantage d'investigations. L'architecture interne, les propriétés géophysiques, géotechniques et les paramètres intrinsèques du sous-sol sont autant d'éléments indispensables à la compréhension de la dynamique des systèmes littoraux et de sa variabilité spatiale. C'est ainsi tout l'objectif du projet SIBLES.

SIBLES : élaborer une méthode solide et reproductible

Le projet SIBLES, *Structure interne des barrières littorales sableuses*, s'articule autour de questions majeures : Quelles sont les structures et propriétés de la partie interne d'un cordon littoral (ensemble regroupant plage, dune et arrière-dune) ? Comment fonctionne-t-il ? Et, comment rendre compte de l'hétérogénéité spatiale de ces côtes sableuses ?

Le projet a été lancé afin d'améliorer la connaissance des systèmes dunaires, et de développer une méthodologie reproductible et économiquement accessible de caractérisation 3D de la partie interne des cordons dunaires. Le côté novateur du projet est de croiser les compétences d'experts de quatre disciplines : sédimentologues, géomorphologues, géotechniciens et géophysiciens autour d'une même problématique (*encadré Verbatim*), pour avoir un regard orienté sur le fonctionnement et la capacité du cordon littoral sableux à s'adapter face aux fluctuations des paramètres météo-marins.

Le site du Pays-de-Monts (Vendée, France) comprend un système dunaire complexe en connexion avec un vaste marais poldérisé (marais de Monts et de Challans). L'imbrication du prisme sableux (le système plage-dune) avec le marais maritime est mal connue. Toutefois, cette zone présente les avantages de bénéficier d'un corpus de données significatif (700 sondages géotechniques et géologiques sur la zone), d'une bonne connaissance des grandes étapes de sa mise en place depuis 7 000 ans (Bernard, 1996 ; Arthuis et Monteil, 2015) et d'être activement suivi depuis 2010 par l'observatoire du littoral des Pays-de-Monts. Ces solides connaissances issues des réseaux locaux et de multiples interactions scientifiques (INRAP, ONF, BRGM, Université de Nantes [IGARUN]) font de ce site un bon sujet d'exploration dans le cadre de SIBLES.



◀ PHOTO 1
Cordon dunaire des
Pays-De-Monts
(Vendée, France).

© DÉCADRAGES ET DÉCIBELS

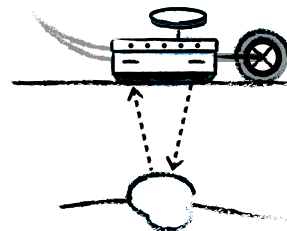
▶ PHOTO 2
Cette tête de forage
correspond au
niveau de la plage
(le 29 Novembre
1991) ce qui permet
de constater
l'érosion de la plage
et de la dune.

© VIVIAN BAUDOUIN, BRGM

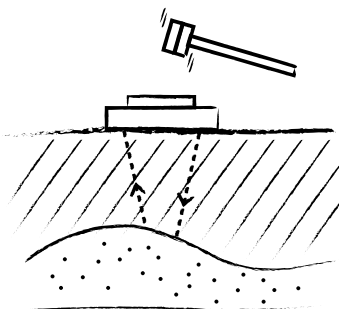
ENCADRÉ 1

► VERBATIM

• **Vivien BAUDOUIN (DAT Nantes), chef de projet** : « L'intérêt de ce projet est de croiser différentes interprétations (de géotechniciens, sédimentologues, géotechniciens) pour en faire une analyse nouvelle. Le géologue peut raconter l'histoire de la mise en place du système dunaire, sans pouvoir détailler les propriétés physiques du site de façon précise. Le géotechnicien de son côté va pouvoir détecter des indicateurs de comportement mécanique de façon ponctuelle, et le géophysicien des indicateurs de façon plus globale, sur toute la zone. Tout cela permet de mieux comprendre comment la dune est agencée. »



• **Angélie PORTAL (DRP/IGT), géophysicienne, en charge de la sismique terrestre sur le projet** : « L'intérêt de travailler avec plusieurs spécialités est de créer une synergie. Chacun apporte ses compétences, sa façon de voir aux autres. Nous en géophysique voyons des choses que les thématiciens ne voient pas et vice-versa. C'est très constructif. À titre personnel, j'ai appris beaucoup sur la thématique littorale et sur l'objet de la mission : c'est impressionnant de réaliser que les dunes ont autant d'histoire ! Et dans mon domaine en tant que tel, ce projet a permis d'expérimenter la géophysique sur un cordon littoral sableux, ce qui n'est pas une application courante. »



• **Jacques DEPARIS (DRP/SPU), géophysicien** : « Je suis spécialisé dans plusieurs techniques de géophysique, notamment le géoradar et l'électrique. Même si je traite les données tirées du géoradar et que je les explique d'un point de vue physique, j'ai besoin d'un géologue pour les interpréter et les replacer dans un contexte géologique. L'intérêt d'un projet comme SIBLES, qui multiplie les compétences, est que la présence de tous ces spécialistes permet d'avoir une interprétation optimum de chaque résultat et d'aller vraiment au bout des choses. »

• **Julie BILLY (DRP/R3C), géologue côtier** : « Jacques a des compétences en traitement du signal que je n'ai pas, et je peux apporter tout le côté de l'interprétation propre au domaine littoral qu'il ne possède pas. Sans la combinaison de nos compétences métier, il serait difficile de mener à bien un projet tel que SIBLES. Quand on travaille ensemble, on gagne en temps et en qualité ! Cela permet aussi de créer du lien entre nos équipes et de décloisonner nos activités. »



Caractérisation géomécaniques des cordons littoraux

Afin de caractériser les formations meubles superficielles sur l'ensemble d'un site, plusieurs méthodes d'imagerie géophysique ont été choisies : la sismique terrestre, la résistivité électrique et le géoradar. Un des points forts de ces différentes techniques est la capacité d'imager le sous-sol sur plusieurs mètres voire dizaines de mètres de profondeur en utilisant des méthodes non invasives et non destructives. De plus, leur maniabilité sur le terrain et leur facilité de déploiement, permettent de prospecter des zones étendues. (voir encadré 2). En parallèle, des mesures *in situ* sont effectuées pour caractériser le sous-sol littoral et calibrer les données géophysiques (sondages carottés équipés de piézomètres pour mesurer le niveau d'eau en continu et sondages géotechniques (pénétromètres)).

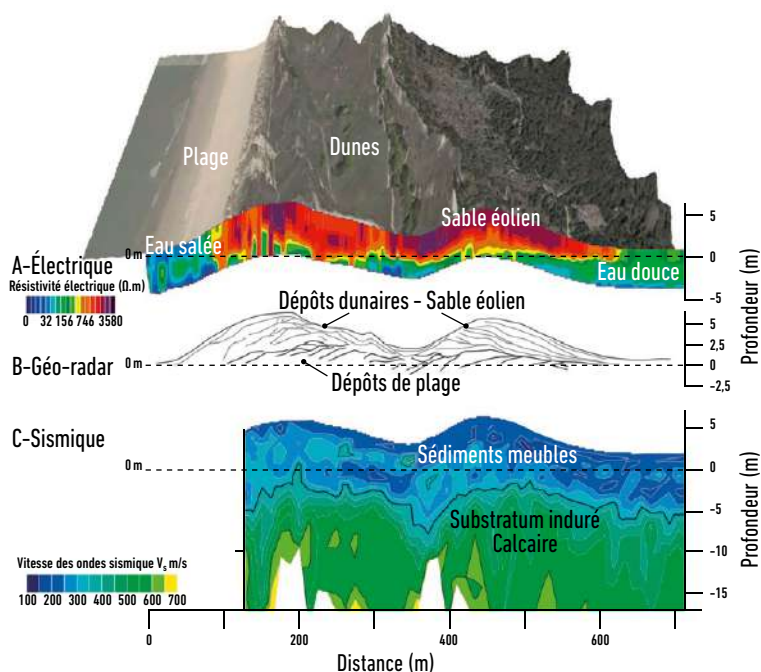
Des résultats prometteurs

Les premiers résultats et les interprétations croisées des données confortent la démarche proposée. La confrontation pluridisciplinaire des résultats sur le littoral du Pays-de-Monts révèle différents ensembles spécifiques en termes géomorphologiques, géomécaniques et hydro-géologiques (figure 2). Ces résultats préliminaires sont très prometteurs, et permettent d'ores et déjà d'appréhender l'hétérogénéité spatiale du système, tant latérale qu'en profondeur (figure 3), en lien avec les modalités de mise en place de l'édifice littoral.

