HAL
open science

Gérer les risques naturels : pratiques et outils

Frédéric Leone, Freddy Vinet

To cite this version:

Frédéric Leone, Freddy Vinet. Gérer les risques naturels : pratiques et outils. Presses universitaires de la Méditerranée, 202 p., 2017, Géorisques, 978-2-36781-243-4. hal-03194144

HAL Id: hal-03194144

https://hal.science/hal-03194144

Submitted on 9 Apr 2021

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Gérer les risques naturels : pratiques et outils

Collection « Géorisques »

Directeurs de collection :
Frédéric Leone, Freddy Vinet

Comité scientifique :
Albert Colas, Stéphanie Defossez, Monique Gherardi, Frédéric Leone,
Nancy Meschinet de Richemond, Mathieu Péroche, Tony Rey, Freddy Vinet

La collection « Géorisques » est une publication annuelle consacrée à la géographie des risques naturels. Les numéros thématiques privilégient les approches méthodologiques, ce qui n'exclue pas de publier des numéros consacrés à des terrains spécifiques : littoraux, montagneux ou îliens.

Les ouvrages de la collection regroupent des articles sélectionnés suite aux rencontres « Géorisques » organisées dans le cadre du master *Gestion des Catastrophes et des Risques Naturels* (G.C.R.N.) de l'université Paul-Valéry. La publication bénéficie également du soutien de l'U.M.R. GRED (Gouvernance, risque, environnement, développement).

L'objectif de la collection est de confronter les approches des chercheurs et des praticiens sur des problématiques récentes.

Gérer les risques naturels : pratiques et outils

Sous la direction de Frédéric Leone & Freddy Vinet
(université Paul-Valéry Montpellier 3)

GÉORISQUES n° 7
2017
Presses universitaires de la Méditerranée

Les directeurs de la collection remercient l'Ird pour le soutien apporté à ce numéro.

Illustration de couverture :
Crédits photo U.M.R. GRED (Mathieu PÉROCHE). « Planification et exercice d'évacuation tsunami en Martinique. Résultats du projet EXPLOIT développé par l'U.M.R. GRED de l'UPVM3 en partenariat avec la Fondation de France ».

Mots-clés :
Risques naturels, retours d'expérience, gestion, prévention, catastrophes, cartographie.

Tous droits réservés, PULM, 2017.

ISBN 978-2-36781-243-4

Sommaire

Éditorial : Gérer les risques naturels : pratiques et outils
Frédéric Leone & Freddy Vinet 9

Chapitre 1 — Retours d'expérience

1 *Le risque de tsunami à Mazagan — El Jadida (Maroc) : réévaluation des sources documentaires historiques évoquant le séisme et le tsunami de 1755*
Nancy Meschinet de Richemond 13

2 *Impacts des aménagements portuaires sur l'environnement côtier. Le cas des deux ports Bouzedjar et Béni-Saf, Algérie*
Tarik Ghodbani 25

3 *Exposition sociale face aux séismes : la mobilité en question. Le cas de Lorca (Espagne) — Mai 2011*
Marc Bertran Rojo, Elise Beck, Céline Lutoff & Philippe Schoeneich 35

4 *La reconstruction post-catastrophe : retour d'expérience sur la tornade du 3 août 2008 dans le nord de la France*
Annabelle Moatty & Freddy Vinet 47

5 *L'impact des laves torrentielles sur les réseaux de communication : l'exemple du Rif Blanc (Alpes françaises)*
Marina Utasse, Vincent Jomelli & Frédéric Leone 61

6 *Le risque hydrogéologique en zone urbaine : cas de la ville d'Oran (Algérie)*
Hamidi Mansour, Atalah Chenafi & Mohamed Kennane 71

Chapitre 2 — Pratiques de gestion

7 *Mémoire des catastrophes socio-environnementales dans la société japonaise. Retour d'expérience et révision des mesures de prévention dans le Kansai, l'ouest du Chūbu et le sud est de la péninsule de Kii*
Grégory Beaussart 81

8 *Accepter ponctuellement et partiellement la submersion marine pour mieux en maîtriser les risques. Évolution de la perception et de la gestion des risques par les ingénieurs techniciens anglais et néerlandais*
Servane Gueben-Venière 91

9 *Perception de la cartographie hydrogéomorphologique en France et perspectives d'évolution*
Antonin Montané & Freddy Vinet 99

10 *Vers une approche collaborative entre assureurs et acteurs publics pour l'amélioration des connaissances sur les dégâts causés par les inondations*
David Bourguignon 105

11 *La résilience en question(s)*
Serge Lhomme 115

Chapitre 3 — Outils de gestion

12 *Accidents technologiques induits par une inondation (phénomène Natech) : développement de scénarios génériques*
Carine El Hajj, Éric Piatyszek, Alicja Tardy & Valérie Laforest 125

13 *L'alerte aux tsunamis en Méditerranée occidentale et en Atlantique Nord-Est*
Emmanuel Gutierrez-Martinez, Adeline Damicis, Bruno Hernandez, Anne Loevenbruck, Audrey Gailler, Pascal Roudil, Hélène Hébert & François Schindelé 135

14 *Développer une application Smartphone face aux inondations rapides : le jeu en vaut-il vraiment la chandelle ?*
Johnny Douvinet, Jules Sekedoua Kouadio & Loïc Grasland 143

Chapitre 4 — Spatialiser le risque

15 *La cartographie du risque glissements de terrain sur le flanc sud-est de l'atlas tellien, NE Algérie*
Riheb Hadji. 155

16 *Évaluation de la susceptibilité aux mouvements de terrain par approche probabiliste. Application à la zone méditerranéenne entre Jebha et Oued Laou*
Mohamed Mastere, Brigitte Van Vliet-Lanoë & Lahcen Ait Brahim 169

17 *Les risques d'inondation dans la région du Xinjiang (Chine) : le cas du bassin versant du Karakash*
Maihepireti Wulamu 179

18 *Modélisation de la dispersion atmosphérique par une approche combinée par automate cellulaire et réseau de neurones*
Pierre Lauret, Frédéric Heymes, Laurent Aprin, Anne Johannet & Gilles Dusserre 189

Éditorial — Gérer les risques naturels : pratiques et outils

Frédéric Leone & Freddy Vinet
U.M.R. GRED/Université Paul-Valéry Montpellier 3 &
I.R.D., Route de Mende, 34199, Montpellier.
Frederic.Leone@univ-montp3.fr
Freddy.Vinet@univ-montp3.fr

La gestion des risques de catastrophes naturelles, dont l'équivalent anglais le plus proche est la *Disaster Risk Reduction* (DRR), repose sur un ensemble d'actions et dispositifs mettant en œuvre une multitude de pratiques, d'acteurs et d'outils. Elle peut se concevoir comme une succession de trois cycles temporels emboités, dont les transitions se mettent en place avant ou après une phase d'impact induite par la manifestation d'un phénomène naturel dommageable (figure 1). Le premier **cycle est celui de la prévention** qui s'étend sur des temps longs et qui intègre une phase de diagnostic de risque. On y retrouve toutes les mesures préalables à la catastrophe dont elles cherchent à réduire les effets, faute de pouvoir l'éviter. Le second est le **cycle de la crise**, période de tensions, parfois extrêmes, qui confronte les gestionnaires à une dilation des espaces touchés et à une contraction du temps de la décision caractéristiques. Il prend naissance à partir du moment où la prévention échoue, au moins partiellement, et s'amorce par une phase de vigilance accrue fondée sur la surveillance. Ce cycle agit sur un temps beaucoup plus court avec des sous phases de pre-crise, de crise proprement dite, et de post-crise. Le moment de l'impact et des dommages associés plonge le gestionnaire dans une phase d'urgence progressivement relayée par un nouveau et troisième cycle, **celui de la reconstruction** post-catastrophe. Ce dernier commence par une période de restauration et s'achève par une phase de reconstruction développementale qui peut s'étaler sur des décennies et qui devrait constituer une fenêtre d'opportunités pour reconstruire en mieux, en plus durable et plus résilient, selon les principes et l'éthique du *Build Back Better (BBB)*, et contribuer ainsi à renforcer un nouveau cycle de prévention qui gagnerait à intégrer ce *BBB* dans son processus de planification de la reconstruction post-désastre.

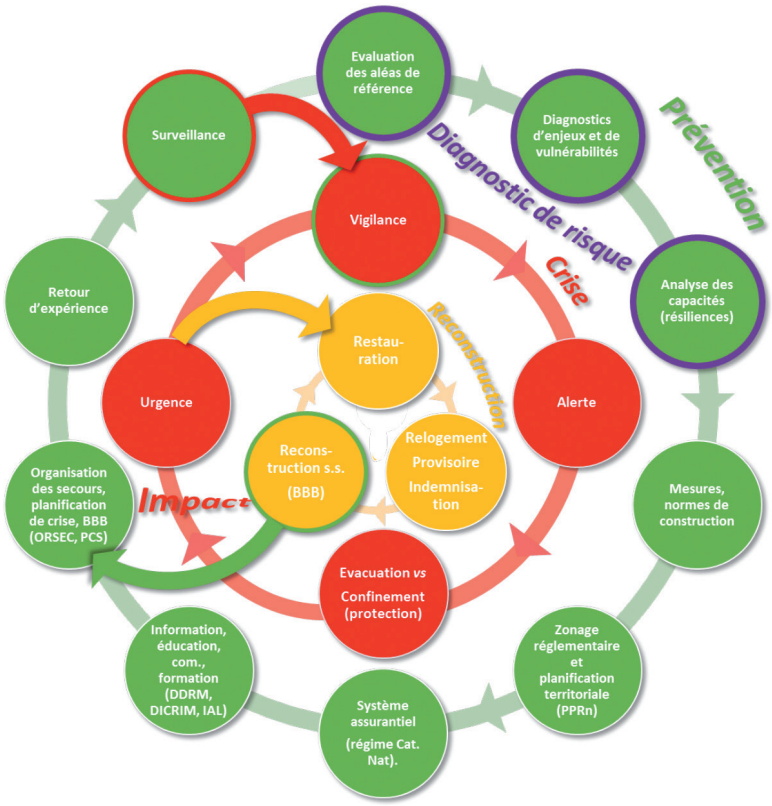


Fig. 1. — Les trois cycles emboîtés de la gestion globale des risques naturels (F. Leone & F. Vinet).

Les articles rassemblés dans ce septième numéro de la collection « Géorisques » viennent éclairer et illustrer certains aspects de cette gestion globale des risques, des crises et des reconstructions post-catastrophes d'origine naturelle, telle que nous la concevons en géographie des risques. Nous avons fait le choix d'organiser ce volume en quatre parties. La première est consacrée à des retours d'expériences, processus d'apprentissage et de compréhension d'une crise ou d'une catastrophe, clé de voute de l'amélioration de nos dispositifs de prévention et de l'expertise des risques. Ces RETEX peuvent être réalisés très longtemps après les catastrophes pour en revisiter les conséquences à partir de la réévaluation des témoignages, comme le fait ici Meschinet De Richemond pour le tsunami de 1755 sur la ville d'El Jadida au Maroc. Ils permettent aussi de comprendre les impacts à moyen terme de certains aménagements portuaires sur l'environnement côtier en prenant pour exemple deux ports algériens présentés par Ghodbani. Rojo *et al.* mobilisent par ailleurs le retour d'expérience de façon tout à fait originale pour reconstituer dans le temps et l'espace les parcours d'activité de survivants au moment du séisme de Lorca en Espagne. Moatty et Vinet, tout comme Utasse *et al.* exploitent des évènements dommageables (tornade et lave torrentielle) pour en suivre les répercussions indirectes, respectivement en matière de processus de reconstruction dans le nord de la France, et en terme de pertes d'accessibilité routière dans les Alpes. Enfin, Mansour *et al.* mènent sur Oran un RETEX technique visant à comprendre les mécanismes d'endommagement du bâti et des infrastructures majeures soumises à divers aléas géotechniques.

La seconde partie de cet ouvrage s'intéresse à certaines pratiques de gestion et de représentation des risques dans des environnements géographiques différents. Beaussart présente les stratégies d'adaptation, technologiques mais surtout humaines, qui ont évolué et se sont diversifiées au fil du temps pour mener au système de gestion actuel du risque socio-environnemental au Japon. De telles stratégies sont également présentées par Gueben-Venière dans le cadre d'une approche comparative menée entre l'Angleterre et les Pays-Bas vis-à-vis du risque de submersion marine. Montané et Vinet développent par ailleurs une analyse des atouts, faiblesses et perspectives de la méthode hydro-géomorphologique telle qu'elle est pratiquée en France pour la définition des zones inondables. Quant à lui, Bourguignon explique et démontre l'intérêt du partage d'informations entre assureurs et acteurs locaux pour améliorer les connaissances sur la sinistralité et proposer des pistes d'amélioration dans la prévention des inondations. Enfin, Lhomme nous livre une réflexion sur le concept de résilience des territoires, et étudie son application pour la gestion des risques.

La troisième partie de ce numéro présente des outils modernes de gestion des risques faisant appel à de nouveaux concepts et à de nouvelles technologies. El Hajj *et al.* décrivent une méthode d'analyse de risque d'accidents décrivant l'ensemble des causes techniques et des conséquences d'un évènement natech inondation. Le dispositif d'alerte tsunami, nouvellement crée en Méditerranée occidentale et en Atlantique Nord-Est, est par ailleurs présenté par Gutierrez-Martinez *et al.* Enfin, Douvinet *et al.* abordent dans un dernier article les intérêts et limites des technologies smartphone pour améliorer les connaissances et les prévisions des inondations rapides.

La quatrième partie de ce volume apporte une dimension spatiale aux outils de prévention en présentant trois études de cas mettant en avant la cartographie. Les deux premières portent sur l'évaluation de la susceptibilité aux mouvements de terrain au moyen d'approches déterministes ou probabilistes, respectivement sur le flanc sud-est de l'atlas tellien en Algérie (Hadji *et al.*) et dans la région du Rif au Maroc (Mastere *et al.*). La cartographie hydro-géomorphologique, d'inspiration française, est également mobilisée par Maihepireti Wulamu, dans le cadre d'un transfert de méthode pour évaluer le risque d'inondation dans la région du Xinjiang en Chine. Le dernier article, présenté par Lauret *et al.*, est une contribution méthodologique inédite basée sur la combinaison des automates cellulaires avec des règles de transition de type réseau de neurones afin de modéliser la dispersion atmosphérique de méthane en deux dimensions. Elle laisse entrevoir de nouvelles applications dans le champ des risques natech (naturels-technologiques).

Chapitre 1
Retours d'expérience

1 Le risque de tsunami à Mazagan — El Jadida (Maroc) : réévaluation des sources documentaires historiques évoquant le séisme et le tsunami de 1755

Nancy Meschinet de Richemond
Département de géographie, Université Paul-Valéry Montpellier 3.
UMR GRED, centre IRD France Sud Montpellier, BP 64501, 34394 Montpellier cedex 5
nancyderichemond@online.fr

Résumé. — Le séisme et le tsunami du 1er novembre 1755, qui détruisirent Lisbonne et touchèrent les côtes marocaines, eurent un retentissement européen et ont fait l'objet de nombreux écrits jusqu'au XXe siècle. Depuis 2005, l'essor de modélisation de tsunami s'accompagne d'un besoin accru de données historiques réelles et fiables afin de contrôler et valider les simulations proposées. Un réexamen de sources historiques (en français, anglais, espagnol et portugais) a été mené dans le cadre du programme de recherche MAREMOTI, pour le site de Mazagan-El Jadida. L'amplitude du tsunami de 1755 réévaluée par Blanc, 2009 (1,90 à 2,30 m à El Jadida) paraît beaucoup plus crédible que la valeur extrême (75 pieds) rapportée par un contemporain (Soyris, 1755). Mais le contexte culturel et historique de production des informations anciennes doit être interrogé : le risque d'anachronisme dans l'interprétation de textes anciens peut conduire à une mauvaise évaluation de la fiabilité de certaines données chiffrées.
Mots-clés. — tsunami de 1755, Maroc, données historiques, anachronisme, contexte culturel et historique.

Title. — *Risk of Tsunami in Mazagan – El Jadida (Morocco) : Revaluation of Historical Documents About the 1755 Tsunamigenic Earthquake*
Abstract. — *The November 1st, 1755 earthquake and tsunami destroyed Lisbon (Portugal) and damaged the coasts of Morocco. This event remains the most commented historical tsunami in the North East Atlantic area. After 2005, numerical modeling of tsunami needs more and more real and reliable historical data to control the simulations. A critical analysis and revaluation of historical documents (in French, English, Spanish and Portuguese) have been realized during the MAREMOTI program for the city of Mazagan-El Jadida (Morocco). The amplitude of the tsunami revalued by Blanc, 2009 (from 1,90 to 2,30 m in El Jadida) seems much more credible than the extreme value (75 feet) given by a contemporaneous (Soyris). But historical and cultural context must be interrogated in order to clarify the generation of old informations : risk of anachronism in the study of old documentary sources may lead to wrong appraisal about the reliability of numerical old data.*
Keywords. — *1755 Tsunami, Morocco, Historical Data, Anachronism, Historical and Cultural Context.*

Introduction

Le séisme et le tsunami du 1er novembre 1755, qui toucha les côtes portugaises et marocaines, a fait l'objet de nombreux écrits et commentaires à l'époque et jusqu'au XXe siècle. La destruction de Lisbonne a fortement marqué les contemporains : en ce milieu de XVIIIe siècle, le développement des gazettes permit une diffusion de l'information à l'échelle européenne, jamais atteinte auparavant pour une catastrophe naturelle. Les modèles de simulation numérique de tsunami se développent aujourd'hui de plus en plus grâce aux progrès techniques et informatiques (SIG, MNT) et suite à la prise de conscience du risque qui a suivi l'évènement du 26 décembre 2004 en Indonésie. Cet essor des modèles s'accompagne d'un besoin accru de données historiques réelles et fiables afin de contrôler et valider les simulations proposées.

Dans cette perspective, Blanc (2009) propose une analyse critique d'un corpus documentaire significatif pour montrer, d'une part la confusion faite dans de nombreux récits entre le séisme tsunamigène du 1er novembre 1755 et un séisme rifain des 18-19 (selon les documents européens) ou 27-28 novembre (selon les documents marocains) de la même année, et d'autre part la surestimation du tsunami sur les côtes marocaines : la confusion entre les deux séismes décrédibilisait les témoignages ou interprétations modérées sur l'inondation, et favorisa une interprétation « maximaliste » des données disponibles, surestimation transmise ensuite au cours des siècles dans la littérature savante faute d'un retour critique aux sources initiales. Effectivement, une des sources primaires disponibles relatant le séisme du 1er novembre 1755 évoque trois vagues successives de plus de 24 m (figure 2) : la lettre de monsieur Soyris écrite à Marrakech (figure 1) le 5 novembre 1755 (soit 4 jours après le séisme et 7 jours après son arrivée dans la ville), rapporte, après d'autres informations précises conformes aux autres témoignages (comme l'heure — 9h39 — et la durée — 8 minutes — de la secousse), une donnée de hauteur d'eau de 75 pieds (soit 24,36 m) : « On marque des villes de la marine que la mer a augmenté pendant 3 fois de soixante et quinze pieds, tellement que la garnison portugaise a Mazagan avoit été dans la necessité d'abandonner la Ville (…) » (Soyris, 1755).

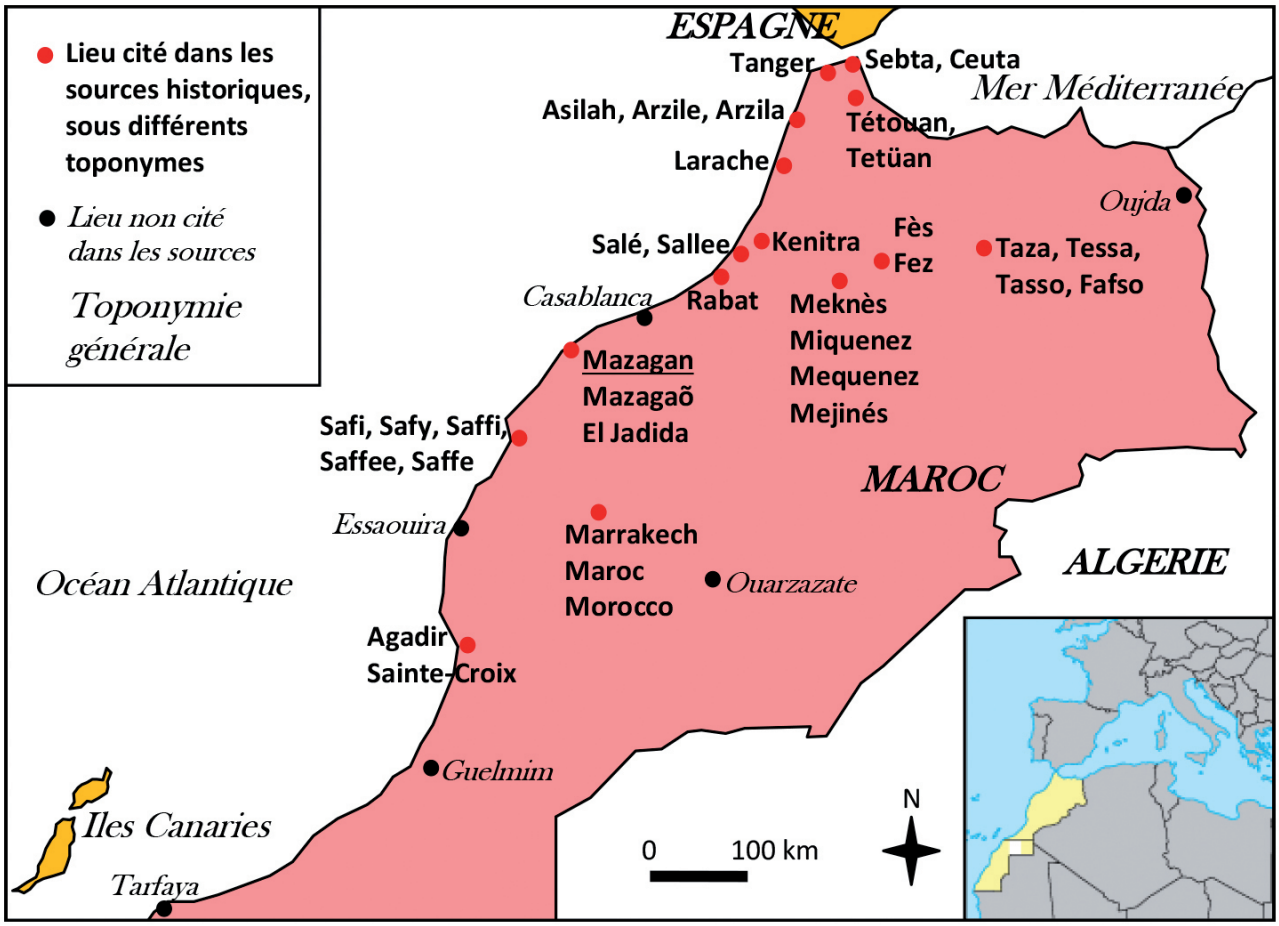


Fig. 1. — Croquis de localisation des lieux cités (d'après Blanc, 2009, modifié).

Mais contrairement à ce témoignage, l'analyse critique de Blanc l'amène à considérer que l'amplitude du tsunami du 1er novembre 1755 au Maroc ne doit pas avoir dépassé celle atteinte à Cadix (Blanc, 2008) soit 2,50 m au dessus de la marée astronomique (vague de 5 m de creux au plus).

Cet article reprend le réexamen critique de sources historiques françaises, anglaises, espagnoles et portugaises réalisé dans le cadre du programme ANR MAREMOTI (Leone *et al.*, 2012) pour le site de Mazagan-El Jadida (figures 3 et 4). Une source importante (Anonyme, 1755) ne figure pas dans le corpus examiné par Blanc (2009). Cette étude ne doit pas être considérée comme exhaustive (l'examen de sources en arabe reste encore à réaliser) mais permet cependant d'apporter quelques compléments aux analyses antérieures : si les valeurs chiffrées qu'il propose pour corriger la surestimation historique de l'amplitude du tsunami sur les côtes marocaines (1,90 à 2,30 m à El Jadida) paraissent beaucoup plus proches de la réalité que la valeur extrême issue de la lettre de Soyris (1755), certains aspects du raisonnement sont incomplets ou discutables, de nature à minimiser peut-être un peu trop les valeurs à intégrer dans un scénario de risque tsunami (une hypothèse de l'ordre de 5 m paraîtrait plus crédible). Il semble en effet important de compléter les travaux antérieurs en s'intéressant notamment au contexte culturel et historique au sein duquel les témoignages de l'époque doivent être compris : le risque d'anachronisme dans l'interprétation de textes anciens peut conduire au contresens ou à une mauvaise évaluation de la valeur/fiabilité de certaines données chiffrées. La place des informations présentées dans une lettre dépend aussi du système de valeurs partagé par l'auteur et le destinataire : ces informations ne doivent donc pas être extraites sans précautions de leur contexte, ni interprétées telles quelles à travers notre système de valeur/nos schémas d'analyse contemporains (Chouquer, 2008). En particulier, il faut souligner que nous ne sommes pas au XVIIIe siècle au Portugal (comme en Espagne ou en France) dans une société laïque, dans laquelle « l'objectivité », la « science » signifie implicitement une coupure radicale entre l'objet étudié et l'observateur, et l'absence de toute action ou dessein divin (Meschinet de Richemond, Reghezza, 2010).

1.1 Nécessité de préciser le contexte implicite de rédaction des sources

1.1.1 Un contexte culturel et religieux difficile à appréhender

Les explications divines des catastrophes naturelles dominent jusqu'au XVIIe siècle. Mais si les causes ou processus invoqués sont inexacts, les archives contiennent beaucoup d'informations indirectes utiles à l'interprétation des témoignages et des chiffres rapportés (contexte culturel et social, mentalités). Encore faut-il les voir et s'y arrêter sans les écarter *a priori* : leur intérêt ne réside pas toujours dans la véracité des faits ou chiffres rapportés mais dans la manière dont ils

témoignent de la familiarité des sociétés avec leur environnement et de la manière dont elles tissent et préservent ce lien. Une catastrophe naturelle n'est alors pas perçue comme une rupture insupportable dans le temps historique. C'est au contraire, en tant qu'épreuve ou punition envoyée par Dieu, une occasion majeure pour une société monarchique chrétienne de réaffirmer sa nature immuable.

Une vision du monde marquée par la relation à Dieu

Dans les sociétés européennes du XVIIe-XVIIIe siècle la conception de l'État monarchique et de la nature s'inscrit dans une vision du monde encore largement marquée par la relation à Dieu : l'ordre et les faits naturels relèvent d'une volonté divine. La hiérarchisation stricte de la société en ordres et corps constitués est considérée comme le reflet de cette volonté. N'étant pas dans une société laïque, le risque majeur est alors la damnation éternelle et la « vulnérabilité » par excellence correspond à la fragilité des humains face au Diable, au péché. C'est l'avènement d'une société de citoyens et non plus de sujets du roi, d'une conception — issue de la philosophie des Lumières — de l'humain comme extérieur à la nature qui permet de définir la vulnérabilité et la résilience dans le sens que nous leur donnons aujourd'hui.

Un prisme moderne difficile à dépasser

Considérer que Dieu est à l'origine des catastrophes naturelles n'est pas synonyme de fatalisme et de passivité. Le croire constitue un anachronisme et un contresens, où le chercheur projette sur le passé le prisme culturel « moderne » dans lequel il baigne (Chouquer, 2008). Ce prisme pose que le progrès est une évolution linéaire (à quelques accidents près) et toujours ascendante, ce qui rend très difficile de reconnaître que nos ancêtres puissent avoir mis en place (aussi bien, voire mieux que nous) des mesures de gestion des phénomènes naturels dommageables. Ce prisme pose également que l'être humain est séparé de la nature, qu'il lui est supérieur et qu'il la maîtrise(ra) de plus en plus, de mieux en mieux. Cette coupure nette entre les humains et la nature, issue de la Modernité, conduit à fonder la démarche scientifique sur la séparation entre l'observateur et l'objet observé, c'est l'objectivité scientifique. Chouquer (2008) montre combien croire à cette objectivité, c'est-à-dire prétendre à une analyse débarrassée des artéfacts humains de l'observateur, marque le début des sciences en tant que disciplines. Celles-ci s'individualisent et se spécialisent de plus en plus, élaborent leur méthodologie, leur corpus et renforce leur identité à travers la (ré) écriture de leur propre histoire. Ce processus conduit à des approches de plus en plus sectorielles et à une théorisation qui se développe au détriment de l'empirisme pragmatique qui prévalait auparavant. Il passe souvent inaperçu car nous épousons facilement aujourd'hui le point de vue disciplinaire qui a prévalu, oubliant que ce dernier n'est pas seulement le reflet de découvertes indiscutables, de démonstrations avérées, mais est aussi le fruit d'une lente construction sociale et humaine, de conflits entre acteurs aujourd'hui oubliés. L'histoire des sciences n'est pas un processus neutre sans incidence sur les contenus scientifiques eux-mêmes.

1.1.2 Une confrontation documentaire particulièrement riche

Le tableau 1 présente les principaux documents analysés pour cette étude (Leone *et al.*, 2012). Les autres documents utilisés ne présentent pas une utilité directe pour la connaissance du tsunami à Mazagan-El Jadida, soit parce le tsunami n'est pas directement évoqué, soit parce les propos ne concernent pas Mazagan ou les côtes marocaines. Leur intérêt est essentiellement contextuel : ils illustrent la manière dont les informations sur le séisme tsunamigène du 1er novembre 1755 ont été diffusées en Europe, à travers les copies successives et/ou croisées (parfois entachée d'erreurs de transcription ou de traduction).

Les documents primaires ont largement nourri les récits des gazettes et les débats des sociétés savantes qui se développent beaucoup à cette époque. Ces documents montrent également l'intérêt suscité en Europe par la catastrophe de Lisbonne et la curiosité des élites de cette deuxième moitié du XVIIIe siècle pour les phénomènes naturels. L'effervescence scientifique du Siècle des lumières s'appuie largement sur l'érudition et la culture classique de nombreux ecclésiastiques et membres de sociétés savantes ; les réflexions sur les tremblements de terre parues dans le *Journal Historique sur les Matières du Tems* (Paris) sont classées, dans la table des matières de 17561, dans la rubrique « Mathématique, Physique, Médecine » et non dans la rubrique « Histoire, Géographie, Antiquités ».

Certains documents, *a priori* peu utiles et dont beaucoup n'ont pas été utilisés par Blanc (2009), ne doivent cependant pas être négligés car ils témoignent d'un aspect important du contexte culturel de l'époque : ce XVIIIe siècle voit l'essor de la « Modernité » c'est-à-dire une transformation majeure des mentalités et du rapport entre les humains et leur environnement naturel.

1.2 Un contexte culturel indispensable à la compréhension : exemple du rapport sur Mazagan

1.2.1 « Le rapport sur Mazagan 1755 » (Anonyme, 1755)

Nous proposons ici une nouvelle traduction du « *rapport sur Mazagan 1755* » (Anonyme, 1755), remaniée par rapport à celle proposée pour le rapport MAREMOTI (Leone *et al.*, 2012). La lettre originale, imprimée en portugais, présente des phrases très longues ; de nombreuses propositions relatives s'enchaînent, séparées par des virgules ou des points-virgules : pour une meilleure compréhension en français, nous avons coupé ces longues phrases en essayant le plus possible de conserver la forme argumentative d'origine, ainsi que le style. Nous avons partout conservé les majuscules du texte original.

Rapport sur le grand tremblement de terre survenu dans la Place[2] de Mazagan le 1er novembre 1755, qui se réfère aux effets et aux ruines qu'il a causé, et qui montre brièvement quelle est l'origine de ces tremblements de terre.

Lisbonne : avec les autorisations nécessaires, l'an 1755.

[Ils] Rapportent.

« En écrivant cette brève narration, mon intention n'est pas de cacher la vérité, ni d'exagérer l'évènement ; parce que, si

1. « Table générale des matières des dix premiers mois de 1756, livres nouveaux, pièces fugitives », p. 478 du J. H. M. T. (Anonyme) : *Journal historique sur les Matières du Tems*, tome LXXIX, 1756.
2. Dans le sens de place forte, forteresse.

Tabl. 1. — Principaux documents analysés

Documents principaux	Caractéristiques	Remarques, articulation avec Blanc (2009)
Le rapport sur Mazagan 1755 : *Relaçaõ do grande terremoto, que houve na praça de Mazagam en o primeiro de Novembro de 1755. Referem se os seos effeitos, e ruinas que causou, e brevemente se mostra de que procedem os tremores de terra. Lisboa : Com as licenças necessarias. Anno 1755*	8 pages (dont 2 pages pour le titre et la page de garde). Version portugaise conservée à la bibliothèque nationale de Lisbonne transmise par M.-A. Baptista, traduction française de F. Moscarelli et N. Meschinet de Richemond.	Ce document ne fait visiblement pas partie du corpus examiné par P.-L. Blanc.
La lettre de Meknès du 8 novembre 1755, suivie de la lettre de Tetouan du 24 novembre 1755 : *Copia de huma carta Escrita pelo Padre Guardiam do Real Convento de Maquinés [Meknès], e Vice-Prefeito das Santas Missoens, que nas partes da Barbaria conserva a religiosa Provincia de Sao Diogo dos RR. PP. Franciscanos descalcos ao Padre Procurador dellas ; Lisboa, Com todas aslicenças necessarias, Anno de MDCCLVI*	8 pages (dont 2 pages pour le titre et la page de garde). Version portugaise conservée à la bibliothèque nationale de Lisbonne transmise par M.-A. Baptista, traduction française de F. Moscarelli et N. Meschinet de Richemond. Document beaucoup plus partial et orienté que le précédent : les informations rapportées sont subordonnées à la vision catholique du monde. Elles ne sont ni « objectives » ni « exhaustives » au sens d'aujourd'hui, mais « véridiques » c'est-à-dire correspondant à ce qui est considéré comme la vérité par les auteurs/lecteurs de ces lettres qui sont des ecclésiastiques.	Ce document correspond, en terme de contenu et d'intitulé à une source espagnole consultée par Blanc (2009) et référencée dans sa bibliographie sous l'appel Sanz, A. (Éd.). Le contenu correspond également à l'annexe jointe à la seconde lettre de Partyet (Consul général de France à Madrid) du 22 décembre 1755 (référencée dans sa bibliographie sous l'appel Partyet, Mr., 1755c – ANF/Marine B7/396) ; et reprise aussi dans les Actes de la séance du 7 janvier 1756 de l'Académie Royale des Sciences de Paris (référencé dans sa bibliographie sous l'appel Mairan J.-J., 1756). Nous ne reviendrons pas ici en détail sur l'analyse de ce document (Leone *et alii*, 2012).
Lettre de Soyris : *Extrait d'une lettre de Maroc en datte du 5 novembre 1755 : de Soyris a Guys.*	Version originale française, écrite à Marrakech le 5 novembre 1755 par un représentant d'une compagnie commerciale marseillaise et diplomate officieux.	Référencée dans la bibliographie de Blanc (2009) sous l'appel Soyris, Mr., 1755 – ANF/Marine B7/403.
Goulven J., *La Place de Mazagan sous la domination Portugaise (1502–1769)*, Paris, 1917.	Version française, 3 pages (p. 164-166) intéressantes issues de plusieurs sources portugaises.	Goulven introduit comme suit une longue citation, entre guillemets, d'un texte paru dans la Gazette de Lisbonne : « Les portugais eurent à subir, au XVIIIe siècle, les effets d'un tremblement de terre qui jeta l'épouvante dans la population et l'éprouva. C'est cette secousse sismique qui détruisit Lisbonne en 1755. Voici ce qu'on écrivit à ce sujet de la forteresse de Mazagan à la *Gazette de Lisbonne* [suivent 2 pages de citation]. » J. Goulven renvoie également, en note de bas de page, à l'ouvrage de Luiz Maria Do Couto (p. 138), cité en bibliographie par Blanc (2009).

cacher la vérité est une faute d'historien, grossir les faits est également une faute littéraire. Pour beaucoup de gens, l'exagération presque incroyable des faits doit permettre aux Lecteurs d'accéder à la vérité, peut-être parce qu'ils ne comprennent pas que les grandes exagérations déplacent la limite de la crédibilité et rendent les récits moins véridiques. Je serai très prudent ; et je préfère perdre par sincérité que gagner par mensonge, notamment parce que je sais que l'âme de l'histoire est la vérité. Je rapporterai le dommage fatal, le mémorable Tremblement de terre du 1er Novembre qui s'est produit dans la célèbre Place Forte de Mazagan et dans ses environs : je décrirai la cause de ces Tremblements, et je proposerai beaucoup d'autres considérations historiques à ce sujet.

Sur la Côte Africaine, où la Nation Portugaise a plusieurs fois été triomphante, se trouve la Place Forte de Mazagan qui, en d'infinies occasions concernant les actions héroïques du Portugal, fut un glorieux théâtre offert à l'admiration du monde. Ce petit espace de terre n'a pas seulement été défendu contre l'invasion des ennemis, qui sont innombrables, mais il a été aussi harcelé par des incursions périodiques, et des affrontements ; considérant comme la plus grande gloire que ses habitants n'aient jamais dégainé une épée ou tiré un coup de pistolet contre un nombre égal d'ennemis. Nombreuses furent les occasions de lutter contre un ennemi supérieur en nombre, quand, pour chacun de nous, il y avait quatre Maures. Et l'occasion est aussi survenue [de combattre] à un Portugais contre cent quatre vingt Maures, chose qui semble incroyable s'il n'existait pas tant d'histoires vraies pour l'accréditer avec certitude.

Le trente et un Octobre, un litige entre cent-cinquante Maures et vingt-six Portugais a ravivé dans la mémoire le souvenir de l'effort Lusitanien, puisque non seulement les habitants de la Place se sont défendus avec grand honneur, mais ils ont aussi combattu avec beaucoup d'énergie, laissant trente deux morts à terre, quatre captifs et quelques blessés. Mais qui aurait pu dire qu'une action si bizarre serait suivie[1] *d'un si triste succès !*

1. Ou « arriverait à ». L'enchaînement chronologique de faits est perçu comme le signe caché d'un lien entre ces évènements, lien voulu par Dieu et difficile à identifier pour les humains.

L'aube du 1er Novembre était si sereine et si agréable qu'elle semblait vouloir arracher toute tristesse des cœurs humains. Les Soldats s'étaient préparés à [remplir] leurs obligations comme de coutume ; beaucoup de monde était dans l'Église pour entendre la Messe ; d'autres attendaient pour se confesser, quand vers neuf heures et trente quatre minutes un petit mouvement dans la terre commença à se faire sentir, augmentant en intensité par intervalles de plus de 6 minutes[1] : cela provoqua la confusion chez tous les habitants, parce que les uns fuyaient vers les Églises tandis que les autres hurlaient pour qu'on les en retirent. Certains, terrifiés, n'ont pas eu le choix ; d'autres, baignés de larmes, se lamentaient sur leur malheur. Les mères affligées tenaient embrassés les petits enfants ; les maris étaient, pour les uns, perdus, pour les autres, surpris. Les gens de Guerre avaient presque perdu le sens pour garder leur poste. Ainsi tout n'était que confusion, que regret, que misère.

Le tremblement a cessé, mais la nécessité des secours semblait augmenter face aux maisons ruinées, aux personnes blessées et à la crainte de toute la population ; et s'ajoutait à cela la peur des répliques. On commença promptement à tout mettre en sécurité, en donnant les ordres les plus importants, en faisant tout d'abord appel à Dieu Notre Seigneur pour qu'il suspende sa Justice et ne permette pas l'accablement de tant d'âmes qui ont continuellement combattu pour la défense de la Très Sainte Foi. Pas plus tard qu'une heure et demie après, la répétition du même Tremblement de terre se fit sentir, mais avec moins d'agitation et de violence. Il était cinq heure de l'après-midi quand nous vîmes un groupe de Maures, hommes et femmes marchant dans la campagne en direction de la Place, qui, faisant signe aux sentinelles, les suppliaient avec d'humbles paroles de les abriter. On ouvrit les portes avec beaucoup de prudence et l'on recueillit ceux qui, fuyant leur patrie, venaient chercher du soutien chez leurs ennemis. Ils rapportèrent ce qu'ils venaient de subir, et l'on en déduisit que la secousse avait été moins importante à Mazagan que dans les environs. Le groupe de Maures était composé de trente six hommes et de dix neuf femmes, presque tous commotionnés, qui adressaient force supplications, dévotions et pénitences à nous autres Catholiques. Ils ont demandé avec une grande insistance à être baptisés, et au regard de la diligence dont ils ont fait preuve à cet effet, on décida de les instruire dans les principaux mystères de notre Sainte Foi. Ils se sont appliqués à cette fin avec tant de désir que, en peu de jours, ils ont été capables de recevoir le sacré Baptême ; rendant ainsi moins sensible l'ancienne défaite et laissant le succès de cette action comme une des plus précieuses pierres qui ornent la Couronne des triomphes Portugais.

Mais face à ce véridique évènement qui vient de se produire et que j'ai promis de raconter, il ne serait pas hors de propos d'exposer la cause du si terrible Phénomène de la nature. Premièrement, nous devons envisager comme certain qu'il existe à l'intérieur de la terre des mines qui sont très grandes et dilatées, les unes avec du Souffre, d'autres avec du Salpêtre, et d'autres avec des matières bitumineuses, et inflammables. Et il ne semble pas douteux que ces mines soient irrégulières, c'est-à-dire qu'une mine est composée de plusieurs veines, par lesquelles il y a correspondance avec une autre mine. De son côté, les veine de cette deuxième mine ont des correspondances avec une troisième, et ainsi de suite, [même si] la composition des matériaux [de ces mines en correspondance successives] est incertaine ; comme l'a élégamment démontré le Père Kirker, infatigable Mathématicien, dans son incomparable œuvre sur le Monde souterrain. On ignore s'il y a des grottes immenses à l'intérieur de la terre, mais c'est plausible même pour ceux qui ont des connaissances médiocres en Mathématiques, en Physique. Cela suppose que, lorsque du feu arrive à une veine minérale, il va la parcourir et à son arrivée dans une grande mine, il fait une grande secousse ; à son arrivée dans une petite mine, il fait une secousse plus petite. Ainsi s'explique pourquoi la secousse est ressentie davantage dans certaines parties de la terre que dans d'autres ; ou pourquoi la secousse est ressentie dans un endroit et pas dans un autre : la raison en est que l'endroit situé au-dessus de la mine souffre forcément davantage qu'une partie de la terre plus éloignée. Et encore, la distance peut être si grande, la mine si petite ou la matière si peu active, que l'on ne sent rien.

J'ai parlé des concavités qu'il y a dans la terre parce qu'il est sûr que ces concavités sont remplies d'un air très sale et remplies de diverses vapeurs, et parce qu'il est sûr également que le feu a la vertu de raréfier l'air. Continuons mon explication : à l'arrivée du feu dans l'une de ces grottes, l'air se raréfie, et comme l'air raréfié occupe plus d'espace, il cause une secousse d'autant plus forte que l'air est plus raréfié. Remarquons qu'il est impossible d'arrêter la secousse jusqu'à ce que cet air, qui est la cause, s'évapore par [à travers] la terre : il faut souligner que plus forte est la résistance, plus forte est la secousse, parce que l'évaporation est plus difficile. Ensuite, il semble aussi clair d'expliquer pourquoi les Tremblements de terre se produisent plus souvent à proximité de la mer : si l'eau est plus légère que la terre, elle est par conséquent plus apte à laisser passer l'air et les vapeurs qui causent la secousse.