Le géoradar révèle l'architecture interne du cordon sableux, c'est-à-dire un enchevêtrement des structures sédimentaires (figure 2), et met en avant la complexité de formation du système. Chaque réflecteur (trait) symbolise une phase d'accumulation de sédiments. Ils représentent les dépôts de plage (traits noirs) recouverts par des dépôts dunaires (traits gris) et montrent un développement à la fois tourné vers la terre et vers la mer. La sismique terrestre visualise le système plus en profondeur et permet de déterminer l'interface entre les sédiments meubles (sable/argile en bleu) et le toit du substratum (calcaire en vert) sur lequel repose l'édifice littoral (figure 2). En revanche, le passage latéral du système littoral sableux à un environnement de

FIGURE 2
Imagerie géophysique du cordon dunaire de la Parée-Grolier (Vendée) illustrant la résistivité électrique, l'architecture interne par géoradar et la vitesse des ondes de cisaillement par sismique terrestre.

© A. PORTAL, J. BILLY, J. DEPARIS

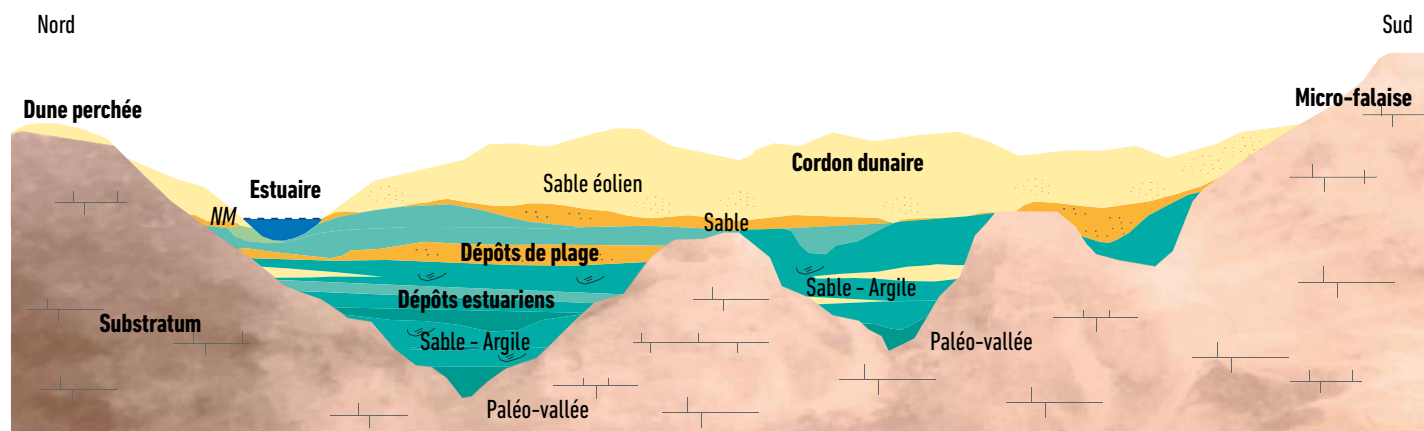


dépôts abrité (argiles, vases, tourbes) est quant à lui moins contrasté. Le profil de résistivité électrique met en évidence assez nettement les sables dunaires très résistants (rouge) qui reposent sur une matrice plus conductrice (figure 2). Ces zones les plus conductrices sont largement conditionnées par le front d'eau saumâtre ou salée sous la plage (en bleu) et par un milieu plus humide, sablo-argileux et/ou organique (en vert) pouvant être interprété comme une zone de marais.

Ces résultats montrent le potentiel de cette démarche dans la description et la compréhension des systèmes littoraux et la complémentarité des méthodes déployées.

FIGURE 3
Coupe schématique longitudinale d'un littoral illustrant sa variabilité spatiale.

© J. BILLY D'APRÈS J. BRIAIS ET V. BAUDOUIN



► DES TECHNIQUES COMPLÉMENTAIRES

• **La sismique terrestre** analyse la propagation des ondes de surface dans le sous-sol pour étudier la variation des ondes de cisaillement (ondes S). Connaissant les vitesses de propagation des ondes, on peut définir, en faisant une approximation sur la densité des terrains, les paramètres élastiques du sous-sol. La technique utilisée dans cette étude est un prototype unique et innovant développé par le BRGM nommé MASW, pour *Multiple Analysis of Surface Waves*. L'innovation de ce système est l'utilisation de géophones marins (capteurs) le long d'une ligne d'acquisition tractée, pour des applications terrestres, afin de pouvoir définir les paramètres élastiques du sous-sol. Une impulsion (un tir mécanique), induite par une masse de 10 kg, est émise et génère des ondes qui se propagent dans le sol. Ces ondes sont captées par une flûte de 24 géophones espacés tous les 2 mètres. Le système est tracté par un quad et l'opération est répétée tous les 10 mètres sur toute la longueur du profil. Cette méthode offre une plus grande rapidité d'acquisition par rapport aux dispositifs classiques (ligne de géophones plantés dans le sol lors de chaque déplacement du dispositif).

• **Le OhmMapper** (*Geometrics*, États-Unis) est un appareil mobile qui permet de mesurer en continu la résistivité électrique du sol. La résistivité électrique est un paramètre intrinsèque qui traduit la capacité d'un milieu à laisser passer le courant électrique. Celle-ci varie en fonction du type de sol (sable, argile, etc.) et de sa teneur en eau (douce, saumâtre ou salée). Le OhmMapper émet un courant dans le sol,

qui sera enregistré par différentes électrodes (ici six électrodes capacitives espacées de 5 puis 10 mètres). Dans cette configuration, le dispositif de type dipôle-dipôle permet d'obtenir une profondeur d'investigation d'environ 5 mètres. Le but de ces mesures est d'observer les variations de résistivité, c'est-à-dire l'aptitude du sol à s'opposer à la circulation du courant électrique, et ainsi pouvoir définir l'enchevêtrement des différentes structures du littoral et observer comment l'eau salée s'infiltre dans le sous-sol.

• **Le géoradar** permet de visualiser les structures sédimentaires proches de la surface (entre 5 et 20 m de profondeur). Son fonctionnement repose sur l'émission, la

propagation et la réflexion d'ondes électromagnétiques hautes fréquences dans le sol (100^{aine} de Méga Hz). À la réception du signal, les discontinuités enregistrées par l'appareil matérialisent les différentes interfaces et les hétérogénéités sédimentaires présentes dans le sol. Le profil généré permet de visualiser l'organisation des dépôts entre eux et de produire une image fine de l'architecture interne de l'édifice littoral. —

► POUR PLUS D'INFORMATIONS, REGARDEZ LA VIDÉO DE LA CAMPAGNE D'ACQUISITION DE DONNÉES DU PROJET SIBLES SUR BRGMTV : WWW.BRGM.FR/VIDEO/PROJET-SIBLES-METHODE-MIEUX-COMPRENDRE-COTES-SABLEUSES



Acquisition
OhmMapper en
cours de réalisation.
© DECADRAGES ET DECIBELS



Acquisition
sismique terrestre.
Déclenchement
des ondes sismiques
à la double-masse.
© DECADRAGES ET DECIBELS



Acquisition géoradar.
© DECADRAGES ET DECIBELS

L'utilisation combinée du géoradar et de la sismique terrestre MASW a également montré des résultats concluants pour la caractérisation du littoral sur un système mixte sable/galet en région Occitanie (BRGM, Université de Perpignan et l'OBSCAT ; Robin *et al.* ; 2018). Ces deux études montrent l'intérêt de développer ce type d'approche méthodologique et d'apporter ces connaissances quasiment inexistantes sur les systèmes littoraux.

Au-delà d'une approche innovante un atout pour la gestion du littoral

Actuellement, les littoraux évoluent dans un contexte de carence sédimentaire (diminution des apports en sédiments) et d'augmentation du niveau de la mer. Les observations saisonnières et annuelles du littoral prennent régulièrement le pouls de son évolution et mettent en avant la complexité de la réponse des systèmes face aux fluctuations des paramètres météo-marins. Cette approche participe à l'effort mis en place pour comprendre les littoraux et tenter d'anticiper leur évolution future. En effet, elle s'imbrique parfaitement dans une démarche à plus grande échelle d'étude des systèmes littoraux, englobant la mise en place passée, le suivi du littoral actuel et l'influence des paramètres forçant sur le milieu. Le projet SIBLES a permis d'initier une nouvelle approche et d'entrevoir son potentiel en apportant des connaissances sur l'hétérogénéité spatiale et interne d'un système dunaire. Dans la continuité du projet, des travaux complémentaires devraient permettre d'établir un protocole opérationnel et robuste afin de développer et généraliser l'utilisation de ces techniques sur tous les littoraux.

Cette méthode offre une nouvelle perspective pour la gestion environnementale et durable des systèmes côtiers dunaires. À terme, les résultats issus de cette approche multiméthodes géophysiques produiront des données indispensables pour se préparer à l'évolution future du littoral face aux changements que subit le milieu. En effet, la connaissance des paramètres intrinsèques du sous-sol à haute résolution est indispensable pour (i) développer l'interprétation géomécanique, pour (ii) identifier des zones de faiblesse via la connaissance interne du système, et pour (iii) alimenter des modèles prédictifs et réalistes de l'évolution 2D longshore et cross-shore du littoral. De plus, ces connaissances sur les cordons dunaires ouvrent des perspectives de recherches sur les liens entre les propriétés du cordon, la caractérisation des habitats et l'évolution de la couverture végétale du milieu dunaire. Ces éléments contribuent tous à comprendre et à apprendre à mieux cohabiter avec ces milieux remarquables. ●



▲ PHOTO 4 / Acquisition sismique sur l'estran avec piezomètres au 1^{er} plan. © VIVIEN BAUDOUIN

ABSTRACT

Comprehensive geophysical subsurface mapping of coastal systems provides a better understanding of the organisation of sediment deposits and the behaviour of coastal areas. The internal structures and geophysical parameters of coastal dune systems can provide clues into the processes involved in their formation and their current dynamic. Unlike geomorphological and shoreline evolution, there have been relatively few studies of the relationships and interactions between individual parts of coastal systems (beach, dunes, marsh, and lagoon) and their internal geophysical properties. As a result, these systems are poorly understood.

To this end, the BRGM research project SIBLES (Structure interne des barrières littorales sableuses) has developed a pluri-disciplinary geophysical method to investigate internal properties of sandy coasts, and brings together sedimentologists, geomorphologists, geophysicists, and geotechnicians. This project focused on the detailed investigation of sandy dune systems in the Pays-de-Monts (Atlantic Coast, France) combining both in situ (cores, piezometer, etc.) and continuous geophysical data (several kilometres of ground-penetrating radar, electrical and terrestrial seismic surveys). Results detail (i) the entire sediment cover (sand and clays) up to the substratum; (ii) the connection between marsh, sandy dunes and former beach deposits; (iii) fine internal architecture of dunes deposits; and (iv) the location of salt- or fresh-water areas. Such knowledge of intrinsic parameters of coastal systems is essential to advance geomechanical interpretations; to predict realistic models of longshore and cross-shore coastal system evolution, and thus to better manage the coastal zone.

BIBLIOGRAPHIE

BRGM-TV-Vidéo du projet SIBLES : <http://www.brgm.fr/video/projet-sibles-methode-mieux-comprendre-cotes-sableuses>. ARTHUIS Rémy, MONTEIL Martial (2015) – *Archéologie de la Basse-Loire*. Presse Universitaire de Rennes, Rennes, 2015, 194 p. BAUDOUIN Vivien, GARCIN Manuel, DEPARIS Jacques, PLAT Emanuelle, BITRI Adnand, LE GUERN Cécile, BODERE Gwennaelle, NOURY Gildas, PORTAL Angélie, ROLLIER Christophe, GOUGUET Loïc, ARTHUIS Rémy (2018) – *Méthode pluridisciplinaire de caractérisation physique des systèmes dunaires côtiers*. XV^e Journée Nationales Génie-Génie Civil, Édition Paralia SFL, pp 597-606 - DOI:10.5150/jngcgc.2018.069. BERNARD Jacques (1996) – *Paléoenvironnement du Pays de Retz et du marais breton-vendéen*. Thèse de doctorat, Université de Nantes, 1996, Tome I, 190 p., Tome II, 55 p. PROUST Jean-Noël, TESSIER Bernadette, CHAUMILLON Éric (2013) – *Sédimentation littorale : état des lieux et recherches en cours*. Géosciences n°17, Octobre 2013, pp 26-35. ISSN 1772-094X-ISBN 978-2-7159-2548-9. ROBIN Nicolas, BILLY Julie, ÉRIC PALVADEAU, MEULE Samuel, BALOUIN Yann, BITRI Adnand, PORTAL Angélie, STEPANIAN Alexis, CERTAIN Raphael, HEBERT Bertil, RAYNAL Olivier, ROJAS-MARQUEZ Alicia, SOTIN Christine, MARGUERITE Sébastien, ALEMANN Nicolas, BARUSSEAU Jean-Paul (2018) – *Apport de la géophysique terrestre (géo-radar, sismique) pour l'aide à la gestion du trait de côte*. XV^e Journée Nationales Génie-Génie Civil, Édition Paralia SFL, pp 401-408 - DOI:10.5150/jngcgc.2018.045. ROY, P.S., COWELL, P.J., FERLAND, M.A., THOM, B.G. (1994) – *Wave dominated coast*. In : R.W.G. Carter and Woodroffe (Eds), Coastal Evolution, Late Quaternary Shoreline Morphodynamics, Cambridge University Press, Cambridge, pp 121-186.

Le point de vue d'une élue sur le risque inondation

PAR MARYLIN DERET

Située entre la Loire et le Cher, Saint-Pierre-des-Corps est une ville à 100 % inondable. En cas de crue, l'eau monterait jusqu'à 3 mètres. Le risque, ici, est double. Une inondation peut en effet être causée par une remontée de nappe au niveau du Cher. La digue de la Loire pourrait également céder sous l'effet conjugué d'une crue atlantique à l'ouest et d'un débit atteignant 6 000 m³ par seconde au Bec d'Allier, à la confluence de la Loire et de l'Allier. La surveillance de ce point situé à 200 kilomètres en amont nous laisserait cependant trois jours environ pour évacuer la population. Face à ce risque, l'objectif de la municipalité et des autres communes concernées consiste à réduire au minimum les dégâts qu'occasionnerait une crue et à permettre le retour des habitants la plus rapidement possible.