Deux choses que tous souhaitent savoir (mais autant il est facile de souhaiter, autant il est difficile de savoir) : y aura-t-il encore des secousses, et y aura-t-il encore une secousse aussi importante que la première ? À ces questions, je réponds que, tant qu'il y aura des mines, il y aura évidemment des secousses. Quant à la seconde question, je réponds : que Dieu [seul] sait ce qui va se produire, mais qu'il semble que, évidemment, il n'y aura pas de nouveau [de sitôt ?] une secousse égale à la première, encore qu'il y ait (ce qui n'est également pas croyable) des mines similaires à celle qui provoqua la première secousse. Et il est aussi clair que, la terre étant déjà ouverte par endroit à cause de l'évaporation de la première secousse, il y aura en conséquence moins de résistance. Et j'ajoute : puisque la résistance est moindre, la secousse sera évidemment moins forte, pour les raisons qui ont été dites. [Mais] comme les phénomènes de la nature ne sont pas sujets aux jugements mathématiques et aux discours physiques, il s'ensuit qu'il est bien possible que ces suppositions soient les plus probables, mais elles ne sont pas infaillibles[2].

On souhaite également connaître la cause des extraordinaires mouvements de la mer ; mais comme toutes ces choses ne demandent pas seulement une science très importante, mais aussi des développements plus amples, je réponds : ainsi comme l'agitation d'un vase rempli d'eau fait que l'eau change de situation, ainsi le mouvement de la terre fait aussi changer l'état naturel de l'eau de mer. Et plus forte sera la secousse, plus importante sera l'inondation ; comme on l'a observé en Afrique où la mer est arrivée à inonder quatre lieues communes : ce qui

1. Les secousses sont espacées d'un peu plus de 6 minutes et chaque secousse est plus forte que la précédente.

2. L'infaillibilité étant une qualité de Dieu, cette phrase souligne, pour l'auteur, combien le raisonnement scientifique ne peut être mis sur le même plan que la foi : la science procède de Dieu et lui est donc soumise.

n'empêche pas de voir de grandes inondations là où la secousse est presque imperceptible. Alors on doit donc en déduire que le tremblement de terre naissant au milieu de la mer, cela entraîne des dommages plus étendus, qui ont été observés en plusieurs endroits.
Deus Super omnia.
Totum Subjicio correctioni Supremorum Tribunalium. »

1.2.2 Un implicite culturel, scientifique et religieux qui donne sa forme au récit

Ce texte concerne Mazagan face au séisme de 1755. La moitié est consacrée à des considérations générales sur les causes des tremblements de terre. Il ne donne pas de précision sur les effets du tsunami alors que les effets de la secousse sismique sont évoqués. Si la forteresse avait été submergée par 3 vagues de 24 m, cela aurait certainement été mentionné. Les dommages humains et matériels dus à la secousse ne semblent pas être très importants, ce qui coïncide avec d'autres témoignages modérés concernant ce site (Goulven, 1917 ; Blanc, 2009). L'intérêt de ce document est plutôt de confirmer la surestimation historique des hauteurs d'eau critiquée par Blanc (2009), et en particulier d'isoler un peu plus le témoignage indirect de Soyris (1755), visiblement excessif.

L'intérêt de ce document, visiblement rédigé par un (des) ecclésiastique(s), est largement contextuel et culturel (métadonnées). Le texte illustre combien les phénomènes naturels catastrophiques sont l'occasion de réaffirmer le lien entre Dieu et les humains (de rappeler aux humains l'importance de ce lien s'ils l'ont oublié). L'analyse de ce texte est intéressante car elle permet de montrer quelques nuances dans les modalités de la relation entre Dieu, les humains, leur environnement et de souligner la complexité de la vision du monde qui se transforme au XVIIIe siècle, avec l'essor de la « Modernité ».

La vision fixiste d'une Nature créée par Dieu

Il permet aussi de se poser la question (soulevée par d'autres lettres ou récits de gazette) du lien entre témoignage sur un évènement précis et les réflexions générales sur le sujet des séisme, association qui paraît souvent étrange et fantaisiste au lecteur du XXIe siècle.

Un séisme n'est pas directement créé par Dieu (d'où le développement d'ensemble à visée scientifique qui suit le témoignage empreint de religiosité), mais il s'inscrit dans la Création faite et voulue par Dieu. Création qui s'envisage à l'époque dans une vision fixiste et non dynamique ou évolutive de la nature. Dieu est donc la source, l'origine des phénomènes naturels mais de manière indirecte (d'où la majuscule souvent mise dans le texte portugais à « Phénomènes de la nature », « discours Physique », en écho aux majuscules mises en début de texte aux termes religieux tels que « Dieu », « Baptême », « Sainte Foi »…). L'appropriation sociale, l'intégration dans le temps quotidien d'un phénomène naturel rare mais destructeur se fait par l'affirmation de ce lien humains/Dieu à travers une interprétation fondée sur ce lien qui est, à l'époque, vécu quotidiennement par les populations dans leurs pratiques sociales et religieuses. L'affirmation en début de texte des vertus Portugaises face à l'adversité et l'hostilité des Maures correspond à un éloge de vertus chrétiennes. Le triomphe, la gloire et l'héroïsme militaire sont le signe d'une élection divine d'autant plus éclatante que l'hostilité des ennemis est grande, et numériquement indiscutable : on peut y voir un écho aux récits bibliques de l'Ancien Testament. La conversion et le baptême d'un groupe de sinistrés Maures est bien présenté comme « une des plus précieuses pierres de la Couronne des triomphes Portugais ». Présenter ce fait comme un dessein divin caché dans la catastrophe permet d'intégrer le phénomène naturel rare et dommageable dans la vie sociale et quotidienne des populations : il s'agit de montrer en quoi ce phénomène naturel non seulement ne détruit pas la vision du monde portée par la société mais encore la renforce. Dans ce but, tout élément fait signe ou sens : si les populations musulmanes des environs sont plus touchées que la place forte de Mazagan elle-même, c'est un signe implicite de la bienveillance de Dieu envers les Chrétiens ; mais les souffrances ou les dommages subits par les Portugais sont une juste punition de leurs péchés ou une épreuve à surmonter pour assurer leur Salut ou l'occasion de se rapprocher de Dieu. Ce qui est important c'est de rappeler ce lien entre la divinité et sa création, création dont les humains font partie.

Des causes divines cachées

Les explications à visée scientifique de la seconde partie ne se veulent pas en contradiction avec la vision religieuse du monde évoquée au début du document. La transition entre les deux parties le souligne, qui associe dans les superlatifs la conversion des sinistrés musulmans et la force du phénomène naturel : « *Mais face à la grandeur de ce succès, il ne serait pas hors de propos d'exposer la cause du si terrible Phénomène de la nature.* »

Cette phrase est un élément clef de l'argumentation de l'auteur (catholique convaincu, peut-être un de ces savants ecclésiastiques qui furent nombreux à faire avancer les connaissances au XVIIIe siècle (Gould, 1990, 1997 : 157 et suiv. ; Krafft, 1991)) : de la même manière que les Hommes ne peuvent, sans l'aide de la foi, percevoir la volonté de Dieu de convertir les Maures car elle se manifeste cachée à travers un séisme, de même, les causes physique d'un séisme sont difficiles à connaître pour les savants. En effet, même les connaissances les plus complètes et approfondies sur les mécanismes internes de la planète ne peuvent suffire à expliquer totalement un phénomène naturel dans la mesure où une partie de ces phénomènes relève de la volonté divine, volonté que l'Homme, dans sa finitude, ne peut comprendre, entendre, percevoir dans toute sa dimension. Ainsi, il ne faut pas prendre cette seconde partie de la lettre comme traitant d'un tout autre sujet que la première partie : les deux se répondent et se renforcent l'une l'autre, au sein d'un raisonnement par analogie qui correspond à une forme d'argumentaire « scientifique » pour l'époque, où savoirs sur les choses naturelles et foi ne sont pas séparés. Les deux parties du rapport sont un témoignage du lien entre Dieu et les Hommes, même si ce lien est difficile à saisir, en particulier pour le profane (au sens littéral…).

Enfin, d'une manière circulaire, la fin du paragraphe qui traite des causes des séismes renvoie également implicitement à la puissance divine (« *[Mais] comme les Phénomènes de la nature ne sont pas sujets aux jugements mathématiques et aux discours Physiques, il s'ensuit qu'il est bien possible que ces suppositions soient les plus probables, mais elles ne sont pas* infaillibles »). L'omniscience de Dieu est d'ailleurs explicitement citée quelque lignes plus haut (« *Dieu [seul] sait ce qui va se produire* ») : cette formule de rhétorique peut

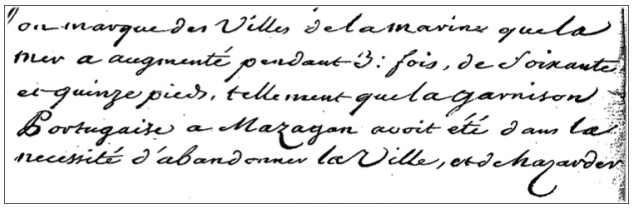

l'on marque des Villes de la marine que la
mer a augmenté pendant 3: fois, de soixante
et quinze pieds, tellement que la garnison
Portugaise a Mazagan avoit été dans la
necessité d'abandonner la Ville, et de hazarder

Fig. 2. — La lettre de Soyris (1755) évoque 3 vagues successives de 75 pieds sur les côtes marocaines, soit environ 24 m.

paraître bien creuse aujourd'hui dans nos sociétés laïcisées, mais elle ne l'est pas encore à l'époque de l'écriture du texte. L'emploi du terme « infaillible » n'est pas neutre ; il caractérise avant tout la puissance divine, laquelle excède les capacités de connaissance humaine.

Ce texte s'inscrit donc dans une conception du monde selon laquelle Dieu n'agit pas directement ou grâce à la magie : les règles qui régissent la nature peuvent être étudiées par l'Homme et il est bon qu'elles le soient[1], mais il serait illusoire de croire que l'Homme puisse connaître un jour complètement ces mécanismes dans la mesure où ceux-ci ont été créés et choisis par Dieu et, à ce titre, reflètent sa puissance et son immensité. Cette conception du monde correspond à une époque de transition vers la « modernité », époque qui ne voit pas encore s'opérer pleinement la coupure entre l'humain et la nature, le savant et son objet d'étude, mais qui pose les bases de cette évolution à travers l'approfondissement des questionnements scientifiques.

1.3 Difficultés d'interprétation de données « chiffrées »

1.3.1 La lettre de Soyris, 1755 (figure 2)

Transcription de la fin de la lettre de Soyris du 5 novembre 1755 (1755 : 5-6) :

« On m'assure ici que les hollandois doivent venir sans faute a la rade de Safi pour faire leur paix avec le Prince, de la meme manière qu'ils l'ont faite avec le Roy Mulei abdella son père, comme ils n'ont point des esclaves dans ce païs, ils en seront quittes pour un present de la valeur d'environ quatre vingt mille livre Tournoi, il ni a pourtant pas apparence que la frégate qui doit porter l'ambassadeur arrive avant le mois de mars prochain. La saison étant trop dangereuse a present sur cette cote.

Le premier de ce mois a neuf heures 39 minutes du matin, nous avons eu un violent tremblement de terre qui a duré l'espace de 8 minutes, quelques maisons se sont écroulées et fort peu de personnes se sont trouvées ensevelies sous les ruines. Il est venu des courriers de Ste Croix, de Safi, d'Azamor, et de Salé au Prince pour informer cette altesse qu'ils ont ressenti le même tremblement, et cela a la meme heure ; mais il paroit qu'il a été plus fort du coté du Nord qu'il ne l'a été au Sud. On marque des villes de la marine que la mer a augmenté pendant 3 fois de soixante et quinze pieds, tellement que la garnison Portugaise a Mazagan avoit été dans la necessité d'abandonner la Ville, et de hazarder sa liberté en se retirant plus d'une lieue a la montagne. Graces a Dieu il n'est point arrivé d'autre mal aux Chretiens — que la peur. On craint a présent une récidive, et si elle arrive il restera fort peu de maisons en nature, qui en general sont endomagées, nous espérons dans le courant de la semaine prochaine de partir pour Saffi, d'ou j'aurai l'avantage de vous écrire plus amplement.

J'ai l'honneur d'être […]. »

Réinterpréter la lettre de Soyris en la contextualisant

L'essentiel de la lettre de Soyris porte sur un éventuel traité d'alliance entre le Prince et le roi de France, passant notamment par le rachat des esclaves français, (traité qui pourrait se préciser si l'auteur de la lettre est porteur d'ordres précis pour mener la négociation, compte-tenu de la bonne volonté du Prince qui souhaite « faire l'opposé de son prédécesseur Mulei Ismail c'est-à-dire la paix avec la France, et la guerre avec l'Angleterre » (Soyris, 1755 : 1).

Blanc (2009) souligne avec justesse que, si la secousse à Marrakech avait été ressentie très violemment, la rencontre de Soyris avec le Gouverneur, qui a eu lieu le jour-même du séisme, aurait été interrompue ou ajournée. Mais la remarque suivante (*« He does mention some damages, but only by hearsay: the wording "some houses collapsed and very few people happened to be buried under the ruins" certainly does not express the shock that an eyewitness would have experienced. »* Blanc, 2009) ne nous semble pas pertinente : dans sa lettre, l'auteur s'efforce d'éviter tout propos empreint de « passion », tout propos qui n'ai pas un caractère raisonnable. Il est clair, comme l'écrit d'ailleurs Blanc (2009) quelques lignes plus haut, que Soyris a ressenti le séisme ; mais il s'efforce d'en donner un témoignage extérieur, objectif, sans affect. Dès lors, le caractère impersonnel de la phrase de Soyris décrivant les dégâts ne nous semble pas un élément suffisant pour en déduire qu'il parle par ouï-dire et non comme témoin. D'autant plus qu'il ne cache pas que les autres informations qu'il donne, au sujet des ports notamment, sont de seconde main.

Les informations directes sur le séisme et indirectes sur le tsunami sur la côte occupent le dernier paragraphe de la lettre. Celui-ci est introduit par une transition qui souligne la dangerosité des côtes marocaines pendant la saison considérée. Cette transition est intéressante car le danger de la côte en cette saison n'est pas mentionné pour lui-même mais par rapport aux intérêts diplomatiques qui occupent le cœur de la lettre : l'ambassadeur hollandais n'arrivera pas de sitôt.

Le récit de l'évènement (séisme et tsunami) arrive donc à l'appui de l'affirmation de la dangerosité des côtes au moment où l'auteur écrit. L'évènement est traité sur le mode « anecdote pittoresque et dramatique de voyage » et selon un prisme culturel précis : l'évènement important n'est pas tant le phénomène naturel lui-même (le séisme ayant fait apparemment peu de dommages) mais le fait que la garnison portugaise de Mazagan, en quittant la ville, a pris le risque de s'enfoncer (sur une lieue) dans un arrière pays non chrétien pour échapper à l'eau. C'est donc le courage voire l'héroïsme des soldats face à l'adversité qui est ainsi souligné. Immédiatement après il est fait mention de Dieu et les soldats sont désignés sous le terme « ces Chrétiens » : cette formulation n'a pas pour but de souligner la fatalité de ce type d'évènement, mais de souligner que Dieu protège les Chrétiens, sous entendu signe logique et naturel de leur supériorité sur les « infidèles ». L'omission du terme « Chrétiens » dans la traduction anglaise de cette phrase (Blanc,

1. La foi n'est plus tout à fait l'ennemie ouverte de la science, mais elle entend se situer au dessus (Gould, 1997 : 157 et suivantes ; Krafft, 1991).

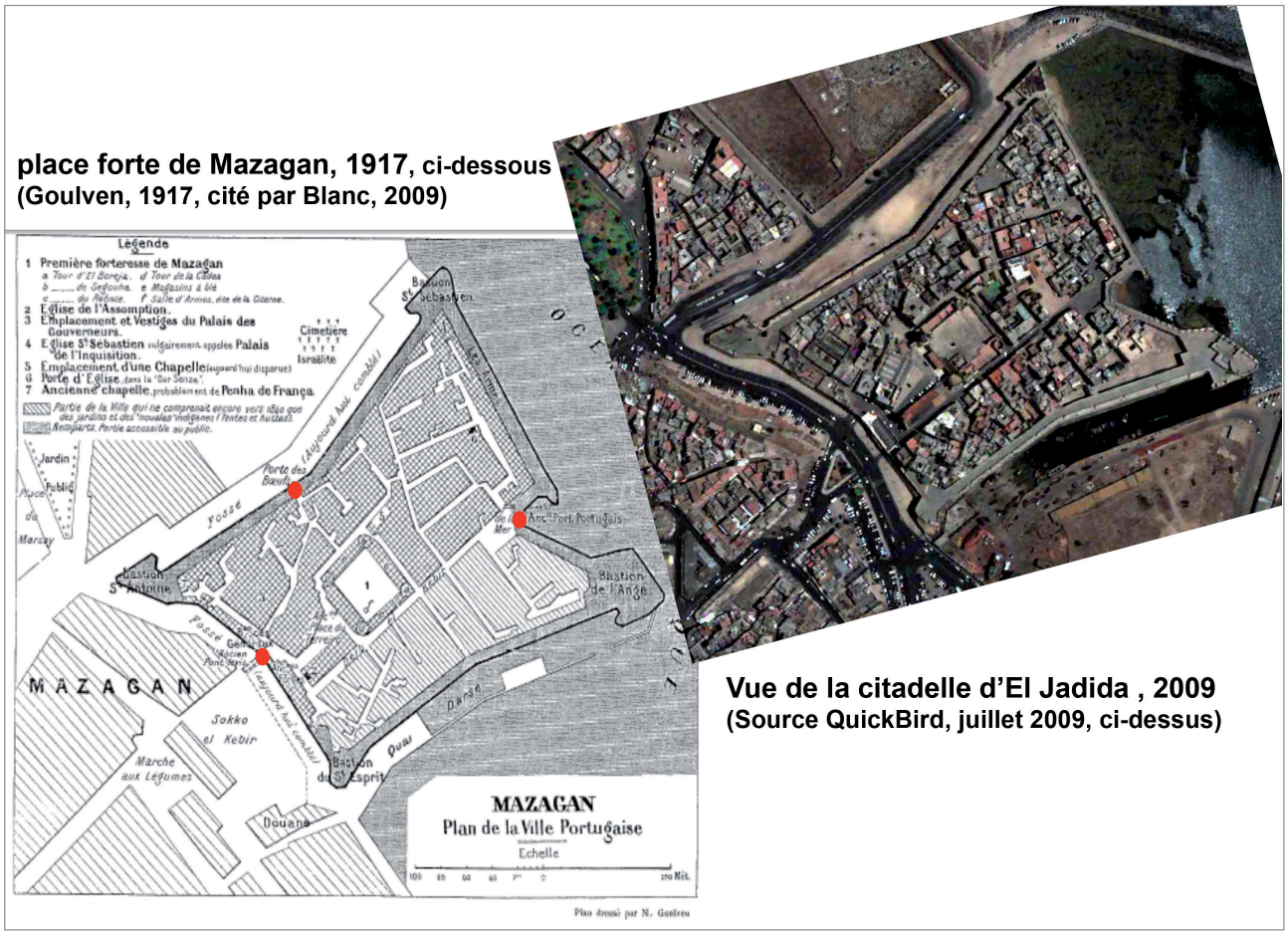


Fig. 3. — Le site de Mazagan-El Jadida. Les portes de la forteresses évoquées dans le récit de Goulven (1917) sont indiquées en rouge (voir aussi figure 4).

2009[1]) apparaît comme révélatrice de la grande difficulté d'identification et de prise en compte par les chercheurs contemporains du contexte culturel implicite des documents anciens. Cette hiérarchie implicite entre Chrétiens et autochtones musulmans qui transparaît dans toutes les sources rédigées par des catholiques, la vision fixiste d'un monde hiérarchisé voulu par Dieu et dont l'Église et les rois chrétiens sont les garants se traduit également par l'opposition entre l'action (connotée positivement) des soldats portugais (qui réagissent à l'évènement en prenant d'autres risques) et la passivité (connotée négativement) du « peu de personnes [qui] se sont trouvées ensevelies sous les ruines », certainement des autochtones.

En accord avec Blanc (2009), la valeur de « soixante et quinze pieds » de haut (24,36 m) pour les vagues du tsunami qui touchèrent la côte de Mazagan nous paraît très excessive et entachée d'erreur… mais il nous paraît très hasardeux d'interpréter la valeur de 75 pieds, relayée par Soyris, comme étant 75 pouces et d'en proposer une transcription brute dans le système métrique moderne ! Le prisme culturel moderne qui nous imprègne aujourd'hui rend particulièrement ardue la prise en compte d'une marge d'erreur à la lecture de données chiffrées à deux décimales. Cette transcription chiffrée, même présentée sous forme de fourchette (1,90 à 2,30 m), tend ainsi à balayer les précautions méthodologiques de la démarche et facilite une mise hors contexte de l'hypothèse proposée en donnant implicitement un sentiment de précision et de fiabilité au lecteur.

1.3.2 Contextualiser le récit rapporté par Goulven, 1917 (figures 3 et 4)

Le récit rapporté par Goulven

« *Le 1er novembre de l'année qui termine (1755), par un jour sans vent, le soleil était clair et chauffait ; on souffrit dans cette place [de Mazagan] des effets d'un formidable tremblement de terre qui commença à 9 heures et demie. La terre trembla pendant un quart d'heure, ouvrant des trous en divers endroits. La consternation générale s'accrut lorsqu'on vit les pierres des édifices bouger et trembler ; bien qu'ils ne tombèrent pas, ils souffrirent beaucoup. Chacun quitta son logis et recourut au ciel ; dans des processions de Rogations on porta les images les plus Saintes qu'on vénérait dans la Place. Mais tout cela se faisait sans ordre et sans accord, car la confusion régnait*

1. *The end of the letter of Soyris (1755) reports quite a different estimate of the tsunami in Southern Morocco, including Mazagaõ: « they write from the maritime towns that the sea increased three times, of seventy five feet, so much that the Portuguese garrison in Mazagaõ had been compelled to abandon the City, and to put its freedom at risk by withdrawing more than one league away to the Mountain. Thank God nothing worse happened than fear ». There is a contradiction with what he stated earlier in the same letter, « it appears that it has been stronger towards the North than it was towards the South ». Obviously, Soyris only mentions of Mazagaõ by hearsay, and there may have been a problem of translation and conversion of Moroccan units to European.*

Fig. 4. — Forteresse portugaise de Mazagan-El Jadida, février 2012. La vue est prise à marée basse depuis le « bastion de l'Ange » (fig. 3, plan de Goulven, 1917) en direction de la seule porte donnant sur la mer.

partout à un tel degré, que personne ne rentra voler dans les maisons vides. Notre gouverneur Joseph Leite de Sousa, animé de l'esprit de chevalier catholique, accourut de suite faire retirer le très saint sacrement de l'Église, pour le mettre dans un lieu plus haut et plus sûr. L'inquiétude augmenta quand la mer dans un mouvement effroyable, sautant par-dessus les roches, défonça les portes, et entra dans la place où elle laissa, en se retirant, de nombreux poissons. Tout le monde anxieux s'enfuit se réfugier sur les murailles, où le gouverneur, dans des tournées continuelles, réconfortait chacun, suppléant par sa présence à l'abandon dans lequel les soldats avaient laissé leurs postes ; il rencontra uniquement son fils aîné, Fernand Pereira Leite de Sousa, qui était de sentinelle à la porte où il resta avec de l'eau jusqu'à la ceinture, abandonné de ses compagnons. La mer fut démontée jusqu'à 2 heures de l'après-midi ; elle emporta des balles dans son ressac et, ayant raviné le sol jusqu'au roc vif, elle enleva les terres dans lesquelles on avait semé de l'orge, des fèves, ainsi que les prairies où paissaient les chevaux, puis elle démolit les fortifications extérieures et les palissades. Des barques et des canots de S. M. les uns se perdirent, les autres se brisèrent. Les vagues engloutirent trois personnes ; elles enlevèrent et emportèrent avec elles, l'Alcaïde major de cette Place, puis le ramenèrent vivant dans la place par une poterne. On lui administra les Sacrements ; mais après avoir vomi pendant huit jours du sable, des petits mollusques, des petits coquillages et un peu de sang caillé, il guérit. Les Maures, bien qu'ils perdirent beaucoup de gens, continuèrent à nous inquiéter, faisant leur possible pour nous empêcher la corvée de bois que nous allions couper aux buissons voisins, ce dont nous avions le plus besoin. » (Goulven, 1917 : 164-166).

Des informations à interpréter en fonction d'un contexte culturel précis

Nous sommes d'accord avec l'argumentation de Blanc (2009) en ce qui concerne l'arrivée du tsunami et le fait qu'il n'a pas submergé les murs de la forteresse. Cela est confirmé par les autres sources que Blanc n'a pas utilisées (et notamment le « rapport sur Mazagan » (anonyme, 1755) analysé plus haut), la configuration des lieux (la forteresse a été encerclée par les eaux) et des portes (trois, dont une seule vers la terre et où se trouvait certainement le fils du gouverneur, figure 3). Le « rapport sur Mazagan » et ce document vont dans le même sens : le nombre de victimes portugaises liées à l'agitation marine et recensés à l'intérieur de la place forte est peu important (0 ou 3).

Mais l'argumentation de Blanc (2009) à partir du récit du comportement du fils du gouverneur nous paraît plus hasardeuse, qui tente d'évaluer la hauteur d'eau en s'appuyant sur la formulation « de l'eau jusqu'à la ceinture » et en estimant la hauteur du sol à cette époque en fonction des travaux réalisés depuis. En effet, on retrouve dans le récit des éléments sur le contexte culturel et religieux de l'époque, déjà évoqués plus haut, mais qui ne nous semblent pas avoir été suffisamment pris en compte par Blanc (2009). Le gouverneur est « animé de l'esprit de chevalier catholique », il est un des rares à garder son sang-froid face à l'inondation en restant actif et en réconfortant les autres. Son fils fait preuve du même courage et du même sang-froid en restant seul à son poste face au danger.

Ces faits peuvent être vrais, mais ils peuvent aussi correspondre non pas à une vérité factuelle objective mais à ce que

nous appellerons un « récit véridique ». Nous entendons par là un récit dont la fonction dans le contexte culturel, social, religieux d'une publication de l'époque est de rappeler combien l'ordre des choses, l'ordre social (voulu par Dieu) n'est pas détruit par un évènement « naturel[1] » dramatique, lequel évènement fait lui-même partie du dessein divin (Dieu n'agit pas directement pour faire monter les eaux, mais rien de ce qui se produit sur terre n'est complètement hors de sa puissance omnisciente et immanente). Ainsi, dans une société monarchique finement hiérarchisée en différents ordres, le comportement du gouverneur et de son fils correspond précisément à celui attendu d'un « chevalier catholique » : par nature, par le sang, ils doivent être plus courageux que ceux qui les entourent et qui leur sont inférieurs socialement, ils doivent soutenir l'Église et montrer les qualités qui correspondent aux valeurs chrétiennes qui structurent cet idéal chevaleresque.

Le récit du comportement du gouverneur et de son fils sur les remparts ressemble ainsi beaucoup à un passage rhétorique obligé (Il ne faut pas oublier que la publication d'un récit dans la *Gazette de Lisbonne* en 1756 est soumis à autorisation). Ce passage peut correspondre à une vérité d'ensemble pour ce qui est important aux yeux des contemporains (montrer ces fameuses qualités censées être propres aux nobles chrétiens) mais ne pas correspondre dans le détail aux faits réels, en particulier le détail fourni sur la hauteur d'eau. Il ne nous semble donc pas que la fonction de ce passage du texte soit de fournir au lecteur de 1756 une information que nous dirions « objective ». Mais cela peut, par contre, être le cas d'autres passages — et notamment la phrase suivante indiquant que la mer fut démontée jusqu'à 14 h : les difficultés d'interprétation sont donc grandes, et la fonction du discours peut changer d'une ligne à l'autre, d'un membre de phrase à l'autre. Il paraît finalement bien hasardeux de construire un raisonnement/questionnement (à quelle hauteur correspond la ceinture d'un soldat portugais de 1755 ; à quelle hauteur d'eau cela correspond-il si l'on tient compte des changements de niveau du sol de la porte depuis cette époque) fondé sur la portion de phrase « la porte où il resta avec de l'eau jusqu'à la ceinture, abandonné de ses compagnons » pour proposer une valeur chiffrée de hauteur d'eau.

Conclusion

La réanalyse critique de documents historiques s'avère riche d'enseignements, en particulier en termes méthodologiques. Le contexte culturel, scientifique et religieux dans lequel les sources ont été élaborées ; les éléments implicites partagés par l'auteur(s) et le(s) destinaire(s) des documents ne doivent pas être négligés car ils ont une incidence (directe ou parfois plus complexe) sur les informations qu'ils contiennent. Décoder ce contexte et les liens qui l'unissent à la forme et au fond des sources documentaires est aujourd'hui capital pour préciser la fiabilité des informations utiles à la recherche d'aujourd'hui. Les prismes culturels qui imprègnent les chercheurs contemporains ne doivent également pas être négligés ou sous estimés (Chouquer, 2008) : des données chiffrées peuvent facilement être perçues comme relevant d'une objectivité scientifique manifestée par le recours à une forme numérique de l'information. Extraire ces données chiffrées de leur contexte sans analyse préalable peut conduire au contresens ou à l'anachronisme. Mais les autres informations contenues dans un document ainsi que le contexte de son élaboration, la confrontation avec d'autres sources (*a priori* moins directement intéressantes mais permettant d'affiner ce contexte culturel et implicite) peuvent améliorer la compréhension des phénomènes physiques extrêmes comme un séisme ou un tsunami.

Une analyse fine permet de préciser les mécanismes, les processus par lesquels ce contexte se manifeste dans les sources anciennes (figures rhétoriques, formes argumentatives, références et autorisations, etc.) : il est alors possible de mieux cerner la fonction d'une information dans le contexte qui lui a donné naissance, ce qui permet de mieux apprécier sa valeur relative et la manière dont elle peut éventuellement être transposée dans un contexte différent, et avec quelles précautions. Si la marge d'erreur des informations chiffrées portant sur le tsunami de 1755 sur les côtes nord-ouest de l'Afrique reste importante, elle peut ainsi être affinée de manière significative et les résultats proposés par Blanc (2009) apparaissent crédibles quoique certainement un peu sous-estimés pour El Jadida (Leone *et al.*, 2012). Cependant, les informations qualitatives collectées et mises en relation les unes avec les autres permettent d'enrichir de manière importante et de nuancer les modes d'appropriation d'un évènement grave par les sociétés chrétiennes du XVIIIe siècle, en situation de front pionnier sur ces terres africaines. C'est le tableau complexe et nuancé, et qui reste encore largement à compléter, des modalités d'insertion d'un évènement catastrophique rare dans le quotidien des sociétés qui se fait jour, à travers le cas particulier du tsunami de 1755 sur les côtes du nord-ouest de l'Afrique : une approche binaire opposant objectivité scientifique et croyances religieuses s'avère réductrice car c'est à travers la manière dont ces sociétés passées articulent vision globale du monde (par le biais de la religion) et évènements extrêmes (en tant qu'outils cachés de médiation entre la sphère divine et la sphère humaine) que nous pouvons tenter de renouveler l'approche « globale et intégrée des risques » (qui peine souvent à être mise en action sur le terrain aujourd'hui) en prenant en compte et en interrogeant des comportements anciens.

Bibliographie et sources

ANONYME, *Copia de huma carta Escrita pelo Padre Guardiam do Real Convento de Maquinés e Vice-Prefeito das Santas Missoens, que nas partes da Barbaria conserva a religiosa Provincia de Sao Diogo dos RR. PP., Franciscanos descalcos ao Padre Procurador dellas, Lisboa, Com todas aslicenças necessarias, Anno de MDCCLVI*, Lisbonne, 1756, 8 p., dit « Lettre de Meknès du 8 novembre 1755 et lettre de Tétouan du 24 novembre 1755 ».

ANONYME, *Relaçaõ do grande terremoto, que houve na praça de Mazagam en o primeiro de Novembro de 1755, Referem se os seos effeitos, e ruinas que causou, e brevemente*

1. Nous mettons des guillemets à « naturel » car le risque d'anachronisme est grand : nous voulons utiliser ici le mot dans le sens « phénomène physique » et sans y ajouter notre implicite culturel du XXIe siècle européen qui oppose « naturel » à « culturel » et met généralement les humains, si ce n'est en dehors de la nature, du moins à part, à une place particulière.

se mostra de que procedem os tremores de terra. Lisboa, Com as licenças necessarias, Anno 1755, Lisbonne, 1755, 8 p., dit « Rapport sur Mazagan ».

Baptista M. A., Miranda J. M., Revision of the Portuguese catalog of tsunamis, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 9, 2009, p. 25-42, www.nat-hazards-earth-syst-sci.net/9/25/2009/.

Beucher S., Meschinet De Richemond N., Reghezza M., « Les territoires du risque. L'exemple des inondations », *Historiens et géographes : Comment construire les territoires*, (coord. P. Arnould et G. Baudelle), UGI/CNFG, n° 403 spécial pour le congrès 2008 de l'UGI à Tunis, 2008, p. 103-111.

Blanc P.-L., « The tsunami in Cadiz on 1 November 1755 : a critical analysis of reports by Antonio de Ulloa and by Louis Godin », *C.R. Geosci.*, 340(4), 2008, p. 251-261.

Blanc P.-L., « Earthquakes and tsunami in November 1755 in Morocco: a different reading of contemporaneous documentary sources », *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 9, 2009, p. 725-738.

Chouquer G., *Traité d'archéogéographie, la crise des récits géohistoriques*, Paris, 2008, 200 p.

Do Couto L.-M., *Memorias para historia da praça de Mazagaõ, Luis Maria do Couto de Albuquerque da Cunha : Fide Goulven,* date inconnue, *1917*.

Gould S.-J., *Aux racines du temps,* Grasset, « Livre de Poche », biblio-essai n° 4247, Paris, 1990 (1re édition USA 1987), 318 p.

Gould S.-J., *Darwin et les grandes énigmes de la vie, réflexions sur l'histoire naturelle,* Seuil, coll. « Points Sciences », Paris, 1997 (1re édition USA 1977), 311 p.

Goulven J., *La Place de Mazagan sous la domination Portugaise (1502-1769)*, Larose, Paris, 1917, 245 p. (p. 164-166).

J.H.M.T. (Anonyme), *Journal historique sur les matières du tems*, Tome LXXVIII, décembre 1755, p. 470-474 ; Tome LXXIX, janvier 1756, p. 38-52 ; Tome LXXIX, janvier 1756, p. 68-71 ; Tome LXXIX, février 1756, p. 131-143 ; Tome LXXIX, février 1756, p. 146-147 ; Tome LXXIX, mars 1756, p. 175-179 ; Tome LXXIX, mars 1756, p. 214-217 ; Tome LXXIX, avril 1756, p. 301-304 ; Tome LXXIX, avril 1756, p. 310-311 ; Tome LXXIX, mai 1756, p. 368-369 ; Tome LXXIX, juin 1756, p. 462-464 ; Tome LXXX, juillet 1756, p. 12-13 ; Tome LXXX, juillet 1756, p. 39-44 ; Tome LXXXIX, juin 1761, p. 466-467 ; Tome CXIII, juin 1773, p. 474-476, p. 479.

Krafft M., *Les feux de la Terre, histoire de volcans*, Gallimard, Paris, 1991, 208 p.

Leone F. (Dir.), Baptista M.A., Zourarah B., Mehdi K., Lavigne F., Meschinet De Richemond N., Omira R., Mellas S., Peroche M., Lagahe E., Heymann A., Gherardi M., Grancher D., Cherel J.P., Sahal A., Denain J.C., Meunier N., Inani D., *Évaluation des vulnérabilités territoriales et humaines face aux tsunamis au Maroc (façade atlantique et ville d'El Jadida) : données historiques, modélisation de l'aléa et des enjeux humains, critères de vulnérabilité, indicateurs de risque, aide à la gestion des évacuations*, rapport WP5 (D5.4., D5.5, D5.6), Projet ANR-08-RISKNAT-05 MAREMOTI (MAREgraphie, observations de tsunamis, modélisation et études de vulnérabilité pour le nord-est Atlantique et la Méditerranée occidentale), dir. U.M.R. GRED/ Université Montpellier 3 & IRD, 2012, 190 p. et annexes.

Meschinet De Richemond N., Reghezza M., « La gestion du risque en France : contre ou avec le territoire ? », *Annales de Géographie*, 673, 2010, p. 248-267.

Meschinet De Richemond N., *Histoire et vulnérabilité : d'une perception empirique et globale à une approche théorique et sectorielle*, in Heude J., Guizard F., Beck C. (études réunies par), *Hors du lit : aléas, risques et mémoires*, Revue du Nord, univ. Charles-de-Gaulle Lille 3, coll. « Art et Archéologie », 16, 2011, p. 19-26.

Pereira De Sousa F.-L., *O Terremoto do 1 de Novembro de 1755 em Portugal e un Estudo Demographico* ; Distritos de Faro, Beja e Evora, Lisboa, vol. I, Cap. IV, *O maremoto e efeitos geologicos*, p. 84-90 ; Cap. VI, *O maremoto e efeitos geologicos*, p. 221, p. 503-510, p. 806-808 ; Cap. IX, p. 815-831 ; Cap. X, *O maremoto, efeitos luminosos e efeitos geologicos*, p. 846-849 ; Vol. II, Cap. VIII, *O maremoto e efeitos geologicos*, p. 403 ; Vol. II, Cap. X, *Principais sismos nos distrites de Santarem e Portalegre anteriores e posteriores ao de 1 de Novembre de 1755*, 1919, p. 417-420.

Royal Society (GB), *Philosophical transactions of the Royal society of London : giving some account of the present undertakings, studies, and labours of the ingenious in many considerable parts of the world*, Vol. XLIX, Part II, for the year 1756, M.DCC.LVII, 1756, p. 351-444.

Soyris, *Extrait d'une lettre de Maroc en datte du 5 novembre 1755 : de Soyris a Guys*, Archives nationales de France, Marine B7/403, 1755, 6 p.

2 Impacts des aménagements portuaires sur l'environnement côtier. Le cas des deux ports Bouzedjar et Béni-Saf, Algérie

Tarik Ghodbani
Département de géographie et de l'Aménagement du Territoire Faculté des sciences de la terre de géographie et de l'aménagement du territoire. Université d'Oran — Pôle de Belgaïd, Oran 31000, Algérie
ghodbani_tarik@yahoo.fr

Résumé. — Les aménagements portuaires occupent une place importante dans le paysage du littoral ouest algérien. Certes, la construction de plusieurs ports a eu un effet bénéfique sur le plan économique, mais elle a générée différents problèmes. L'ensablement des chenaux d'accès et des bassins d'accostage ont constitué la première préoccupation chez les gestionnaires, les techniciens et les utilisateurs. Les conséquences les plus apparentes sont le dérèglement du transit sédimentaire littoral et les modifications de la position du rivage.
Sur le littoral ouest de l'Algérie, les ports qui ont eu le plus d'impact sur l'environnement sont ceux qui se trouvent dans les zones caractérisées par une avant côte sableuse à faible bathymétrie et une dérive littorale active, comme le port de Bouzedjar et de Béni-Saf.
Dans les deux cas, Bouzedjar et Béni-Saf, l'étude des modifications dynamiques s'est faite à travers la comparaison, sur une longue période, entre photos aériennes et levés bathymétriques, complétée par des observations personnelles de terrain, effectuées entre 2005 et 2014.
Mots-clés. — Littoral, Algérie, Environnement, Dynamique Côtière, Ports.

Title. — *Impacts of Harbour Construction on the Coastal Environment. The Case of Bouzedjar and Beni-Saf, Algeria*
Abstract. — *The planning of ports is an important task within the landscape of the west coast of Algeria. The construction of several ports had a beneficial impact on the economy but it has generated various environmental problems. The silting of access channels and berthing basins have been the primary concern among managers, technicians and users.The disruption of coastal sediment transport and changes in the position of the shoreline are the most apparent environmental consequences in these areas*
On the west coast of Algeria, the ports that have the greatest impact on the environment are those who are in areas characterized by a sandy shoreface with low bathymetry and and an active drift force, such as the ports of Bouzedjar and Beni Saf. In both cases, Bouzedjar and Beni Saf, the study of dynamic changes was done by comparing, over a long period, aerial photography and bathymetric surveys, as well as observations through personal surveys, during the period between 2005 and 2010.

Keywords. — *Coastline, Algeria, Environment, Dynamic Coast, Harbour.*

Introduction

L'équilibre de la dynamique littorale est très fragile. Des obstacles avancés en mer tels que les aménagements portuaires risquent de perturber le transit des matériaux et de modifier de façon remarquable le profil du rivage. Des atterrissements se forment contre la jetée tandis que les secteurs situés au-delà démaigrissent et reculent, car ils sont privés d'apports sédimentaires. L'urbanisation collée au rivage s'oppose à la mobilité naturelle des plages. Le blocage des échanges sédimentaires entre les différentes parties de la plage et la multiplication de la capacité érosive des vagues, lors du déferlement, entraîne la perte d'importantes quantités de sable de plage.
En Algérie, d'une manière générale, l'urbanisation de la côte suit un rythme accéléré. Son impact est moins ressenti sur le milieu naturel en comparaison avec les côtes de Tunisie et du Maroc ou d'autres pays de la rive nord méditerranéenne. Cependant elle est de plus en plus inquiétante ces dernières années. Le bétonnage de la côte conduit actuellement à la régression de plusieurs plages et à une érosion qui menace à la fois la stabilité des infrastructures existantes et le développement futur de l'activité touristique balnéaire (Ghodbani, 2009).
Les résultats de M. Larid (2002), montrent sur quelques cas, qu'entre 1959 et 1993, 5 % seulement des plages algériennes étaient en phase d'engraissement, que 15 % étaient plus au moins stables et 80 % en phase d'érosion. Le même auteur a démontré que le recul moyen annuel varie selon les sites entre 0,3 m et 10,4 m, avec une accélération depuis le début des années 1980, en particulier dans les plages situées à proximité des zones urbanisées. Les causes sont attribuées à quatre principaux facteurs : la régression des apports continentaux due à l'effet de piégeage des sédiments provoqués par la construction des barrages et des retenues collinaires, la perturbation des transits littoraux par les infrastructures portuaires, l'extraction des matériaux pour répondre aux besoins croissants de l'urbanisation et enfin l'occupation du rivage par les divers aménagements dont les constructions illicites à usage d'habitation. L'évaluation des impacts des aménagements côtiers et les risques qui peuvent engendrés restent limités dans le contexte du Maghreb d'où la nécessité de ce travail. Cependant le peu de travaux, publiés par R. Paskoff (1999) et A. Oueslati (2004), sur les côtes à forte dynamique sédimentaire, en Tunisie et au Maroc, nous ont guidés dans notre travail méthodologique.