Pour cela, l'eau doit pouvoir entrer sur le territoire de façon maîtrisée. C'est pourquoi une surverse est envisagée dans la digue de la Loire, là où elle est le plus fragile. L'eau doit ensuite pouvoir s'écouler calmement dans la ville, sans engendrer trop de dégradations. Ces considérations ont été prises en compte dans le plan local d'urbanisme (PLU) adopté début novembre et qui tend vers un urbanisme résilient.

Le règlement impose ainsi de construire au moins une pièce au-dessus des plus hautes eaux connues. Il augmente également les surfaces non imperméabilisées sur la ville : certains terrains non encore construits et particulièrement vulnérables à une crue ont été classés en zones de jardin. La part constructible d'une parcelle a en outre été diminuée. Elle passe par exemple de 100 % à 50 % en centre-ville. Ces dispositions sont compatibles avec l'objectif que nous poursuivons à travers notre PLU, qui est de maintenir et non d'augmenter la population de Saint-Pierre-des-Corps. Nous prévoyons ainsi de construire 65 nouveaux logements par an, contre 90 dans notre précédent plan d'occupation des sols (POS).

Ces choix sont le fruit des études qui ont été menées sur notre territoire, mais aussi de la culture du risque inondation que nous développons depuis plusieurs années. Nous nous efforçons également de la diffuser auprès des habitants et des entreprises. Nous envisageons enfin de créer des points de vue et des accès sécurisés à la Loire. Nous voulons nous réapproprier le paysage remarquable que nous offre la Loire et vivre mieux avec le fleuve.

Marie-France BEAUFILS

Maire de Saint-Pierre-des-Corps



Aléas naturels et sûreté nucléaire : quelles avancées ?

L'IRSN est l'expert public national des risques nucléaires et radiologiques. Il concourt aux politiques publiques en matière de sûreté nucléaire et de protection de la santé et de l'environnement au regard des rayonnements ionisants. La prise en compte des aléas naturels pour le dimensionnement et la protection des installations nucléaires est l'un de ses nombreux domaines de recherche, en appui de son activité d'expertise.

La prévention d'un accident grave survenant dans une installation nucléaire s'inscrit parmi les sujets de préoccupation majeurs des acteurs de la filière et de la société civile. Cet enjeu particulier conduit à un haut degré d'exigence dans la conception et l'exploitation de ces installations. Leurs exploitants doivent régulièrement démontrer leur sûreté à l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN). En support à l'ASN, l'IRSN effectue l'évaluation technique des démonstrations des exploitants. L'Institut contribue aux travaux des instances chargées de définir et de promouvoir les meilleures pratiques, comme

l'ASN en France ou l'AIEA à l'international. L'exigence de la sûreté nucléaire se traduit par la prise en compte d'aléas naturels de très forte intensité et très peu probables : séismes, inondations, étiages et aléas météorologiques (en particulier vent, tornade, température, neige et foudre). La définition des aléas naturels de référence relève historiquement d'une approche consistant à identifier et caractériser les événements les plus forts survenus dans le passé et à leur appliquer une majoration pour se prémunir des incertitudes associées à la détermination des aléas extrêmes. Cette approche est aujourd'hui complétée par une approche probabiliste qui définit un niveau d'aléa en regard d'une « cible » : typiquement, une fréquence de dépassement annuelle inférieure à 10^{-4} . À la suite de l'accident de Fukushima Dai-ichi, des aléas naturels plus sévères ont été définis, en ajoutant une majoration supplémentaire pour renforcer encore la sûreté des installations.

Un élément clé de l'expertise de l'IRSN est de pouvoir couvrir l'ensemble des étapes de l'évaluation des aléas naturels, depuis leurs sources jusqu'à leurs effets sur les installations. Le champ de connaissances à mobiliser est donc très large. La recherche en support à l'expertise est conduite de manière ciblée sur les éléments de définition des aléas les plus sensibles, en transposant des méthodes entre différents domaines et en réunissant des compétences multiples dans le cadre de collaborations.

Quelle que soit l'approche utilisée, les données prises en compte ont un rôle prépondérant. Ce sont en premier lieu des données instrumentales. Elles peuvent être complétées par une information historique issue de la bibliographie et des archives, telle que celle collectée dans la base de données SisFrance développée par le BRGM, EDF et l'IRSN. Des travaux récents ont montré la capacité et l'intérêt d'utiliser des données historiques de submersions marines. Une submersion résulte de la concomitance d'un niveau de marée élevé et d'une surcote générée par une tempête. Ainsi, les données instrumentales du port de Dunkerque couvrent une trentaine d'années et la surcote occasionnée par la tempête majeure de 1953, par ailleurs bien documentée, apparaît comme un événement nettement plus fort que les autres. L'extrapolation statistique est alors discutable. Des recherches bibliographiques et dans les archives menées avec le CNRS ont permis d'identifier six événements majeurs et de s'assurer qu'ils n'avaient pas été dépassés pendant une période d'environ 120 ans. Cette information supplémentaire permet de constituer un échantillon plus homogène et de réaliser une extrapolation statistique nettement plus robuste. La recherche sur les submersions historiques est poursuivie au sein d'un groupe de travail constitué en concertation avec la DGPR, animé par l'IRSN et auquel participent des spécialistes du SHOM, du CEREMA, du BRGM, d'EDF, de l'UPLC17 et d'ARTELIA. Le groupe alimente une base de données ouverte d'événements historiques, issue d'une analyse critique collective.

L'utilisation des informations disponibles sur l'occurrence de séismes dans le passé comporte une part notable d'incertitude, car les séismes destructeurs sont rares. En

Vincent REBOUR

Chef du Service de Caractérisation
des Aléas Naturels, IRSN
vincent.rebour@irsn.fr



complément, une approche tenant compte davantage de la physique de la rupture des failles apparaît nécessaire. Il existe des méthodes d'évaluation probabiliste de l'aléa sismique utilisant les caractéristiques géométriques et d'activité des failles ainsi que les incertitudes qui y sont associées. Dans ces méthodes classiques, chaque rupture est associée à une unique faille. Or, comme l'ont montré des séismes récents, en 2016, en Italie et en Nouvelle-Zélande, lors d'un événement les ruptures peuvent intervenir sur plusieurs failles. Il est donc nécessaire d'envisager des ruptures multiples dans un ensemble de scénarios représentant la variabilité des caractéristiques des failles. L'IRSN a initié avec l'OGS (Istituto Nazionale di Oceanografia e Geofisica Sperimentale) le groupe de travail FAULT2SHA (<https://fault2sha.net/>) au sein de l'ESC (European Seismological Commission). Ce groupe multidisciplinaire a pour objectif de standardiser la collecte des données de terrain et de développer des méthodes d'évaluation probabiliste de l'aléa sismique permettant de prendre en compte les ruptures multiples. Les premiers travaux montrent que ces méthodes conduisent à des évaluations d'aléa qui peuvent être très différentes de celles obtenues par les méthodes classiques.