2.1 Choix des cas d'étude et méthode de travail

Les aménagements portuaires occupent une place importante dans le paysage du littoral ouest algérien. On compte dix ports de différents types : commercial, militaire, de pêche et de plaisance. Certes, la construction de plusieurs ports a eu un effet bénéfique sur le plan économique, mais elle a généré différents problèmes. L'ensablement des chenaux d'accès et des bassins d'accostage ont constitué la première préoccupation chez les gestionnaires, les techniciens et les utilisateurs. Leur entretien a suscité plusieurs campagnes de dragage, parfois très coûteux. Sur le plan environnemental, les conséquences les plus apparentes sont le dérèglement du transit sédimentaire littoral et les modifications de la position du rivage.

Sur le littoral ouest, les ports qui ont eu le plus d'impact sur l'environnement sont ceux qui se trouvent dans les zones caractérisées par une avant côte sableuse à faible bathymétrie et une dérive littorale active, comme le port de Bouzedjar et de Béni-Saf (figure 1). D'autres ports tels qu'Oran ou Mers el Kébir, occupant une baie à falaise haute et à bathymétrie accusée à fond rocheux (Leclaire, 1972), ont moins d'impact sur la dynamique littorale. La position parallèle au rivage de leurs principales jetées favorise une circulation plus libre de la dérive littorale dominante. Notre méthode de travail dans l'analyse des impacts sur le rivage de Bouzedjar et de Béni-Saf s'est basée essentiellement sur une approche diachronique à travers la comparaison entre photos aériennes à plusieurs dates, images satellitaires et profils bathymétriques. Des mises à jour des informations ont été effectuées, entre 2005 et 2014, à travers des levés de terrain personnels et des entretiens avec les ingénieurs de la Direction des Travaux Publiques d'Aïn Témouchent et les anciens pêcheurs des deux sites côtiers.

2.2 Le cas de Bouzedjar, une plage fragmentée

La baie de Bouzedjar se trouve à 60 km à l'ouest d'Oran. Cette partie du Sahel ouest oranais connaît depuis quelques années une occupation humaine de plus en plus dense. La richesse en poisson des eaux marines et la saturation du port d'Oran sont les deux principales raisons qui ont poussé à décider de l'installation d'un port de pêche dans cette baie en 1985. La zone côtière de Bouzedjar est programmée aussi pour accueillir une zone d'expansion touristique (ZET) prioritaire et recevoir d'importants investissements au cours des prochaines années. Les conséquences sur l'environnement côtier deviennent importantes dès la mise en service de l'infrastructure portuaire aux débuts des années quatre-vingt-dix.

2.2.1 Une baie ouverte à faible bathymétrie

La baie de Bouzedjar s'ouvre sur une profondeur d'environ 700 m et une longueur de 2 km. Elle est limitée par deux avancées rocheuses : le promontoire de Djebel Moul el Bhar à l'est et le Cap Figalo à l'ouest. Façonnées dans des brèches et coulées d'andésite à biotite, ces deux formes rocheuses attestent d'une activité volcanique ancienne. À l'intérieur de la baie, l'interface représente des falaises basses découpées par des ravinements et séparées de la mer par une plage

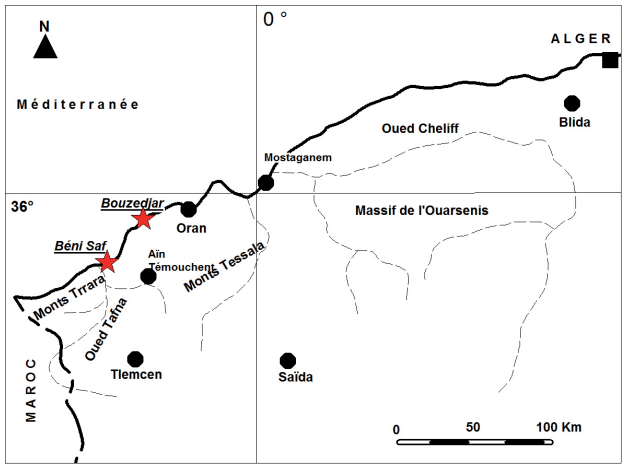


Fig. 1. — Localisation des deux ports d'études sur le littoral ouest de l'Algérie.

sableuse de quelques dizaines de mètres de large. À l'est, suit une petite crique abritant une agglomération de pêcheurs et de plaisanciers. À l'ouest, par contre, la côte reste haute et déchiquetée sur quelques kilomètres jusqu'à la plage de Sbiat. La partie terrestre de la baie représente une grande dépression qui occupe le secteur septentrional du plateau des Ghamras. Celui-ci est limité, au nord-est par la formation volcanique de Tifraouine, au sud-est, par la dépression de la grande sebkha d'Oran et au sud ouest par les montagnettes de Terga et le plateau d'Aïn Témouchent. Au contact du plateau des Ghamras, la dépression offre des pentes fortes qui s'atténuent à l'approche de la côte. Du point de vue géologique, les terrains sont en majorité formés de marnes et de grès micacés avec affleurement d'éboulis calcaires dans le centre et à la périphérie. En arrière du Djebel Moul el Bhar, des grès à hélices et un bas fond sableux occupent une surface signifiante (Doumergue, 1912).

Dans la partie marine, selon la carte marine (Service hydrographique de l'INC, 1979) le plateau continental est assez large et les profondeurs sont faibles, sans apparence particulière d'accident topographique. Par ailleurs, l'étude sédimentologique menée en 1996 par le laboratoire des études maritimes (LEM) montre l'existence de deux classes granulométriques (160 et 250 µm) avec une diminution de la taille des particules de la côte vers le large. L'hydrodynamisme de cette côte est caractérisé par des houles dominantes de direction nord, nord-ouest et nord-est. Cependant, d'après le bureau d'étude français Sogreah qui s'est chargé d'étudier la réalisation du port de Bouzedjar en 1984, seules les houles nord et nord-est peuvent atteindre la baie. En abordant la côte avec une incidence oblique, ces dernières engendrent un courant de dérive littorale dans le sens est-ouest, transportant les sédiments depuis leur source jusqu'à la zone portuaire. En parallèle, un courant de retour assure la dissémination des sédiments dans le profil de la plage (LEM, 1996). Ces apports solides ont deux principales origines : l'érosion du promontoire Moul el Bhar et la petite crique limitrophe, mais les quantités les plus importantes restent celles qui sont charriées par l'oued Ed Draa qui, selon les estimations du LEM (1998), peuvent atteindre 2240 m^3/an. Cette capacité de transport est liée à la vulnérabilité des terrains proches de la côte, due principalement à la fragilité du sol, au régime torrentiel des pluies et à la faible densité de la couverture végétale. Ces facteurs,

Photo. 1. — Chantier naval inondé et éboulement, Port de Bouzedjar, novembre 2010.

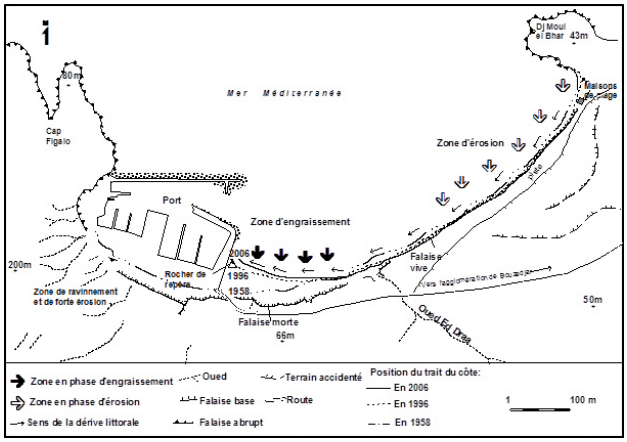


Fig. 2. — La position du trait de côte avant et après la construction un port de Bouzedjar.
Source : Ghodbani, 2009.

qui favorisent une forte érosion, exposent la structure portuaire au risque d'éboulement durant les saisons hivernales (voir photo 1).

2.2.2 Le port de pêche et ses impacts

Le port de Bouzedjar, construit par l'ex entreprise algérienne la SOTRAMO, est composé de deux grandes jetées : la première, d'une longueur de 450 m, occupe une position parallèle au rivage. La deuxième est perpendiculaire à la côte et sa longueur est de 160 m. La superficie totale du port est de 16 hectares. Son plan d'eau, occupant 7,2 hectares, est partagé par six quais d'accostage destinés principalement aux embarcations de pêche (figure 2). La situation du port au fond d'une baie, sur le piémont du Cap Figalo lui confère une bonne protection par rapport aux influences marines, vents et vagues, du nord-ouest qui sont plus importantes en force et en fréquence, en comparaison avec les influences de direction nord-est.

Les impacts sur la dynamique littorale sont apparus dans les changements importants du profil de la plage. On assiste à un blocage de la dérive causé par la jetée est. De plus, de par sa position perpendiculaire à la côte, cette même jetée favorise l'engraissement de la partie ouest de la plage au détriment de la partie est.

La comparaison entre les photos aériennes : de 1959 et de 1996, quelques années après la mise en service du port, complétée par des relevés de terrain personnels réalisés durant l'année 2006, montre les changements suivants :

En 1959, la plage occupait presque la totalité de la baie (IGN, 1959), d'une largeur moyenne ne dépassant pas les 60 m. Son profil affichait une certaine régularité entre les différents segments. À l'extrémité est de la baie, à la base du promontoire Moul el Bhar, deux maisons occupaient l'arrière plage, à une distance de 40 m du trait de côte.

En 1996 : le dessin de la plage a nettement changé après la construction du port (INC, 1996). On peut facilement constater une avancée importante du trait de côte sur environ 100 mètres depuis la racine de la jetée est, soit un déplacement d'environ 16,5 m/an. Le retrait de la mer dans cette zone s'est accompagné de l'apparition d'une nouvelle plage sableuse atteignant, dans son avancée, un rocher qui était loin du rivage en pleine mer (photo 1 et 2). Par contre, la partie est de la plage montre un recul généralisé du trait de côte avoisinant les 40 m, traduisant une sévère régression de la bande sableuse soit 6,5 m/an en moyenne.

En 2008 : Nos relevés de terrain sur la position du trait de côte réalisés par rapport à des repères fixes ont révélé la même tendance. Dans la zone ouest, le trait de côte dépasse le rocher cité ci-dessus de 5 m (photo 3) et, à l'est, les falaises sont de plus en plus attaquées par les vagues. Ici, la largeur de l'estran a diminué et ne s'étend plus que sur quelques mètres. Évidemment, l'engraissement des segments proches du port a joué en faveur de l'élargissement de la plage, mais aussi de son épaississement. En effet, l'apparition de micros dunes (Nebkas) couvertes au sommet par une végétation basse au niveau de l'arrière plage (photo 4) atteste d'une abondance des sédiments. *A contrario* dans la zone est, à partir de la rive droite de l'embouchure de oued Ed Draa, l'érosion est de plus en plus intense. Elle se manifeste par les faits suivants : la disparition de la bande sableuse qui laisse la place à un matériau plus grossier, le sapement presque continu de la falaise argileuse et enfin l'état des deux maisons à l'extrémité de la plage ; l'une est toujours debout grâce à des avancées de défense, l'autre est complètement détruite par l'action des vagues favorisée par le recul du trait de côte et l'avancée de la mer (photo 5).

Les modifications engendrées par l'aménagement de ce port ne se limitent pas à la partie émergée de la plage. Elles affectent aussi sa partie submergée. En effet, la comparaison entre deux relevés bathymétriques réalisés en 1983 par la Sogreah et en 1995 par le Laboratoire des Étude Maritimes (LEM) sur la même zone (figure 3), montre un exhaussement des fonds dans la partie proche de la passe d'entrée, matérialisée par un resserrement des isobathes -4, -5, -6, -7 et -8 m. Cette nouvelle morphologie marine est ponctuée selon le LEM par des rides d'avants côte dont la plus grande est de 220 m de longueur et 20 m de large, et la plus petite est de 80 m de longueur et 20 m de large. Cet exhaussement du fond marin associé à une avancée du trait de côte, menace d'ensablement le chenal d'accès du port.

2.2.3 Autres impacts sur le littoral

La baie de Bouzedjar est appelée, dans les différents outils d'aménagements locaux et régionaux, à recevoir une impor-

Photo. 2. — Chantier du port en 1988. On remarque la position du rocher en pleine mer avant l'édification de la jetée est (cliché DTP d'Aïn Témouchent, 1988).

Photo. 3. — Vue générale sur le port et la baie de Bouzedjar (mars 2008). Le rocher est à 5 m à l'arrière du trait de côte (cliché Ghodbani, 2008).

Photo. 4. — Petites dunes (Nebkas) et végétation basse à l'arrière de la plage à proximité du Port (cliché Ghodbani, 2008).

tante Zone d'Expansion Touristique (ZET), sur une surface de 120 hectares, couvrant presque la totalité de la baie (figure 4). De grands investissements (en partie en cours de réalisation), sont déjà programmés (grands hôtels, bungalows, équipements, routes…) pour une capacité totale de 6 600 lits. L'examen de l'avant projet d'aménagement réalisé en 1997 par le groupe espagnol Flamingo Intercontinental, révèle la non prise en compte des changements dynamiques induits par le nouveau port. Pourtant, la plage considérée comme support à cette nouvelle activité prometteuse est sévèrement érodée tout le long de la partie est de la baie. Plus grave encore, la zone de falaise programmée pour l'édification d'un front de mer est actuellement en phase de recul accéléré, sous l'effet d'une forte exposition à l'action destructrice des vagues. Le maintien d'un tel plan d'aménagement nécessitera de lourds travaux de réhabilitation et de défense (engraissement artificiel, épis, enrochement…). Par ailleurs, une urbanisation trop proche du rivage bloquera les échanges naturels entre la partie terrestre et la partie

Photo. 5. — Une maison, à l'extrémité est de la baie de Bouzedjar, sapée et détruite par les vagues (cliché Ghodbani, 2008).

marine. Elle aura des conséquences négatives et irréversibles sur l'équilibre de tout l'écosystème littoral. En plus de ces perturbations d'ordre hydrodynamique, l'environnement côtier de Bouzedjar connaît de forts taux de pollution : les rejets d'eaux usées domestiques de l'agglomération de Bouzedjar dans la mer sans traitement préalable ainsi que le dégazage sauvage des bateaux de pêche et le rejet des emballages défectueux dans les eaux côtières limitrophes, participent gravement à la dégradation de la plage et de ses eaux de baignade.

2.3 Le cas de Béni-Saf, des falaises en recul

Béni-saf est un port relativement ancien. Il a été construit entre 1877 et 1880 par la société multinationale Soumah et Tafna, qui détenait la concession de la mine de fer de Ghar el Baroud. Avec l'épuisement de cette mine, vers les années soixante-dix, le port est exclusivement dévolu à la pêche. Le port de Béni-Saf est situé au fond d'une baie, entre le cap Acra et le cap Oulhassa. Par sa position engagée dans la mer, il a provoqué un déséquilibre majeur du transit littoral. L'ensablement consécutif de ses bassins et de son chenal d'accès a imposé plusieurs campagnes de dragage.

2.3.1 Un site étriqué

La côte qui abrite le port et la ville de Béni-Saf se présente comme une interface de falaises rocheuses taillées dans des sables grésifiés et des grès. Ce relief élevé offre un bon abri au port, par rapport aux vents est et sud. Les ouvertures de cette côte sur la mer sont représentées par des embouchures d'oueds encaissés en forme de vallons, ravinant un relief de plateau et de montagnettes. Ces derniers sont limités, à l'ouest, par la basse vallée de la Tafna, à l'est, par l'oued El Maleh et prolongés au sud par le plateau d'Aïn Témouchent. Du point de vue géologique, les terrains abordant le port et supportant la ville sont façonnés dans du sable grésifié et des grès encroûtés. Vers l'ouest jusqu'à la basse vallée de la Tafna, les formations présentent des basaltes et tufs plio-quaternaires, surmontés au nord par des dunes anciennes

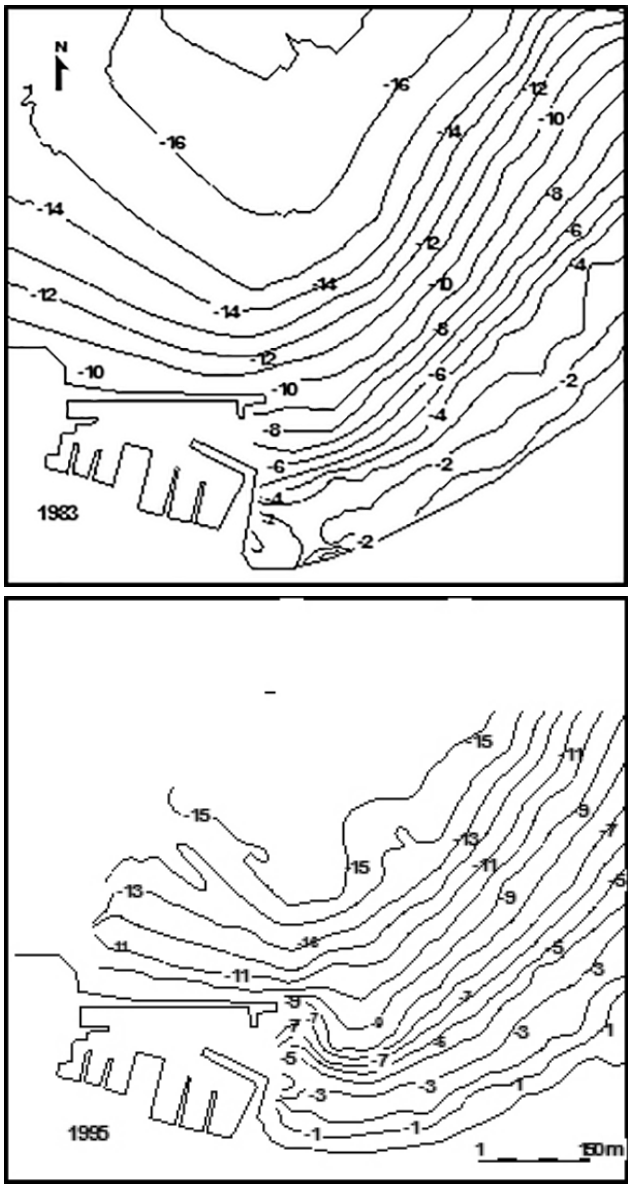


Fig. 3. — Schémas bathymétriques de la zone proche de l'entrée du port. Source : Laboratoire des Études Maritimes (LEM, (1996).

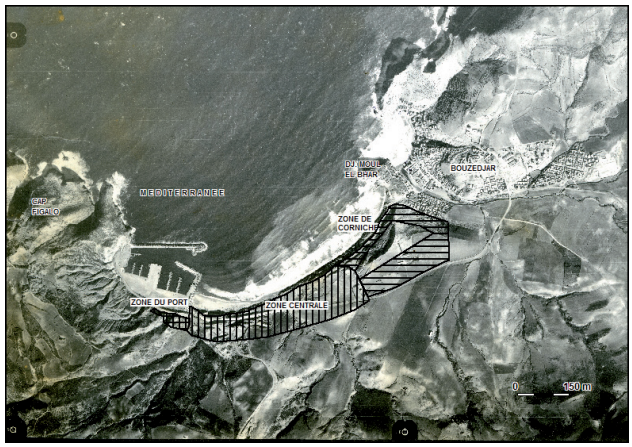


Fig. 4. — Localisation de la future ZET sur la baie de Bouzedjar. Source : Ghodbani, à partir de la photo aérienne, INC (1996) et plan d'aménagement de la ZET, Gropo Flamingo intercontinentale (1997).

à sable grésifié et grès à clypéastres. Au sud et à l'ouest de la côte, d'importantes surfaces de schistes sont prolongées par des terrains calcaires miocènes et jurassiques.

La partie marine du littoral est connue pour sa faible bathymétrie où l'isobathe –20 m se trouve à environ 1,2 km de la côte. À ce niveau, le plateau continental est large. Sa pente est à la fois faible et régulière (Leclaire, 1972). Par ailleurs, la dynamique littorale dans cette partie de la côte est caractérisée par deux faits importants : le premier est relatif à une élévation dans la fréquence et la force à la fois des vents et des houles de direction ouest nord-ouest. Le second est en liaison avec une dérive littorale forte et dominante, de direction ouest-est, charriant d'importantes quantités de sédiments depuis l'embouchure de la Tafna.

En effet, des études sur des données climatiques et hydrodynamiques de la région par Rémimni et Rémaoun 1984 ; Laboratoire hydraulique central de France 1971, Benzada et Dali, 1995 ; Laboratoire des Études maritimes 1998, ont montré une importante fréquence des vents de direction sud et ouest, durant toute l'année. La fréquence des vents peut varier entre 11 % à 20 %, avec un maximum de vitesse entre 15 et 25 nœuds, enregistrés pendant la saison hivernale. Les vents de secteur nord et nord nord-est occupent la deuxième position du point de vue de la fréquence, mais gardent les mêmes vitesses : 15 à 20 nœuds. Il va de même pour les houles qui enregistrent une fréquence importante (55 %) de direction ouest et nord, avec une nette concentration pendant la saison hivernale. La saison estivale voit dominer plutôt les houles de direction nord est.

Quant aux transits littoraux, une étude réalisée par le laboratoire central d'hydraulique de France (LCHF) en 1971 a montré l'importance de la charge sédimentaire en passage, qui peut atteindre les 130 000 m^3/an. Le transit est dirigé d'ouest en est par une forte dérive littorale ; ce qui permet l'engraissement de plusieurs plages dans cette partie de la côte. Une étude minéralogique et microscopique de plusieurs échantillons prélevés tout le long de l'avant côte de Béni-Saf, menée par le même laboratoire dans le but de déterminer l'origine et la taille des matériaux, a montré que la plupart des sédiments proviennent des apports de l'oued Tafna avec une prédominance des diamètres variant entre 140 µm et 210 µm.

2.3.2 Impacts du port sur le littoral

De forme rectangulaire, le port de Béni-Saf présente un plan d'eau d'environ 16 ha délimité par trois jetées, ouest, est et nord. Les deux premières, parallèles entre elles, sont enracinées perpendiculairement au rivage. La jetée nord raccordée à la jetée ouest court dans une direction semblable à celle de la côte (sud-ouest, nord-est) (photo 6). La passe d'entrée, ouverte à l'est et au nord-est, a une largeur initiale de 160 m. Les longueurs respectives des ouvrages sont de 400 m, 300 m et 500 m.

Dès sa construction, le port avait une emprise remarquable sur la mer. Le principal impact constaté est le blocage partiel du transit littoral dominant dans le sens ouest-est. Une rétention s'est formée. Elle s'est traduite au cours du temps par la formation d'une importante plage à l'ouest du

Photo 6. — Vue générale sur Béni-Saf dans les années quarante IGN (1945).

Photo 7. — L'urbanisation de Béni-Saf sur les bassins versants : les oueds ici sont colmatés ou déviés (cliché Ghodbani, 2009).

port, l'exhaussement des fonds environnants, l'apparition d'une flèche sableuse à l'extrémité de la jetée nord et une accélération de l'érosion des zones situées à l'est du port. L'étude de ces modifications se fait par la comparaison, sur une longue période, entre des photos aériennes et des levés bathymétriques, complétée par des observations personnelles effectuées en 2007 :

En 1945 : Prise d'un angle oblique (IGN, 1945), la première photo couvre le site étudié. On peut remarquer l'étalement d'une grande plage à l'ouest du port. À ce niveau le trait de côte devance une zone de falaise morte, depuis la racine de la jetée ouest, sur une distance moyenne de 200 m. Cette forme de rivage ne reflète pas l'évolution naturelle de la côte. Elle est le résultat d'une interception des transferts sédimenteux exercée par la jetée ouest. En effet, le levé bathymétrique de 1878, réalisé pendant les travaux d'édification de cette jetée, ne fait pas apparaître l'existence de cette plage dénommée actuellement la plage du Puit (LEM., 1998). Au sud, on remarque l'alignement d'une centaine de maisons balnéaires parallèles au rivage. Dans la zone est du port, d'autres photos aériennes obliques, de même date, montrent l'existence d'un ensemble de maisons de pêcheurs occupant une petite plage de quelques mètres de large, formant ce qui était appelé auparavant le quartier de la marine. Celui-ci était relié aux autres quartiers de Béni-Saf par une route de corniche creusée dans la falaise vive de Sidi Boucif. Dans cette partie de la côte, on remarque l'apparition d'une petite plage accolée à la digue est. Cette plage doit son existence, selon le LCHF (1971), au passage d'une faible dérive littorale de direction ouest est. Par ailleurs, au niveau de la face interne du coude reliant la jetée ouest à la jetée nord, apparaît une accumulation sableuse d'une taille moyenne. Ce phénomène s'explique par des contournements et des franchissements d'une partie de la charge sédimentaire transitant le long de la jetée nord et pénétrant à l'intérieur du bassin portuaire.

En 1958 : Mis à part une légère avancée du trait de côte au niveau du segment ouest de la plage du Puit, la photo ne montre pas de grands changements dans le profil du rivage (IGN, 1958). Cependant, à l'extrémité nord ouest du port, on constate un élargissement de l'accumulation sableuse dans le sens de la largeur et de la longueur qui atteint, selon nos calculs, une superficie d'environ 450 m^2.

En 1972 : Cette photo fait apparaître deux faits importants (INC, 1972). Le premier est la disparition de l'accumulation sableuse due à des travaux de dragage intensifs qui se sont étalés sur 9 ans (1970-1979). Les volumes de sable extraits sont estimés par Benzada et Dali (1995) à 750 000 m^3 soit plus de 80 000 m^3/an. Le deuxième fait est une certaine stabilité du trait de côte au niveau de la plage du Puit. Par ailleurs, selon les déclarations des techniciens de la subdivision des travaux publics de la Daïra de Béni-Saf, la route de la corniche, à l'est du port, commence à partir de cette date, à souffrir d'une érosion intensive due au recul accéléré de la falaise de Sidi Boucif. La circulation est fréquemment interrompue pour des travaux de renforcement de la chaussée, endommagée après chaque intempérie. L'érosion peut être expliquée ici par l'accentuation des profondeurs dans cette partie de la côte qui se trouve privée d'une importante charge sédimentaire. Cela a favorisé un nouveau profil bathymétrique qui a donné plus d'amplitude aux vagues déferlantes sur les pieds de la falaise, donc de fortes pressions lors du sapement.

En 1992 : Cette photo montre l'importance de l'étalement urbain de la ville de Béni-Saf qui s'est fait dans différents sens (INC, 1992). Au niveau de la zone ouest du port, l'urbanisation occupe presque 90 % de la surface totale de la plage. Dans les autres secteurs du site urbain plusieurs oueds ou valons, comme oued Ahmed ou Boukourdan (photo 7), traversant autrefois les quartiers de la ville, sont soit déviés, soit colmatés. L'urbanisation prive la côte d'une importante masse sédimentaire. Cette photo aérienne, contrairement aux précédents, indique que la plage du Puit commence à reculer par endroits, selon une distance moyenne de 20 m. Au nord ouest du port, l'accumulation sableuse, aspirée par les travaux de dragage, réapparaît une deuxième fois, mais sous une forme différente de la première. Sur la zone est du port, la route de la corniche ainsi que les maisons du quartier de la marine sont ravagés par la tempête qui a frappé la côte ouest algérienne en décembre 1980 (photo 8 et 9). Ce quartier s'est vidé de ses habitants et la route de la corniche, déjà très fragilisée par l'érosion marine a perdu de grands tronçons. L'effondrement de grandes parois est facilement repérable au pied de la falaise de Sidi Boucif. Malgré les dégâts, la route reste toujours ouverte à la circulation piétonnière. Enfin, on note l'élargissement de la jetée est qui reçoit un nouveau chantier naval.

Photo 8. — Démantèlement de la route de la Marine (cliché Ghodbani, 2007).

Photo 9. — Risque d'inondation et maisons détruites dans l'ancien quartier de la Marine (cliché Ghodbani, 2008).

En 2008 : Nos visites successives de terrain nous ont permis de constater dans la partie est du port un démantèlement presque total de la route suite aux éboulements et aux décollements de grandes parois de la falaise Sidi Boucif. Ce fait a renforcé l'isolement des quartiers Est de Béni-Saf, du port et du centre ville qui ne sont joignables, pour les habitants, qu'après un long détour. Dans la zone ouest du port, la plage donne dans plusieurs endroits, des signes d'érosion. Des travaux de défense ont été réalisés à l'est et à l'ouest de la plage, pour protéger quelques maisons ainsi que le bâtiment de l'aquarium. La tendance au recul de la plage du Puit peut expliquer une régression dans la charge sédimentaire transitant par ce segment de la côte. Effectivement, l'édification du barrage de Boughrara, en amont de l'oued Tafna, en 1995 a participé au piégeage de grandes quantités de matériaux : environ 1 540 000 de tonnes, selon l'Agence nationale des barrages et transferts (ANBT, 2006. Ce poids est équivalent à 962 500 de m^3 de vase retenue, soit 0,875 % de la capacité totale du barrage en volume qui peut emmagasiner jusqu'à 110 millions de m^3.

Les déséquilibres de la dynamique littorale ne se limitent pas à la morphologie du rivage. Ils affectent aussi le fond marin. En effet, des bouleversements du profil de l'avant côte sont enregistrés. L'analyse de plusieurs levés bathymétriques selon le LEM (1998), faits à l'ouest et au nord du port, sur une période de plus de 110 ans (1878, 1895, 1902, 1979, 1989, 1997), conduit aux résultats suivants :

À l'ouest du port, l'exhaussement des fonds est évident. Selon les périodes et la distance par rapport au rivage, la moyenne générale d'ensablement varie entre 1 et 20 cm/an. Par conséquent en 1997, l'épaisseur a atteint, au point situé à 600 m du rivage actuel, une hauteur d'environ 2,6 m, par rapport à sa position initiale en 1878. Ce phénomène a engendré selon l'analyse du LEM, basée sur un modèle réduit, au déplacement de la ligne de déferlement des vagues comprises entre les isobathes -4 m et -9 m franchissant, ainsi les limites physiques du port. Ce dernier se trouve dans la zone de déferlement. La mobilisation des matériaux par les houles dominantes de direction ouest nord-ouest favorise donc un transport sédimentaire le long de l'ouvrage principal. En effet, la superposition de plusieurs coupes bathymétriques, faites au large du port, montre un ensablement important sur une distance de 400 m, à partir de la jetée principale (figures 5 et 6).

Photo 10. — Enrochement autour de l'aquarium de Béni-Saf (cliché Ghodbani, 2009).

C'est la preuve d'un transit dans le sens ouest est, associé à une perte considérable de la charge sédimentaire lors de son passage. Le reste de la charge est abandonné à l'extrémité de la jetée nord, formant avec le temps une flèche sableuse. Notons ici que la dynamique n'est toutefois pas simple, des départs sédimentaires peuvent se manifester de temps à autre de la côte vers les hauts fonds et le contraire (LCHF, 1971). Cette forme sous-marine se constitue lorsqu'en extrémité de l'ouvrage le bilan d'énergie de la houle et des courants associés est insuffisant pour transporter les matériaux qui vont transiter le long de l'ouvrage. Cette flèche, qui occupe la passe d'entrée du port, est de forme ellipsoïdale dont l'axe forme avec la digue principale un angle de 55° (LEM, 1998). La configuration de la flèche gêne considérablement l'accès des navires au port car une grande partie du chenal d'accès se trouve sous l'emprise directe de cette flèche.

La dynamique littorale de la côte de Béni-Saf a évolué d'une manière complexe suite à la construction du port, selon plusieurs étapes. Une synthèse simplifiée des changements peut en rendre compte (figure 7) :

L'édification du port a contribué à l'évolution de la plage du Puit. L'avancée du trait de côte la plus spectaculaire a été enregistrée au cours des 25 premières années qui ont suivi la

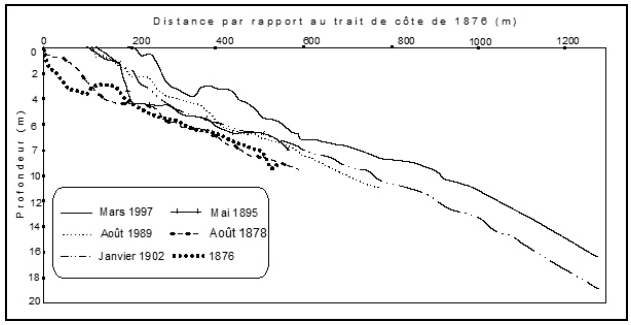


Fig. 5. — Évolution de la bathymétrie à l'ouest du port de Béni-Saf. Source : LEM (1998).

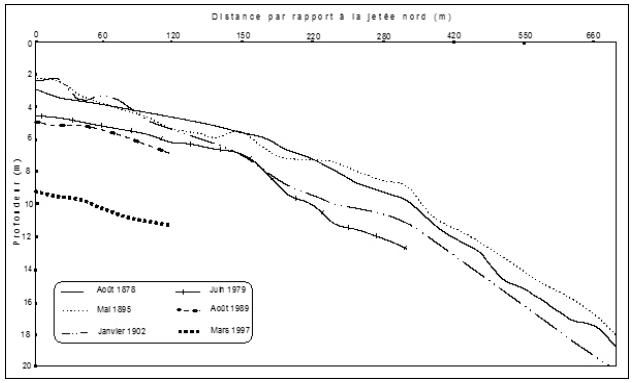


Fig. 6. — Évolution de la bathymétrie au nord du port de Béni-Saf. Source : LEM (1998).

construction de la jetée ouest. À partir des années cinquante, le profil de la plage du Puit montre une certaine stabilité, tandis que les falaises de la zone Est du port commencent à reculer sous l'effet de l'érosion marine, due principalement à une accentuation de la bathymétrie. Les principaux impacts de cette érosion sont la destruction du petit quartier de la marine et le démantèlement de la route de raccourci reliant les quartiers Est de Béni-Saf au port et au centre-ville.

Au cours d'une seconde étape, l'exhaussement des profondeurs a engendré le déplacement de la zone de déferlement comprise entre l'isobathe -4 m et -9 m. Suite à cela, la plage a commencé à libérer une partie de son stock sédimentaire, pendant les périodes de fortes vagues provenant du secteur ouest nord-ouest. Suite à l'action des vagues, une partie des matériaux est peut être remontée vers la digue principale et introduite à l'intérieur du port par franchissement. Par contre, les plus grandes quantités sont entraînées vers l'extrémité de la digue où une flèche sableuse se forme, bloquant une grande partie du chenal d'accès. Sous l'action des houles diffractées et des houles de secteur nord-est, une partie du sable de cette flèche est rabattue vers l'intérieur du bassin portuaire où elle s'accumule sur la face interne de la digue principale. Le volume de sable apporté au niveau de l'entrée du port est important. Mais selon Benzada et Dali (1995), l'ensablement de cette zone diminue dans le temps, puisqu'on a enregistré, pour la période 1979-1989, 512 655 m^3 contre 338 910 m^3 pour la période 1989-1997. En même temps, surtout à partir des années 1990, le trait de côte de la plage du Puit connaît, par endroits, un recul significatif d'une moyenne de 20 m, reflétant ainsi une diminution de la charge sédimentaire transitant dans cette partie de la côte. Cette régression est peut être expliquée par la déviation des oueds au niveau du site

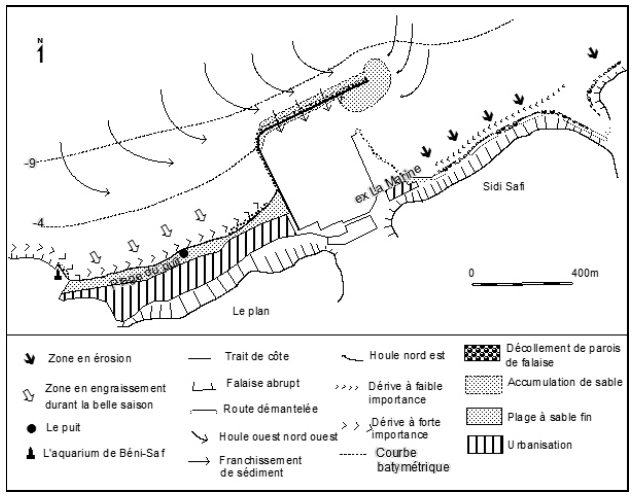


Fig. 7. — Schéma simplifié de la dynamique littorale sur la côte de Béni-Saf. Source : Ghodbani, 2009.

urbain de Béni-Saf, d'une part, et par la rétention de grandes quantités de matériaux exercée par le nouveau barrage de Boughrara, à environ 60 km en amont de l'embouchure de l'oued Tafna, d'autre part.

2.4 Enjeux socio économiques et solutions d'aménagement

Parallèlement à ces modifications hydrodynamiques et environnementales, l'activité de la pêche a connu un développement important sur la côte ouest algérienne. Selon les statistiques fournies par la direction des pêches de la wilaya d'Aïn Témouchent les deux ports étudiés détiennent depuis quelques années environ 40 % de la production halieutique nationale.

Les efforts de l'État dans la subvention des petits métiers et les aides alloués au secteur primaire dans le cadre de la relance économique lancé depuis 2000 ont favorisé l'augmentation en nombre de la flotte et par conséquent une évolution dans la productivité. Une enquête menée par Rahou et Belabbes (2010) consacrée au port de Bouzedjar montre un élargissement remarquable du rayon de la commercialisation du poisson bleu (tableau 1). À cette dynamique s'ajoute une activité touristique balnéaire qui se développe par l'introduction d'une flotte de plaisance ainsi que l'approbation de projets d'hôtellerie partageant le même espace de la côte avec les structures portuaires.

Face à cette littoralisation des activités menacées par l'ensablement des chenaux d'accès aux ports et des bassins d'accostage, l'érosion des plages limitrophes ainsi que le recul des falaises, des actions d'aménagement ont été suggéré pour éviter d'éventuels risques. Les gestionnaires, en l'absence d'une vision de développement intégrée, visent à travers différentes actions à préserver la durabilité des emplois dans ces ports malgré les coûts que cela pourra induire.

Dans le cas de Bouzedjar deux épis de 170 m de longueur ont été réalisés vers la fin 2005 au niveau de la rive gauche de l'Oued Ed Draa, perpendiculairement au rivage, tandis qu'un deuxième est édifié sur une distance de 300 m du premier. Le but de ces ouvrages, qui ont coûté l'équivalent

Tabl. 1. — Commercialisation du poisson bleu à travers le territoire nationale durant le mois de mars 2010.

Wilaya	Quantité (Tonne)	%
Sétif	46, 4	40,37
Sidi Bel Abbes	13	11,28
Batna	11,6	10,09
Oran	11,1	9,69
Mascara	10,3	8,93
Media	9,6	8,34
Alger	8,6	7,5
Béchar	4,37	3,8
Total	115	100

Source : Rahou & Belabbes 2010.

de 2 280 000 d'euros, est de freiner le transit sédimentaire. Cette opération coûteuse qui a fortement artificialisé la baie de Bouzedjar a été suivie d'une grande opération de dragage durant le printemps 2013. De grands volumes de sable extraits des fonds marins appartenant auparavant à l'avant plage ont été revendus aux chantiers de construction. À Béni-Saf à l'extrémité nord-ouest du bassin portuaire, la masse sableuse qui occupait la partie interne du coude a fortement régressé grâce à l'extraction de 50 000 m^3 de sable suite à des opérations de dragage réalisées entre 1999 et 2012, Par la suite un nouvel épi qui a été édifié perpendiculairement à l'extrémité interne de la jetée nord (photo 10), a permis une réduction partielle de l'ensablement du port. Enfin la route de la corniche reliant le port aux quartiers est de la ville a été totalement construite avec des enrochements de renforcement contre l'attaque des vagues.

Conclusion

L'impact négatif des aménagements portuaires sur le rivage est ainsi très visible dans les deux cas étudiés du littoral ouest. Il se manifeste essentiellement par la fragmentation de la côte en zones d'engraissement et en zones de recul. Outre les aménagements portuaires, l'urbanisation de la côte et les travaux d'aménagement des bassins versants (urbanisation, construction de barrages, etc.) privent désormais le rivage de grandes quantités de matériaux et accentuent le déficit en budget sédimentaire des plages. La lutte contre l'érosion côtière passe par des solutions multiples mais très coûteuses : épis, enrochement… Les actions entreprises restent cependant ponctuelles et altèrent le paysage naturel.

Dans les deux cas, la fragilité paraît évidente. Cependant la pression exercée par le développement des activités économiques ne cesse d'augmenter. Une prise en charge des zones côtières par l'instauration d'une gestion intégrée est de plus en plus nécessaire pour un développement durable de tout le littoral.

Mais ce qui attire le plus l'attention, c'est le nombre important de projets programmés sur le littoral ouest (ZET, abris de pêche, ports) inscrits pour la plupart dans les divers outils d'aménagements locaux et régionaux sur le moyen et le long terme. Cette ambition de développement économique reste malheureusement loin des préoccupations environnementales, surtout en matière de protection des rivages fragiles et dynamiques.

Photo 11. — Un nouvel épi sur la face interne de la jetée principale pour limiter l'ensablement du bassin portuaire (cliché Ghodbani, 2009).

Bibiliographie

A.N.B.T., *Évaluation de la sédimentation du barrage de Boughrara et Sidi Abdeli, wilaya d'Aïn Témouchent*, Rapport technique, 2006, 5 p.

A.R.M.A.Q., *Étude d'aménagement et de viabilisation de la Zone d'Expansion Touristique* de Bouzedjar. Document explicatif du projet, 25 p.

Benzada K. & Dali K., *Ensablement et dragage du port de Béni-Saf conséquences et site de dépôt*. Mémoire d'ingénieur en aménagement littoral de l'Institut des Sciences de la Mer et de l'Aménagement Littoral (ISMAL), 1995, 106 p.

Doumergue F., Cartes géologiques. *Rio Salado Lourrmel* 1/50 000, feuille n° 179, *Les Andalouses*, 1/50 000, feuille n° 152. Éd. Les services de la carte géologique d'Algérie, 1912.

Ghodbani T., *Environnement et littoralisation de l'Ouest algérien*. Thèse géographie en cotutelle entre université d'Oran et Paris 8, 2009, 306 p.

Gropo Flamingo Intercontinentale, *Proposition pour le développement touristique de la plage de Bouzedjar*. Document technique, 1997, 35 p.

IGN, Photo aérienne 1/20 000 de Béni-Saf n° 6001-65 et de Bouzedjar n° 6001/63, 1959.

IGN, Photos aériennes 1/20 000 de Béni-Saf n° 192/200 et de Bouzedjar, n° F085, 1992.

INC, Service hydrographique, *Carte marine de la côte d'Algérie de Bordj Bouabed à Arzew*, levés bathymétriques de 1930, 1/120 000, 1979.

Laboratoire Central Hydraulique de France (LCHF), *Aménagement du port de Béni Saf, Document technique*. Avant-projet sommaire, 1971, 76 p.

Larid M., « Recul des plages en Algérie, problèmes et perspectives, communication », in actes du Colloque

international, *Érosion littorale en méditerranée occidentale : dynamique, diagnostic et remèdes*, Tanger (Maroc), 19-20 septembre 2002, p. 39-49.

LABORATOIRE DES ÉTUDES MARTIMES (LEM), *Étude de protection contre l'ensablement du port de Béni-Saf*. Document technique, Avant projet sommaire, 1998, 90 p.

LECLAIRE L., *La sédimentation holocène sur le versant méridional du bassin Algéro-Baléares (Précontinent Algérien)*, Éd. Muséum, Paris, 1972, 243 p.

LEM, *Étude de protection contre le phénomène d'ensablement du port de Bouzedjar*. Document technique, Avant projet sommaire, 1996, 79 p.