Les aléas naturels sont évalués lors des réexamens de sûreté décennaux, en anticipant autant que possible les évolutions pouvant intervenir jusqu'au prochain réexamen. Pour de nombreux aléas hydrométéorologiques, la définition des aléas de référence repose sur une extrapolation statistique réalisée à partir de données instrumentales. Des développements ont été réalisés dans la communauté scientifique pour adapter les méthodes statistiques au traitement d'échantillons présentant des tendances d'évolution dans le temps, comme celle liée au changement climatique. Pour ses besoins d'expertise, l'IRSN a développé un outil statistique permettant l'évaluation des couples niveau d'aléa-fréquence de dépassement à une date future, typiquement celle du prochain réexamen de sûreté. Cet outil permet d'obtenir, à partir d'observations présentant des tendances d'évolution dans le temps, des résultats apportant la même information que celle fournie pour des observations sans évolution, y compris l'estimation de l'incertitude inhérente à l'approche statistique. Les nouveaux développements engagés portent notamment sur l'utilisation de données issues des modèles simulant l'évolution climatique pour en déduire une information sur les aléas météorologiques. —



Mesure du déplacement sur une faille à la suite des séismes d'Italie centrale en 2016.

© IRSN



◀ Éboulement en masse de la falaise sur la RN1 dite route du littoral (La Réunion, mars 2006). © IFSTTAR

Impacts des risques naturels sur les réseaux d'infrastructures de transport

Les risques naturels peuvent impacter fortement les réseaux d'infrastructures de transport. Le gestionnaire doit anticiper ces risques, de manière à en prévenir les conséquences, tant sur les biens et les personnes que sur le fonctionnement même de son réseau.

Le territoire français est largement exposé aux risques naturels qui, malheureusement, font régulièrement la « Une » des informations nationales. Deux tiers des 36 000 communes françaises sont exposés à au moins un risque naturel.

Ces risques peuvent être liés aux mouvements de terrain (glissement, chute de blocs, éboulement, affaissement, effondrement de cavités souterraines...), à l'eau (inondation, crue torrentielle, submersion marine, ravinement, coulée boueuse...), aux séismes, aux avalanches, aux volcans et au retrait-gonflement des argiles. Ils apportent tous et régulièrement leur lot de catastrophes, tant sur les vies humaines que sur les biens et d'une manière générale sur les aménagements du territoire.

Parmi ces aménagements, les infrastructures de transports sont très développées en France ; elles sont multiples

et jouent un rôle essentiel, principalement en organisant les flux de voyageurs, de marchandises, d'énergies, d'informations... Elles contribuent à créer du lien entre les lieux, les hommes et leurs activités.

Ces infrastructures sont aussi très fortement exposées aux risques naturels, avec de nombreuses conséquences :

- endommagement ou destruction ponctuelle de l'infrastructure ;
- décès ou blessures d'usagers, de riverains ou de personnels de gestion et d'entretien du réseau ;
- conséquences économiques quant à la remise en état ou la reconstruction de l'infrastructure ;
- altération ou interruption de la fonction de transport de l'infrastructure. S'agissant d'infrastructures routières, les conséquences peuvent dans un premier temps empêcher l'arrivée des secours sur des zones sinistrées, le transport



Marianne CHAHINE
Cerema Infrastructures de Transport
et Matériaux, direction technique
du domaine Géotechnique
Marianne.Chahine@cerema.fr

des blessés, l'évacuation des sinistrés, puis, dans un deuxième temps, affecter l'économie locale tant que les possibilités de transport ne sont pas rétablies.

Ainsi, le gestionnaire d'un itinéraire (que ce soit dans le domaine routier, fluvial ou ferré, voire touristique, mais aussi dans le domaine de l'énergie...) se doit de connaître, sinon parfaitement, du moins de manière approfondie, l'intégralité de ses ouvrages (y compris les parades contre les risques, ainsi que les confortements déjà existants) afin de garantir la sécurité des usagers et une continuité de cet itinéraire.

Pour ce faire, il doit anticiper tous les risques pouvant survenir, ainsi que leurs impacts sur les usagers, allant d'une gêne légère (inconfort) à un impact physique pouvant avoir des conséquences graves. De la même façon, le gestionnaire doit pouvoir anticiper le coût d'une coupure d'itinéraire (partielle ou totale), le coût directement lié à la durée de cette interruption, ainsi que le coût des solutions d'aménagement et de confortement qui seront exécutées (études et travaux).

Malgré une politique volontariste de réduction des effets des risques naturels sur les personnes, les biens et les activités humaines, et malgré les développements issus de la recherche, il n'existe aujourd'hui pas de méthode opérationnelle normalisée permettant, à partir d'une série de données, de réaliser un diagnostic de vulnérabilité des infrastructures vis-à-vis de tous les risques naturels et de dérouler un plan d'actions qui permettra :

- d'améliorer la sécurité des personnes exposées ;
- de réduire les dommages aux réseaux et minimiser le coût de ces dommages ;
- d'améliorer (en raccourcissant le délai) le retour à la normale de la fonction « transport » du réseau.

Ainsi, chaque gestionnaire développe sa méthodologie propre pour mieux connaître les risques naturels pouvant impacter son réseau (cartographie et qualification des aléas, cartographie et qualification des enjeux), réaliser le diagnostic de vulnérabilité de ses infrastructures, concevoir et dérouler un plan d'actions (surveillance de sites, travaux de mise en sécurité, entretien des parades, mises en place...). À ce titre, il respectera les sept principes de la politique française de prévention des risques majeurs :

- la connaissance des phénomènes, de l'aléa et du risque ;
- la surveillance ;
- l'information préventive et l'éducation des populations ;
- la prise en compte des risques dans l'aménagement et l'urbanisme ;
- la réduction de la vulnérabilité ;
- l'anticipation de la crise ;
- le retour d'expérience. ■



SOLUTIONS TECHNOLOGIQUES POUR L'ENVIRONNEMENT

NIVEAU DEBIT QUALITE
EAUX SOUTERRAINES SUPERFICIELLES
SEDIMENTS MILIEU NATUREL
POLLUTION SITES
MONITORING ECHANTILLONNAGE
SOL EAU AIR

Instrumentation de mesure
pour la Surveillance Environnementale

NOUVEAU

**SONDE MULTIPARAMÈTRES
AQUA TROLL 500**



Maintenance **Minimale**

Stabilité de mesure

Système **Auto-Nettoyant**

Mesures **Ponctuelles**
ou raccord sur **Automate**

Ecran LCD
Visualisez l'état des capteurs

**SUIVI NIVEAU/DÉBIT DES EAUX
GAMME MACE**

Capteurs entièrement **personnalisables** :