OUESLATI A., *Littoral et aménagement en Tunisie, des enseignements de l'expérience du vingtième siècle et de l'approche géoarchéologique à l'enquête prospective*, Publications de la Faculté des Sciences Humaines et Sociales, université de Tunis, 2004, 534 p.

PASKOFF R., *Les littoraux, Impact des aménagements sur leur évolution*, deuxième éd., Paris, Masson, 1999, 255 p.

RAHOU S. & BELABBES A., *L'activité de la pêche à Bouzedjar et son influence régionale*, Mémoire de fin d'étude en géographie, université d'Oran, 2010, 134 p.

REMIMNI F & RÉMAOUN K., « Béni-Saf, étude des vents et aménagement du port », in *Actes du 5e Séminaire maghrébin de géographie*, mai 1984, Constantine.

SOGREAH, *Bureau d'étude en génie maritime, Plan d'aménagement du port de Bouzedjar, première phase*. Rapport technique et cartes hors texte, 1984, 120 p.

TINTHOIN R., *Les aspects physiques du Tell Oranais*, Thèse doctorat de l'université d'Alger, 1948, 395 p.

3 Exposition sociale face aux séismes : la mobilité en question Le cas de Lorca (Espagne) — Mai 2011

Marc Bertran Rojo, Elise Beck, Céline Lutoff & Philippe Schoeneich
Université Grenoble 1, PACTE UMR 5194 (CNRS, IEPG, UJF, UPMF), Grenoble, 38041, France
marcbertranrojo@gmail.com

Résumé. — Cet article présente les premiers résultats d'une étude sur les comportements de mobilité observés lors d'une crise sismique. Le 11 mai 2011, un double séisme, le plus meurtrier depuis 50 ans, a surpris la ville de Lorca en Espagne. Les habitants y ont répondu de manière différente, s'exposant parfois à la chute de débris des bâtiments. Pour mieux comprendre cette exposition et ses variations dans l'espace et le temps, nous analysons le déroulement de l'évènement sur le plan social, en mettant l'accent sur les activités et les trajets réalisés depuis la première secousse jusqu'à l'évacuation de la ville. Les victimes ayant été affectées pendant la période de crise, nous nous focalisons sur ce moment particulier pour mieux caractériser les facteurs qui jouent sur l'exposition individuelle au risque sismique. Les résultats montrent que la mobilité à l'intérieur de la ville durant la crise contribue largement à la variation de l'exposition individuelle.
Mots-clés. — Séisme, crise, mobilité, exposition sociale, Lorca (Espagne).

Title. — *Social Exposure to Earthquakes : The Mobility Concerned. The Case of Lorca (Spain) — May 2011*
Abstract. — *This paper is demonstrating the first results of a study on mobility behaviours during a seizmic crisis. On the 11th of May of 2011, a double earthquake, of a strength unseen for 50 years, shook the city of Lorca, Spain. Inhabitants reacted in various ways, sometimes exposing themselves to falling debris and buildings. To understand such exposition and its variations in space and time, we will look into the course of the event on a social level and we will have a thorough look on activities and movements starting from the first earth tremor until the evacuation of the city. Since the victims were affected during this time of crisis, we will focus on this particular moment, to isolate the factors involved in individual exposition to seizmic risk. The results are showing that mobility inside the city during the crisis are contributing highly to the variation of individual exposition.*
Key-words. — *Earthquake, Crisis, Mobility, Social Exposure, Lorca (Spain).*

Introduction

Le 11 mai 2011, exactement deux mois après la catastrophe de Fukushima au Japon, un double séisme a secoué la ville de Lorca, située à environ 60 kilomètres au sud-ouest de Murcia en Espagne. La péninsule ibérique n'avait pas connu de tremblement de terre aussi meurtrier depuis 1956, où un séisme avait fait 13 morts dans le sud-est de l'Espagne, près de la ville de Grenade.

Le séisme, de magnitude Mv 5,2, a eu lieu vers 18h47 heure locale (16h47 heure GMT) et il a été précédé de presque deux heures par une autre secousse de magnitude Mv 4,6. D'une intensité de VII (EMS 98), la catastrophe a causé neuf décès, environ 300 blessées, l'écroulement total d'un bâtiment, et des dommages graves à 1 164 autres. Les pertes économiques étaient estimées en novembre 2011 à 1 200 millions d'euros par la municipalité de Lorca. Les victimes ont été touchées sur la voie publique à proximité de bâtiments. La cause des blessures n'est pas liée à l'effondrement des bâtiments mais à des chutes de corniches, balcons, ou autres éléments constitutifs des bâtiments (Martínez Moreno *et al.* 2012).

La secousse a été de très courte durée (quelques secondes). Il a provoqué une accélération de 0,37 g, la plus grande enregistrée en Espagne depuis le début de l'installation des accéléromètres en 1984. Les effets de site, la forte accélération ainsi que la vulnérabilité relativement élevée des infrastructures, semblent être les facteurs explicatifs de l'endommagement observé (Martínez-Díaz *et al.* 2012). Les dégâts ont été très concentrés sur la ville de Lorca et sont à peine visibles en s'éloignant de la ville.

Ce séisme a attiré des techniciens, des architectes, des géologues de toutes les universités espagnoles et européennes, et plusieurs rapports géologiques et analyses des types de constructions ayant le mieux résisté ont été publiés (Vissers et Meijninger 2011 ; López-Comino *et al.* 2012 ; Santoyo, 2012 ; Álvarez-Gómez *et al.* 2011 ; Cabañas Rodríguez *et al.* 2011 ; García Sende, 2012 ; Martinez-Diaz, 2011). Ce séisme a mis en évidence, une fois de plus, que des séismes de faible magnitude peuvent être très destructeurs et avoir de lourdes conséquences pour la population (Díaz, 2012).

De plus, le séisme a testé pour la première fois en Espagne la sécurité sismique des nouveaux bâtiments, avec de bons résultats du point de vue de la sécurité structurale. Sur plus de 3 000 bâtiments neufs, seul un n'a pas résisté. Néanmoins, cet épisode a mis en relief le mauvais comportement des éléments non structuraux du bâti tels que les murets de toiture, les balcons ou corniches. Les dégâts dans ces parties ont été très élevés, provoquant ainsi des victimes (Salcedo Hernández et Campesino Fernández, 2012).

En ce qui concerne la population, quelques rapports évoquent le comportement spontané de panique de la population et mettent en avant le manque de culture du risque sismique dans la région (Martínez Moreno *et al.* 2012 ; Alfaro *et al.* 2011). Par contre aucune étude n'est en mesure de démontrer ces affirmations ni de faire le lien entre ces comportements généraux et l'exposition des individus.

Bien qu'inexistantes pour le cas de Lorca, il existe des études sur les comportements projetés, pour mieux adapter les plans d'action, mais ces études se révèlent incomplètes, très descriptives, et nécessitent des validations par des observations de terrain (Beck *et al.*, 2010). La fréquence relativement faible des séismes en Europe fait que les retours d'expérience sont rares et souvent incomplets du point de vue des aspects sociétaux. De plus, l'absence de protocole de récolte de données sociétales, associée aux difficultés inhérentes à ce type de recherches rendent ces travaux encore plus rares. L'objectif du travail présenté ici est ainsi de contribuer à combler ce manque en mettant en relation les comportements de mobilité individuelle suite à un séisme et la fluctuation de l'exposition individuelle.

3.1 Mobilité et exposition aux séismes : les comportements en question

Nous souhaitons comprendre comment évolue l'exposition individuelle dans le temps immédiat après un séisme pendant la période de crise, en observant la mobilité des individus dans l'espace post sismique. La question est la suivante : est-ce que se déplacer dans les minutes qui suivent un séisme est un facteur d'aggravation ou de diminution de l'exposition des individus ? Le cas de Lorca montre que les décès ont eu lieu immédiatement après la seconde secousse.

Pour répondre à ces questions, prenons le cas d'autres risques, comme par exemple les crues rapides, pour lesquelles la mobilité constitue un facteur de vulnérabilité sociale important (Ruin, 2007). Avoir la possibilité de se déplacer n'implique pas forcement un éloignement graduel face à la source de danger, car un choix inadéquat de trajet peut avoir l'effet opposé selon la dynamique spatio-temporelle propre au phénomène. Nous proposons ici de nous inspirer des méthodes de collecte de données développées dans ce contexte particulier pour les appliquer à notre objet d'étude.

Par ailleurs, comme pour d'autres séismes, comme celui de l'Aquila en 2009 ou d'Assise en 1997, l'évènement de Lorca a été précédé d'un séisme précurseur. Comment ce séisme précurseur peut-il affecter le déroulement de la réponse sociale ? Comme nous l'expliquerons plus loin, le premier séisme a eu pour effet qu'une grande partie de la population s'est trouvée à l'extérieur des bâtiments. Nous supposons que ces circonstances ont pu sauver des vies notamment dans le bâtiment qui s'est effondré avec la deuxième secousse. Néanmoins, tous les rapports montrent que nombre de blessures sont dues à la chute sur la voie publique d'éléments provenant des bâtiments. Nous voulons donc étudier les différents comportements des individus, afin d'identifier ceux qui favorisent ou au contraire réduisent l'exposition individuelle. Précisons que nous concevons l'exposition telle que considérée dans le modèle de Turner, comme un facteur de la vulnérabilité ainsi que la résilience et la sensibilité (Turner *et al.* 2003).

S'intéresser aux comportements individuels en période de crise sismique n'est pas complètement nouveau. Des travaux datant de la fin des années 1980 et du début des années 1990 ont mis en avant l'importance de s'intéresser aux périodes de crise sismique (Goltz *et al.*, 1992 ; Bolton, 1993). Néanmoins ces études, principalement quantitatives, construites à partir d'échantillons importants, se concentrent sur les individus, les dommages subis, et les raisons qui les ont amenés à évacuer. Elles apportent des informations statistiquement valables qui nous aident à comprendre quelles sont les principales activités réalisées par les individus affectés, mais ces informations sont déconnectées d'un moment et d'un lieu finement définis. En conséquence, il nous est impossible de contextualiser les décisions qui amènent les individus à réaliser ces activités ; nous sommes ainsi dans l'incapacité de cibler les comportements à risque, dans un moment et un endroit déterminé.

Suite à un séisme moyen, les personnes doivent s'adapter immédiatement à un environnement plus ou moins altéré. On peut supposer que la prise de conscience de la nouvelle situation et les prises de décisions qui s'ensuivent sont liées à l'évaluation individuelle de ce nouvel environnement. Or, en situation perturbée (réseaux et téléphone coupés) cette reconnaissance se fait principalement de manière physique. Dans l'objectif de représenter de la manière la plus fidèle possible les trajectoires des individus dans leur environnement, nous nous inspirons des travaux développés dans le cadre de la « Time-Geography » pour conceptualiser les trajectoires spatio-temporelles. Cette approche permet une représentation de la mobilité comme une succession de lieux (ou stations associées à des activités) et de déplacements dans le temps et dans un espace finement défini (Chardonnel, 2001). Généralement, cette conceptualisation est utilisée pour analyser les trajectoires quotidiennes des individus. Dans notre cas, nous allons l'appliquer à l'analyse des trajectoires spécifiques de la période post séisme. Nous proposons donc de nous concentrer sur les activités et déplacements entrepris lors de la crise sismique, avec un repérage spatial et temporel le plus précis possible, afin de mieux comprendre quelles sont les trajectoires les plus exposées aux effets induits des séismes.

Suite à un phénomène sismique modéré comme celui de Lorca, les individus, quand ils sont à l'intérieur d'un bâtiment, sont exposés à l'écroulement des cloisons, des meubles ou même des bâtiments, et à la chute d'éléments non structuraux tels que corniches et revêtements de façade quand ils se trouvent dans la rue à proximité des bâtiments. Dans le cas des séismes urbains, la logique individuelle ainsi que les consignes de sécurité amènent les individus à s'éloigner du danger différemment selon leur situation initiale : sortir des bâtiments, s'en éloigner pour éviter les chutes d'éléments de façade, rejoindre un lieu ouvert (place, parc, stade, etc.) et enfin quitter la zone sinistrée, potentiellement dangereuse en cas de répliques. Nous cherchons ici à savoir comment se déroule ce processus dans la réalité et quel est le niveau d'exposition individuelle associé à chacune des étapes.

De nombreuses études en psychologie environnementale se focalisent sur les facteurs qui conditionnent les comportements face à une menace de manière générale. Les facteurs observés le plus souvent sont la personnalité de l'individu, son âge, son groupe ethnique ainsi que sa situation économique ou les mécanismes usuels auquel il a recours pour faire face aux problèmes (Cohén, 1985). À la suite de ces études, d'autres auteurs décrivent les mécanismes conscients et inconscients

des personnes face à une période de crise (Campillo Cascales *et al.* 2004). Cependant, dans l'ensemble, ces travaux sont déconnectés de la question de l'exposition, répondant plutôt aux besoins des personnels d'accompagnement psychologique des survivants d'une catastrophe. Néanmoins, ces informations contextualisent les actions du point de vue comportemental et nous aident à identifier les décisions prises lors d'un séisme et les mécanismes de prise de décision déjà observés par la psychologie comportementale face aux risques.

En 2004, I. Ruin et C. Lutoff mettent en relation les comportements de 30 individus confrontés à une crise hydrométéorologique et aux différents niveaux d'alerte associés (alertes orange et rouge de Météo France) (Ruin et Lutoff, 2004). Les auteurs mettent en relation les facteurs de prise de décision avec les actions mises en œuvre, actions qui peuvent entrainer une augmentation ou une réduction de l'exposition des individus (Ruin et Lutoff, 2004). À la suite de ces travaux entamés il y a une dizaine d'années, il a été montré qu'au-delà des vulnérabilités sociales plus classiques propres aux personnes âgées qui n'évacuent pas à temps, une autre catégorie d'individus apparaît spécialement vulnérable face aux phénomènes hydrométéorologiques extrêmes. Ce sont principalement des hommes, d'une moyenne d'âge de 43 ans, qui adaptent difficilement leurs comportements de mobilité à l'évènement. Ces travaux mettent en évidence que cela concerne particulièrement les petits bassins versants très réactifs (Ruin *et al.*, 2008). Par analogie, nous supposons que maintenir certaines activités et déplacements dans la ville à la suite d'un séisme peut également induire une exposition individuelle, très dépendante du contexte spatial et temporel.

3.2 Lorca, une ville qui bouge

Nous exposons ici quelques caractéristiques de la ville et des habitants de Lorca, quelques aspects physiques du séisme ainsi que des détails sur l'organisation des services de sécurité, afin de mieux contextualiser les comportements et les décisions de la population.

3.2.1 Étude de cas

Lorca est une ville de près de 93 000 habitants située au sud-est de l'Espagne et c'est la deuxième ville la plus étendue du pays. La plupart de la population se trouve concentrée dans le centre urbain qui, selon l'Institut national de statistiques espagnoles, compte 60 000 habitants. Au moment du séisme, l'économie locale est marquée par l'important développement des services, non seulement au niveau de la ville mais aussi de toutes les régions voisines. Néanmoins, le secteur le plus important reste l'agriculture de fruits et légumes ; de ce fait, le paysage présente une configuration rurale, avec de nombreuses résidences secondaires. Cette configuration a eu une forte influence sur le déroulement de l'évènement surtout en ce qui concerne l'évacuation. De même, l'activité agricole attire une population étrangère, provenant principalement d'Équateur et d'Afrique du nord, et qui représente 18 % de la population de Lorca.

La région de Lorca est habituée aux séismes de faible magnitude, entre trois et cinq, voire six sur l'échelle de Richter. Récemment, entre 1999 et 2005, sept séismes d'une magnitude entre Mv 3,9 et Mv 5 ont secoué la zone (Guevara, 2011). Dans le cas du séisme du 11 mai 2011, une portion d'environ trois kilomètres de long de la faille qui va de l'Alhambra à Murcia et se situe au NE de la ville de Lorca a été réactivée (Martínez Moreno *et al.,* 2012) (figure 1).

Un important dispositif incluant les différents services d'urgence de la région avait été déplacé sur Lorca en conséquence du premier séisme et leur intervention fut immédiate. Plusieurs rapports affirment que cette circonstance a rendu possible une première intervention très rapide, n'ayant cependant pas empêché de lourdes conséquences pour la population (Santamaría *et al.*, 2012 ; López, 2012).

Il n'y eut aucun cas de personne ensevelie dans les bâtiments, neuf personnes sont décédées lors de la deuxième secousse dans des quartiers différents alors qu'elles se trouvaient sur la voie publique (López, 2012). La Croix Rouge a réalisé entre 19h15 et 24h00 un total de 163 interventions directement liées au séisme, et dont les pathologies ont été : blessures et hémorragies (52), crises d'anxiété (32), polycontusions (28), traumatismes cranio-encéphaliques ainsi que polytraumatismes et autres (8). La cause des décès a été identifiée comme provenant de traumatismes.

3.2.2 Aspects méthodologiques

Quatre jours après la secousse, nous nous sommes rendus à Lorca afin d'identifier la situation post séisme et de définir les conditions d'une enquête qualitative adaptée à la situation et permettant de collecter les données nécessaires à la vérification de nos hypothèses.

Neuf mois plus tard, nous avons réalisé 20 entretiens auprès de la population ainsi que sept enquêtes auprès de différents organismes qui ont eu un rôle lors de l'évènement, tels que la Croix Rouge, la Protection civile ou la Police locale. Les enquêtes qualitatives auprès de la population ont porté sur la manière dont les individus ont réagi pendant la période de crise, permettant de collecter l'ensemble des activités et déplacements entrepris entre la première secousse et l'évacuation de la ville. Les enquêtes sur les services de sécurité se sont centrées sur leur vision des évènements ainsi que sur leur déploiement, leur organisation et leurs actions.

Nous avons réalisé un échantillonnage par boule de neige cherchant une diversité des situations spatiales la plus étendue possible (malgré le nombre réduit d'individus interrogés). En effet une grande quantité de paramètres spatiaux peut influer sur les comportements des individus tels que le lieu de résidence, le lieu de travail, la situation au moment de la première ou de la deuxième secousse. Tenant compte des paramètres de vulnérabilité plus classiques, relevés dans la littérature, nous avons également essayé d'avoir une variété en termes d'âge et de genre. De la même manière, nous avons tenu compte du grand nombre d'étrangers en intégrant aussi cette catégorie d'individus dans notre analyse. Les entretiens ont duré entre 1 heure et 3 heures chacun. Au cours de ces 20 entretiens, nous avons interviewé 8 hommes et 12 femmes entre 24 et 80 ans, 9 avec des enfants à charge. Au total, nous avons collecté auprès de ces personnes une base de données regroupant 229 actions et 115 déplacements pour l'évènement étudié.

Pour collecter les données nous avons adapté une grille d'entretien créée pour l'analyse des comportements de mobilité en période de crues rapides (Ruin *et al.* 2013). Cette grille repose sur une échelle chronologique dans laquelle le temps est divisé en une succession de lieux et de déplacements. Pour chacun d'eux, nous demandons plusieurs informations qualitatives, qui sont à tout moment liées à un espace et

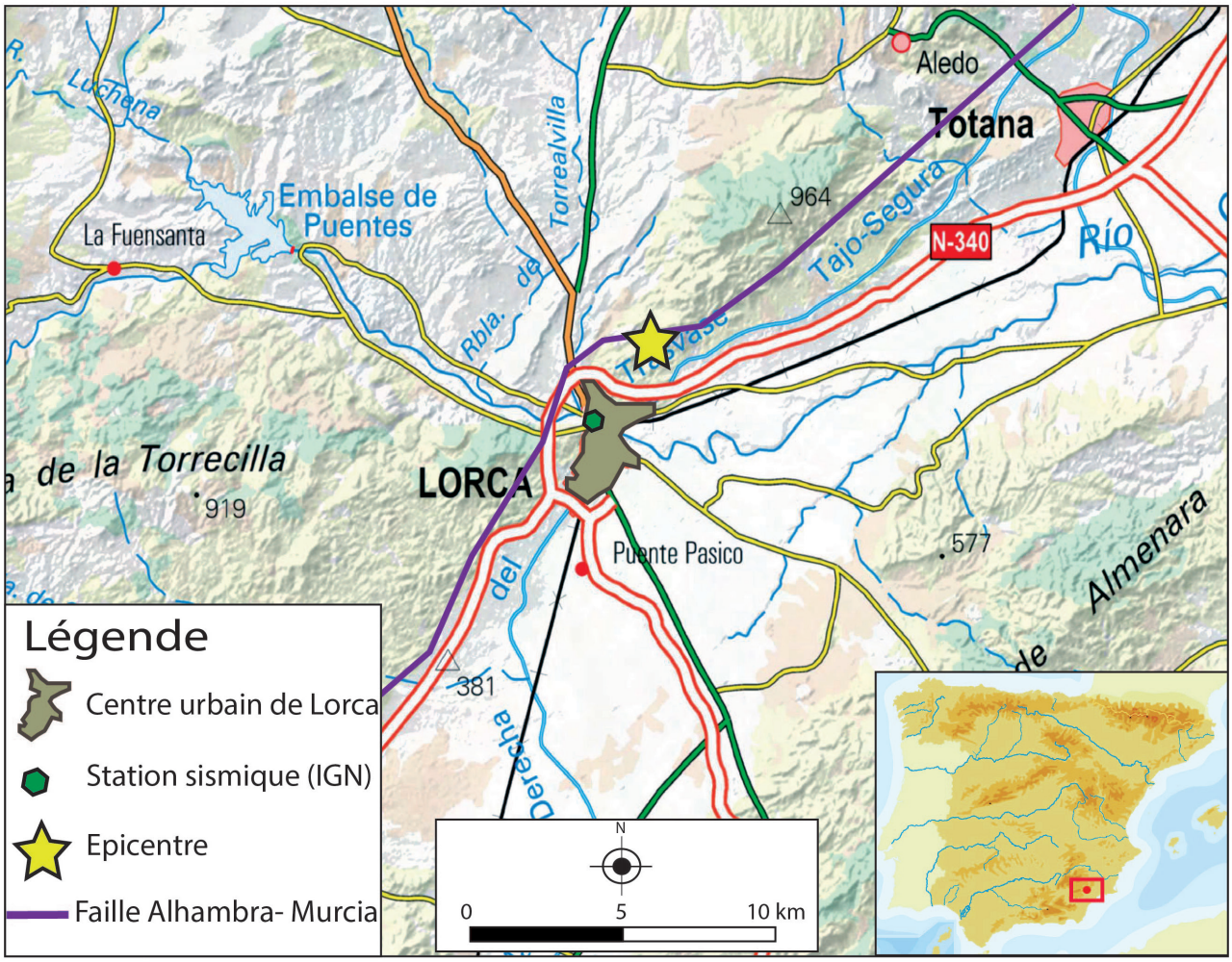


Fig. 1. — Carte de localisation de la ville de Lorca et du séisme du 11 mai 2011 (données IGN).

à une frange de temps précis. Concernant les lieux, nous avons demandé l'adresse, les horaires, les activités réalisées et en compagnie de qui ; pour les déplacements, nous avons obtenu le mode de déplacement, l'adaptation de l'itinéraire et ses raisons, les caractéristiques anormales de l'itinéraire — comme les bouchons. Nous avons enfin cherché à savoir si les individus étaient accompagnés. Cette grille permet de travailler avec des horaires précis (« je me souviens qu'à 20h14 j'ai appelé mon fils ») ou à défaut des durées (« je ne sais pas à quelle heure je suis arrivé mais normalement ce trajet je le fais en 15 minutes »).

En même temps que nous complétions la grille avec la personne à enquêter, nous dessinions conjointement les itinéraires ainsi que les lieux sur une carte (figure 2). Étant donnée la forte concentration des dégâts à l'intérieur du centre-ville, nous n'avons pas collecté les itinéraires hors les frontières de la ville (zone de non exposition dans cette situation). Utiliser le support cartographique lors des entretiens permet aux personnes de se rappeler plus facilement de détails de leurs parcours et d'être plus précis concernant les horaires. Cela permet également de se rappeler la manière dont les itinéraires ont été modifiés par l'évènement (par exemple, faire un détour pour estimer l'état de son commerce ou éviter des voies encombrées ou coupées). Il nous faut cependant signaler que cette méthode présente quelques limites. Il est impossible de répertorier certaines actions et déplacements, comme par exemple les déambulations dans un quartier pendant des heures afin d'aider les personnes, ou vérifier plusieurs bâtiments pour aider la sortie des individus coincés. Pour ces mouvements, la carte se révèle inadaptée pour des questions d'échelle mais aussi parce que ces micro-déplacements ne sont pas toujours très présents dans la mémoire des individus. Cet échantillon de données d'actions et déplacements ont été traitées selon deux grands types d'analyses. Dans un premier temps, nous avons interprété les caractéristiques principales de la mobilité des personnes interrogées pendant la période de crise. Pour mieux comprendre pour quelles raisons et dans quel contexte spatial et temporel les individus se sont déplacés, nous avons analysé les trajets, puis avons mis l'accent sur les activités réalisées dans le cadre de cet itinéraire. Dans un deuxième temps, nous avons analysé comment ces trajectoires individuelles ont fait évoluer l'exposition individuelle lors de la crise sismique à Lorca.

3.3 Des discours individuels à l'analyse des données de mobilité

Comme nous l'avons déjà évoqué, nous nous intéressons à la période de crise ; cette période est plus ou moins longue selon les individus, mais dure au maximum 10 heures. Nous

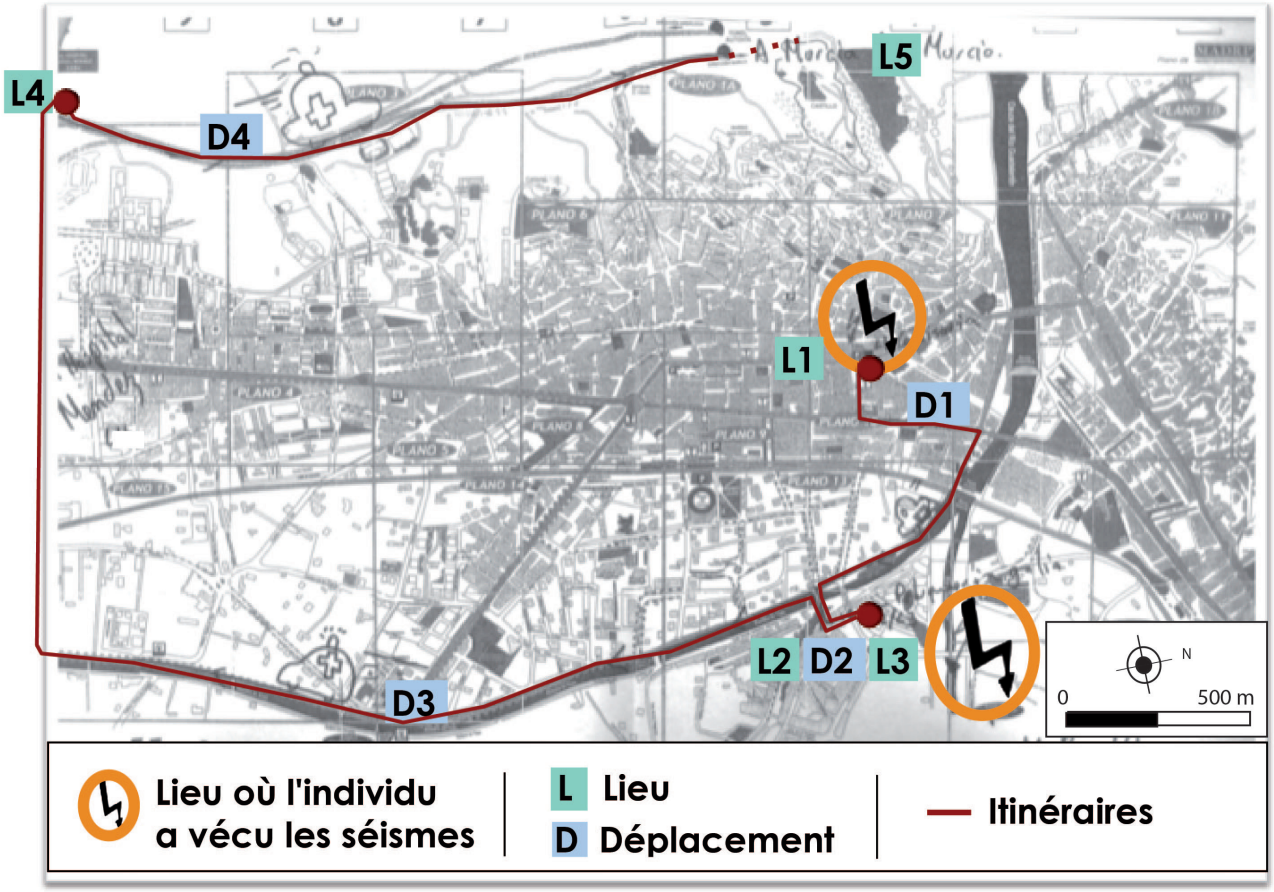


Fig. 2. — Exemple de la carte des itinéraires réalisée pendant les enquêtes. (Fond carte : Annuaire des commerçants).

avons discrétisé le temps à la minute pour avoir une bonne connaissance des mobilités immédiates après le séisme. Ces trajets souvent très courts comportent une haute exposition au risque. Par exemple, l'action de sortir d'un bâtiment se fait dans la minute, aller chez soi chercher ses clefs pour évacuer prend environ deux minutes. Pour ne pas perdre ces informations, nous avons ainsi souhaité garder un pas de temps à la minute.

3.3.1 Typologie d'activités

Nous inspirant des analyses de mobilités issues de la Time Geography, nous avons analysé les activités des individus en les associant aux différents lieux fréquentés et aux déplacements induits. À partir d'une typologie établie pour l'étude des comportements en cas de crues rapides, nous avons distingué cinq catégories d'activités (Ruin *et al.*, 2008 ; Creutin *et al.,* 2009) : activités « normale », information, organisation, protection et évacuation. Nous proposons ici d'adapter ces catégories définies pour décrire spécifiquement les situations de crise sismique.

Activités normales : Quelle que soit la situation imposée par l'évènement sismique, la personne estime que le pic de danger n'est pas atteint (ou est passé), et qu'elle peut faire le nécessaire pour poursuivre (retourner) à ses activités normales. Par exemple, recueillir des objets tombés après la première secousse, ou continuer la même activité (exemple pris dans notre étude : continuer sa sieste).

Information : Les informations peuvent être entrantes ou sortantes et nous ne différencions pas les moyens d'information : information directe (de visu), par téléphone, par radio ou TV. Les informations sortantes sont donc celles que l'individu donne ; les entrantes celles qu'il reçoit.

Organisation : L'organisation concerne tout ce que l'individu fait dans un lieu pour améliorer son confort ou le confort des autres et répondre de manière appropriée à la situation (par exemple aller chercher des couvertures ou des aliments).

Protection : La protection fait référence à une activité réalisée par l'individu pour améliorer sa sécurité ou celle des autres ou de ses biens. Certains individus réalisant cette activité augmentent leur exposition. Par contre dans la plupart des cas, la protection va entrainer une réduction de l'exposition par l'application des consignes de sécurité et le déplacement vers un espace ouvert ou un campement.

Évacuation : L'évacuation consiste à sortir à l'extérieur des frontières de la zone impactée pour s'éloigner de tout danger. Dans cette catégorisation, sortir de la maison pour aller dans la rue est considéré comme une action de protection, l'évacuation étant réservée au départ hors de la zone impactée.

Afin de comparer les activités et les trajets entrepris par les individus à la suite de chaque séisme, nous avons distingué trois périodes temporelles. La première période correspond au laps de temps entre les deux secousses, c'est-à-dire 101 minutes ; nous avons défini une deuxième période de durée égale à la première pour pouvoir les comparer. Finalement le temps restant forme la troisième période, de

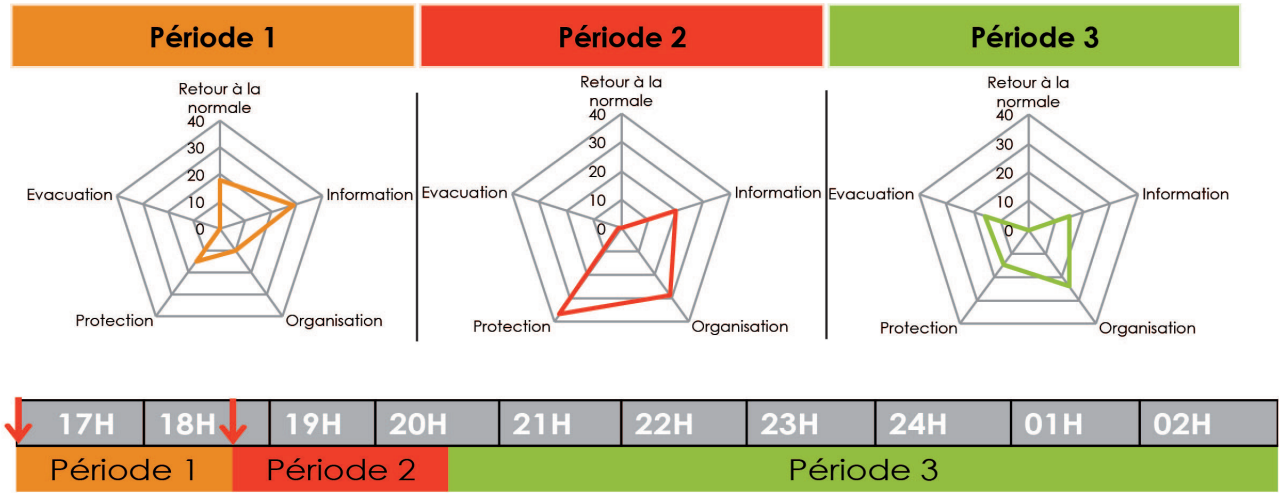


Fig. 3. — Activités réalisées pendant les périodes définies.

391 minutes, soit presque quatre fois plus longtemps que les deux périodes précédentes.

3.3.2 Évolution des activités dans le temps

Les 229 activités réalisées par les 20 individus interrogés sont représentées dans le temps en fonction des trois périodes (figure 3). Chaque personne a accompli en moyenne 11 à 12 activités. Ces dernières sont réalisées dans 135 lieux que les individus atteignent au travers des 115 trajets répertoriés. Les individus terminent leur trajectoire en un lieu spécifique avant évacuation ; ce lieu est également comptabilité dans notre base de données : 115 trajets + 20 lieux finaux = 135 lieux répertoriés au final. En moyenne, dans chaque lieu, les individus réalisent entre 1 et 2 activités. Comment attribue-t-on les activités réalisées en chaque lieu ? Seules les activités différentes réalisées en un lieu sont comptabilisées. Autrement dit, si la personne, depuis chez elle, appelle son père afin de vérifier son état de santé (information) et ensuite allume la télévision pour savoir ce qui s'est passé (information), on considère une seule activité d'information pour ces deux actions.

Les individus se déplacent lors de chaque période pour des raisons différentes. Après le premier séisme, l'information apparaît comme l'activité dominante. Que s'est-il passé, quels sont les dégâts causés et que sait-on des possibles répliques ? Tels sont les principaux sujets des informations qui circulent. Dans les situations de crise collective, certaines informations n'ont pas pour fonction la transmission des connaissances mais de partager et libérer la peur et le possible stress. Quelques unes de ses informations pourront même donner lieu à des rumeurs et avoir des conséquences néfastes pour la population. Ces rumeurs augmentent la peur des individus et peuvent entrainer des situations de panique collective (Páez *et al.*, 2001). Par contre on observe aussi que plusieurs individus retournent à leur activité normale. Ils n'estiment pas que le premier séisme a été d'ampleur significative même si, dans la plupart des cas, ils affirment qu'il a été le plus fort jamais ressenti. Les activités dominantes consistent à remettre la maison en état et à ramasser les objets tombés, ou tout simplement à continuer l'activité précédente. Dans la deuxième période, après le séisme principal, on observe une grande quantité d'activités en lien avec la protection, donc en moyenne deux activités de ce type par individu, avec une très grande variabilité d'un individu à l'autre (minimum 1 maximum 6). On observe aussi dans une moindre mesure des activités d'information et d'organisation, mais pas d'évacuation. Cette information et cette organisation vont permettre aux individus d'évacuer dans la troisième période comme on peut l'observer dans le dernier graphique radar.

Concernant les trajets, les 20 individus enquêtés réalisent un total de 115 trajets recensés pendant 10 heures et la plupart des trajets sont réalisés dans la première et la deuxième période qui comptabilisent 33 et 39 trajets respectivement. Ce sont des trajets de très courte durée, ne dépassant souvent pas les deux minutes tandis que dans la troisième période ce sont plutôt des trajets moyens et longs (figure 4). Chaque séisme provoque le déplacement simultané d'une grande partie des individus. Cette première analyse nous permet de comprendre que l'évacuation de la ville ne se fait pas de manière immédiate après le deuxième séisme, ce qui est très important car cela implique que l'exposition des personnes interrogées ne va pas décroitre tout de suite.

3.3.3 L'évolution de l'exposition individuelle

L'objectif étant d'étudier l'évolution de l'exposition individuelle, nous avons divisé l'espace en quatre catégories, créées en estimant les différents niveaux d'exposition. Ces catégories

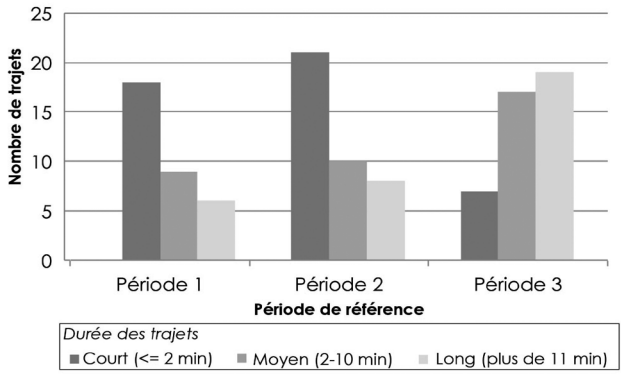


Fig. 4. — Durée des trajets individuels effectués pendant les périodes définies.

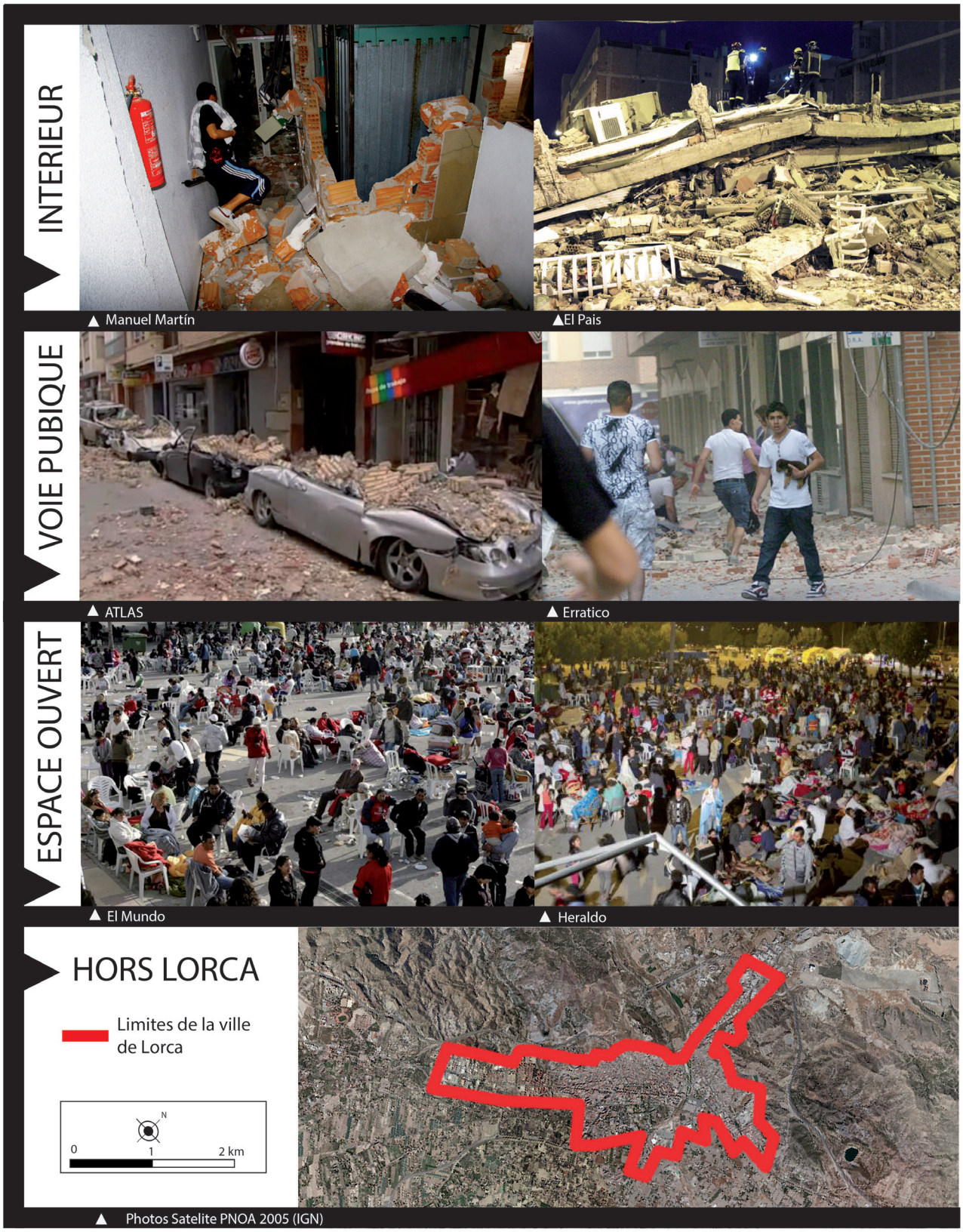


Fig. 5. — Les différentes catégorisations de l'espace (Sources multiples ; cf. sous les photos).

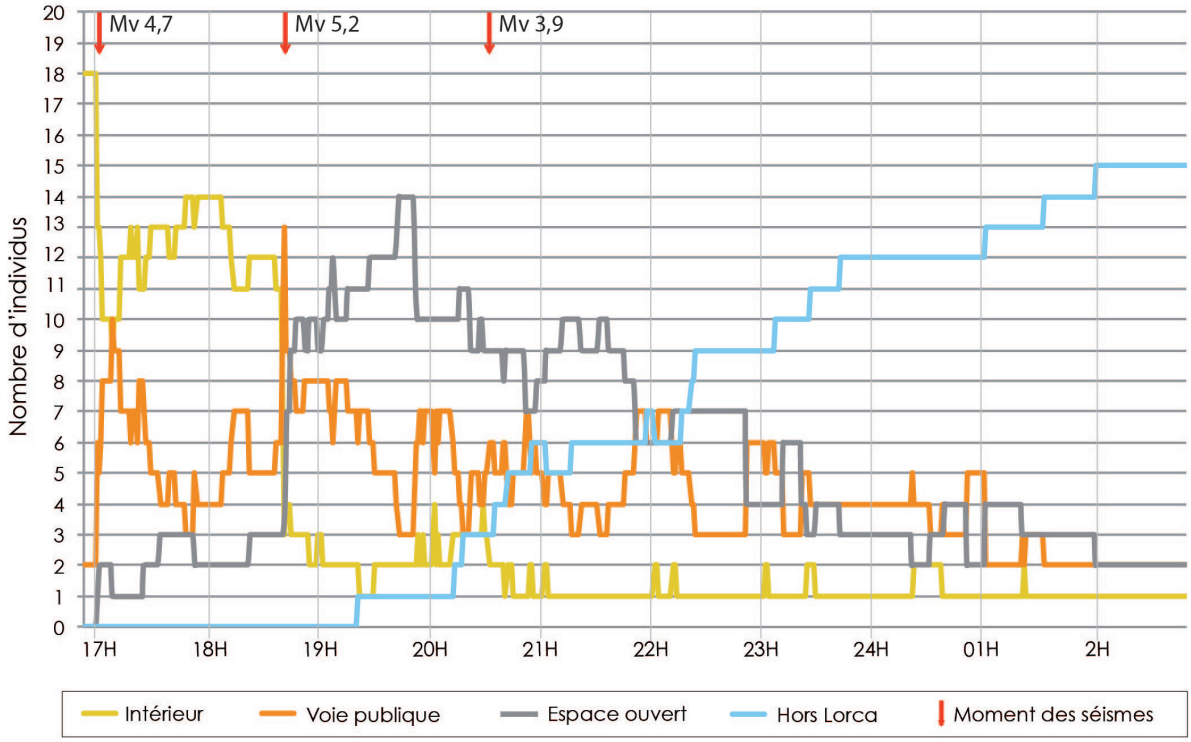


Fig. 6. — Évolution de la localisation des individus vis-à-vis des bâtiments : une méthodologie d'analyse de l'exposition.

nous permettent d'avoir une idée des types d'espace où se trouvent les individus et des dangers auxquels ils s'exposent lors de leurs activités et de leurs déplacements (figure 5).

Intérieur : Les individus se trouvent dans des bâtiments, quel que soit leur type (maisons, immeubles, etc.) ou le rapport des individus au lieu (domicile, au travail, chez des amis ou autres). La catégorie « intérieur » induit que lors d'une réplique, il peut y avoir des effondrements partiels ou totaux touchant l'individu. Comme nous l'avons déjà signalé, un seul bâtiment s'est écroulé pendant le séisme, ne causant aucun mort à l'intérieur.

Voie publique : Nous mettons dans cette catégorie les personnes se trouvant sur la voie publique à proximité de bâtiments : les rues, petites ou larges, à l'intérieur de la ville, pouvant être entourées de maisons basses ou de bâtiments hauts, neufs ou plus anciens. Le parc immobilier de Lorca est très hétérogène, surtout hors du centre historique.

Espace ouvert : Ces espaces se trouvent à l'intérieur de la ville, mais à la différence des précédents, il est très difficile voire impossible qu'un bâtiment ou des débris mettent en danger la population. La nature de ces lieux peut être très variée, avec des places, des jardins ou des friches. Suite à la deuxième secousse, certains de ces espaces ouverts sont devenus les lieux d'installation des équipes de protection et de sécurité (Croix Rouge, Protection civile ou Unité militaire d'urgence).

Hors Lorca : Une fois les individus sortis des limites de la ville, ils sont hors de danger, qu'ils soient à l'intérieur, à l'extérieur ou dans un espace ouvert.

Pour cette analyse, nous avons indiqué avec des flèches rouges l'heure du premier et du deuxième séisme, ainsi qu'une réplique d'une magnitude Mv 3,9 (figure 6). En regardant la courbe inférieure, on observe qu'effectivement les trajets courts identifiés antérieurement correspondent en grande partie aux déplacements entrepris immédiatement après le séisme pour sortir des bâtiments. Sur la même ligne, nous observons plusieurs phénomènes qui apparaissent dans les entretiens. Quelques minutes après la première secousse, certains individus retournent à l'intérieur de chez eux car ils estiment que le danger est passé. Ensuite, quelques uns sortent à cause des rumeurs de réplique, pour regarder les dégâts causés par le premier séisme ou simplement parce qu'il y a du monde à l'extérieur. Cette phase est bien connue des psychologues et identifiée comme une phase de négation qui, dans certains cas, affecte la perception de la réalité externe. Ces mécanismes inconscients aident certaines personnes à relativiser une situation relativement choquante en permettant de mieux contrôler leur peur ou leur angoisse (Páez *et al.*, 1995).

La deuxième secousse fait sortir les individus qui étaient restés dans leur maison, donc à l'intérieur, de manière immédiate quand cela leur est possible ou quelques minutes plus tard s'ils ont des personnes à charge (personnes âgées notamment) ou s'ils se trouvent en état de panique. Ensuite on observe ici le comportement qui consiste à rassembler sa famille pour pouvoir organiser l'évacuation, même si ce rassemblement provoque une augmentation de l'exposition d'un ou plusieurs membres de la famille. Néanmoins c'est dans la minute qui suit le séisme principal que nous observons le plus de monde sur la voie publique (13 sur 20) où les accidents mortels et blessures graves se sont produits.

On observe aussi que l'évacuation commence de manière majoritaire presque deux heures suite au séisme principal ; puis le nombre d'individus évacués augmente de manière régulière. Nous observons aussi que des individus rentrent à nouveau dans des bâtiments et cette action est immédiatement suivie par une évacuation. Il s'agit de personnes ayant besoin de chercher des affaires comme les clefs de la voiture ou de leur résidence secondaire avant d'évacuer. Enfin

nous observons que suite au premier séisme les individus ne ressentent pas le besoin d'aller dans un espace ouvert et restent sur la voie publique. Par contre, suite au séisme principal, la plupart des individus se concentrent dans les espaces ouverts plutôt que sur la voie publique.
Nous ne prétendons pas extrapoler le comportement des 20 individus interrogés à l'ensemble de la population, mais montrer que ce modèle conceptuel, proposé sur la base des observations empiriques, permet de comprendre que l'évacuation de la ville est l'aboutissement d'une série complexe de déplacements plus ou moins à risque (figure 7). Le temps sur l'axe des ordonnées est spécifique à chaque individu, ce qui veut dire que le temps de passage de l'intérieur de la ville à l'extérieur va varier en fonction des contraintes individuelles. On observe aussi que nous avons deux types de trajets selon les objectifs poursuivis. D'un côté toutes les mobilités relatives à la protection (flèches noires) et de l'autre toutes celles concernant l'évacuation (flèches bleues). Plus on reste dans l'étape de mise en protection (intérieur, voie publique, espace ouvert) plus l'exposition est élevée. Elle diminue seulement dès que les individus se trouvent en dehors de la ville. En effet, compte tenu de l'origine des décès et blessures observés dans le cas de Lorca, il apparaît que la voie publique peut constituer un endroit plus exposé que l'intérieur des bâtiments. Dans des travaux futurs, on voudrait comprendre pourquoi certains individus sortent plus vite que d'autres.

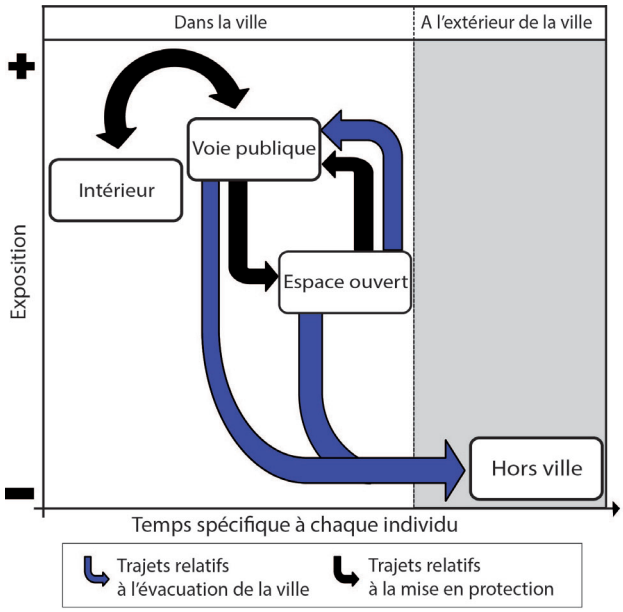


Fig. 7. — Modèle conceptuel de la mobilité en période de crise sismique. Modèle construit à partir du séisme du 11 mai de Lorca en Espagne.

Conclusion

Cette étude du cas particulier du séisme de Lorca en mai 2011 montre ainsi que la mobilité a un rôle déterminant dans l'évolution de l'exposition individuelle en période de crise sismique. Immédiatement après la secousse, au moment où il y a eu le plus de blessés et de décès, la plupart des individus se déplaçaient de manière simultanée. Le fait de se précipiter sur la voie publique pendant ou immédiatement après le séisme est une pratique à risque dans le cas des séismes moyens comme celui de Lorca, en prenant en compte que seul un bâtiment s'est écroulé suite au séisme, et que les normes de construction parasismique ont rempli leur fonction dans la majeure partie des cas. Dans cette situation, sortir des bâtiments doit être entrepris avec la plus grande précaution et parfois « l'immobilité » peut être le choix le plus sûr pour les individus se trouvant à l'intérieur des bâtiments ou dans des espaces ouverts. Néanmoins pour les individus qui se trouvent sur les trottoirs, la seule manière d'éviter des dommages est de se déplacer immédiatement loin des bâtiments.
Dans le cas de Lorca, le premier séisme a contribué à réduire le temps de réaction des services de sécurité mais a aussi provoqué le déplacement des individus depuis l'intérieur des bâtiments vers la voie publique, par curiosité, par peur, ou par mimétisme. La voie publique est un endroit d'échanges d'informations et d'une multitude de rumeurs. Parmi les consignes de sécurité proposées par le Service d'urgence municipal de Lorca figurent « sortir de la maison calmement » ainsi que « s'éloigner des bâtiments et des débris ». Les individus sont sortis de leurs maisons et sont restés sur la voie publique, à l'endroit où plus tard ont eu lieu les accidents. Dans le cas de Lorca, l'exposition la plus haute correspond aux minutes qui ont suivi immédiatement les séismes, alors qu'il y a le plus du monde sur la voie publique ainsi que d'individus en déplacement.
Cette étude permet de définir les catégories d'espaces qui modifient et conditionnent l'exposition individuelle (intérieur, extérieur, voie publique) ainsi que de comprendre quelles sont les activités réalisées dans ces espaces. Malgré un échantillon réduit, nous sommes capables de mettre en parallèle, et de manière spatiotemporelle, plusieurs récits, et ainsi d'interpréter les principaux flux d'individus, leur situation, leurs motivations. Cela nous permet aussi d'isoler les comportements entrainant une exposition plus élevée par rapport à l'ensemble des autres individus. Nous comprenons donc les motivations amenant ces actions et ces trajets qui augmentent l'exposition des individus interrogés.
Nous allons poursuivre nos analyses en digitalisant nos données dans un SIG. Approfondir les aspects spatiaux va nous ouvrir la possibilité d'analyser les espaces dans lesquels sont réalisées les activités principales et ainsi d'identifier les principaux flux de personnes. Ensuite nous allons croiser les informations relatives aux déplacements avec des données sur les bâtiments ayant subi des dommages importants au niveau structurel. Nous serons ainsi capables de mieux définir les caractéristiques spatiales de l'exposition.
Pour standardiser le graphique de manière à le rendre comparable à d'autres réalisés ailleurs, une étude structurelle de la ville sera entreprise, ce qui nous permettra de mieux identifier les comportements induits par la structure de la ville, et ceux qui relèvent du contexte particulier de l'évènement (figure 6). Nous sommes conscients que le relativement faible échantillon pose des limites en termes d'interprétation : dans le long terme, nous espérons pouvoir remédier à cette faiblesse en testant cette méthodologie sur d'autres cas en contexte européen. Enfin, ce travail ouvre la voie vers le développement de modèles de simulation orientés agent, qui nécessitent d'avoir une connaissance très fine des comportements individuels.

Remerciements

Nos remerciements vont à la région Rhône-Alpes sans le soutien de laquelle cette étude n'aurait pas pu être réalisée, ainsi qu'Aurélien Calmettes, doctorant en géographie à l'U.M.R. PACTE pour ses relectures.

Bibliographie

Alfaro P., González M., Brusi D., López Martín J.-A., Martínez-Día J.-J., García Mayordomo J., Benito B. *et al.*, « Lecciones aprendidas del terremoto de Lorca de 2011 », *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra* 19 (3) : 2011, p. 245-260.

Álvarez-Gómez J.-A., Rodríguez-Peces M.-J., Insua-Árévalo J.-M., Martínez-Díaz J.-J., Silva P.-G., « Testing archaeoseismological techniques with instrumental seismic data caused by the mw 5.1 Lorca earthquake (5-11-2011, se of Spain) », *International Workshop on Active Tectonics, Earthquake Geology, Archaeology and Engineering, Corinth, Greece,* 2011.

Beck E., André-Poyaud I., Chardonnel S., Davoine P.-A., Lutoff C., « MOVISS : Méthodes et Outils pour l'évaluation de la VulnérabIlité Sociale aux Séismes Final report », *Programme Pôle Grenoblois des Risques Naturels*, 2010.

Bolton P.-A., *The Loma Prieta, California, Earthquake of October 17, 1989: Public Response*, *US Government Printing Office*, 1993.

Cabañas Rodríguez L., Carreño Herrero E., Izquierdo Álvarez A., Martínez Solares J.-M., Capote del Villar R., Martínez-Díaz J.-A., Benito B., « Informe del sismo de Lorca del 11 de mayo de 2011 », *Informe Técnico*, 2011.

Campillo Cascales M.-J., Rivas Molina A., Luna Maldonado A., Llor Esteban B., « ¿ Qué pueden hacer los psicólogos en una situación de desastre ? », *Enfermería Global,* 3 (1), 2004.

Chardonnel S., « La *Time-Geography* : les individus dans le temps et dans l'espace. Aspects fondamentaux de l'analyse spatiale », *Modèles en analyse spatiale*, 2001, pp. 129-156.

Cohén R., « Reacciones individuales ante desastres naturales », *Bol Of Sanit Panam* 98, 1985, p. 171-180.

García Sende N., « Análisis del comportamiento sísmico de edificios de hormigón armado : comparación entre un edificio porticado y uno de forjado reticular sometido al sismo de Lorca », *Treballs acadèmics UPC,* 2012.

Goltz J.-D., Russell L.-A., Bourque L.-B., « Initial behavioral response to a rapid on set disaster: a case study of the October 1, 1987, Whittier Narrows Earthquake », *International Journal of Mass Emergencies and Disasters,* 10 (1), 1992, p. 43-69.

Guevara J.M.B., « Sismos del 11 de mayo de 2011 en Lorca », *Papeles de geografía,* (53), 2011, p. 199-213.

López S.-G., « Secuencia sísmica de Lorca : análisis de consecuencias y actuaciones de emergencia y post-emergencia », *Revista de la Asociación de Amigos del Museo Arqueológico de Lorca* (10), 2012, p. 9-37.

López-Comino J.-A., Mancilla F.-L., Stich J.-M., « Rupture directivity of the 2011, Mw 5.2 Lorca earthquake (Spain) », *Geophysical Research Letters*, 2012.

Martínez-Díaz J.-J., « La falla de Alhama de Murcia probable causa del terremoto de Lorca », *D.E.A.D.E.M*, 2011.

Martínez-Díaz J.-J., « Lorca : el terremoto del 11 de mayo de 2011 », *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra,* 19 (3), 2012, p. 362-364.

Martínez-Díaz J.-J., Bejar-Pizarro M., Álvarez-Gómez J.-A., Mancilla F.-L., Stich, Gerardo Herrera D., Morales J., « Tectonic and seismic implications of an intersegment rupture : The damaging May 11th 2011 Mw 5.2 Lorca, Spain, earthquake », *Tectonophysics,* 2012, p. 546-547.

Martinez Moreno F., Salazar Ortuño A., Martínez-Díaz J.-J., López Martín R., Terrer Miras R., Hernández Sapen A., 2012, *EsLorca : Una Iniciativa Para La Educación y Concienciación Sobre El Riesgo Sísmico, Boletín geológico y minero* 123 (4), 2012, p. 575-588.

Páez D., Arroyo E., Fernández I., « Catástrofes, situaciones de riesgo y factores psicosociales », *Mapfre y Seguridad,* 57, 1995, p. 43-45.

Páez D., Fernández I., Beristain C.-M., « Catástrofes, traumas y conductas colectivas : procesos y efectos culturales », *San Juan C, comp. Catástrofes y ayuda de emergencia,* 2001, p. 85-148.

Quarantelli E.-L., « Sheltering and housing after major community disasters : case studies and general observations », *University of Delaware Disaster Research Center* 1982.

Ruin I., 2007, « Conduite à contre-courant. Les pratiques de mobilité dans le Gard : facteur de vulnérabilité aux crues rapides », Thèse, univ. Grenoble I, 319 p.

Ruin I., Lutoff C., « Vulnérabilité face aux crues rapides et mobilités des populations en temps de crise », *La Houille Blanche,* (6), 2004, p. 114-119.

Ruin I., Creutin J.-D., Anquetin S., Lutoff C., « Human exposure to flash floods-Relation between flood parameters and human vulnerability during a storm of September 2002 in Southern France », *Journal of Hydrology,* 361 (1-2), 2008, p. 199-213.

Ruin I., Lutoff C., Boudevillain B., Creutin J.-D., Anquetin S., Rojo M.-B., Boissier L. *et al.*, « Social and Hydrological Responses to Extreme Precipitations : An Interdisciplinary Strategy for Post-Flood Investigation, Weather, Climate, and society », 2014.

Salcedo Hernández J.-C., Campesino Fernández J.A., « Experiencias constructivas del terremoto de Lorca », *Investigaciones geográficas*, 2012.

Santamaría G.-P., López S.-G., Alguacil L., « Análisis de Consecuencias y Actuaciones de Protección Civil en el Terremoto de Lorca (Murcia) : Pre-Emergencia, Emergencia y Post-Emergencia », *Física de la Tierra,* 24-26, 2012, p. 343-362

Santoyo M.-A., « Finite Fault Analysis and Near Field Dynamic Strains and Rotations due to the 11/05/2011 (Mw5. 2) Lorca Earthquake, South-Eastern Spain », *Submitted to Cornell University Library,* 2012.

Turner B.-L., Kasperson R.-E., Matson P.-A., Mccarthy J.-J., Corell R.-W., Christensen L., Eckley N., « A Framework for Vulnerability Analysis in Sustainability Science », *Proceedings of the National Academy of Sciences,* 100, 2003.

Vissers R.L.M., Meijninger B.M.L., « The 11 May 2011 earthquake at Lorca (SE Spain) viewed in a structural-tectonic context », *Solid Earth*, 2011, p. 199-204.

4 La reconstruction post-catastrophe : retour d'expérience sur la tornade du 3 août 2008 dans le nord de la France

Annabelle Moatty & Freddy Vinet
U.M.R. GRED (Unité Mixte de Recherche Gouvernance Risques Environnement et Développement – I.R.D. | Université Montpellier 3) 911 Avenue Agropolis, 34394 Montpellier
amoatty@yahoo.fr

Résumé. — Dans la nuit du 3 au 4 août 2008, une tornade de force 4 (échelle de Fujita améliorée) s'abat sur quatre communes du département du Nord. Elle touche le sol à 22h28 et parcours 19 kilomètres pour disparaître à 22h42. Un millier de maisons ont été sinistrées, dont 45 complètement détruites soit 183 familles à reloger. La tornade a fait 4 morts et 18 blessés. La reconstruction a été menée dans un objectif de remise aux normes des logements, notamment au regard des préconisations du programme national pour la rénovation urbaine (ANRU) et du nouveau zonage sismique. Les logements reconstruits sont ainsi de meilleure qualité et aux normes parasismiques. Les habitants d'Hautmont et Maubeuge ont changé leur perception de leur ville. Ils ont, grâce à la solidarité nationale, aux indemnisations des assurances, saisi cette opportunité pour insuffler un nouveau souffle de développement à leurs villes. L'objectif de cette étude est de proposer un retour d'expérience de la reconstruction post-tornade en démontrant comment cette période difficile a pu être une opportunité d'amélioration de l'habitat et de l'urbanisme dans les communes sinistrées.
Mots-clés. — reconstruction, territoire, relèvement, retour d'expérience, relogement, tornade.

Title. — *Post-disaster recovery after a tornado : the case of tornado of August the 3rd 2008 in Northern France*
Abstract. — *During the night of the 3nd to 4th of August 2008, a 4th level tornado (on Enhanced Fujita Scale) falls onto four cities of Northern France. The tornado touches the ground at 10:28 PM and run through 19 km before disappearing at 10:42 PM. A thousand houses were affected with 45 completely destroyed and 183 families to relocate. The tornado toll was four dead and 18 wounded. The reconstruction was carried out with the aim of upgrading housing standards, particularly in terms of urban renovation and new seismic zoning. The houses were rebuilt better respecting seismic standards. The inhabitants of Hautmont and Maubeuge have changed their perception of the city and, through national solidarity and insurance compensation, they have taken advantage of the recovery period to breathe new life developing their cities. The aim of this study is to provide a feed-back of the reconstruction process demonstrating how this difficult period could be an opportunity to improve housing and urban planning in the affected zones.*

Key words. — *Recovery, Tornado, Territory, Feed-back Analysis, Reconstruction Process.*

Introduction

La reconstruction, particulièrement en France et en Europe occidentale, est un sujet peu traité car les systèmes étatiques et assuranciels privilégient la prévention ou la compensation financière des dommages. Ainsi manque-t-il un lien entre cette phase de prévention et la période de récupération post-catastrophe qui n'intègre pas officiellement de reconstruction préventive. Par ailleurs, les bilans à long terme des reconstructions post-catastrophes font défaut. Ces bilans permettraient de déterminer les modalités techniques, sociales et territoriales des reconstructions et d'évaluer leur portée préventive.
La présente étude porte sur la tornade qui a frappé les communes de Boussières-sur-Sambre, Hautmont, Neuf-Mesnil et Maubeuge, dans la nuit du 3 au 4 août 2008 et propose un retour d'expérience sur la reconstruction suite à cet évènement. Pour ce faire, trois questions sont posées en guise de fil rouge de la réflexion :

- Comment ont été recomposés les *territoires* touchés ?
- Que sont devenues les *populations* qui ont subi le sinistre ?
- Y a-t-il eu des déplacements de population ?
- Des mesures de *prévention* ont-elles été prises pour diminuer la vulnérabilité des enjeux exposés ?

Il convient, selon nous, de proposer une définition des actions de relèvement en phase post-catastrophe, qui peut être divisée en plusieurs périodes (Kates et Pijawaka, 1977). De l'urgence à la reconstruction en passant par la réhabilitation, un continuum d'actions a pour objectif de restaurer des conditions de vie « acceptables ». Pour C. Guénon (direction de la Sécurité civile — ministère de l'Intérieur, de l'Outre-Mer et des Collectivités territoriales), les objectifs de la « reconstruction sont de parvenir à une situation nouvelle acceptée par l'ensemble de la société, aussi proche que possible de la situation antérieure, voire améliorée vis-à-vis du risque, dans un objectif global de développement de la résilience » (Guénon in Chance & Noury, 2011).
La première partie de ce travail présente les caractéristiques de la tornade de 2008 et les dommages associés dans le Val de Sambre. Il s'agit de réaliser un rappel des caractéristiques de l'évènement et un bilan de la situation aux lendemains de la catastrophe. La deuxième partie porte sur les aides à la reconstruction et sur la question de la recomposition territoriale et du relogement. Dans cette partie, nous allons présenter les stratégies de relogement temporaire puis

Tabl. 1. — Échelle de Fujita améliorée

Echelle de Fujita Améliorée (d'après Keraunos)		
Dégats observés	**Vitesse du Vent**	**Intensité : exemples en France**
casse de petites branches d'arbre, torsion de panneaux de signalisation	105 à 135 km/h	F0 légère - Marans (17) 17.08.06
arrachage de tuiles sur les toits, déplacement latéral des voitures sur les routes, renversement de caravanes	136 à 175 km/h	F1 modérée - Ile Rousse (2B) 15.11.07
soulèvement de toits entiers, déracinement d'arbres, débris légers commencent à être emportés sur de longues distances	176 à 220 km/h	F2 importante - Les Echelles (73) 10.03.06
arrachage des murs, retournement des véhicules lourds comme camions et trains, objets de taille moyenne (quelques kg) sont transportés en altitude	221 à 270 km/h	F3 sévère - St Omer Capelle (62) 07.01.98
soulèvement et déplacement de bâtiments sans fondation, de véhicules légers, des corps de toutes sortes (pesant jusqu'à une centaine de kg) volent littéralement	271 à 320 km/h	F4 catastrophique - Hautmont (59) 03.08.08
soulèvement et déplacement de bâtiments avec fondations, de camions, de trains, arrachage systématique de tous les arbres et de toutes les structures proéminentes, les débris se transforment en projectiles d'une violence inouïe	> 320 km/h	F5 - Montville (76) 25.08.45

Tabl. 2. — Présentation générale des communes étudiées (données INSEE 2015 — enquête nov. 2011, Moatty)

	Hautmont	Maubeuge	Boussières-sur-Sambre	Neuf-Mesnil
Superficie	21,3 km²	18,9 km²	3,3 km²	1,2 km²
Population (2011)	14 115	31 103	526	1 273
Densité de population	1 150,4 hab/km²	1 650 hab/km²	160,4 hab/km²	1 052,1 hab/km²
Principales infrastructures	Gare Axe routier N2 Ecole primaire Collège Lycée Professionnel* Stade* Centre commercial Hôtel Centre hospitalier*	Gare Axe routier N2 Collège Lycée IUT Gendarmerie* Cinéma Maison des Associations* Piscine* Zoo* Hôtels Camping municipal Résidence séniors Hôpital*	-	Axe routier N2

Tabl. 3. — Typologie des dommages selon les communes et l'intensité de la tornade (d'après Mahieu et Wesolek, 2008 — crédits photos : Mahieu et Wesolek)

Commune	Intensité	Description des dommages *(non exhaustive)*	Illustration
Boussières-sur-Sambre	F2	Champs de blé fauchés et saules renversés ou arrachés	
	F3	Arbres dépouillés Tuiles envolées Murs porteurs lézardés	
	F4	Maisons détruites et éventrées *(cf. illustration ci-contre)*	
Hautmont	F3	Anéantissement partiel des arbres	
	F4	Anéantissement total du bois du Fayt Rue du Vélodrome : maisons rasées et soufflées, premiers décès enregistrés *(cf. illustration ci-contre)*	
	F3	Toitures aspirées et soufflées Double vitrage soufflé	
Neuf-Mesnil	F2	Jeunes arbres arrachés ou étêtés Maisons endommagées mais pas de dégâts sur les murs porteurs *(cf. illustration ci-contre)*	
Maubeuge	F2	Flèche du clocher de l'église arrachée Maisons sans toit mais avec murs porteurs *(cf. illustration ci-contre)* Destruction d'arbres datant du 18ème siècle	

permanent, ainsi que les changements d'occupation des territoires qui émergent en phase de reconstruction. Une troisième partie développe les aspects sociaux du relèvement des populations (questions de suivi des populations sinistrées à court, moyen et long terme). Enfin, une quatrième partie présente les actions de mitigation mises en œuvre durant la phase de reconstruction.

4.1 Caractéristiques de la tornade et dommages associés dans le Val de Sambre

4.1.1 La tornade de 2008 et les territoires affectés

La tornade du 3 août 2008 a affecté le territoire du Val de Sambre (département du Nord). Huit communes ont été traversées par cette tornade et affectées à différents degrés. Nous nous sommes concentrés sur les quatre communes les plus touchées Hautmont, Maubeuge, Neuf-Mesnil et Boussières-sur-Sambre. La collecte des données a été réalisée grâce à des entretiens auprès des autorités et des services en charge de la reconstruction. Seules les municipalités de Hautmont et Maubeuge ont souhaité répondre à nos questions. Les communes de Neuf-Mesnil et Boussières-sur-Sambre ont refusé l'entretien. Nous avons pu accéder à quelques données sur ces deux communes par le biais d'autres entretiens et des documents issus par les communautés de communes (Communauté de Communes Sambre Avesnois et Agglomération Val de Sambre).

La tornade a été classée F3 par Météo France, avec un pic d'intensité en F4 à Hautmont, sur le quartier des Exotiques puis une décroissance en F2 sur les communes de Neuf-Mesnil et Maubeuge (Wesolek et Mahieu, 2011). Elle fait partie de la petite quinzaine de tornades de catégorie F4 ou F5 qui ont touché le sol en France depuis 1680 (Magdeleine, 2011).

Le 3 août, le contexte météorologique est propice à la formation de tornades. Celle-ci est la plus puissante d'une série qui a touché le sol en France, aux Pays-Bas et en Allemagne. En effet, en surface, une série de dépressions s'étend depuis l'Atlantique jusqu'aux îles Britanniques et à la Russie. Simultanément, en altitude, des flux rapides de direction ouest/sud-ouest circulent entre un creux barométrique près de l'Écosse et une faible crête barométrique localisée au-dessus du sud de la France. Ces conditions réunies, la tornade de force 4 a parcouru près de 19 km à une vitesse moyenne de 80 km/h et des vents en rafales estimés à plus de 300 km/h par Mahieu et Wesolek (tableau 1). La largeur maximale du couloir tracé par la tornade est de 140 m. L'heure du premier impact était 22h28 à Pont-sur-Sambre, et celle de la dissipation est 22h42 à Marpent (Mahieu et Wesolek, 2008).

Selon Mahieu et Wesolek (2008), la tornade du 3 août 2008 est la plus forte tornade enregistrée en France depuis celle de 1982, sur la commune de Levier dans le Jura. C'est aussi la tornade la plus meurtrière sur le territoire métropolitain depuis celle de 1967 à Palluel dans le Pas-de-Calais où sept décès avaient été recensés.

L'étude réalisée par Mahieu et Wesolek (2008) démontre que le relief a joué un rôle de manière temporaire dans les variations d'intensité : les reliefs ascendants engendrent des regains d'intensité. En revanche, il apparaît que le tissu urbain n'a pas eu beaucoup d'influence sur la force de la tornade mais a joué un rôle dans la trajectoire qui a été plus sinueuse du fait des obstacles qu'elle rencontrait.

La force et la rareté du phénomène ainsi que la faible actualité nationale en ce début de mois d'août en ont fait un évènement médiatique. Malgré les dommages bien visibles dans le paysage, la tornade a été considérée comme une tempête ou encore « mini-tornade » par les journalistes qui ont alors largement diffusé ces termes réducteurs. Voici quelques exemples issus des archives de deux journaux : « Mini-tornade à Hautmont : l'aide de 300 000 euros va être allouée le plus rapidement possible», journal *20 minutes* du 5 août 2008 ; ou encore « Une mini-tornade dans le Nord fait trois morts et neuf blessés » publié par *L'Express* du 4 août 2008. Cependant, « les populations n'auraient pas compris que le Cat Nat (l'état de catastrophe naturelle) ne soit pas reconnu car ils ont vécu une réelle catastrophe, un réel traumatisme » (Mme Ducanchez, secrétaire générale de la sous-préfecture d'Avesnes-sur-Helpe). Ainsi, les communes de Boussières-sur-Sambre, Hautmont, Neuf-Mesnil et Maubeuge ont été reconnues en état de Cat Nat (JORF n° 199 du 27 août 2008, IOCE0820715A — Arrêté du 26 août 2008) par décision ministérielle (figure 1). Les tornades ne font en général pas l'objet d'arrêté catastrophes naturelles puisque les effets du vent et les dégâts des eaux par le toit sont pris en charge par la garantie TGN (tempête, grêle, neige) des polices d'assurance dommage. Il est clair que les arrêtés Cat Nat ont été pris à des fins politiques, pour rassurer les populations. En effet, l'arrêté Cat Nat a été signé le 26 août pour les 4 communes les plus touchées par la tornade. Le 3 août 2008, les orages ont touché tout le nord de la France et au total 29 communes ont bénéficié d'arrêté Cat Nat inondation et coulées de boue dont 18 dans le département du Nord, deux dans le Pas-de-Calais, cinq en Seine-Maritime et quatre dans la Somme. Pour les communes autres que les quatre concernées par la tornade les arrêtés n'ont été pris que plus tard en décembre 2008 voire en mai 2009 pour certaines communes. Ce phénomène de « favoritisme » médiatique est fréquent après des évènements tempête à forte résonnance médiatique alors que les dommages liés au vent ne sont pas, en théorie, couverts par le régime Cat Nat. La tempête Klaus du 24 janvier 2009 par exemple fit elle aussi l'objet d'un arrêté Cat Nat au titre des « Inondations et coulées de boue du 24 janvier 2009 » (JORF n° 0024 du 29 janvier 2009, IOCE0902322A) de même que la tempête Xynthia ou les tempêtes de décembre 1999.

4.1.2 Bilan de la tornade

Le bilan humain de cette tornade est de 3 morts et 18 blessés. Un homme s'est suicidé peu après avoir vu sa maison s'effondrer mais la préfecture n'a pas reconnu le lien de causalité. Tous les acteurs de la gestion de crise ont salué les bons réflexes des populations qui se sont mises en sécurité à la cave ou sont sorties des bâtiments qui menaçaient de s'effondrer. Pour l'ensemble des quatre communes, 1 600 logements ont été détruits ou endommagés et 290 ont été classés inhabitables par les experts. Sur ces 1 600 logements affectés, une cinquantaine n'étaient pas assurés.

Outre les logements, un certain nombre d'édifices publics (cf. tableau 2) et d'entreprises ont subi des dégâts. L'hôpital de Hautmont a été évacué car le toit s'est envolé. C'est l'aile des maisons de retraite qui a été le plus touchée. Quelques entreprises ont été concernées, principalement Promocil

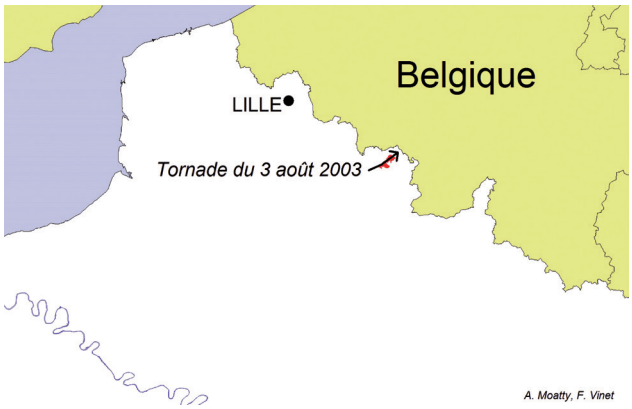


Fig. 1a. — Carte de situation de la tornade du 3 août 2008.

spécialisé en rénovation d'habitat et de logements sociaux. Les logements qu'elle rénovait et son siège social ont été complètement détruits. Les rénovations en cours au moment de la tornade ont subi un léger retard, le temps pour l'entreprise de réaliser l'évaluation des dommages. À Maubeuge, ce sont surtout des bâtiments administratifs qui ont subi des dommages, quelques maisons ont aussi été détruites. L'image de la ville a été fortement détériorée par la tornade, comme l'exprime le maire de Maubeuge, R. Pauvros, interrogé par *La Voix du Nord* : « Avant, à Maubeuge, il y avait des arbres immenses, ils donnaient du cachet à la ville, ils ont été soufflés par la tornade… ils ont été replantés mais maintenant il faut attendre que le temps fasse le travail […]. »

Les espaces touristiques, les bâtiments sportifs, scolaires, culturels, administratifs, lieux de vie symboliques ont été durement touchés. Autant d'espaces publics qui réunissaient le plus grand nombre (Monnet, 1998), administrés comme touristes, et qui constituaient des lieux de vie et de lien social. Les édifices publics ont subi de lourds dommages, ce qui a posé d'énormes problèmes de fonctionnement. Malgré tout, « le principe de continuité du service public a toujours été respecté » (R. Pauvros, Maire de Maubeuge). Ces bâtiments publics fortement endommagés étaient inoccupés à l'heure — tardive — de la tornade, ce qui explique sans doute en partie le faible nombre de décès.

Les infrastructures routières ont aussi été endommagées, notamment à cause des nombreux arbres arrachés. La route départementale D 95, qui est un des axes principaux de circulation, a été coupée, ce qui a rendu l'acheminement des secours long et complexe. Si les axes principaux ont rapidement (quelques jours) été dégagés, le déblocage total des routes n'a été terminé qu'un mois après. Les réseaux électriques ont aussi été impactés, avec 1 300 clients privés d'électricité. 200 foyers ont été privés de gaz par précaution. La forêt du

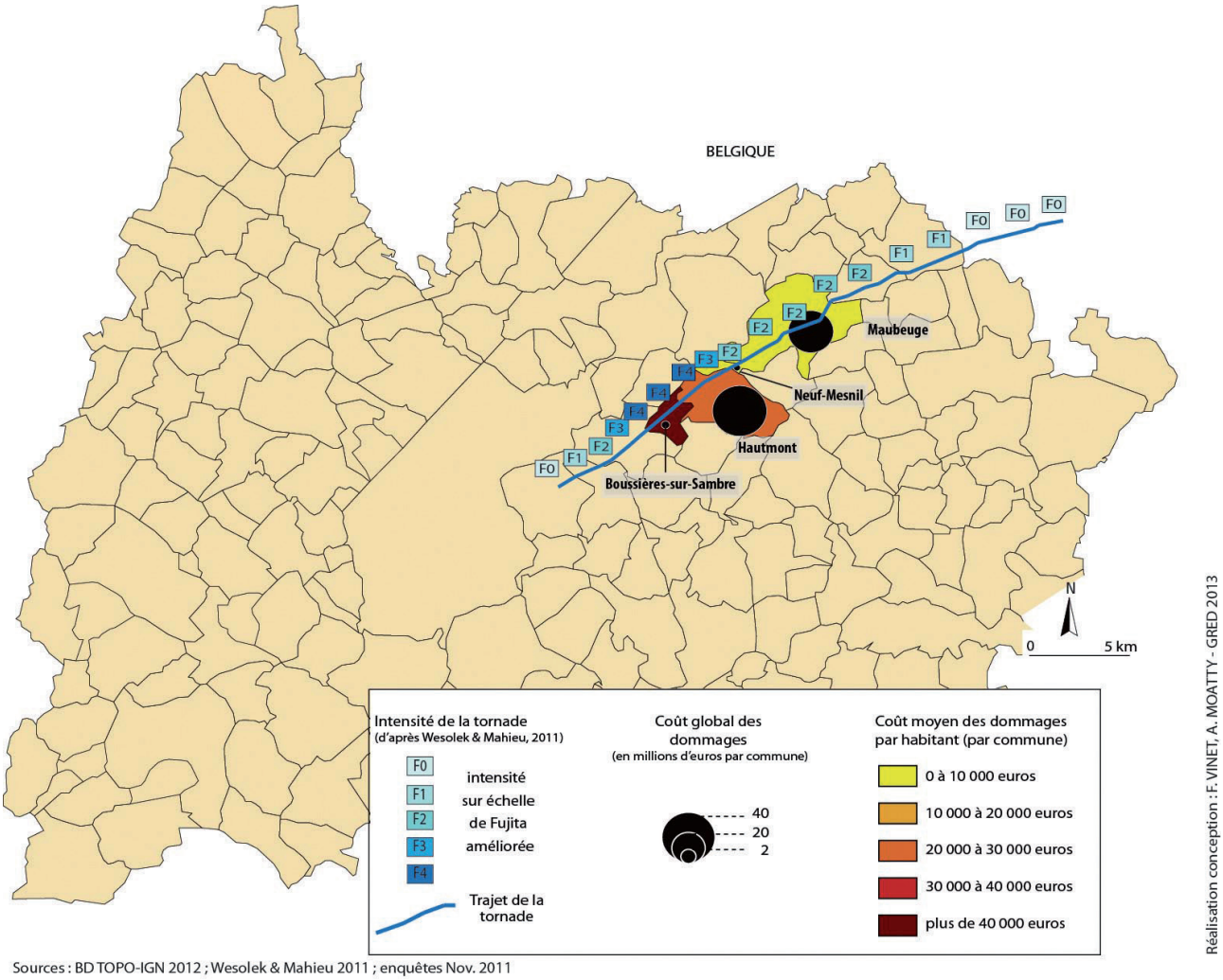


Fig. 1b. — Carte de l'intensité de la tornade associée aux coûts des dommages.

Bois du Fay (cf. tableau 3), entre Hautmont et Boussières sur Sambre a été complètement rasée. C'était une perte économique importante puisque ces arbres étaient destinés à la construction de mobilier et qu'ils étaient prêts à être coupés. La conception d'une typologie des bâtiments détruits et endommagée est rendue complexe par les variations d'intensités de la tornade qui d'une part n'a pas affecté les enjeux de la même manière sur toute sa trajectoire, et qui d'autre part, n'a pas affecté les enjeux d'une même localisation par les mêmes processus d'endommagement. Dans leur rapport de 2008, Mahieu et Wesolek concluent que « l'intensité et la disposition des dégâts sur l'ensemble de la trajectoire confirment le passage d'un vortex aux caractéristiques variables » (Mahieu et Wesolek, 2008). Lors de leur recensement des dommages, ils ont constaté des « dégâts collatéraux liés à la zone d'aspiration directe » où les enjeux n'ont pas été endommagés par la tornade elle-même mais par les retombées de projectiles. Ainsi les bâtiments et infrastructures endommagées et détruites sont de nature très différente, allant de la torsion de la tribune du stade de Hautmont à la destruction totale de maisons comme ça a pu être le cas à Boussières-sur-Sambre.

Le bilan économique des dommages directs (publics et privés) a été chiffré à 39 millions d'euros pour Hautmont, avec un total de 1 005 individus sinistrés. Pour Maubeuge, les dommages s'élèvent à 28 millions € (dont 17 millions € pour le parc privé) avec 3 057 individus sinistrés. Le coût des dommages est identique pour les communes de Neuf-Mesnil et de Boussières-Sur-Sambre, il s'élève à 1 300 000 euros (figures 1a et 1b). En revanche, le nombre de sinistrés varie. À Neuf-Mesnil, il s'élève à 133 individus alors qu'à Boussières-Sur-Sambre, il est de 30 individus.

Cette carte permet de mettre en relation les changements d'intensité de la tornade avec le coût des dommages. On constate que pour Boussières-sur-Sambre et pour Hautmont, le coût des dommages augmente simultanément avec l'intensité de la tornade. En revanche, on observe un basculement entre Neuf-Mesnil et Maubeuge : la tornade plus puissante à Neuf-Mesnil mais le coût des dommages est plus important à Maubeuge. Ceci est lié à la trajectoire de la tornade et au niveau d'équipement des communes. Maubeuge est une commune bien plus développée et riche que Neuf-Mesnil et la tornade est venue frapper des infrastructures collectives en majorité. Ces deux paramètres expliquent que le coût des dommages soit bien plus élevé à Maubeuge qu'à Neuf-Mesnil. S'ajoutent aux dommages directs les coûts indirects (non chiffrés) notamment celui de la prise en charge des déchets (Groupe d'Expertise et d'Intervention DEchets post-catastrophe, 2007). Les déchets post-catastrophe sont une problématique à ne pas sous-estimer. En effet, en plus du coût du nettoyage, les collectivités se trouvent face à des quantités de déchets, parfois toxiques, à stocker et à traiter. Sur le plan juridique, les maires sont responsables de la gestion des déchets sur leurs communes. Sur les quatre communes touchées, 50 tonnes de déchets étaient évacuées chaque jour en moyenne soit 1 300 tonnes sur l'ensemble de l'opération de déblayage qui a duré 26 jours. Une centaine de militaires ont aidé au déblaiement. Le lieutenant-colonel P. Hartmann évoque un volume de déchets et gravats équivalent à « un stade de foot recouvert sur cinq mètres de hauteur ».