Ultrason

Doppler

Sondes de pression

Qualité des eaux

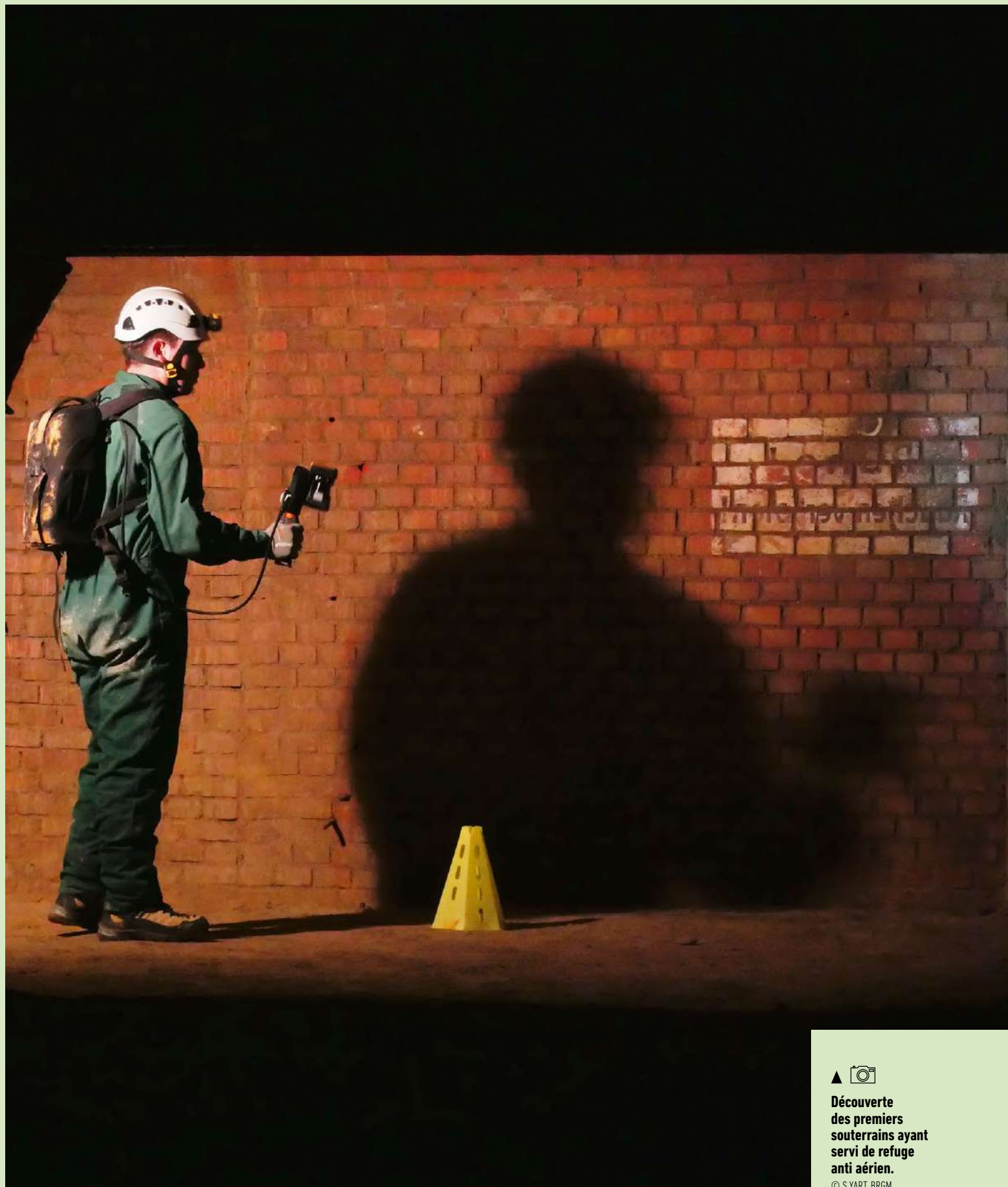


DÉCOUVREZ NOS ÉQUIPEMENTS

www.sdec-france.com

+ 33 2 47 94 10 00

info@sdec-france.com



**Découverte
des premiers
souterrains ayant
servi de refuge
anti aérien.**

© S.YART, BRGM



CARNET DE TERRAIN

À la recherche du bunker perdu

Deux spécialistes des mouvements de terrain du BRGM, Florian Masson et Silvain Yart, sont partis en mars 2018 examiner les souterrains d'une petite commune du sud de l'Alsace. Objectif : cartographier un réseau de galeries et un bunker, vestiges de la présence allemande lors de la Seconde Guerre Mondiale, qui peuvent menacer la stabilité des terrains de la commune. Récit.

MISSION EN **ALSACE**, AVEC **FLORIAN MASSON** ET **SILVAIN YART**

C'était un refuge souterrain durant la guerre.

Les dispositifs anti-déflagration y sont toujours présents, ainsi que les inscriptions allemandes intimant l'ordre de ne pas fumer ou de suivre les ordres des agents de police. Une vieille table y est abandonnée. L'atmosphère tempérée du lieu contraste avec la fraîcheur hivernale qui règne à l'extérieur. La raison de notre présence se trouve au-dessus de nos têtes. Une école a été construite un mètre à peine au-dessus de cet abri : si celui-ci venait à s'effondrer, c'est très certainement un impressionnant cratère – appelé fontis dans le jargon technique – qui s'ouvrirait dans la cour de l'établissement, ou sous une classe. C'est pourquoi, pour mieux identifier les zones à risque,

nous devons cartographier cette galerie et la repositionner par rapport aux bâtiments en surface.

Florian et moi avons mis les pieds pour la première fois en Alsace à la fin mars 2017. Notre unité venait tout juste de s'équiper d'un nouvel outil de cartographie des cavités souterraines : le ZEB-REVO. Cet appareil est un scanner laser 3D mobile, qui a révolutionné notre façon de travailler en nous permettant d'avoir enfin une idée précise de l'étendue, du volume et des zones de faiblesse des cavités souterraines. Loïc Grabenstaetter, ingénieur risques à l'antenne BRGM de Strasbourg, nous a demandé d'effectuer une démonstration de l'outil à l'occasion d'une réunion de restitution du projet qu'il

mène sur les cavités de la commune. Notre démonstration a, semble-t-il, été convaincante, puisque nous serons sollicités quelques mois plus tard pour revenir travailler dans le secteur.

Plusieurs effondrements d'ampleur ont eu lieu dans la petite ville ces dernières années. Celle-ci est en partie construite sur une colline de loess, un limon accumulé par le vent. Or, la butte, par nature friable, est parcourue de souterrains qui servaient de lieu de stockage pour du champagne et des aliments, puis d'abris anti-aériens durant la dernière guerre. Fragiles, ces derniers ont pu s'effondrer, ce qui pourrait être à l'origine des mouvements de terrain observés en surface. Le « hic » est qu'on ne les connaît sans doute pas



Silvain Yart, Florian Masson et un agent de Redbox improvisent un bureau pour traiter les premiers résultats, dans une galerie sous l'école.

© ERIC ZIPPER, REDBOX

tous. D'après des vieux plans allemands conservés aux archives, il existe tout un réseau de galeries enserrant un bunker qui servait de QG à l'armée allemande et qui n'a jamais pu être retrouvé. C'est cet entrelacs que l'on soupçonne d'être à l'origine des ennuis actuels et qu'il faut identifier.

– 05 MARS 2018

Nous arrivons en Alsace en fin d'après-midi.

Nous y retrouvons Loïc, accompagné d'Éric Zipper, gérant de la société REDBOX, et par ailleurs spéléologue, qui s'est pris de passion pour les souterrains de la ville. Ils sont affairés, avec l'équipe de REDBOX, à désobstruer une galerie récemment découverte par des forages de reconnaissance et rendue accessible par le creusement d'un puits depuis la surface. Une certaine frénésie règne sur le chantier. Et pour cause, à en croire les

plans d'archives, il s'agirait de l'une des galeries menant au bunker allemand dont tout le monde parle, mais qui n'a encore jamais été retrouvé.

Mais pour Florian et moi, la « chasse au bunker » devra attendre encore un peu, le temps que nos collègues fassent place nette dans les souterrains. En effet, les travaux ont pris du retard, la pluie a compliqué le travail en rendant la terre humide, ce qui bouche le tuyau permettant de remonter la terre en surface. Et surtout, la stabilité de la galerie est plus que précaire ; le moindre geste doit être effectué avec d'innombrables précautions.