4.2 Les aides à la reconstruction et la question du relogement des populations sinistrées

Deux ans après la catastrophe, les communes sinistrées connaissaient le début du retour à une situation « normale ». Durant ces deux ans, une partie des sinistrés a été relogée dans des mobiles homes à proximité de leur maison. La reconstruction s'est faite in situ pour les propriétaires qui souhaitaient reconstruire. Certains ont préféré quitter la commune voire la région.

4.2.1 Assistance économique

Dès le lendemain du sinistre, les experts des assurances, la DDTM (Direction départementale des territoires et des mers) et les techniciens municipaux expertisaient les biens pour calibrer le montant des aides et de l'indemnisation (cf. figure 1).

La solidarité nationale et les dons privés

Les aides provenant de la solidarité nationale ont été de 1 111 829 euros. Les dons proviennent des particuliers (810 529 euros), de la recette d'un match de foot amical entre Valenciennes et Lens (150 000 euros), d'un spectacle de danse (1 300 euros), de dons des maires collectés par un habitant de Hautmont (150 000 euros). L'acteur Dany Boon, originaire de la région, ainsi que le groupe de musique Marcel et son Orchestre ont réalisé des prestations dont les bénéfices ont été reversés aux sinistrés. Les dons ont été généreux et abondants, notamment les dons en matériel (mobilier, petit électroménager, etc.). Concernant ce dernier point, les municipalités ont fait passer un message aux médias pour stopper l'afflux incessant de matériel qu'elles ne pouvaient plus stocker. La collecte n'a pas rencontré de difficulté, en revanche, la gestion de ces dons et leur répartition s'est avérée plus problématique. En effet, il fallait, dans un contexte dégradé, organiser une gestion transparente et une répartition acceptable pour l'opinion publique.

Les dons ont été redistribués par la CCSA de Hautmont (Communauté de communes Sambre Avesnois) et par l'AMVS (Agglomération Maubeuge Val de Sambre) dont le siège est à Maubeuge. Une ligne budgétaire spéciale a été créée pour permettre une gestion plus transparente. L'objectif était ainsi de couper court aux éventuels soupçons de détournement, par les pouvoirs publics, de fonds dédiés aux sinistrés. Les organismes receveurs de dons ont aussi été multipliés dans le but de répartir équitablement l'argent de la solidarité. Ainsi, les CCAS (Centres communaux d'action sociale) de Maubeuge et Hautmont ont aussi reçu des dons directs. Dans ce cadre, la CAF (Caisse d'allocations familiales) a versé aux CCAS 831 000 euros pour aider les foyers les plus défavorisés. La CGT (confédération générale du travail) a versé la somme de 102 000 euros aux centres d'action sociale. Ces aides ont permis de répondre à une partie des besoins immédiats des populations sinistrées, mais aussi d'accompagner l'effort de relèvement et de retour à une situation acceptable pour les populations.

L'État

L'État a subventionné la reconstruction par le biais de nombreux programmes et conventions. Le tableau ci-dessous résume les aides financières en provenance de l'État et de ses services déconcentrés (tableau 4).

Tabl. 4. — Les procédures d'aides économiques mises en œuvre par l'État

Type d'aide	Définition	Montant *(si disponible)* en euros
Aide d'urgence	Permettre aux populations de répondre à leurs premiers besoins (se nourrir, se vêtir)	300000
Convention Etat/ communes pour la prise en charge du déficit	L'Etat se porte garant de la dette accumulée par les communes pour l'effort de reconstruction	75% du déficit 800 000 = plafond de la prise en charge
Aide au relèvement	Emane du Ministère de l'Intérieur, pour permettre aux populations sinistrées d'acquérir les biens perdus qui étaient nécessaire à la vie quotidienne	7 000 000
Fonds d'aide au relogement d'urgence	Financer la remise en état des logements encore habitables, aider au paiement des loyers et charges, financer en partie l'aménagement des terrains pour l'accueil des mobiles-homes	553 267 pour 8 894 familles bénéficiaires
Fonds de solidarité en faveur des collectivités territoriales ayant subi une catastrophe naturelle	Réfection ou rénovation des biens communaux de voirie et des ouvrages d'art, et d'acheminement et de traitement de l'eau potable	502 771
Agence Nationale de Rénovation de l'Habitat - « mettre en œuvre la politique nationale de développement et d'amélioration du parc de logements privés existants» Et Agence Nationale pour la Rénovation Urbaine - « changer la ville dans 500 quartiers partout en France »	Subventions pour faire des réparations lourdes dans les logements privés, ne finance pas les reconstructions : ANAH Pour la reconstruction des logements sociaux : ANRU	Maubeuge (Epinette) projet de 58 millions d'euros et subventionné à hauteur de 14 millions. Hautmont (Bois du Quesnoy) projet de 110 millions subventionné à hauteur de 28 millions.
Aide à la vente des logements sinistrés	Aider les propriétaires qui souhaitaient vendre leur maison et quitter le territoire	1 000 000

Tabl. 5. — Répartition des dons collectés par le fonds de concours (en euros)

	Hautmont	Maubeuge	Neuf-Mesnil	Boussières-sur-Sambre
Somme perçue	3 463 947	1 651 697	156 504	136 392
nombre de bénéficiaires	2 661	1 815	111	41
% FSCT perçu	58.6%	35.5%	2.9%	2.9%
coûts estimés des dommages	39 000 000	28 000 000	1 300 000	1 300 000

Plusieurs outils financiers ont permis une gestion des dons adaptée aux conditions particulières de la phase de relèvement post-catastrophe. Un FSCT (Fonds de solidarité en faveur des collectivités territoriales) a été mis en œuvre et a centralisé la somme de 5 408 540 euros. Il s'agit d'un fonds de concours, autrement dit un mode de coopération financière entre un EPCI (Établissement public de coopération intercommunale), et les communes membres. La répartition a été faite par la Sous-Préfecture et par les élus selon l'ampleur des dégâts constatés (tableau 5). Cette forme de redistribution de l'argent public finance la construction, la réhabilitation ou l'acquisition d'un équipement utile à l'intercommunalité.

Le FSCT est un montage financier dont la création est annoncée par décret au Journal Officiel du 27 août 2008, le même que celui qui fait état de la reconnaissance en catastrophe naturelle des communes impactées. En effet, ce fonds est instauré par une modification du chapitre III du titre Ier du livre VI de la première partie réglementaire du code général des collectivités territoriales par insertion d'une seconde section intitulée : « Fonds de solidarité en faveur des collectivités territoriales et de leurs groupements touchés par des catastrophes naturelles. » Le FSCT a été créé pour répondre aux besoins de financements de la reconstruction en cas de sinistres trop localisés ou n'ayant pas causé assez de dommages pour faire appel à la solidarité nationale (régime Cat Nat). Des prélèvements annuels sont réalisés sur la compensation de la taxe professionnelle pour alimenter le fonds qui était doté de 20 millions d'euros en 2008. Au regard de la mauvaise santé financière du fonds Cat Nat, on peut supposer que la création de ce fonds réponde à un besoin de financement spécifique à ce type de sinistre (relativement peu étendu spatialement mais avec un fort pouvoir destructeur) en faveur des collectivités et de leurs groupements. Par extrapolation, nous supposons que la tornade dans le Val de Sambre a été l'évènement déclencheur à la mise en place de cette mesure. Elle va dans le sens d'une reconstruction facilitée car elle permet le déblocage rapide de fonds conséquents, en revanche, elle privilégie la reconstruction à l'identique « exclusion faite de toute dépense d'extension ou d'amélioration du bien » (JO du 27 août 2008, décret n° 2008-843), comme c'est le cas pour d'autres dispositifs de financement de la reconstruction comme le système de l'indemnisation par les polices d'assurance par exemple.

L'énumération exhaustive de tous les dispositifs mis en œuvre serait longue et inappropriée dans le cadre de cet article, c'est pourquoi nous avons choisi de nous concentrer exclusivement sur le FSCT qui vient en aide aux collectivités pour les infrastructures collectives, et le PIG (Programme d'intérêt général) pour l'habitat individuel et collectif. Nous aurions aussi pu traiter le FSL (Fonds de solidarité logement) mis en place pour aider les locataires en difficulté à payer leur loyer, mais cette mesure a concerné moins de foyers que le PIG. Les objectifs des PIG sont de réaliser un « repérage et un traitement de l'habitat indigne, lutter contre la précarité énergétique, adapter les logements pour les personnes à mobilité réduite, et remettre sur le marché des logements qui étaient jusqu'alors vacants » (Circulaire n° 2002-68/UHC/IUH4/26 du 8 novembre 2002 relative aux opérations programmées d'amélioration de l'habitat et au programme d'intérêt général). Les moyens pour réaliser ces objectifs sont l'appui administratif et technique au montage du dossier financier. Les aides financières apportées par les PIG, pour les propriétaires occupants, se présentent sous la forme de subventions comprises entre 45 % et 90 % du montant des travaux éligibles et plafonnées à 32 500 euros hors taxe. Pour les propriétaires bailleurs, les subventions sont de l'ordre de 20 % à 75 % dans la limite de 650 euros/m^2 et

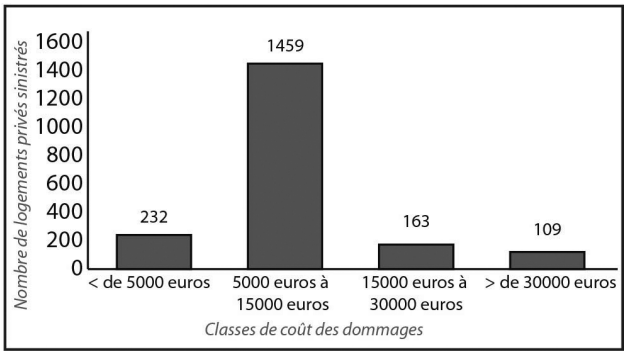


Fig. 2. — Coût des dommages pour les logements sinistrés (source : enquête de novembre 2011, conception : A. Moatty 2012).

en fonction de l'effort fait sur la modération du loyer. Les pourcentages de subvention varient en fonction des ressources du propriétaire.

4.2.2 Gestion et répartition des dons

Les clés de répartition des dons ont été définies lors de réunions de concertation entre les quatre communes. Les médiateurs de la République, dans les domaines des assurances et du relogement, envoyés par les services du premier ministre ont participé à ces réunions. Les critères retenus pour la répartition des dons sont la gravité des dégâts dans les habitations et le nombre de personnes dans le foyer, sachant qu'un logement abrite un seul foyer. Quatre niveaux ont été définis du moins au plus endommagé (figure 2) pour les 1 963 logements sinistrés (maisons et appartements). Les communautés de communes Val de Sambre et Sambre Avesnois ont été porteuses et garantes de la transparence dans le procédé de répartition des dons. Les 300 000 euros de l'aide d'urgence débloquée par l'État ont été répartis en forfaits de 150 euros par adulte et 75 euros par enfant, le reliquat a été redistribué aux familles les plus en difficulté. Le tableau ci-dessus est extrait de documents de communication de la Croix rouge française (tableau 6). Il rassemble les principaux postes de dépense des dons collectés en phase de post-catastrophe.

Aux lendemains de la tornade, la gestion des dons a été confiée à deux associations de loi 1901 : l'AMN (Association des maires du Nord) et l'Association des sinistrés. L'AMN a été créée pour faciliter aux maires et présidents d'intercommunalités du département, l'exercice de leurs fonctions en leur apportant conseils, formations, documentation ainsi qu'en représentant et défendant leurs intérêts auprès des autorités administratives locales comme nationales. Pour la répartition des dons, les sinistrés déposent une déclaration de sinistres en mairie. Après analyse de ces informations (la mairie se porte garant de l'exactitude des déclarations), chaque logement est classé dans une catégorie de 1 à 4, du moins au plus endommagé, catégorie à laquelle correspond à un montant d'aide.

Les mairies se sont accordées pour définir quatre classes mais le montant attribué à chacune varie. Pour Maubeuge et Neuf-Mesnil, la classification est celle présentée dans le tableau ci-dessous : petits travaux de moins de 5 000 euros, travaux compris entre 5 et 15 000 euros, travaux compris entre 15 et 30 000 euros et enfin la dernière catégorie des travaux supérieurs à 30 000 euros (tableau 7). À Neuf-Mesnil,

Tabl. 6. — Utilisation des dons par la Croix rouge française (d'après S. Dauphin, 2010)

Urgence	Post-urgence	Long terme
Distribution des biens de première nécessité (nourriture, vêtements, etc.)	Privilégier investissements qui vont permettre un retour à l'autonomie des familles et actions qui planifient le long terme	Si les premiers besoins en nourriture, vêtements, logements sont satisfaits, certains ont perdu leur travail et subissent des effets psychologiques à long terme : accompagnement de ces personnes vulnérables
Financement des opérations de secours et d'aide aux sinistrés (achat ou acheminement de matériel)	Pallier la longueur des procédures d'indemnisation par les assurances	Dispositifs d'écoute et d'aide sociale
Aide d'urgence pour les sinistrés	Combler la différence entre la valeur vénale (indemnisation) et la valeur d'achat	Financement des actions sur le long terme

Tabl. 7. — Somme forfaitaire allouée par foyer en fonction des dommages subis

Catégorie	Hautmont	Boussières-sur-Sambre
1	0	150
2	306	300
3	1 226	1 100
4	3 066	2 250

pour les locataires dont les biens sont classés dans la catégorie 1 l'aide est de 150 euros par foyer. Pour les locataires des catégories 2, 3 et 4, l'aide est de 300 euros avec une prime de 150 euros si le foyer a été contraint au déménagement temporaire. Pour les propriétaires occupants, les aides sont les mêmes que les locataires pour les classes 1 et 2, en revanche, pour la classe 3, elle est de 1 100 euros, et pour la catégorie 4, elle est de 2 250 euros. Toujours avec la prime de 150 euros si relogement temporaire ailleurs que dans le logement d'origine il y a eu.

À Boussières-Sur-Sambre et à Hautmont, la catégorie n° 1 correspond aux travaux dont le coût est inférieur à 3 000 euros, la catégorie 2 correspond aux travaux dont le coût est inférieur à 20 000 euros, la catégorie 3 pour les travaux compris entre 20 et 60 000 euros, et la catégorie 4, pour les travaux supérieurs à 60 000 euros. Là encore c'est le montant des aides allouées qui varie.

Pour l'ensemble des communes sinistrées, l'argent collecté par la solidarité a été géré par les associations et les communautés de communes plutôt que par les mairies directement. Les lois et règlements qui encadrent la gestion financière des structures associatives ou de groupements de communes sont plus souples que les structures municipales. Elles sont aussi gérées collectivement par des assemblées générales ou des comités de gestion, qui légitiment la prise de décision. Contrairement à la structure communale où le maire est seul responsable, bien que la décision soit aussi prise par les membres du conseil municipal. Malgré cette organisation de la prise de décision par un comité représentatif de la population, des critiques ont été faites aux clés de répartition. L'opinion publique invoquait alors le fait que Hautmont reçoive une majorité de fonds. Une campagne de sensibilisation par la voix des médias a été mise en œuvre pour justifier les sommes reversées à Hautmont, par l'ampleur des dégâts sur le parc privé notamment.

4.2.3 Le relogement d'urgence

Dès le lundi matin, le sous-préfet d'Avesnes-sur-Helpe a organisé une réunion avec les services de l'État pour trouver les premières solutions de relogement. À cette réunion étaient

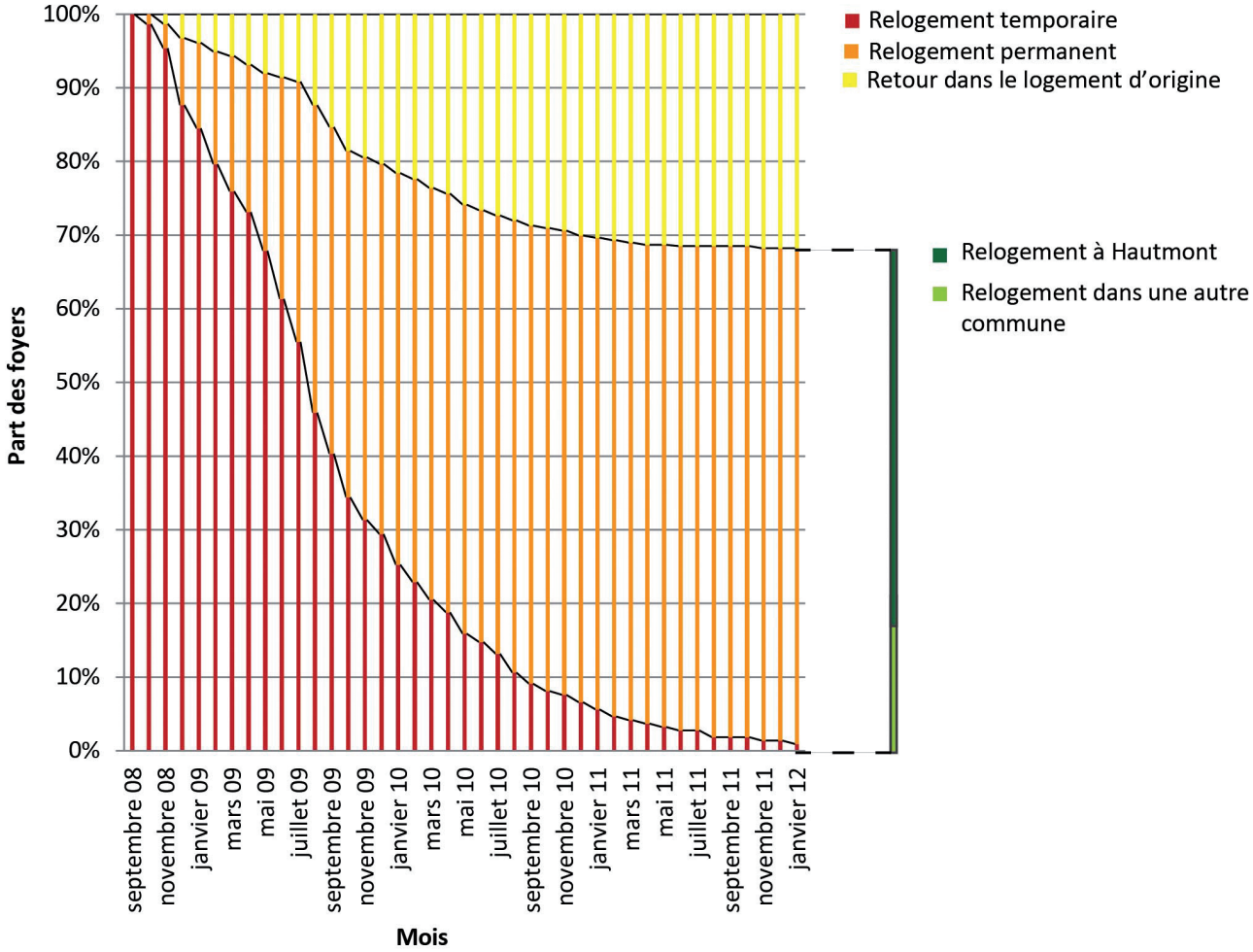


Fig. 3. — Temporalité du relogement des foyers hautmontois, du temporaire au permanent de 2008 à 2012.

présents le SIRACED PC (Service interministériel régional des affaires civiles et économiques de défense de protection civile), les maires des communes et la DDTM. Des organismes bailleurs ont été touchés par la tornade, notamment Promocil qui a procédé aux travaux de rénovation et a mis à disposition des biens de leur patrimoine pour le relogement d'urgence. Le choix a été fait d'utiliser les réseaux sociaux existants et de garder les structures de voisinage pour permettre un meilleur relèvement de la population.

Parmi les solutions étudiées, c'est celle des mobiles homes qui a été retenue. L'État a payé la location des mobiles homes à la DGSC (Direction générale de la sécurité civile) pour une durée de deux ans avec renégociation possible. Il y avait une enveloppe globale avec une tranche minimum attribuée aux mobiles homes. Ils étaient commandés au coup par coup selon la composition des foyers à reloger. Des indemnités d'entretien de 350 euros par foyer ont été versées aux familles bénéficiaires d'un mobile home.

Ce sont 54 mobiles homes qui ont été distribués sur les quatre communes, dont 39 à Hautmont. Les premiers mobiles homes sont arrivés 10 jours après la tornade. Pendant ce temps, les personnes sinistrées étaient soit dans leurs maisons sous bâche, soit chez des proches. Le dernier mobile home est parti en juillet 2012. Certains ont servi à plusieurs familles, ce qui explique le « petit » nombre de mobiles homes au regard du nombre de foyers à reloger.

Les techniciens de la DDTM ont recherché des sites adéquats qui répondent à la fois aux exigences de sécurité mais aussi aux volontés des populations sinistrées : être près de leur maison et garder une structure de voisinage, et même un rapprochement familial. Les mobiles homes ont aussi été tout de suite équipés de boîte aux lettres pour éviter les situations d'isolement et pour faciliter les démarches d'assurances et d'information par voie postale.

Pour prioriser les familles à reloger, le premier critère d'accès aux mobiles homes était d'avoir assuré son bien immobilier avant la tornade. Le second critère était lié à la composition de la famille et aux typologies de mobiles homes disponibles : certains n'étaient pas adaptés aux enfants en bas âge, d'autres n'étaient pas adaptés aux personnes âgées, etc.

Un an après la catastrophe, 50 % des foyers hautmontois étaient relogés durablement. En décembre 2012, seuls 2 % des foyers sinistrés n'avaient pas encore regagné leur logement définitif (figure 3). Ce retard s'explique principalement par les conflits avec les assurances. Une grande majorité des relogements se sont fait sur Hautmont par volonté des populations de rester à proximité de leur habitation détruite pour suivre l'avancée des travaux.

En termes de stratégie de reconstruction, c'est l'amélioration des conditions de vie des populations qui a été privilégié par rapport à la reconstruction à l'identique ou encore à la reconstruction préventive avec l'utilisation de techniques

de construction para-cyclonique par exemple. L'objectif était de coupler cette reconstruction post-catastrophe avec les objectifs de l'ANAH. Les décisions de reconstruire ou de rénover ont été faites au cas par cas par la DDTM avec un bureau d'étude et des agents communaux. Les notions prises en compte pour faire ce choix de la reconstruction ou de la rénovation portaient sur la dangerosité du logement et les difficultés à vivre dans le logement.

Pour les foyers dont le logement devait être détruit, les maires avaient le devoir de proposer un relogement. La DDTM devait donner son accord et la sous-préfecture donnait le droit de jouir de ce logement pour deux ans. Le relogement dans le parc social a été quasi immédiat. Entre temps, les communes limitrophes ont permis un premier relogement temporaire. Certains appartements, promis à la démolition dans le cadre de la rénovation urbaine, ont été réouverts pour accueillir temporairement des familles.

La DDTM était en charge de l'organisation générale des quartiers à reconstruire et des procédures de reconstruction en se faisant le relais de l'information. En revanche, elle n'est pas intervenue dans les procédures de vente dans le quartier des Exotiques (quartier dans lequel seules trois maisons n'ont pas été détruites). Les autres ont été démolies pour être reconstruites. Environ 30 % des habitations de ce quartier ont été vendues par leurs propriétaires. Il ne s'agit pas de procédures d'expropriations (comme celles prévues par la loi Barnier de février 1995 pour les habitations fortement exposées à un ou plusieurs risques d'origine naturelle), mais de volontés individuelles de quitter le quartier, parfois même la ville dans le cadre de rapprochement avec d'autres membres de la famille.

La procédure de vente est fondée sur une convention entre la mairie et Promocil qui a racheté les maisons et terrains pour le compte de la mairie. Les assurances prenaient en charge les frais de démolition. Puis les terrains ont été rétrocédés aux propriétaires des autres logements de ce quartier qui souhaitaient agrandir leur parcelle, ou bien ils ont été transformés en lots de rénovation urbaine.

Le Maire d'Hautmont s'est positionné pour une restructuration du quartier pour « mieux reconstruire ». Une commission d'attribution des logements a été mise en place. Son directeur, M. Dehoux déclare publiquement en septembre 2008 que « La priorité est de reloger dans le cadre de la rénovation urbaine ». Il y a eu une vaste concertation pour proposer un nouveau plan du quartier.

À Maubeuge, les services de la ville ont privilégié le relogement en partenariat avec les bailleurs privés et sociaux. Les mobiles homes étaient considérés comme une solution provisoire et inadaptée dans la durée (28 m^2 pour une famille de quatre personnes). En parallèle, une nouvelle organisation et de nouveaux lieux pour les espaces touristiques, de loisirs, bâtiments administratifs, scolaires et culturels ont été pensés pour adopter un « nouveau regard sur la ville » (R. Pauvros, Maire de Maubeuge). Par exemple, en Septembre 2009, les nouveaux satellites de restauration scolaire étaient prêts à accueillir les enfants inscrits à la cantine. Cette organisation est réfléchie « ce n'est pas le fruit d'un coup de tête pris dans l'urgence. La municipalité travaillait sur ce projet, la tornade a juste précipité les choses » (adjointe au maire de Maubeuge). Ceci démontre que la « reconstruction en mieux » est facilitée lorsqu'il existe un plan préétabli. Dans ce cas, les plans concernent le secteur de la rénovation urbaine et la phase de reconstruction post-catastrophe a été vécue comme une opportunité d'améliorer en remettant aux normes. Cependant, cet exemple peut être transposable aux plans de maitrise de l'urbanise au regard de la gestion des risques naturels avec une sélection de mesures de protection à mettre en œuvre en phase de reconstruction.

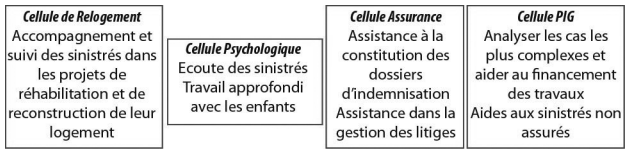


Fig. 4. — Organisation de la prise en charge de la population.

4.3 Relèvement des populations

Le suivi des populations sinistrées s'est fait au cas par cas par les employés municipaux. Les cellules de crise, remplacées par les cellules de veille sont restées dans chaque mairie pendant plusieurs mois pour fournir une assistance administrative et technique. Le suivi a été ponctuel et scrupuleux jusqu'au relogement définitif de tous les sinistrés. Dans ce domaine, des problématiques différentes émergent selon la période de reconstruction où l'on se situe.

4.3.1 La post-crise et la mise en sécurité

« On a fait surtout avec les moyens locaux, le travail en collaboration a bien fonctionné, on a su où trouver les compétences localement, les cadres ont reporté leurs projets de vacances… » (Balzani, employé municipal de Hautmont, service du logement).

La sous-préfecture et le SIRACED PC se sont surtout impliqués dans la gestion de crise et de la post-crise immédiate. Malgré la rareté d'occurrence de tornades durant les décennies précédentes, les services de secours sont habitués à gérer des crises liées aux inondations de la Sambre, ce qui explique en partie leur grande réactivité. De plus, il était impératif de protéger les populations car Météo France prévoyait d'importantes pluies et des orages dans les jours à venir pour tout le Nord de la France. Des bâches ont été apportées pour couvrir les maisons qui étaient encore debout. Dès le lundi, les habitants de l'arrondissement, et même des autres départements sont venus apporter du matériel, des couvertures, des vêtements, du linge pour les premiers besoins. Comme pour le volet financier, la solidarité nationale et surtout régionale a été spontanée et généreuse.

Les C.R.S. sont venus barrer les routes à cause du voyeurisme et des vols, sur demande des populations. En effet, dans les jours qui ont suivi la catastrophe, des vols de radiateurs et de tuyauterie (en cuivre principalement) ont été signalés. Les voleurs profitaient de l'absence des propriétaires dans leur habitations la nuit pour dérober les biens. La délinquance en période de post-catastrophe est assez répandue, on recense des vols de matériaux de construction principalement. On ne dispose pas de chiffres sur cette thématique mais de nombreux ouvrages relatent ces vols notamment de matériaux de construction (Hernandez, 2008 et 2009 ; Miles et Morse, 2006), le cuivre, qui est environ 40 % plus cher que le PVC, étant particulièrement prisé.

Tabl. 8. — Extrait du tableau de suivi des populations sinistrées (source : Mairie de Hautmont)

	RELOGEMENT TEMPORAIRE (ne pas inscrire les familles restées dans leur logement*)					RELOGEMENT DEFINITIF				
	MOBIL HOME	PARC PUBLIC OU FOYER/HEBERGEMENT	PARC PRIVE	ACCUEIL FAMILIAL (ou séjour à l'étranger)	TOTAL relogés temporaire à fin de mois	RETOUR LOGEMENT D'ORIGINE (propriétaire/locataire-public/privé)	RELOGEMENT DEFINITIF PARC PUBLIC	RELOGEMENT DEFINITIF PARC PRIVE	TOTAL relogés par mois	TOTAL relogés cumulés fin de mois
septembre 08	37	72	9	31	149	0	0	0	0	0
octobre 08	(+ 2) 39	70	8	30	147	0	1	1	2	2
novembre 08	39	69	7	29	144	2	1	0	3	5
décembre 08	36	65	6	28	135	3	3	3	9	14
janvier 09	(+ 1) 37	64	5	25	131	1	1	2	4	18
février 09	37	57	(+ 3) 8	23	125	2	0	4	6	24
mars 09	37	56	7	20	120	1	1	3	5	29
avril 09	36	55	7	19	117	2	0	1	3	32
mai 09	34	50	7	19	110	2	4	1	7	39
juin 09	33	45	5	17	100	1	9	0	10	49
juillet 09	33	39	4	15	91	1	8	0	9	58
août 09	31	29	3	15	78	6	5	2	13	71
septembre 09	29	24	3	15	71	6	1	0	7	78

Page 1

Des cellules de veille ont été mises en place dans toutes les mairies. Les administrés pouvaient s'y rendre pour poser des questions concernant l'indemnisation, les modalités d'attribution des aides, ou encore sur le suivi des travaux de reconstruction des habitations. Les médiateurs de la république ont assisté les personnels municipaux dans cette démarche. À l'instar des cellules de crises remaniées en cellules de veille, un local de la Croix Rouge est resté ouvert plusieurs mois sur place. L'ouverture de lieux d'accueil, pour poser des questions, échanger avec les voisins permet de recréer un lien social et de lutter contre l'isolement. Après Xynthia, en Vendée, les équipes de la Croix Rouge ont organisé des petits déjeuners pour commencer les journées de travaux de déblayage des décombres. Le SAMU et le SMUR sont restés deux ans sur place, et leur travail a principalement porté sur le soutien et l'accompagnement des enfants. Les bénévoles ont rapporté de nombreux cas de régression chez les enfants. Certains ont eu des problèmes d'énurésie nocturne, d'autres développent une agressivité inhabituelle. Les psychologues ont observé des cas d'automutilation, etc. (Koplewicz dir., 2006). Ces derniers parlent de l'atteinte à l'intégrité physique et morale de l'enfant et des personnes affectées en général, qui engendre un stress post-traumatique voire des dépressions et angoisses.

4.3.2 Le suivi à moyen terme des populations

Un numéro vert a aussi été mis en place pour permettre aux sinistrés d'avoir accès à une assistance psychologique. Une cellule psychologique a été mise en place à Maubeuge et Hautmont. Elle est restée active pendant deux ans. Le ministère de l'Éducation nationale a dépêché des psychologues scolaires pour aider les enfants à surmonter le traumatisme. La cellule de veille a permis d'organiser l'orientation des personnes vers les services administratifs compétents. Elle permettait aussi d'assurer le lien avec les assurances et les bailleurs sociaux pour le relogement. Les agents des mairies se sont rendus dans les quartiers sinistrés pour interpeler les gens et les inciter à se rendre en cellule de veille. Pour répondre le plus efficacement possible aux préoccupations des habitants sinistrés, quatre cellules spécifiques ont été mises en place en mairie de Hautmont et de Maubeuge (figure 4). Dans le local de la Croix rouge à Hautmont, les bénévoles avaient installé des machines à laver. Ce lieu faisait office de laverie, mais aussi et surtout, de lieu de rencontre et de discussion, « cela évitait que les gens ne restent enfermés chez eux » (bénévole de la Croix Rouge de Hautmont). Certaines salles communales, encore en bon état ont été équipées de tentes par les secouristes. L'objectif de ces tentes était de préserver l'intimité des familles. Seules trois personnes sont allées dans ces centres, qui ne sont restés ouverts que deux jours. « Les gens avaient trop peur du vol… » (M. Clerc, Siraced Pc). Ce sentiment d'insécurité a persisté toute la période du relogement temporaire, à tel point que les foyers relogés en mobiles homes souhaitaient que ce dernier soit placé devant leur maison en travaux. En plus de la délinquance matérialisée par le vol de matériaux, il y a eu le cas, dans les premières semaines, d'une entreprise malhonnête qui a bâclé le travail (matériaux de moins bonne qualité qu'annoncée, méthodes de construction moins rigoureuses pour gagner du temps, etc.) et qui a pris la fuite dès les premières protestations des propriétaires. Le sentiment d'insécurité en période post-catastrophe est fréquent, il fait partie des effets induits par les chocs et les dommages engendrés par les catastrophes, au même titre que le sentiment d'impuissance, le chagrin ou encore la culpabilité (Commission économique pour l'Amérique latine et les Caraïbes, 2001 et E. de Soir, 1998). Les personnes en difficulté ont été suivies jusqu'à leur relogement définitif. Les agents des mairies de Hautmont et Maubeuge contactaient les familles régulièrement (toutes les deux semaines) pour connaître leur situation. Les informations recueillies étaient alors retranscrites dans un fichier Excel pour permettre un suivi rigoureux et pour permettre l'échange de ces informations avec d'autres acteurs de la reconstruction (tableau 8).

Ce tableau de suivi des populations était étudié tous les mois par les membres de la cellule relogement (cf. figure 4). Il résultait de ces réunions un tableau de suivi mensuel. L'investissement de ces personnels municipaux et des services d'État démontre l'importance accordée au facteur humain.

> Il fallait composer avec les volontés de chacun : certaines personnes souhaitaient ne plus revenir dans ce quartier, d'autres souhaitaient avoir leur mobile home juste en face de leur maison pour suivre chaque étape de la reconstruction, d'autres ne voulaient revenir

Tabl. 9. — Les actes de mémoire suite à la tornade

Lieu	Moyen	Porteur du projet
Hautmont	Stèle en hommage aux victimes et aux disparus	Mairie de Hautmont
Les quatre communes	Distribution de médailles aux bénévoles qui ont aidé au relèvement et à la reconstruction	Préfecture
Hautmont	Exposition commémorative	Mairie de Hautmont
Hautmont	Résidence rebâtie dans le quartier des Exotiques nommée « Huguette et Michel Fichaux »	Mairie de Hautmont
Boussières-sur-Sambre et Hautmont	Boulevard renommé « Boulevard du 3 Août 2008 »	Mairie de Boussières-sur-Sambre et Mairie de Hautmont
Maubeuge	Cérémonie : « A la Sainte Catherine, Maubeuge prend racine » : plantation d'arbres dans le quartier de la porte de Mons	Mairie de Maubeuge
Ainsi que de nombreuses journées commémoratives et numéros spéciaux des journaux communaux ou locaux (La Voix du Nord principalement)		

> qu'une fois que leur maison serait finie ; ça dépendait des sensibilités de chacun et nous avons fait au mieux pour les satisfaire…
> (Lalisse, DDTM 59)

4.4. Éthique préventive et reconstruction post-catastrophe

Les phases de reconstruction peuvent être considérées comme des « fenêtres d'opportunité de prévention » (Christoplos, 2006). Cependant, cette opportunité ne peut être saisie que si des plans d'action, des dispositifs, des acteurs formés à cette problématique préexistent à la catastrophe. Il s'agit de reconstruire mieux en réduisant le risque à l'origine de la catastrophe sans amplifier d'autres risques et en améliorant la qualité de vie des populations exposées.

4.4.1 La mise en œuvre de mesures structurelles

Les communes sont en zone 3 du zonage sismique de la France et le choix a été fait par les municipalités de Hautmont et Maubeuge (nous ne disposons pas des données pour Boussières-sur-Sambre et Neuf-Mesnil) de reconstruire selon les normes parasismiques. On peut s'interroger sur le choix de construire aux normes parasismiques plutôt qu'aux normes de construction résistantes aux effets du vent. En effet, la région du Nord est la plus exposée aux tornades en France (Paul, 2001) alors que l'on n'y a pas connu de séisme de magnitude véritablement destructrice depuis le début des mesures et dans les historiques. On trouve cependant des outils de communication qui présentent des principes de construction permettant de rendre l'habitation plus résistante à la fois aux séismes et aux cyclones (« Principes des bâtiments résistants contre séismes et cyclones », Development Workshop, 2010). Parmi ces principes, on retrouve, entre autres, le choix de formes simples et symétriques pour augmenter la compacité du bâtiment ou encore, le principe de lier tous les composants pour minimiser le risque d'effondrement en cas de séisme et éviter le soulèvement du toit en cas de tornade. Ainsi la construction aux normes sismiques n'est pas complètement inefficace contre le vent mais elle n'est certainement pas la norme la plus adaptée au Nord-Pas-de-Calais et occasionne des surcoûts de construction difficiles à justifier.
Il existe cependant une norme de construction plus adaptée aux effets du vent, la norme : NV 65 modifiée 99 (MRN, 2005). Cette norme de construction visent à adapter les bâtiments au poids de la neige et aux effets du vent. Les éléments de construction fondamentaux pour la résistance aux effets du vent sont les façades rideaux, les fenêtres et les portes, les fermetures, le bardage et la vêture ainsi que les systèmes d'ancrage. Le document du CSTB (Centre scientifique et technique du bâtiment) sur les Règles NV 65 datant de 2000 préconise quelques règles comme la limitation des débords de toiture pour atténuer le risque d'arrachage par des vents soulevant. On peut aussi citer la limitation des surfaces en baies vitrées et la pose systématique de volets. Compte tenu du caractère récurrent des vents forts et des tornades dans le nord de la France (2 tornades ont fait des dégâts en octobre 2013), le renforcement du bâti face aux effets du vent devrait être une prescription prioritaire face au risque sismique.

4.4.2 Planification et actes de mémoire

La commune de Hautmont a réalisé un DICRIM (Document d'information communal sur les risques majeurs) ainsi qu'un « retour d'expérience » sous forme d'exercice de reconstitution de l'évènement avec tous les services concernés dans le but de développer une méthode d'organisation de gestion de crise. Cette démarche s'est accompagnée de la réalisation d'un PCS (Plan communal de sauvegarde). La commune de Maubeuge a elle aussi réalisé son PCS dans l'après catastrophe. Le maire de Hautmont, dans son courrier d'accompagnement du DICRIM, incite les citoyens à être acteurs de leur sécurité :

> Même si la possibilité de survenance de tels risques est faible (hormis le risque inondation), souvenons-nous en particulier de la nuit du 3 août 2008, durant laquelle un phénomène météorologique inouï et meurtrier s'est abattu sur le Val de Sambre. Qui aurait pu penser qu'une telle tornade puisse balayer de la sorte une partie du Val de Sambre. […] Nous devons vous informer pour que vous deveniez acteurs de votre propre sécurité.
> (J. Wilmotte, le 20 septembre 2010)

Certains quartiers touchés étaient anciens, défavorisés sur les plans économiques et sociaux. La tornade a été vécue comme une fenêtre d'opportunité pour améliorer l'image de ces quartiers. Il y a eu une émulation autour de ceux qui ont commencé à faire des travaux d'amélioration, chacun souhaitant avoir « mieux qu'avant ».

Conclusion

Malgré sa faible extension spatiale, la tornade du 3 août 2008 a généré des destructions particulièrement graves

sur des bâtiments privés et infrastructures publiques dans quatre communes du Nord de la France. En trois ans, les stigmates se sont peu à peu effacés grâce à un processus de reconstruction qui, finalement, suit les grandes lois du genre. Comparé à la littérature scientifique qui concerne le plus souvent des catastrophes de grande ampleur, le processus de reconstruction post-tornade dans le Val de Sambre fut dans son phasage et sa durée comparable à celui donné pour les catastrophes internationales de grande ampleur (Oliver-Smith (1977) sur Yungay au Pérou ; Gaillard et Leone (2000) et Gaillard (2002) sur le Pinatubo aux Philippines, Hernandez (2008 et 2009) sur la Nouvelle-Orléans). Globalement, la reconstruction après les catastrophes dure de 3 à 4 ans (Kates et Pijawka, 1977). Dans l'Aude, une cérémonie officielle avait clôturé la phase de reconstruction le 12 novembre 2002 au troisième anniversaire des crues dévastatrices même si certains dossiers se sont prolongés sur 5 ou 6 ans. Les spécialistes internationaux soulignent que les effets indirects de la catastrophe et de la reconstruction peuvent perdurer plus de 10 ou 20 ans (Oliver-Smith, 1992 ; Gaillard, 2002). Concernant la prise en charge de la reconstruction, des spécificités apparaissent. En effet, la catastrophe, du fait de sa faible ampleur est facilement absorbée par les mécanismes de solidarité nationale. L'État et les collectivités territoriales ont répondu rapidement aux besoins financiers des sinistrés. Le système assurantiel mis en place par la loi de 1982 relative à l'indemnisation des victimes et la mobilisation de la solidarité à toutes les échelles ont assuré globalement une remise en état rapide du secteur sinistré. Cependant, la reconstruction mobilise des ressources et des énergies considérables. À ce titre, elle suscite parfois des conflits et induit des réactions face au risque qui ne vont pas toujours dans le sens d'une prévention durable. Nous entendons par là, une prévention qui s'organise dès la phase de reconstruction et qui tire les enseignements de l'évènement catastrophique (Vinet, 2010). Mais la période de reconstruction est aussi un temps de confrontation entre des acteurs, aux objectifs, aux méthodes et aux intérêts différents. Ce qui ressort fortement de la gestion de crise et des premiers mois après la catastrophe est l'impression d'une improvisation reposant sur la bonne volonté des personnes et sur un surcroît d'énergie des communautés et autorités locales. Ceci peut expliquer les frustrations à l'origine des refus d'information que nous avons essuyés. En effet, les maires des communes de Neuf-Mesnil et de Boussières-sur-Sambre n'ont pas souhaité répondre à notre enquête ont argué que « l'évènement a été trop douloureux et maintenant c'est derrière nous, le problème est réglé et nous voulons oublier » (courrier de la mairie de Neuf-Mesnil, Novembre 2012).

Les difficultés rencontrées sur les plans technique, juridique et social sont les mêmes que pour d'autres cas de reconstructions post-catastrophe, à savoir : la gestion des logements non assurés, l'absence de dispositif de gestion de crise local (type Plan communal de sauvegarde) avant la catastrophe, la gestion de la communication auprès des médias et la gestion des rumeurs, les actes de délinquance et la gestion du traumatisme des populations.

Cette période est aussi porteuse d'innovation. En effet, elle oblige les élus, les sinistrés, les services de l'État et les établissements publics à travailler ensemble dans le but de reconstruire efficacement. La reconstruction a été menée dans l'objectif de remise aux normes des logements, notamment au regard de la loi ANRU et du nouveau zonage sismique. La mise en œuvre de ces mesures a été relativement aisée car les personnels municipaux et des services d'État sont en poste depuis longtemps et connaissent bien les populations de ces territoires. Ainsi, la coordination entre les services et la communication sur cette stratégie de reconstruction ont été suffisantes pour faire accepter ces choix stratégiques aux sinistrés. En termes de perception de l'espace, les habitants d'Hautmont et de Maubeuge ont changé leur vision de leur ville. Grâce à la solidarité nationale, aux indemnisations des assurances, les élus et leurs administrés ont saisi cette opportunité d'insuffler un nouveau dynamisme à ces villes. Des enquêtes psychosociologiques et des entretiens complémentaires seraient nécessaires pour expliquer la trace laissée par cet évènement sur le territoire et pour comprendre les écarts de résilience entre Hautmont et Maubeuge et les deux autres communes.

Bibliographie

Alexander D., *Post disaster reconstruction : planning and sustainability*, Université de Florence, 2010, 35 p.

Altinitas E., Colpin I., Remiens A., Rusinek S., Guerrien A., *Conséquences d'une catastrophe naturelle sur la santé psychologique et l'épuisement professionnel du personnel hospitalier : l'exemple de la tornade d'Hautmont*, 16e congrès de l'Association internationale de psychologie du travail de langue française (AIPTLF), Lille, 2010, 24 p.

Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB), Règles NV65 (DTU P06-002) : *Règles de calcul définissant les effets de la neige et du vent sur les constructions et annexes*, CSTB 2000 ISBN 2-86891-284-2, 2000, 224 p.

CEPRI, *Les collectivités territoriales face aux déchets des inondations : des pistes de solutions — Guide de sensibilisation*, 2012, 80 p.

Chance H., Noury M., *La gestion de la post catastrophe : l'approche française et la stratégie internationale*, Les dossiers de l'Institut des risques majeurs de Grenoble, 2011, 143 p.

Christoplos I., *The elusive « window of opportunity » for risk reduction in post-disaster recovery*, Intervention « ProVention Consortium Forum », Bangkok, 2-3 février 2006, 4 p.

Commission Économique pour l'Amérique Latine et les Caraïbes, *Manuel pratique d'évaluation des effets socio-économiques des catastrophes*, 2001, 418 p.

Dauphin S., « La gestion des dons en phase post-catastrophe », *Risques Infos* n° 24, 2010, 2 p.

Development Workshop France, *Principes des bâtiments résistants aux séismes et cyclones*, 2010, 1 p.

Gaillard J.-C., « Implications territoriales et ethnoculturelles d'une crise volcanique : le cas de l'éruption du Mont Pinatubo aux Philippines », *Annales de Géographie*, n° 627-628, 2002, p. 574-591.

Gaillard J.-C., Leone F., « Implications territoriales de l'éruption du Mont Pinatubo par la minorité autochtone Aeta : cas des bassins-versants des rivières Pasig at Sacobia (provinces de Pampanga et Tarlac, Philippines) », *Cahiers Savoisiens de Géographie 1/2000*, 2000, p. 53-68.

GIEDE (Groupe d'expertise et d'intervention Déchets post-catastrophe) – *Robins des bois, Déchets post-catastrophe : risques sanitaires et environnementaux*, 2007, 300 p.

Hernandez J., *Le tourisme macabre à La Nouvelle-Orléans après Katrina : résilience et mémorialisation des espaces affectés par des catastrophes majeures Norois 2008/3 (n° 208)*, 2008, p. 61-73.

Hernandez J., « *The Long Way Home* : une catastrophe qui se prolonge à La Nouvelle-Orléans, trois ans après le passage de l'ouragan Katrina », *L'Espace géographique* 2009/2 (vol. 38), 2009, p. 124-138.

Journal Officiel de la République française du 27 août 2008/ n° 199, 2008, 147 p.

Journal Officiel de la République française du 29 janvier 2009/n° 24, 2009, 244 p.

Kates & Pijawka, *From Rubble to Monument : The Pace of Reconstruction, Disaster and Reconstruction, HAAS, KATES & BOWDEN*, Cambridge, Massachusetts, M.I.T. Press, 1977, p. 1-23.

Koplewicz H.-S. (dir.), *Caring for kids after trauma, disaster and death : a guide for parents and professionals*, 2006, 65 p.

Magdeleine, *Les tornades*, 2011, 2 p. http://www.notre-planete.info

Mahieu P., Wesolek E., « La tornade F4 du 3 août 2008 en Val de Sambre, Analyse du contexte météorologique, inventaire des dégâts et perspectives dans le cadre de la prévision », *Keraunos*, 2008, 101 p.

Miles B., Morse S., « The role of media in natural disaster risk and recovery », *Ecological Economics* n°63 in *Science Direct*, 2006, 9 p.

Ministère de l'Intérieur, de l'Outre-mer et des Collectivités territoriales, *Circulaire n° 2008-843* du 25.08.2008, fonds de solidarité en faveur des collectivités territoriales et de leurs groupements touches par des catastrophes naturelles, 2008, 17 p.

Ministère de l'Intérieur et de l'Aménagement du territoire, direction de la Défense et de la Sécurité civile, sous-direction de la Gestion des risques, Bureau d'analyse et de préparation des crises, « La conduite du retour d'expérience, éléments techniques et opérationnels », 2006, 120 p.

Monnet J., « La symbolique des lieux : pour une géographie des relations entre espace, pouvoir et identité », *Cybergeo : European Journal of Geography, Politique, Culture, Représentations*, document 56, 1998, 11 p.

Oliver-Smith A., « Disaster rehabilitation and social change in yungay, Peru », *Human organization* 36-1, 1977, p. 5-13.

Oliver-Smith A., *The Martyred City : Death and Rebirth in the Andes*, Waveland Press Inc., 1992, 280 p.

Paul F., « A developing inventory of tornadoes in France. Conference on European Tornadoes and Severe Storms », *Atmospheric Research*, volume 56, Issues, 1-4, 2011, p. 269-280.

Rose A., « Resilience and sustainability in the face of disasters », *Environmental Innovation and Societal Transitions in Elsevier*, 2011, 5 p.

Soir De E., *Manuel pour le travail traumatique après incidents critiques*, Maklu, 1988, 24 p.

Stratégie internationale pour la prévention des catastrophes (UNISDR), *Terminologie pour la prévention des risques de catastrophe*, 2009, 39 p.

Stratégie internationale pour la prévention des catastrophes (UNISDR), *Pour des villes résilientes, ma ville se prépare, campagne mondiale 2010-2011 pour la prévention des catastrophes*, 2011, 104 p.

Wesolek E., Mahieu P., « The F4 tornado of August 3, 2008, in Northern France: Case study of a tornadic storm in a low CAPE environment », *Atmospheric Research*, 100 (4), doi:10.1016/j.atmosres.2010.09.003, 2011, p. 649-656.

5 L'impact des laves torrentielles sur les réseaux de communication : l'exemple du Rif Blanc (Alpes françaises)

Marina Utasse[1], Vincent Jomelli[1] & Frédéric Leone[2]

1. Laboratoire de Géographie Physique, U.M.R. 8591, CNRS. 1 place Aristide Briand, 92195 Meudon Cedex, France.

2. U.M.R. GRED — Gouvernance, Risque, Environnement, Développement, IRD. 911 avenue Agropolis, BP 64501 34394 Montpellier cedex 1 — France.

marina.utasse@cnrs-bellevue.fr

Résumé. — Le 4 juin 2012, une lave torrentielle située sur le torrent du Rif Blanc a provoqué la coupure de la principale liaison économique et touristique du département des Hautes-Alpes, axe permettant de rejoindre les villes de Grenoble et Briançon. Outre la paralysie du réseau routier, les perturbations se sont prolongées durant plusieurs jours dans l'ensemble du territoire du Grand Briançonnais. Le retour d'expérience, appuyé par une approche intégrée du risque a permis de reconstruire les différentes étapes de l'évènement, depuis le processus naturel ayant conduit à l'évènement dommageable, pour ensuite évaluer leurs conséquences territoriales en termes de pertes d'accessibilité. En parallèle, une enquête auprès des acteurs de la gestion de crise a permis de reconstruire l'ensemble de la chaîne logistique et d'analyser leur capacité de résilience face à ce type d'aléa naturel.

Mots-clés. — Lave torrentielle, torrent du Rif Blanc, réseau routier, retour d'expérience, endommagement, gestion de crise, accessibilité territoriale.

Title. — *The Impact of Debris Flows on Communication Networks : The Case of the Rif Blanc Torrent (French Alps)*

Abstract. — *June 4, 2012, a debris flow located on the Rif Blanc catchment caused the interruption of the main economic and touristic road link of the Hautes-Alpes department, axis which links the cities of Grenoble and Briançon. Beside the paralysis of the road network, the disturbances are extended for several days throughout the territory of the Grand Briançonnais. The feedback experience within an integrated approach of the risk allowed to reproduce the various steps of the event, from the natural process leading to the damaging event in order to evaluate territorial consequences in terms of accessibility losses. Meanwhile, a survey of decision-makers in crisis management allowed to reproduce the logistic process and analyze their resilience to cope with this kind of natural hazard.*

Keywords. — *Debris Flows, Rif Blanc Catchment, Road Network, Feedback Experience, Damages, Crisis Management, Territorial Accessibility.*

Introduction

Le retour d'expérience constitue une méthode largement utilisée pour la description et la compréhension d'un évènement naturel. À titre d'exemple, de nombreuses bases de données internationales traitant du retour d'expérience des catastrophes naturelles sont répertoriées (Federal Emergency Management Agency of USA, Asian Disaster Reduction Center, The International Disaster Database, etc.). La plupart de ces études portent sur des évènements exceptionnels et/ou de grande envergure, mais peu relèvent d'évènements d'intensité moyenne à portée régionale ou locale, statistiquement plus fréquents. De manière générale, les travaux post-évènement proposent une approche analytique du phénomène en se concentrant sur un des aspects du risque. De nombreuses études portent ainsi sur des constats d'endommagement structurels et humains, en particulier sur les séismes et les éruptions volcaniques (Ge *et al.*, 2010 ; Bono *et al.*, 2011). En revanche, la grande majorité des travaux sur les laves torrentielles sont d'avantages consacrés à l'analyse et à la compréhension de l'aléa torrentiel. Dans ce contexte, la plupart des analyses post-évènement se concentrent sur cet aspect du risque (Remaître *et al.*, 2002 ; Lahousse et Salvador, 2002 ; Sepúlveda *et al.*, 2006 ; Oramas *et al.*, 2007 ; Doberstein, 2009).

Il existe peu d'études consacrées aux laves torrentielles appliquées à une description complète de l'évènement en analysant l'ensemble des causes et les conséquences (Perrin *et al.*, 1998), et très peu sont appliquées aux impacts occasionnés sur les réseaux de transport. Ces derniers représentent un système particulièrement sensible en cas d'interruption. En effet, la perturbation des réseaux ne touche pas seulement le secteur sinistré, mais s'étend à toutes les zones et activités qui en dépendent. Ce constat s'applique d'autant plus au réseau en montagne, peu connexe et dont les axes de communication sont limités.

L'intérêt de cet article est donc de proposer une analyse systémique du risque à travers la constitution d'un scénario reproductif d'un évènement lave torrentielle d'intensité moyenne impactant le réseau routier dans la communauté de communes du Briançonnais (Hautes-Alpes).

Cette approche est appliquée à l'évènement torrentiel du 4 juin 2012 sur le torrent du Rif Blanc (Hautes-Alpes, France) entrainant la coupure du réseau routier au col du Lautaret. Cette étude vise à caractériser l'écoulement torrentiel, dans le but d'estimer les volumes requis pour impacter le réseau routier, les modes d'endommagement du réseau et ses facteurs aggravants. Il s'agit également d'identifier les rôles et missions des principaux acteurs de la gestion de crise dans le but d'analyser à chaque étape, le processus de décision et

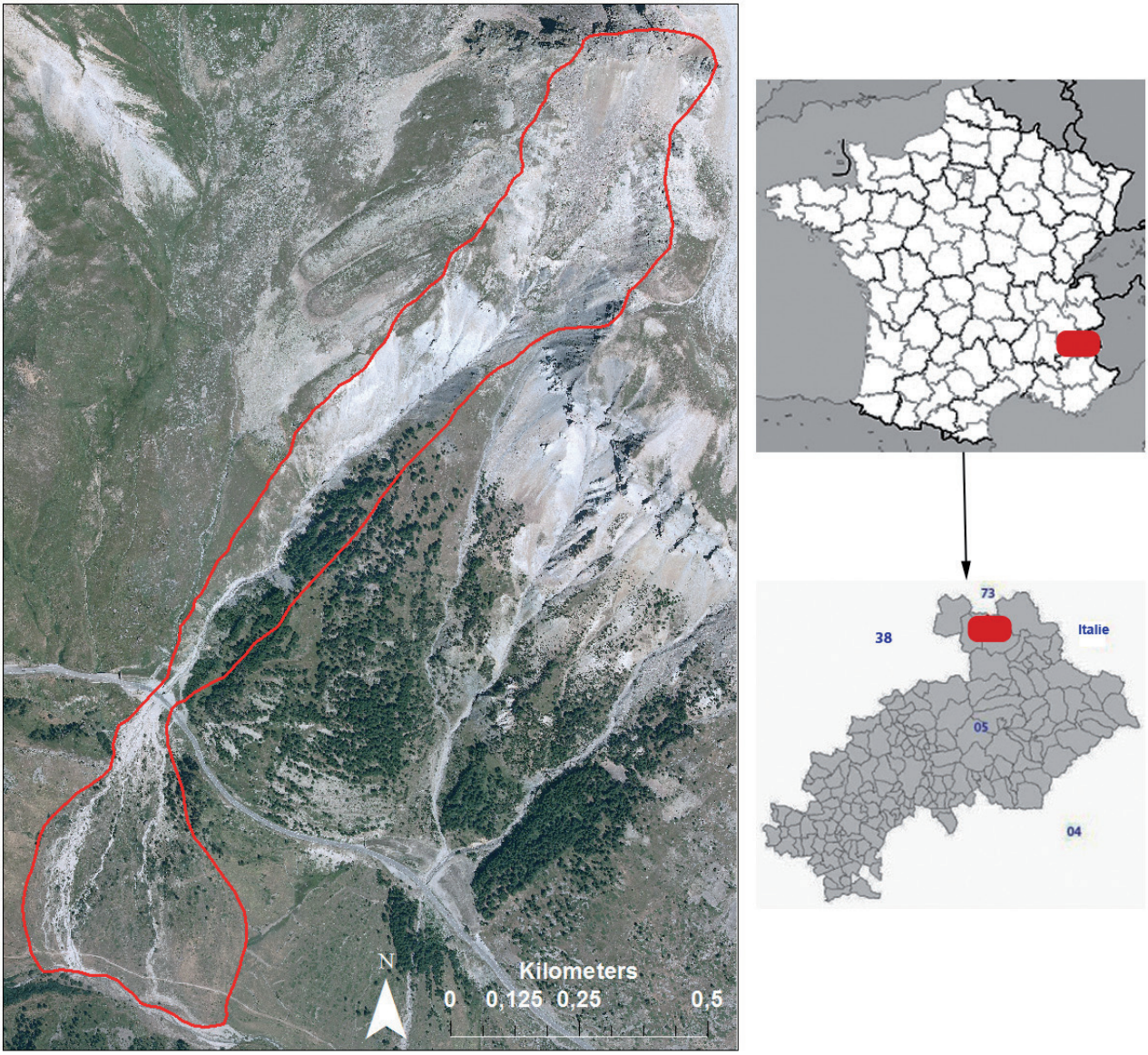


Fig. 1. — Localisation du bassin-versant du Rif Blanc.

d'intervention des différents organismes. Cet article propose également de mesurer la vulnérabilité fonctionnelle au moyen d'une analyse de l'accessibilité territoriale du Briançonnais, afin d'évaluer la performance du réseau routier en situation normale et en situation perturbée suite à cette coupure. Cette approche du potentiel d'accessibilité est appuyée par l'utilisation d'un indice de quantité de population accessible en un temps donné (Chapelon, 2006), mais également en fonction de l'offre des bassins touristiques de la vallée.

5.1 Le contexte torrentiel et structurel

Le bassin-versant du Rif Blanc (surface 0.6 km^2) se situe dans la vallée de la Guisane, au nord du département des Hautes-Alpes sur la commune de Monêtier-les-Bains (figure 1). Cette vallée du Grand Briançonnais se distingue par la présence de nombreux bassins torrentiels actifs, soit une trentaine depuis le col du Lautaret jusqu'à la ville de Briançon (Lahousse et Salvador, 2002). Les torrents situés en amont de la vallée, sur le versant adret, impactent régulièrement le réseau routier lors d'évènement torrentiels. Selon les archives RTM et du conseil général des Hautes-Alpes, six évènements de type laves torrentielles sur le Rif Blanc ont été répertoriés, avec un temps de retour inférieur à deux ans depuis 2008.

Le torrent traverse à son apex la route départementale RD 1091. Cet axe dessert l'ensemble de la vallée de la Guisane et permet de rejoindre les villes de Grenoble et de Briançon en passant par le col du Lautaret. Cet espace est marqué par la présence d'un tunnel routier adjacent à la chaussée principale. La galerie d'une longueur d'une centaine de mètres de longueur et de quatre mètres de hauteur dispose de trois fenêtres d'ouvertures le long de la chaussée.

À l'origine, le tunnel constituait la voie principale de la RD 1091, dont le but était de se prémunir des aléas torrentiels. Mais au vu des augmentations du trafic routier et du sous-dimensionnement de ce passage, des aménagements ont été entrepris dans le milieu du XXe siècle pour la construction d'une chaussée plus large à double sens en parallèle de la

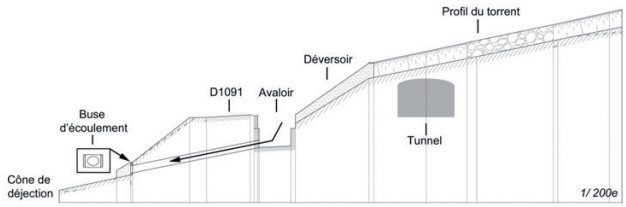


Fig. 2. — Caractéristiques de l'ouvrage de franchissement au niveau de la D 1091 pour le torrent du Rif Blanc.

galerie. Un déversoir empierré est construit en amont afin de permettre l'écoulement des eaux du torrent, dirigées ensuite vers un avaloir permettant à son tour de faire s'écouler les eaux sous la chaussée vers le cône de déjection en aval (figure 2). Cependant, ce dispositif est prévu pour un écoulement fluide et rapide, mais il est moins adapté pour un évènement torrentiel avec une matrice à forte viscosité et des blocs rocheux. Ces travaux d'aménagement ont donc abouti à une plus grande exposition du réseau routier face aux aléas de ce torrent.

5.2 La valeur stratégique du réseau

Définit en tant que Grand axe économique par le conseil général des Hautes-Alpes (CG05), la route D 1091 traversant la vallée de la Guisane située au nord du Briançonnais constitue un réseau essentiel au maillage routier départemental et interdépartemental. À ce titre, une pression permanente est exercée par les décideurs locaux et les professionnels des secteurs d'activités influents pour limiter la fermeture du col du Lautaret, dans le but de maintenir l'accessibilité de la vallée. Dans un département où 80 % du PIB provient du secteur touristique (Observatoire du tourisme des Hautes-Alpes), le Briançonnais détient à lui seul 21 % de l'offre touristique. Le dynamisme de ce secteur d'activité est donc directement lié à la viabilité de la route D 1091. À titre d'exemple, la station touristique de Serre-Chevalier située entre Monêtier-Les Bains et Briançon (12e station de ski française exposait, 1re de PACA) n'est desservie que par cette unique route. De même, la fréquentation touristique annuelle est majoritairement concentrée sur la période estivale : 47 % pour la période juillet-août contre 38 % pour la période décembre-avril en 2009.
À l'image de l'activité touristique du département, la densité du trafic routier (comptages 2011) en période estivale est nettement plus importante qu'en période hivernale puisqu'elle observe une augmentation du trafic de 74 % entre les mois de mars et août pour La Grave près du col du Lautaret et de 38,5 % pour la même période à Monêtier-les-Bains (tous sens confondus).
La vallée de la Guisane est également la plus peuplée du nord du département, ce qui implique d'importants déplacements domiciles-travail pour ses usagers quotidiens. En cas de d'interruption du trafic, les conséquences engendrées sont très influencées par la durée de la perturbation, mais également par l'heure à laquelle ont lieu les évènements.
Ce constat maximise la vulnérabilité de ce réseau ainsi que sa valeur stratégique vis-à-vis de la période d'activité du torrent du Rif Blanc (figure 3) où la probabilité de coupure par un évènement (ratio entre le nombre d'évènements recensés et le nombre de coupures occasionnées) est de près de 100 %.

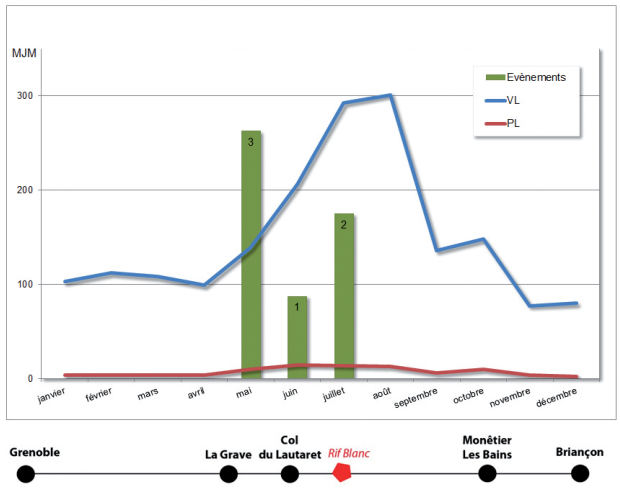


Fig. 3. — Comparaison entre la fréquentation routière moyenne journalière mensuelle des poids lourds et véhicules légers (tous sens confondus, au niveau de Monêtier-les-Bains) et la répartition mensuelle des évènements du Rif Blanc (RTM, CG05).

5.3 L'évènement du 4 juin 2012, brève description

Deux coulées ont été enregistrées lors de cet évènement, la première a été signalée par un usager vers cinq heures du matin. Une seconde coulée est constatée par les services routiers et de gendarmerie vers dix heures durant les premières opérations de déblaiement. Les précipitations relevées par les radars météorologiques à Monêtier-Les-Bains ont atteint 35mm/h la veille de l'évènement, soit un temps de retour de l'intensité pluviométrique inférieur à 10ans.
Au total plus de 95 mètres linaires de route sont impactés. Les dommages physiques constatés sont une obstruction totale de la chaussée et du tunnel adjacent ainsi qu'une destruction partielle de la plate-forme (figure 4). Le trafic est interrompu pour une durée de huit à neuf heures, puis il est partiellement rétablit en fin de journée au moyen d'un système d'alternat via la galerie dégagée. La perturbation routière s'est prolongée durant cinq jours avant le rétablissement complet des voies de communication. Le CG05 a estimé le coût des dommages structurels à près de 25 000 euros.

5.4 De l'aléa à la vulnérabilité structurelle

La première étape du retour d'expérience a consisté à caractériser cet évènement sous la forme d'un scénario d'écoulement de la lave torrentielle, c'est-à-dire reconstruire le mode de propagation de la coulée en termes de distance d'arrêt, de hauteurs de dépôts et leur étalement. L'objectif visant à estimer au mieux les volumes mobilisés requis pour impacter le réseau routier afin de déterminer l'intensité de l'évènement.
De ce postulat, la modélisation numérique de l'écoulement était la méthode d'analyse la plus appropriée, combinée avec des observations de terrain pré et post évènement.

Fig. 4. — Photographies des dommages physiques sur le réseau routier après l'évènement du 4 juin 2012 (CG05).

5.4.1 Cartographie des volumes requis pour impacter le réseau

De nombreuses techniques existent pour l'analyse de l'aléa mouvement de versant, dans Hürlimann *et al.* (2008) une revue de ces outils a été réalisée, ce qui a permis de choisir la méthode la plus objective pour cette étude. Aussi, le choix s'est porté sur une approche numérique 2D qui remplit les conditions nécessaires pour la cartographie des risques. L'avantage d'une telle approche pour ce travail est de fournir une information spatiale locale directe comprenant les distances d'arrêt nécessaires pour atteindre et les volumes nécessaire pour impacter du réseau routier.

Parmi les codes numériques 2D à disposition, le choix s'est porté sur MassMov2D (Begueria *et al.*, 2009), conçu pour simuler les phases de propagation et d'étalement des mouvements gravitationnels tels que les laves torrentielles, les lahars et les glissements de terrain. Disponible en Open Source, il présentait l'avantage d'une prise en main facile grâce à l'intégration de logiciels SIG et du langage PCRaster servant à exécuter le modèle. Son utilisation est relativement flexible en raison de la variabilité des différentes conditions initiales et les conditions aux limites qui peuvent y être configurées (Mathieu, 2010).

Ce modèle considère la masse glissée comme un fluide monophasique dont le comportement est contrôlé par la rhéologie. Il est basé sur deux équations constitutives (conservation de la masse et de la vitesse) auxquelles des équations numériques secondaires permettent de simuler différentes rhéologies (Begueria *et al.*, 2009b), ici la loi de Coulomb-Viscous ajustée.

Le modèle requiert également différentes cartes d'entrée tels que: l'épaisseur initiale de la masse à faire glisser, la direction du flux et les limites du domaine de simulation. Toutes ces conditions sont représentées sur un MNT à haute résolution du bassin-versant.

Grâce à la mise à disposition par le CG05 d'une vidéo de la seconde coulée, il a été possible d'estimer le débit de pointe de cette coulée. L'opération consistait à calculer le temps de parcours d'un bloc entre deux sections du déversoir relié à une estimation de la section mouillée. À partir des valeurs de débit et selon la formule de Rickenmann (Qp = 0,1 V 0,83 avec Qp : débit de pointe et V : volumes), nous avons pu estimer les volumes mobilisés à incorporer dans le modèle. Les volumes mobilisés ont ainsi pu être estimés à 11 000 m^3, mais il est nécessaire de rappeler qu'il s'agit de la modélisation de la seconde coulée, elle ne prend donc pas en compte l'intégralité des volumes mobilisés par l'évènement mais permet de disposer d'une fourchette de valeurs réalistes de l'évènement. À partir de cette information, plusieurs scénarii sont modélisés, la fourchette de valeurs entre 10 000 m^3 et 15 000 m^3 est retenue pour cet évènement au regard des hauteurs de dépôts observées sur le terrain, il s'agit des volumes minimum et maximum requis pour atteindre et impacter le réseau routier (expliquer que c'est selon les observations de terrain).

Cependant, un volume de 11 000 m^3 semble être le plus scénario le plus fidèle à la réalité puisque les résultats cartographiques sont très proches des hauteurs de dépôts relevées sur le terrain quelques jours après l'évènement, bien que le modèle présente une tendance à retenir une partie des matériaux au-dessus de l'ouvrage (figure 5).

L'extension spatiale des dépôts sur la route en mètres linéaires est globalement satisfaisante, excepté en rive droite du torrent, pour lequel l'étendue des matériaux n'atteint pas les limites constatées sur le terrain. Précisons que le relevé des hauteurs de dépôts correspond aux traces observées sur la chaussée, les parois de l'ouvrage, et les berges du torrent, plus fidèles à la réalité de l'évènement et non aux épaisseurs de matériaux remaniées les entreprises de déblaiement, encore présents sur le site lors des observations de terrain.

5.4.2 Les facteurs aggravants de vulnérabilité

Outre le processus naturel en lui-même, la configuration des ouvrages d'écoulement constitue un facteur technique de vulnérabilité aggravant vis-à-vis d'un endommagement structurel du réseau. En effet, au regard des sorties du modèle, la buse d'évacuation des eaux sous la route apparait clairement sous-dimensionnée pour un écoulement torrentiel de cette intensité. De même, l'extension spatiale des dépôts modélisés atteignent les flancs du tunnel routier.

Au regard de l'ensemble des évènements recensés dont celui-ci, dans la moitié des cas la coulée a envahi la galerie du tunnel routier, le rendant impraticable. Cette obstruction par les matériaux est facilitée par la présence des fenêtres d'ouverture le long de la chaussée principale. La coupure du réseau est donc totale contrairement aux objectifs prévus

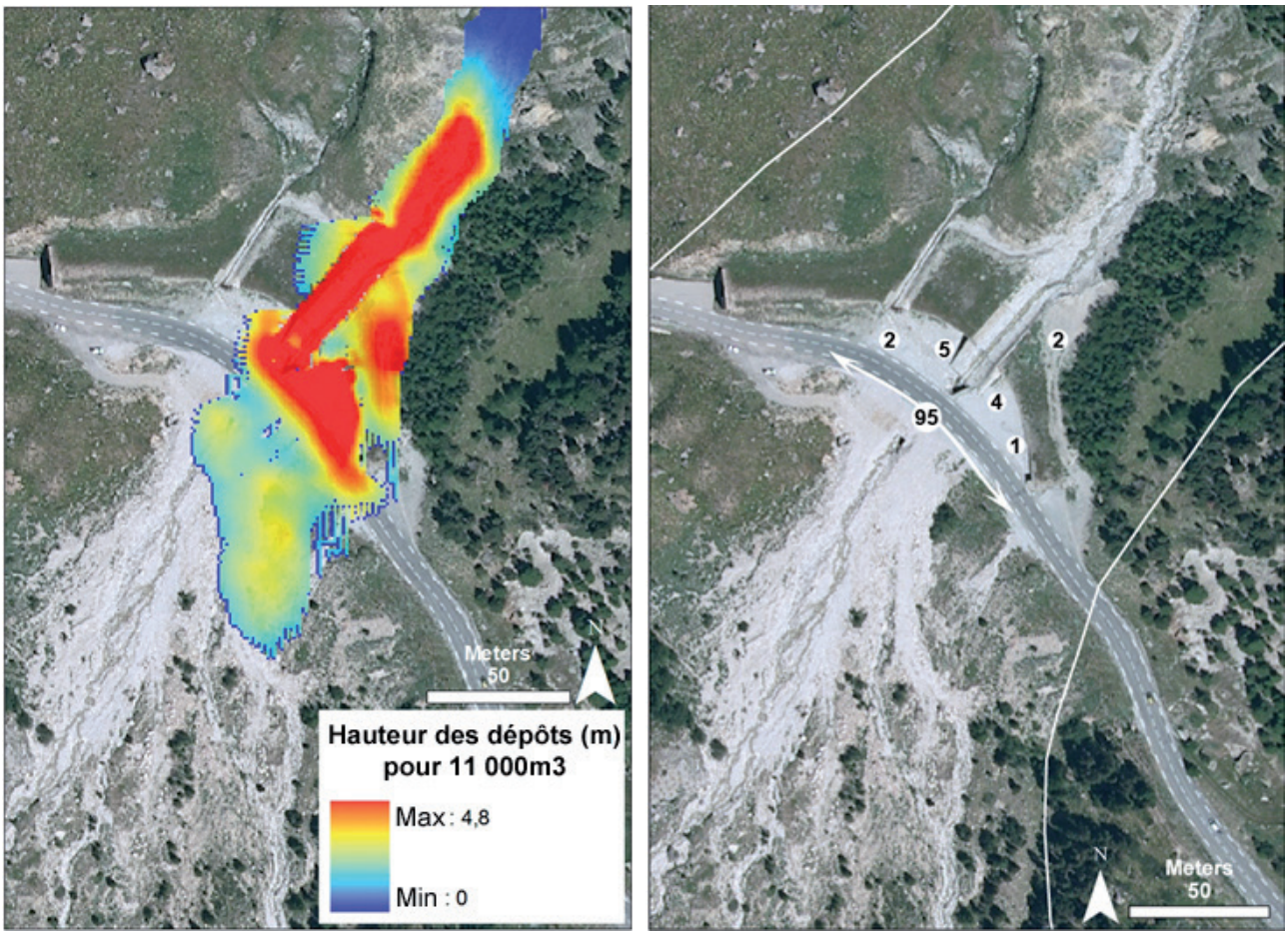


Fig. 5. — Comparaison entre les hauteurs des dépôts en sortie du modèle (2e coulée) pour un volume de 11 000 m³ et les hauteurs de dépôts (en mètres) relevées sur le terrain après l'évènement.

initialement pour cet ouvrage, c'est-à-dire utiliser la galerie comme moyen de substitution en cas d'obstruction de la RD 1091. Pour cette raison, les services du CG05 déblaient en priorité la galerie afin de résorber au plus vite l'impact causé l'interruption du trafic sur le réseau.
Ce type d'évènement est donc suffisant pour endommager la chaussée et pour obstruer le tunnel de déviation routière entrainant une coupure totale du réseau. Un évènement d'intensité moyenne suffit à paralyser totalement la circulation routière.

5.5 Reconstitution du processus décisionnel, organisationnel et d'intervention des gestionnaires du réseau

5.5.1 Identification et rôles des acteurs de la gestion de crise

Suite à l'évènement, un travail d'enquête a été effectué auprès des gestionnaires de réseau (conseil général des Hautes-Alpes, agence territoriale Nord) et des services territoriaux (mairie, gendarmerie, sapeurs-pompiers, médias) dans le but d'identifier les procédures d'intervention et la prise de décision durant la gestion de crise dans le cadre du retour d'expérience. Sous la forme d'un entretien semi-directif, les questions portaient essentiellement sur :

1. L'alerte des différents services et l'identification des acteurs.
2. Leurs rôles respectifs en termes de prises de décision et d'intervention.
3. Les moyens mobilisés sur le terrain pour la gestion de la circulation et du déblaiement.
4. Les solutions de substitution proposées telle que les déviations.
5. Les canaux d'information mis à disposition du grand public et des professionnels vis-à-vis des perturbations routières.
6. Les coopérations existantes ou en projet pour la gestion de la circulation entre les différents départements et les pays limitrophes.
7. Le mode d'archivage et de collecte des données sur l'évènement.

À l'écoute des différents intervenants, nous avons pu identifier l'ensemble des acteurs, leurs rôles respectifs et ainsi reconstruire l'enchainement du processus décisionnel et d'intervention (figure 6). Par extrapolation, ce schéma représente synthétiquement l'organisation de la gestion de crise en cas de survenance d'un évènement impactant le maillage routier départemental sur le territoire du Pays du Grand Briançonnais. Il comprend également la réaction post-évènementielle immédiate pour un retour rapide à une situation normale, élément déterminant dans la mesure de la capacité de résilience.

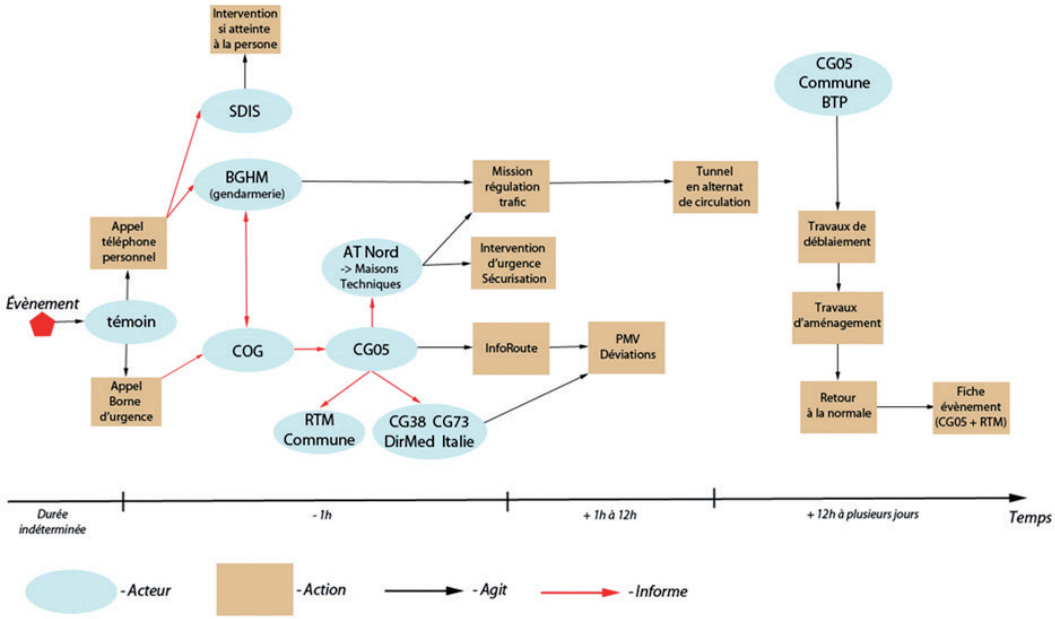


Fig. 6. — Processus d'intervention et de gestion de crise pour un évènement lave torrentielle impactant le réseau routier départemental selon les acteurs décisionnels.

L'alerte sur le terrain est le plus souvent donnée par un témoin (un usager par exemple), soit depuis un téléphone portable, soit depuis une borne d'appel d'urgence. L'appel est orienté vers les numéros d'appel d'urgence publique, c'est-à-dire le Service départemental d'incendie et de secours (SDIS) ou vers le centre opérationnel de gendarmerie. Ces derniers relayent l'information vers les acteurs concernés. La gendarmerie a alors pour mission la régularisation et la sécurité du trafic routier. En parallèle, le conseil général des Hautes-Alpes, responsable du réseau routier départemental est directement intégré dans le processus décisionnel. Organe central de la gestion de crise, son rôle est multiple :

1. Il informe et délègue la procédure d'intervention à l'agence territoriale Nord (zone du Briançonnais). Cet organe territorial représente l'antenne locale en appui des services du conseil général et coordonne les Maisons techniques sur le terrain. Les Maisons techniques ont pour compétence la surveillance régulière du réseau grâce à des équipes de patrouilles mobiles. Elles sont les premières informées en cas de dysfonctionnement du réseau routier, mais également les premières à intervenir sur le site pour sécuriser et viabiliser la route endommagée. Elles interviennent également dans la mise en place de la régulation de la circulation routière aux côtés de la gendarmerie. En interne, tous ces intervenants sont en étroite relation de manière permanente. Le déblaiement des voies est également effectué par des entreprises de BTP dépêchées sur place par un système d'appel d'offre par le CG05.
2. Le CG05 met à disposition auprès du public un service d'information et de diffusion en temps réel de la situation routière *via* le site web *InfoRoute*. Disponible sous plusieurs supports de communication pour toucher le maximum d'usagers, ce service intègre différents outils comme les caméras routières fixes et les panneaux à messages variables. Outre un rôle informatif, ce dispositif a pour but la prévention et l'anticipation auprès des usagers du réseau routier. Dans le cas du Rif Blanc l'information des PMV s'est affichée depuis les villes de Grenoble et de Briançon. Ce service de signalisation automatique existe également en correspondance avec l'Italie, sous le nom d'Infomobile et disponible dans la langue des deux pays.
3. Dans le même temps, le CG05 contacte ses homologues limitrophes de l'Isère et de la Savoie, et la DirMed (la direction interdépartementale des routes Méditerranée) pour la gestion interdépartementale du réseau *via* des protocoles de collaboration préétablis. Bien que la communication entre ces organismes soit effective quel que soit l'importance de l'évènement, cette démarche s'applique en particulier lors de la mise en place des itinéraires de contournement en cas de coupure du réseau principal.
4. Le service de restauration des terrains de montagne, branche de l'ONF est alerté au cours de l'évènement bien qu'il intervienne plus généralement sur des phases de pré et post-évènement. Informés en interne, les agents territoriaux peuvent se rendre sur les lieux pour étudier l'activité torrentielle et préparer d'éventuels travaux d'ouvrage. Les observations techniques sont collectées en vue de l'archivage d'une fiche descriptive synthétique de l'évènement torrentiel.

Cet organigramme met en avant le rôle central et prépondérant du conseil général, ses services interviennent aussi bien pour la gestion de crise, que la gérance du réseau routier départemental et la gouvernance du territoire associé à ce réseau.

5.5.2 Comparaison des itinéraires de contournement possibles en cas d'une coupure de réseau liée au torrent du Rif Blanc

L'axe routier de référence pour mesurer l'accessibilité territoriale est la liaison régionale Grenoble-Briançon, puisqu'il s'agit des limites administratives stratégiques définies par

le CG05, et à partir desquelles sont indiquées les déviations. En cas de perturbations du trafic sur la RD 1091 cet axe, seulement trois itinéraires de substitution sont possibles dans le maillage routier alpin.

– It.1. Itinéraire classique *via* la RD 1091.
– It.2. Itinéraire de substitution *via* la ville de Gap et Argentière-la-Bessée par la RN 85 et la RN 94.
– It.3. Itinéraire de substitution *via* Gap, l'autoroute A 51, les D 1075 et D 994 puis la RN 94.
– It.4. Itinéraire de substitution par la Savoie *via* les autoroutes A 41 et A 43 puis par l'Italie *via* le tunnel de Fréjus.

Pour la catégorie des véhicules légers, la comparaison des itinéraires de substitution par rapport à l'axe principal pour relier Grenoble à Briançon met en avant l'itinéraire 2 comme le plus intéressant en termes de distance kilométrique, mais peu de différences sont observées avec l'itinéraire 3 (figure 7). En revanche, le plus attractif en termes de distance-temps est l'itinéraire 4, ce constat s'explique par une circulation majoritairement effectuée sur voies rapides. Les surcoûts tarifaire (carburant et péage compris) occasionnés par les déviations sont en revanche très hétéroclites, très marqué sur l'itinéraire 4 par le passage au tunnel du Fréjus.
Mais il est important de noter que pour chaque axe, la coupure du réseau principal par le Rif Blanc implique un rallongement du temps de trajet de plus d'une heure avec un détour de plus de 70 km pour les usagers.
Dans le cadre de ses conventions avec le conseil général de l'Isère et la DirMed, le CG05 incite les automobilistes et les entreprises de transport à emprunter les itinéraires de contournement passant prioritairement par Gap, en cas de coupure du réseau sur l'axe Grenoble-Briançon au niveau de la RD 1091. Cette déviation est valable aussi bien pour un évènement naturel que pour des travaux sur les voies. L'itinéraire 2 est proposé en premier lieu, mais en cas de réseau dégradé sur ce dernier les automobilistes sont orientés vers l'itinéraire 3. Vraisemblablement, ces choix sont fonction de la durée de la perturbation, de sa nature et du volume de trafic en circulation capable d'être supporté par ces parcours. En revanche, le CG05 ne propose pas aux usagers de passer par l'itinéraire 4 en Savoie. Cela peut s'expliquer par des raisons administratives mais aussi bien pour des raisons économiques en raison du surcoût tarifaire supporté par les usagers. Mais il semble également logique que le CG05 tienne à conserver le flux routier sur son territoire en vue de maintenir l'attractivité économique qui en découle et limiter ainsi un éventuel manque à gagner déjà lésé par la perturbation du réseau principal.