Nous commençons donc par scanner la surface : la rue, les bâtiments, etc. Le modèle 3D de ces différents éléments nous servira à positionner très précisément les relevés souterrains par rapport aux relevés de surface. Notre binôme commence maintenant à être bien rôdé, et chacun sait ce qu'il a à faire : pendant que l'un de nous deux

dispose des cônes en plastique – qui serviront de point de repère dans les modèles 3D – et relève leur position au GPS, le second met en route le scanner et commence les mesures. L'acquisition consiste à parcourir la zone à modéliser avec le scanner à la main, en faisant attention évidemment à bien passer partout, avant de revenir au point de départ. Chaque session de mesure, ou « boucle », dure une vingtaine de minutes. Vue de l'extérieur, ce ballet paraît pour le moins incongru : imaginez un « type » affublé d'un attirail à la « Ghostbusters » déambulant de façon apparemment aléatoire dans la ville, en plein après-midi ! Évidemment, comme à chaque fois, les gens nous arrêtent, intrigués, et posent des questions sur notre activité et notre appareil. « À quoi cela sert ? », « Est-ce que cela permet de voir à travers la roche ? »... Les questions sont nombreuses et sont l'occasion d'expliquer notre travail aux riverains.

Rentrés à l'hôtel, nous déchargeons les données de l'appareil et lançons le traitement des enregistrements de la journée. Pendant que les algorithmes de traitement font leur travail, nous retrouvons Loïc pour discuter du programme du lendemain autour d'une bière locale. Si tout va bien, nous pourrions cette fois aller sous terre.

– 07 MARS 2018

Le chantier de désobstruction de l'hypothétique accès au bunker s'est poursuivi toute la journée du 6 mars, sans aboutir à l'objectif escompté.

Nous nous sommes donc cantonnés à poursuivre les relevés 3D en surface. Mais aujourd'hui, c'est le grand jour, l'accès est dégagé et nous pouvons enfin pénétrer dans le réseau de galeries. Celui-ci est constitué de plusieurs tronçons isolés auxquels on accède à quatre patte via des tuyaux en béton d'un mètre de diamètre installés au pied d'un talus. Ces accès débouchent dans des galeries d'une hauteur d'un mètre 50, creusées directement dans le loess. De longues racines très fines pendent du plafond, tels d'innombrables cheveux. Nous progressons courbés, en faisant attention de ne pas toucher aux murs et au plafond, très friables, qui pourraient s'effondrer. Le sable est partout, qui s'infiltre dans les narines. Ces galeries servaient également d'abri anti aérien : il reste encore des bouteilles, des fils, des chaussures abandonnées sur le sol. Les occupants semblent partis la veille. Rien n'a bougé depuis les années 1940.

On ne badine pas avec la sécurité et nous sommes accompagnés par une personne qui vérifie s'il n'y pas trop de CO₂ dans les galeries et qu'elles ne risquent pas de s'effondrer derrière

► LE ZEB-REVO

Il existe plus de 180 000 cavités recensées en France, d'origine naturelle ou créées par l'homme (carrières, tunnels, aqueducs souterrains...). Au fil de l'Histoire, elles ont souvent été oubliées. Afin d'éviter qu'elles ne s'effondrent et n'entraînent des maisons dans leur chute, il est nécessaire de les recenser et de les surveiller. C'est une des missions du BRGM, qui gère notamment la base de données nationale des cavités souterraines abandonnées.

L'organisme s'est doté depuis 2017 d'un ZEB-REVO, un scanner laser 3D mobile qui a véritablement changé la donne en matière d'évaluation des risques. Cet appareil apporte en effet une vision beaucoup plus exhaustive des cavités que les appareils classiques, qui sont statiques et n'offrent généralement qu'une vision partielle du terrain. Il permet de scanner en trois dimensions les cavités, y compris dans leurs moindres recoins, et d'avoir une idée précise de leur superficie. Il repère par exemple les vides souterrains, leur géométrie, leur volume, la hauteur des galeries. « Avant, nous pouvions simplement constater les choses visuellement. Aujourd'hui, nous pouvons ramener ces données pour les évaluer et travailler dessus de façon beaucoup plus précise, explique Silvain Yart, ingénieur risques naturels, spécialiste des cavités. Nous pouvons par exemple repérer le début d'une instabilité avant qu'elle ait atteint la surface, dès que son toit commence à s'effondrer. »

Autre intérêt, l'appareil acquiert les données beaucoup plus rapidement que les autres appareils existants, ce qui le rend très intéressant économiquement. « Avec le ZEB-REVO, on peut scanner dix hectares de carrière en quelques jours, alors qu'avant cela prenait des mois. Il rend possible des actions qui n'étaient financièrement pas possibles auparavant ». En 2018, par exemple, 30 hectares de terrain dans la Vienne ont été scannés en trois semaines dans le cadre d'un plan de prévention des risques.



— — —
« Il reste encore des bouteilles, des fils, des chaussures abandonnées sur le sol. Les occupants semblent partis la veille. Rien n'a bougé depuis les années 1940. »
 — — —

nous. Nous sommes également équipés d'un détecteur de gaz, dont le bip constant, seul bruit audible dans cet univers silencieux, nous stresse un peu.

Nous commençons alors à scanner les galeries. Silvain part en repérage pour identifier les points qui risquent de poser problème. Le ZEB-REVO a beau être un outil redoutablement efficace, il a néanmoins ses petites faiblesses que nous avons appris à anticiper avec l'expérience. En l'occurrence, c'est le manque de points de repère dans les tuyaux en béton, bien lisses et bien rectilignes, qui gêne l'algorithme en charge de reconstruire le modèle 3D. Il faudra y aller doucement. Florian commence à scanner. Il s'agit ici, comme à l'extérieur, de faire le tour de la galerie en avançant lentement et en veillant à explorer les moindres recoins. La même opération est répétée pour chaque souterrain. En tout, nous passons en revue quatre galeries dans la journée. Le poids du scanner, porté à bout de bras, commence à se faire sérieusement sentir en fin de journée.

De retour à l'hôtel, comme chaque soir, on lance le traitement des données du jour. Après un repas où on ne peut s'empêcher de parler de la mission, vient enfin le moment de découvrir les premiers résultats de nos investigations souterraines. Les différents tronçons de galeries scannés se positionnent les uns

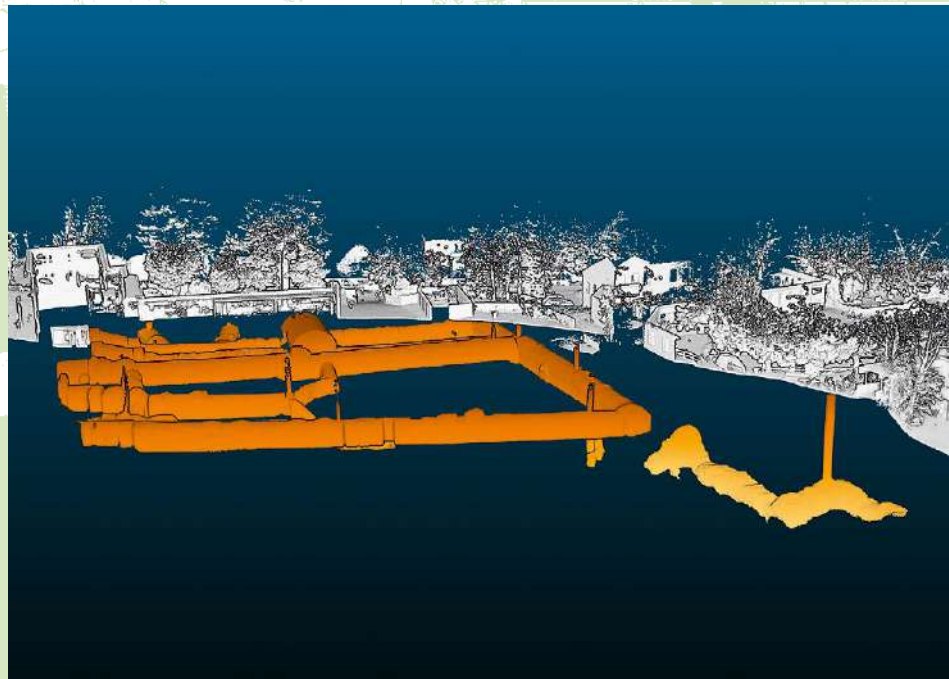
par rapport aux autres pour redessiner, en 3D, une partie du réseau figurant sur l'ancien plan. En particulier, les relevés 3D confirment que la galerie qu'on a tenté de désobstruer au début de la mission se dirige bien vers l'emplacement du bunker. Mais celui-ci reste encore à découvrir, tout comme une grande partie des souterrains reportés sur le plan d'ailleurs.

08 MARS 2019

Pour notre dernier jour sur place, deux nouvelles galeries, plus larges que la veille, sont explorées.

Dans l'une d'elles, nous retrouvons le débouché d'un des deux puits d'accès forés quelques mois auparavant. Éric

▲ **Modélisation de la surface et d'une partie des cavités obtenue grâce au laser 3D.** © BRGM



nous raconte son étonnement lorsqu'il est descendu le premier dans le forage. Il s'attendait à tout, sauf de ressortir par une petite porte dans le jardin d'un riverain !

Cette même galerie nous a d'ailleurs réservé une petite difficulté technique, puisqu'elle comporte une cheminée remontant vers la surface sur quelques mètres avant de repartir à l'horizontale. Avec l'aide d'un membre de l'équipe REDBOX, qui escalada la cheminée, nous parvenons à scanner l'ouvrage souterrain dans ses moindres recoins, y compris les plus inaccessibles. En fin de journée, nous profitons du temps qu'il nous reste pour réaliser quelques clichés de ces souterrains à l'ambiance si particulière.

Le lendemain, nous reprenons la route pour Orléans, avec dans nos valises quelques gigaoctets de données à interpréter et, surtout, l'espoir de revenir un jour poursuivre l'exploration des mystérieux souterrains. ●



Florian Masson
circule à travers
un secteur
effondré de
la galerie avec
le ZEB-REVO.

© S.YART, BRGM

ANRN 2019

ASSISES NATIONALES DES RISQUES NATURELS 25/26.03.2019

Le BRGM participe aux Assises nationales des risques naturels (ANRN), organisées par le ministère de la Transition écologique et solidaire, les 25 et 26 mars 2019 à Montpellier. Celles-ci réunissent tous les acteurs de la prévention des risques naturels pour échanger sur l'état de la situation et les perspectives de réduction des catastrophes.

Le fil rouge de l'édition 2019 est « l'adaptation des territoires pour une société résiliente ».

→ [HTTPS://WWW.ANRN2019.FR](https://www.anrn2019.fr)



▲ La flèche sableuse du Cap Ferret.

© OLIVIER CHALDEBAS, OBSERVATOIRE DE LA CÔTE AQUITAINE

◀ Dégâts suite au glissement de Gazost.

© ISABELLE BOURULLEC, BRGM



CHANGEMENT CLIMATIQUE

LES TRAVAUX DU BRGM CITÉS PAR LE GIEC

Le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) a publié en octobre 2018 un rapport relatif aux conséquences d'un réchauffement climatique de 1,5°C par rapport à la période préindustrielle. Dans le cadre de son audition au Sénat en octobre dernier, Valérie Masson-Delmotte, co-présidente du groupe de travail, a souligné le travail du BRGM. Elle a ainsi déclaré que les chercheurs de l'organisme étaient en mesure d'affiner les connaissances sur le niveau d'élévation des océans et ses incidences sur les territoires.

→ [HTTPS://WWW.ECOLOGIQUE-SOLIDAIRE.GOUV.FR/TRAVAUX-DU-GIEC](https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/travaux-du-giec)

BRGM ET IPGP

UNE COOPÉRATION RENFORCÉE

Un premier accord-cadre, d'une durée de 4 ans, a été signé le 18 janvier entre le BRGM et l'Institut de physique du globe de Paris. Il institutionnalise une coopération scientifique déjà riche entre les deux établissements, qui porte tant sur la recherche que sur l'enseignement. Ce partenariat va permettre d'accélérer la collaboration en matière de suivi des risques volcaniques et sismiques et de recherche en géosciences.

→ [HTTP://WWW.BRGM.FR/PUBLICATION-PRESSE/BRGM-IPGP-RENFORCENT-LEUR-COOPERATION-MATIERE-RISQUES-NATURELS-RECHERCHE](http://www.brgm.fr/publication-presse/brgm-ipgp-renforcent-leur-cooperation-matiere-risques-naturels-recherche)



Michèle Rousseau,
P.-D.G. du BRGM, et
Marc Chaussidon,
directeur de l'IPGP.

© BRGM

ESPRESSO : UNE SUITE À SENDAI ?

Le projet de recherche européen ESPRESSO (2016-2018) a rendu ses conclusions. Ce consortium constitué de 7 partenaires européens, dont le BRGM, visait à contribuer à une nouvelle vision stratégique pour aborder la réduction des risques naturels et l'adaptation au changement climatique. Deux documents ont été produits à l'issue du projet fin 2018. Ceux-ci proposent des lignes directrices pour la gestion des risques et une vision sur les futures stratégies de recherche. Optique : mieux définir les priorités de recherche suite au Cadre d'action de Sendai pour la réduction des risques de catastrophe 2015-2030.

→ [HTTP://WWW.ESPRESSOPROJECT.EU](http://www.espressoproject.eu)



Tempête Johanna, Le Conquet.

© STEVEN LAMARCHE

CYCLONE

SPICY, PRÉVENIR LES INONDATIONS D'ORIGINE CYCLONIQUE

Prévenir les inondations liées aux cyclones tropicaux, tel est l'objectif de Spicy. Ce projet ANR (2014-2018), mené sur l'île de La Réunion, a réuni cinq partenaires sous coordination BRGM. Il s'est articulé autour de l'amélioration des prévisions météo, leur déclinaison en prévision des conditions marines et hydrologiques, jusqu'à l'estimation des inondations sur le territoire. Il a permis de fournir aux acteurs locaux des premiers outils d'anticipation et de gestion de crise.

→ [HTTP://WWW.AGENCE-NATIONALE-RECHERCHE.FR/PROJET-ANR-14-CE03-0013](http://www.agence-nationale-recherche.fr/projet-anr-14-ce03-0013)





BRGM FORMATION

Au plus près des besoins des entreprises, des bureaux d'études et d'ingénierie, des administrations et des services décentralisés de l'État, des collectivités...

6 THÈMES DE FORMATION :

- Géologie
- Ressources en eau souterraine
- Géothermie
- Mines, carrières, après-mine
- Environnement et aménagement durable
- Risques naturels, impacts du changement climatique

Renseignements et inscriptions :
<http://formation.brgm.fr>



brgmformation

60 brgm
Depuis 60 ans,
innover pour être au cœur
des enjeux de demain

HORS SÉRIE

LES GÉOSCIENCES AU CŒUR DES ENJEUX DE DEMAIN

Abonnez-vous à Géosciences
sur www.brgm.fr



Géosciences pour une Terre durable

brgm

SIÈGE - CENTRE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE

3, avenue Claude-Guillemin
BP 36009 - 45060 Orléans Cedex 2 - France
Tél. : (33) 2 38 64 34 34 - Fax : (33) 2 38 64 35 18



ACCÉDEZ AU SITE WEB
EN FLASHANT CE QR CODE