5.6 Scénario reproductif de dégradation de l'accessibilité routière suite à l'évènement du Rif Blanc

La dernière étape de notre étude vise à mesurer la « valeur territoriale » (Leone, 2008) du réseau routier et les conséquences d'une rupture de ce réseau dans la région du Grand Briançonnais, cette analyse est effectuée à partir du modèle RouteFinder.
RouteFinder s'appuie sur l'algorithme de Dijkstra (1959) pour estimer l'accessibilité territoriale depuis un point de départ

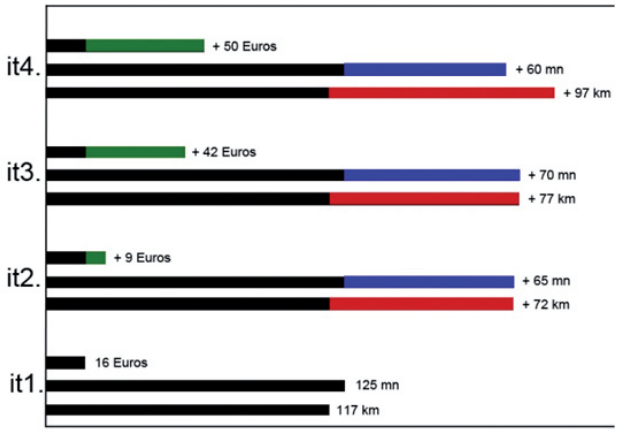


Fig. 7. — Comparaison des itinéraires reliant Grenoble à Briançon en distance-temps, distance kilométrique et le coût associé.

du réseau (Grenoble) vers un point d'arrivée (Briançon). Le réseau est alors représenté par un graphe, symbolisé par des arcs pour les segments de route et des nœuds pour en désigner les intersections. Ce modèle opère directement dans un environnement SIG à partir des données attributaires vecteurs d'objets linéaires. La base de données utilisée ici est la BD TOPO fournie par l'IGN (Institut géographique national). Le graphe prend en considération la hiérarchie et la structure des différents axes qui composent le réseau routier (Appert et Chapelon, 2006). Les caractéristiques du réseau retenues sont la longueur et la largeur de la route, la classification administrative et le sens de circulation. Ensuite, la vocation des tronçons routiers permet d'y associer des classes de vitesse, elles-mêmes pondérées en fonction de la pente, de la sinuosité et du type de véhicule configuré pour la modélisation. Enfin, l'accessibilité est mesurée suivant la logique du plus court chemin en termes de temps, divisés en classe de trente minutes, puisque le meilleur temps de parcours reflète le fonctionnement optimal de la chaîne de transport dans un intervalle de temps donné (Chapelon, 2006). À noter que toutes les voies de déviation ont été prises en compte dans la modélisation, y compris *via* l'Italie.

5.6.1 Cartographie de la vulnérabilité par l'indice de population accessible

Aux résultats des scenarii d'accessibilité, nous avons agrégé dans le premier scénario les données de population résidente par maille de 200 m^2 (source INSEE) pour chaque commune du Grand Briançonnais, afin de quantifier le nombre de personnes potentiellement impacté par une perturbation du réseau routier (figure 8). Cette information est un marqueur supplémentaire pour la mesure de l'accessibilité.
Bien que l'accès par l'Italie compense en partie les retards imputés aux déviations, l'extension spatiale des conséquences des perturbations est importante et le rallongement du temps de trajet reste conforme aux observations précédentes. Au total dans le sens Grenoble–Briançon, 16 426 personnes sont potentiellement impactées par un retard de 30 à 60 minutes. Elles sont principalement localisées au niveau des nœuds urbains, sur les communes de Briançon, Puy-Saint-Pierre, Val-Des-Prés et Montgenèvre. Les impacts sont plus diffus pour la classe des retards de 60 à 90 minutes, bien que la portion de territoire concernée est plus importante en

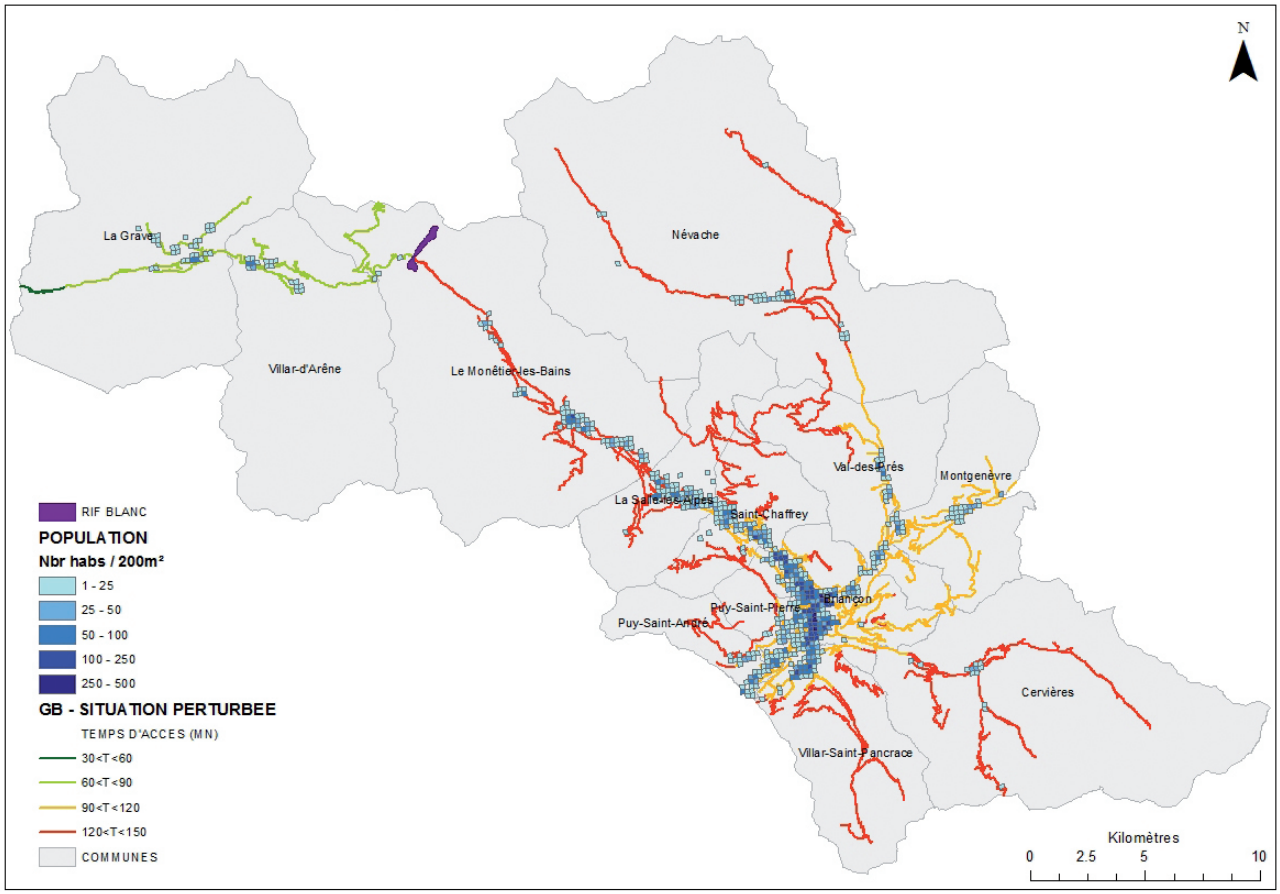


Fig. 8. — Population potentiellement impactée par les pertes d'accessibilité du territoire au Grand Briançonnais dans le sens Grenoble-Briançon.

particulier dans les vallées dont le réseau est peu connexe, où près de 2 527 habitants sont potentiellement impactés.

5.6.2 Cartographie de la vulnérabilité par l'indice de l'offre touristique disponible

De la même manière, pour le second scénario d'accessibilité, nous avons attribué sur les résultats cartographiques des temps de parcours, les données du secteur touristique traduites par les lits disponibles (en hôtel et chambre d'hôtes) par kilomètre et par commune (source INSEE) (figure 9).
Il apparaît nettement que les communes avec la plus grande capacité d'accueil touristique sont celles les moins accessibles, en particulier la commune de Monêtier-les-Bains et de La Salle-les-Alpes. La mise en évidence des difficultés d'accès dans le Grand Briançonnais pénalise l'économie touristique desservie par ce réseau puisque une forte proportion de clients étrangers en provenance d'Italie ou français de l'hexagone empruntent ces axes, en particulier en période estivale. À titre d'exemple, la station de vacances de Serre Chevalier a rapporté près de 30 % du chiffre d'affaire touristique annuel du département des Hautes-Alpes en 2010 (CG05, 2012). L'effet de la perturbation du réseau au niveau du Rif Blanc est donc directement ressenti sur la vallée de la Guisane. Ce constat est également valable pour les communes de Briançon et de Montgenèvre bien que le rallongement du temps de trajet soit moins conséquent. À noter que la vallée de la Clarée au niveau de la commune de Névache comptabilise peu de lits. Très fréquentée en été, l'offre d'accueil se fait majoritairement sous la forme de campings, non comptabilisés dans cette étude, mais les pertes d'accessibilités y sont toutes aussi importantes.

Discussion et conclusion

Ce retour d'expérience sur la lave torrentielle du 4 juin 2012 a permis de mettre en évidence la vulnérabilité du réseau routier vis-à-vis d'un évènement de faible intensité. Dans un document du CG05 visant à l'amélioration de l'ouvrage d'écoulement en place sur ce torrent, il apparait que le coût des travaux d'aménagement est estimé à 10 000 euros. Rappelons que le coût total des dégâts physiques était de 25 000 euros. Ainsi, au regard du rapport coût-bénéfices, il est donc plus intéressant de revoir le dimensionnement des ouvrages de protection et d'évacuation des eaux torrentielles plutôt qu'opter pour une réparation systématique des dégâts. Dans l'ensemble, les gestionnaires de réseau font preuve d'une bonne capacité de réponse aux modalités d'alerte et d'organisation des services durant la gestion de crise, mais également en ce qui concerne les impacts directs et l'organisation du trafic sur le territoire. Cette organisation s'articule autour de plans de gestion de crise qui permettent d'anticiper la crise et les actions à mener.
Cependant, les services publics doivent faire face à des mutations importantes ces dernières années comme la privatisation, le transfert de compétence et de propriété des infrastructures,

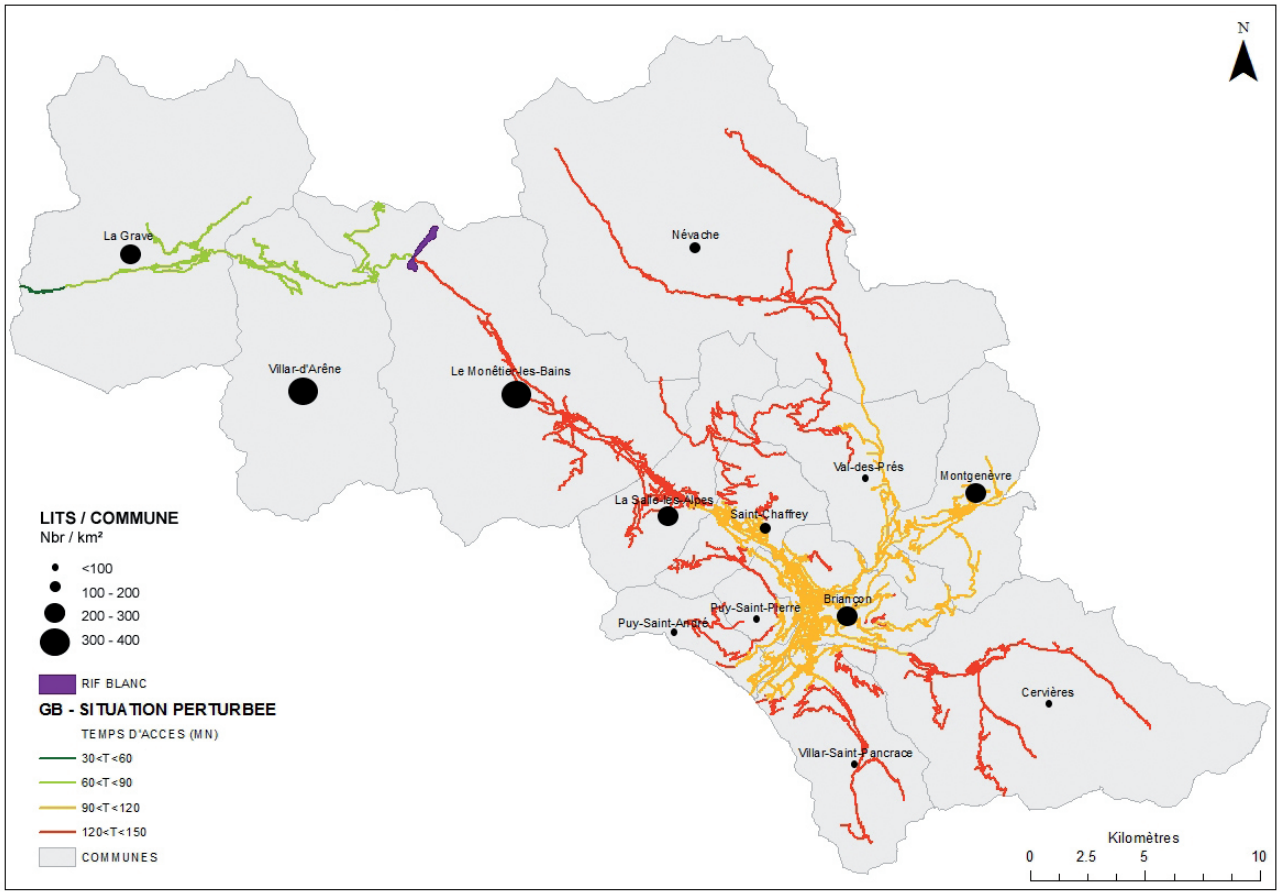


Fig. 9. — Nombre de lits (offre touristique par commune) potentiellement impactés par km linéaire par les pertes d'accessibilité du territoire du Grand Briançonnais dans le sens Grenoble-Briançon.

la montée de la concurrence, une confidentialité accrue entre les services territoriaux, etc. Ces observations jouent sur les capacités individuelles et collectives à maîtriser les risques (EP Loire, 2006), dans un contexte où la réactivité face à un évènement doit être immédiate et vite résorbée pour maintenir l'attractivité de leur territoire.

Aussi malgré une volonté de développement des échanges et de partenariat du CG05 envers les conseils généraux des départements limitrophes et surtout avec l'Italie, la problématique d'une gestion commune à l'échelle du massif alpin pose encore des questions d'organisation et de communication. Les échanges restent encore très limités entre les gestionnaires des routes départementales et des routes nationales, *i.e.* la gestion d'état DirMed. À l'heure actuelle, il semblerait que cette communication repose d'avantage sur un réseau informel et sporadique des services techniques grâce à l'ancienneté et aux échanges entre les agents avant la refonte des services administratifs. Il semble que les conflits d'intérêts à l'échelle des gestionnaires empêchent la mise en place de réels projets coopératifs. La crainte présomptive d'ingérence d'un service sur un autre engage les acteurs à peu communiquer leurs informations.

Enfin, il existe de nombreux conflits entre les services d'État et les professionnels du tourisme, certaines entreprises dépendantes du réseau routier et quelques communes en ce qui concerne la qualité et la flexibilité du service routier. Pour ces derniers, communiquer sur les risques naturels auprès du public peut être sujet à polémique pour l'image du territoire alpin. Pourtant, il semble clair que les perturbations fonctionnelles doivent être prises en considération au-delà de la zone endommagée, puisqu'elles engagent l'activité touristique et la population résidente.

En conséquence, certains aspects de la gestion du risque nécessitent d'être développés :

1. Consolider sur le long terme cette volonté d'échanges d'informations/procédures d'interventions planifiées entre les différents gestionnaires de réseaux.
2. Tendre vers une plus grande diffusion entre les gestionnaires et entre les différents services sur la bonne pratique de diagnostics territoriaux du risque-réseaux, éventuellement sous la forme d'un cahier des charges et de retours d'expérience post-évènement mutualisés.
3. Mettre en avant la sensibilisation et le développement de la mémoire des risques auprès du public, en intégrant les professionnels du tourisme dans la boucle pour une meilleure prise de conscience du risque.

Bibliographie

Appert M, Chapelon L., « La vulnérabilité des réseaux routiers urbains face aux risques d'altération », in *La mise en carte des risques naturels. Géorisque*, collection du laboratoire GESTER, université Montpellier 3, 2, 2006, p. 47-58.

Begueria S., Van Hees M. J., Geertsema M., « Comparaison of three landslides runout models on the Turnoff Creek rock avalanche, British Columbia ». *Landslide Processes: From geomorphologic mapping to dynamic modeling*, CERG, UU& US-Strasbourg, 2009.

Begueria S., Van Asch T. W. J., Malet J. P., Gröndahl S., « A GIS based numerical model for simulating the kinematics of mud and debris flows over complex terrain », *Natural and Hazards System Sciences*, 9, 2009, p. 1897-1909.

Bono F., Gutiérrez E., *A network-based analysis of the impact of structural damage on urban accessibility following a disaster : the case of the seismically damaged*, 2011.

Chapelon L., « Accessibility as a marker of diparities of influence among port cities in Europe », *Cybergeo : European Journal of Geography. Systems, modelization, geostatistics*, 2006, 25.

Conseil général des Hautes-Alpes : http://www.cg05.fr/ 2012.

Dijkstra E.W., « A note on two problems in connexion with graphs », *Numerische Mathematik* 1,1959, p. 269-271.

Doberstein B., « Post-disaster assessment of hazard mitigation for small and medium-magnitude debris flow disasters in Bali, Indonesia and Jimani, Dominican Republic », *Natural Hazards*, 50, 2009, pp. 361-377.

Établissement public Loire, *Étude préalable à la réduction de la vulnérabilité des réseaux liée aux inondations en Loire moyenne*, 2006, 180 p.

Ge Y., Gu Y., Deng W., « Evaluating china's national post-disaster plans : The 2008 Wenchuan Earthquake's recovery and reconstruction planning », *International Journal of Disaster Risk Science*, 1, 2010, p. 17-27.

Hürlimann M., Rickenmann D., Medina V., Baterman A., « Evaluation of approaches to calculate debris-flows parameters for hazard assessment », *Engineering Geology*, 11, 2008, p. 152-163.

Lahousse P., Salvador P. G., « Torrential hazard assessment in the Verdarel catchment area (Hautes-Alpes, France) », *Géomorphologie : relief, processus, environnement*. 8, 2002, p. 93-103.

Leone F., *Caractérisation des vulnérabilités aux catastrophes « naturelles » : contribution à une évaluation géographique multirisque (mouvements de terrain, séismes, tsunamis, éruptions volcaniques, cyclones)*, Éd. Édilivre universitaire Collection, Paris, 2008, 336 p.

Mathieu A., *Modélisation numérique bidimensionnelle de l'aléa « coulée de boue » sur substrat argileux : application au glissement-coulée de La Valette (Alpes de Haute-Provence)*, Mémoire de Master, 2010, 56 p.

Observatoire du Tourisme des Hautes-Alpes, http://observatoire.hautes-alpes.net.

Oramas D., Dorta G., Toyos C., Oppenheimer M., Pareschi T., Sulpizio R., Zanchetta G., « Empirical modelling of the May 1998 small debris flows in Sarno (Italy) using LAHARZ », *Natural Hazards*, 40, 2007, p. 481-496.

Perrin J.-L., Janeau J.-L., Podwojewski P., « Deslizamientos de tierra, inundaciones y flujos de lodo en Esmeraldas : diagnostico general de la situacion actual de la ciudad (mision de expertos) », Rapport d'expertise, Quito : ORSTOM, 1998, 20 p.

Remaîte A., Maquaire O., Pierre S., « Study of a debris flow event in the Faucon stream (Barcelonnette basin, Alpes-de-Haute-Provence). Determination of triggering areas and contribution areas », *Géomorphologie : relief, processus, environnement*. 8, 2002, p. 71-84.

Sepúlveda S. A., Rebolledo S., Vargas G., « Recent catastrophic debris flows in Chile : Geological hazard, climatic relationships and human response », *Quaternary International*, 158, 2006, p. 83-85.

6 Le risque hydrogéologique en zone urbaine : cas de la ville d'Oran (Algérie)

Hamidi Mansour, Atalah Chenafi & Mohamed Kennane
Laboratoire Géoressources, Environnement et Risques Naturels, département des Sciences de la Terre — Campus Belgaïd, Université d'Oran 2. El M'naouer BP 1524 — Oran, Algérie
l_mansou_l@yahoo.fr

Résumé. — La communauté urbaine et la ville d'Oran, connue pour des problèmes d'instabilité de terrain, accentués par une urbanisation anarchique, bâtie sur des assises d'oueds comblés, se trouvent confrontées à de nombreuses instabilités de terrain ayant des impacts certains sur l'habitat urbain. Il y a lieu de signaler également un phénomène de dissolution affectant d'une part les calcaires gréseux, développant une structure karstique et d'autre part des lentilles de calcaires gypseux, générant de véritables cavités souterraines, qui sous le poids du bâti existant aura un impact conséquent sur la stabilité de certains immeubles du centre-ville.
Le système aquifère du plateau d'Oran constitue un ensemble hydrogéologique complexe, caractérisé par un substratum imperméable ondulé et par de fréquents changements latéraux de faciès. Ainsi, vers le nord la nappe est caractérisée par un système de trop plein le long de la frange maritime alors que vers le Sud c'est le système de drainage qui alimente la nappe alluviale de la Daïait Morcely. Les écoulements superficiels et les infiltrations peuvent provoquer des risques potentiels d'effondrement, particulièrement ceux du centre-ville d'Oran. Il est fondamentalement important de signaler qu'une bonne partie des constructions sont érigées sur une formation de remblai. Ces remblais étant instables dans le temps, vont provoquer au sein des constructions une fissuration importante des murs et des affaissements du sol, résultant le plus souvent de l'imbibition de ce remblai (très perméable) par les venues d'eau d'infiltration, suralimentées continuellement par un réseau d'assainissement souvent défectueux.
Mots clés. — affaissement, effondrement, instabilité de terrain, structure karstique.

Title. — *Hydrogeological Urban Risk : The Case of Oran City (Algeria)*
Abstract. — *The urban community and the city of Oran known by ground instability problems, exacerbed by uncontrolled urbanization and fragility of the urban site are facing important ground instability with serious impacts on urban settlements. The instabilities field having a definite impact. Another concern is also a phenomenon of dissolution affecting on one hand the sandy limestone, developing a karst structure and on the other hand lenses of limestone gypsum, generating real underground cavities, which under the weight of existing buildings will have an impact on the stability of some of them particularly those of the city centre.*
The aquifer system of Oran plateau presents a whole hydrological complex characterized by a corrugated impervious substratum and frequent lateral changes in facies. Thus, towards the north the water is characterized by an overflow system along the maritime fringe while to the south is the leakance system that feeds the alluvial water table of Daïait Morcely. Surface runoff and infiltration may cause potential risk of collapse, especially in the direction of the city centre of Oran. It is fundamentally important to note that many of the buildings stand on a formation of embankment. These embankments being unstable over time, will result in major cracking walls of the constructions and subsidence of soil, most often resulting from the imbibition of the backfill (highly permeable) by inflows of water infiltration, continuously overfeeded waste water networks often not up to standard.
Keywords. — *Subsidence, Collapse, Instability Field, Structure Karst Aquifer.*

Introduction

Les risques géologiques en zone urbaine constituent pour les collectivités locales de la ville d'Oran une préoccupation majeure. C'est dans ce cadre que l'étude entamée a permis de comprendre les phénomènes liés à la déformation du sol, du bâti et des infrastructures de base. L'investigation hydrogéologique en zone urbaine s'est avérée très délicate en raison des difficultés d'accès aux informations hydrodynamiques et du champ d'observation très réduit des affleurements géologiques. C'est ainsi que la mise en place de ces informations géologiques, hydrogéologiques et géomorphologiques couplées aux données urbaines a permis de faire ressortir une analyse spatiale pour l'aménagement, la gestion du risque géologique et la prise de décision.

6.1 Considérations générales

6.1.1 Localisation de la zone d'étude

Le littoral oranais constitue un chapelet de petits massifs schisteux secondaires, séparés par des plateaux Néogènes et Quaternaires. Il désigne l'unité structurale comprise entre les marais d'El Macta à l'est, les dépressions de la grande sebkha d'Oran et les salines d'Arzew au sud, la Méditerranée

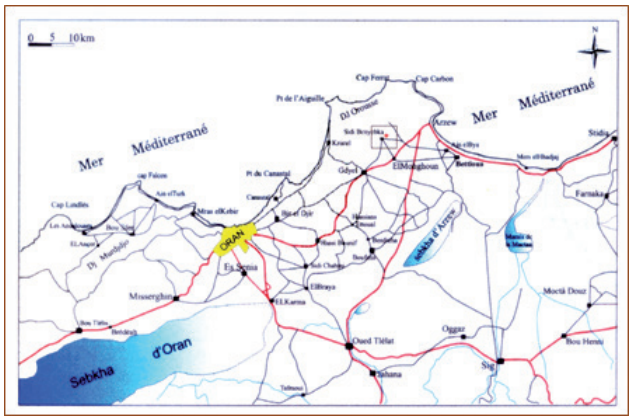


Fig. 1. — Carte de localisation de la zone d'étude.

au nord et l'ouest (Gourinard, 1958 : 28). Il s'allonge sur une centaine de kilomètres et présente une largeur moyenne de 20 à 25 kilomètres. Le secteur d'étude représenté par le plateau d'Oran se situe entre les massifs littoraux du Murdjadjo à l'ouest (Misserghin), le Djebel Khar à l'est (Bir El Djir) tout en s'ouvrant sur la Méditerranée au Nord (figure 1).

6.1.2 Géomorphologie de la région d'Oran

Le plateau d'Oran fait partie de l'ensemble appelé « littoral oranais » constitué de plateaux encadrés de horsts. Cet ensemble est situé dans le prolongement du bassin du Bas Chélif (Belkebir, 1986 : 42). Sur le flanc sud du Djebel Murdjadjo, les oueds limités en amont par la ligne de partage des eaux superficielles constituent des entailles plus ou moins profondes dans les calcaires du Miocène. Ils présentent généralement un écoulement temporaire au régime très irrégulier, conditionné le plus souvent par la fréquence des précipitations (figure 2).

6.2 Contexte hydrogéologique

6.2.1 Assise géologique de la ville d'Oran

Série du ravin blanc

La série complète est reconstituée au niveau de la falaise du ravin blanc (Mansour, 1989 : 74) où on distingue une formation gréso-calcaire attribuée au Calabrien, souvent fissurée,

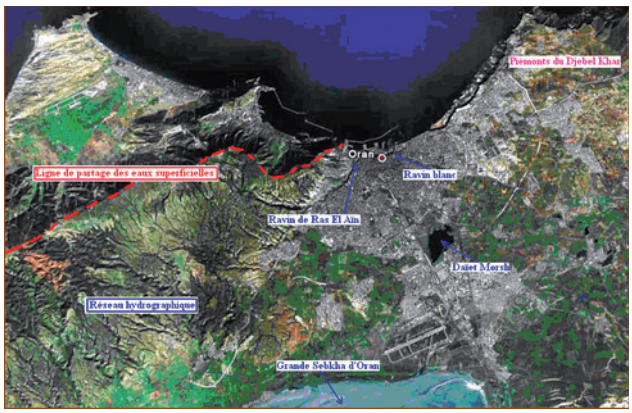


Fig. 2. — Vue satellitaire d'Oran et de son réseau hydrographique (Algeria Space.Blogspot.com).

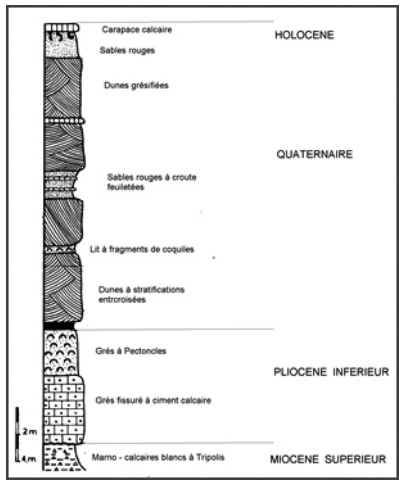


Fig. 3. — Coupe géologique du ravin blanc (Mansour, 1989).

reposant en discordance sur un substratum représenté par des marnes à tripolis du Miocène supérieur (figure 3). Des dunes consolidées à stratifications entrecroisées attribuées à l'Holocène viennent recouvrir la formation gréso-calcaire. Les formations géologiques du Tertiaire, marnes, calcaires et grès offrent de bonnes possibilités aquifères, particulièrement au droit du ravin blanc (Benabdellah, 2010 : 39). On distinguera :

- Les calcaires fissurés du Miocène constituent un aquifère à très bonnes potentialités hydrogéologiques.
- Le Pliocène représenté par les grès, les sables et lumachelles forme un aquifère libre ayant tantôt les marnes bleues du Miocène tantôt les marnes à tripolis comme substratum imperméable.

Les sondages de reconnaissance

Un inventaire exhaustif des principaux sondages géotechniques d'une profondeur de 8 à 15 m, réalisés au droit de la frange maritime (Laboratoire des travaux publics d'Oran, 2005), a permis de mettre en évidence des formations aquifères gréso-calcaires Pliocène. En considérant les sondages pris le long des axes perpendiculaires par rapport au front de mer (ravin blanc), on constate que le relèvement du substratum marneux a un impact direct sur l'hydrodynamique des eaux souterraines. C'est le cas par exemple des exutoires sous forme de sources de trop plein disposées le long du talus du front de mer (figure 4).

6.2.2 Cartographie des eaux souterraines

Le système aquifère du plateau d'Oran constitue donc un ensemble hydrogéologique complexe, caractérisé par un substratum imperméable ondulé et par de fréquents changements latéraux de faciès. Les eaux infiltrées dans les formations Pliocènes s'écoulent selon trois directions principales, mettant en évidence trois bassins hydrogéologiques (figure 5).

- Bassin hydrogéologique de Ras El Aïn au nord-ouest,
- Bassin hydrogéologique de Daïat Morcely au sud,
- Bassin hydrogéologique au nord est comprenant deux sous bassins hydrogéologiques :
  - * Sous-bassin hydrogéologique matérialisé par un axe de drainage alimentant vers l'Est la région de Canastel.
  - * Sous-bassin hydrogéologique alimenté par les ravins

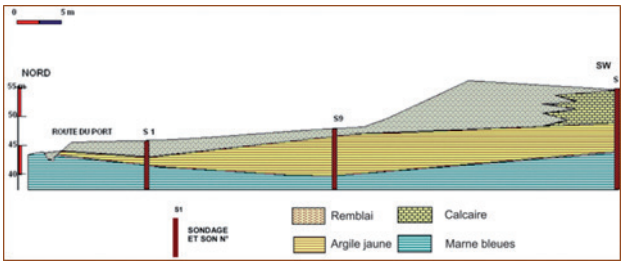


Fig. 4. — Coupe géologique perpendiculaire au front de mer.

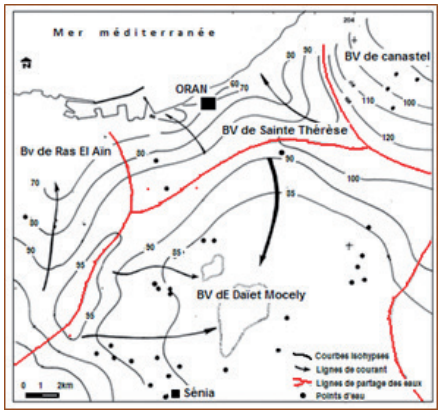


Fig. 5. — Cartographie des eaux souterraines du plateau d'Oran (Mansour *et al.*, 2009).

de la cressonnière et du ravin blanc, matérialisé par un axe de drainage alimentant la baie de Sainte-Thérèse. La nappe du plateau sud d'Oran alimentée par les eaux ruisselant du flanc sud du Murdjadjo à l'ouest s'étend vers Hassi Bounif, Sidi Chahmi et El Karma vers l'est où elle est coiffée par une couche d'alluvion épaisse. Le substratum de cet aquifère est essentiellement marneux ou argileux. L'épaisseur des alluvions diminue à l'est dans la zone des Dayas où le substratum imperméable affleure (Joseph, 1979 : 61).

6.3 Risques hydrogéologiques en zone urbaine

Les caractéristiques mécaniques d'un matériau, sa perméabilité et son état d'altération sont autant de paramètres conditionnant la pente limite d'équilibre et l'occurrence du mouvement. Les mouvements de terrain rencontrés peuvent être de deux types :

- Les mouvements lents et continus comme les tassements et les affaissements : certains sols compressibles peuvent se tasser sous l'effet de surcharge (construction, remblais) ou en cas d'assèchement (drainage, pompage).
- Les mouvements rapides et discontinus comme les effondrements dus à la présence de cavités souterraines. Il peut s'agir des cavités souterraines naturelles générées par la dissolution de formations géologiques (carbonates ou gypses) ou artificielles (carrières et ouvrages souterrains). Ces anomalies peuvent entrainer l'effondrement du toit de la cavité et provoquer en surface une dépression généralement de forme circulaire.

Fig. 6. — Paléohydrographie du versant nord d'Oran (Somatre, 2005).

Photo. 1. — Substratum dolomitique faisant office de ligne de partage des eaux.

6.3.1 Paléohydrographie de la frange maritime

Afin de mieux comprendre l'origine des mouvements du sous-sol (affaissements, glissements, chutes des blocs) observés sur certaines partie de la ville d'Oran, il est nécessaire de retracer l'histoire des écoulements superficiels relatifs à la paléohydrographie et ceux avant l'édification de cette grande métropole. L'analyse morphométrique de la frange littorale fait ressortir deux bassins versants séparés par une limite hydrogéologique représentée par l'unité géologique Jurassico-Crétacé (photo 1) faisant office de ligne de partage des eaux (barre rocheuse) qui s'étend depuis l'entrée actuelle du port jusqu'aux hauteurs de la ville d'Oran (figure 6) :

- Bassin versant de Ras El Aïn situé à l'ouest de la ligne de partage des eaux, drainé par l'oued Rebhi et ayant pour exutoire une émergence dont le débit actuel oscille autour de 60 l/s.
- Bassin versant de la baie de Sainte Thérèse : comprend quatre ravins d'est en ouest (figure 6) :

Ravin Rouina : prend naissance au niveau du boulevard de l'indépendance (Medina jadida), pour aboutir à la rue des sœurs Benslimane en passant exactement entre la banque BCA et le trésor public (photo 2).
Ravin Mina : prend naissance près de la place place Hoche pour rejoindre le front de mer juste à l'est de l'hôtel Hadef.
Ravin de la Cressonnière : Très profond, ce ravin prenait naissance non loin de la place des Victoires en passant sous le front de mer au droit de la place Port Saïd.

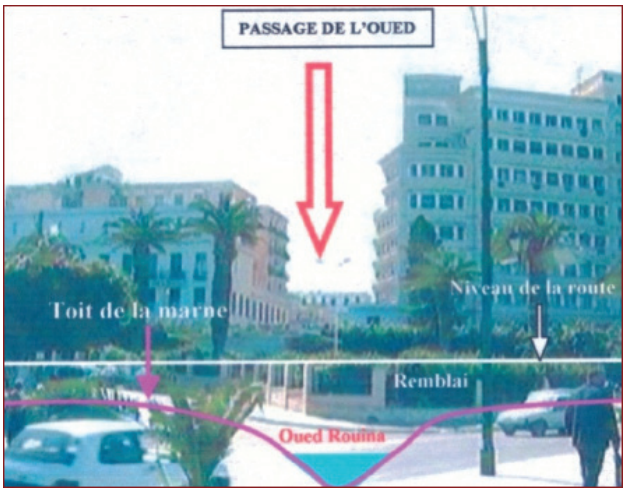


Photo. 2. — Passage de l'Oued Rouina.

Ravin blanc : représente le bassin versant le plus important de par sa superficie, séparant les quartiers de Saint-Eugène et de Gambetta.

6.3.2 Drainage des bassins versants de la baie de Sainte-Thérèse

L'extension de la ville d'Oran vers l'est a imposé le remblaiement de ravins de la baie de Sainte-Thérèse sur lesquels ont été réalisées particulièrement les infrastructures de base (routes et chemins de fer). Avant le remblaiement, de grands collecteurs (ovoïdes) ont été installés au droit des ravins pour permettre le drainage et la déviation des eaux hors de la baie de Sainte-Thérèse (figure 7).

6.3.3 Interaction oued — nappe

La carte piézométrique a mis en relief un grand écoulement, matérialisé par l'existence d'un axe de drainage qui se superpose parfaitement sous l'écoulement superficiel du ravin blanc. Ce qui dénote qu'il existe une relation hydrodynamique entre l'écoulement souterrain (nappe du plateau d'Oran) et l'écoulement superficiel (oued du ravin blanc). Ce sous-bassin hydrogéologique alimente en continu les terrasses ainsi que les remblais édifiés pour les besoins de l'infrastructure routière. Un collecteur relie le rond point

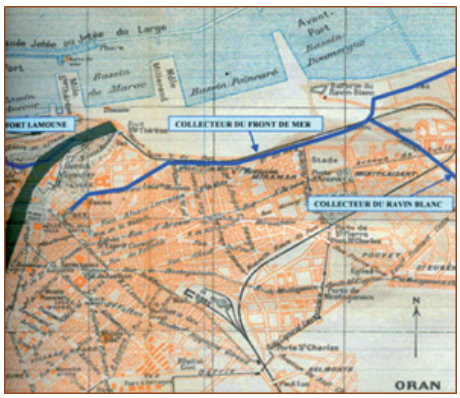


Fig. 7. — Drainage par collecteurs (ovoïdes) des eaux superficielles et souterraines des ravins de la baie de Sainte-Thérèse (Somatre, 2005).

Photo. 3. — Dispositif de captage d'une source à débit notable.

de cité Djamel à la chambre de collecte située au pied de la pile Sud du pont Zabana en suivant le lit du ravin. Il permet ainsi d'acheminer vers l'ovoïde géant du front de mer toutes les catégories d'eaux (superficielles, souterraines et usées). Un certain nombre de sources dont le débit total atteint plusieurs litres par seconde sont captées. Il s'agit d'un dispositif comportant une buse de 300 mm de diamètre, munie d'une grille métallique et d'un filtre en gravier soigneusement mis en place (photo 3). Des coulées pétrifiées de carbonates témoignent d'importantes infiltrations de la nappe à travers les parois de l'ovoïde (photo 4).

6.3.4 Des réseaux de drainage et d'assainissement

Le manque de travaux d'entretien sur le réseau souterrain des ovoïdes a entraîné les dégradations observées par des travaux d'expertise (SOMATRE, 2005). Les dégradations par fissurations des parois, effritement de l'enduit de surface et détachement de plaques de béton sont localisées sur les tronçons d'ovoïde traversant les anciens ravins remblayés. Dans ces zones, l'absence de drainage a entraîné une augmentation de la pression des eaux souterraines dans les remblais, provoquant ainsi les dégradations constatées. Les impacts sont très nombreux vis-à-vis du bâti urbain et de son environnement. On citera particulièrement la saturation du remblai surtout en période hivernale, l'augmentation de la pression hydrostatique sur les parois externes des ovoïdes, la détérioration des réseaux supérieurs d'alimentation en eau potable et d'assainissement, l'inondation des caves et ruelles en période hivernale, les fuites des eaux usées dans le sous-sol et la contamination de la nappe phréatique.

6.3.5 Impacts sur le bâti et l'environnement urbain

Fissuration du réseau routier : exemples

– Fissuration de la route du port : apparue pour la première fois en 1985, autrement dit lors de l'achèvement des

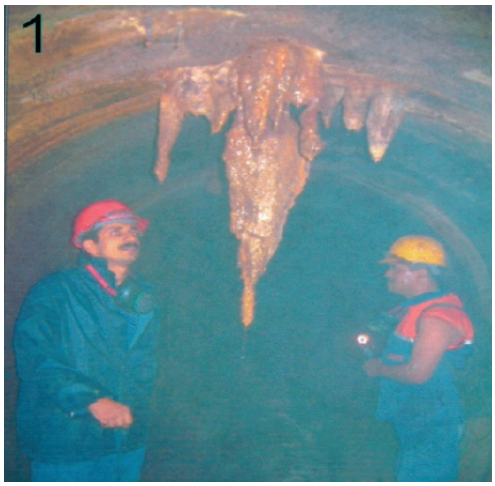


Photo. 4. — Coulées pétrifiées de carbonates témoignant d'importantes infiltrations de la nappe à travers les parois de l'ovoïde.

Photo. 6. — Chaussée endommagée par une fissure longitudinale.

Photo. 5. — Fissure affectant la chaussée menant au port à conteneurs.

Photo. 7. — Fissuration d'un tronçon de l'avenue Boutlelis.

travaux de mise en place du remblai. Depuis cette date, le talus de remblai de cette zone se trouve constamment en mouvement malgré tous les travaux de réparation par rechargement de chaussée (photo 5).

– Avenue qui débouche sur le rond-point du pont Zabana : à la suite des travaux d'une société de promotion immobilière, une importante ouverture du sol visible en surface est apparue sur quelques mètres le long de la chaussée, ainsi que des traces longitudinales de fissuration du bitume (photo 6).
– Boulevard Boutlelis : lors de la réalisation de fouilles pour la construction d'un centre commercial, une fissure s'est manifestée sur une centaine de mètres (photo 7).

Affaissements

Il s'agit particulièrement d'affaissements ayant un impact sur la dégradation du bâti urbain, qui trouvent leur origine dans l'interaction de l'eau souterraine avec la matrice encaissante. Deux origines ont pu être identifiées :

– *Remblaiement d'anciens ravins (exemple ravin de la Rouina)* : les écoulements superficiels et les infiltrations peuvent provoquer des risques potentiels d'effondrement, particulièrement ceux du centre-ville d'Oran. Il est fondamentalement important de signaler qu'une bonne partie des constructions (Boulevard Emir Abdelkader, Boulevard de la Soummam, Place du 1er novembre, pour ne citer que ceux-là), sont érigées sur une formation de remblai, étalées à l'ère coloniale pour combler et aménager l'oued Rouina dans le but d'étendre la ville d'Oran vers l'est. Ces remblais instables dans le temps, vont provoquer au sein des constructions une fissuration importante des murs et des affaissements du sol (photos 8 et 9), résultant le plus souvent de l'imbibition de ce remblai (très perméable) par les venues d'eau d'infiltration, suralimentées continuellement par un réseau d'assainissement souvent défectueux. Le piézomètre du Boulevard Emir Abdelkader a révélé une eau fortement nitratée avec notamment la présence de coliformes fécaux (Zidouri, 1986) dénotant ainsi le mélange des eaux infiltrées avec celles des eaux usées domestiques. On assiste donc à Oran de temps à autre à des affaissements de terrains dont l'impact est certain sur le bâti.
– *Phénomène de dissolution des formations géologiques* : la nappe du plateau d'Oran est contenue principalement dans

Photo. 8. — Affaissement du plancher de la pharmacie.

Photo. 9. — Affaissement avec déformation des trottoirs (angle Boulevard Emir Abdelkader).

Photo. 10. — Phénomène de dissolution, affleurement de la nappe du plateau d'Oran dans les calcaires gréseux karstiques (falaise de la carrière de Carteaux).

Photo. 11. — Cavité de dissolution mise à jour dans les calcaires gypseux.

les calcaires gréseux fissurés du Calabrien, reposant en discordance sur les marnes à tripolis du Miocène supérieur. Le phénomène de dissolution y est très présent, affectant d'une part les calcaires gréseux, développant une structure karstique (photo 10) et d'autre part des lentilles de calcaires gypseux, générant de véritables cavités souterraines (photo 11), qui sous le poids du bâti existant aura un impact conséquent sur la stabilité des immeubles (Mahammad *et al.*, 2010 : 8) comme c'est le cas d'un lotissement au niveau de la rue de Mostaganem (sud du centre-ville).

Effondrements et chutes de blocs

Des effondrements et des chutes de blocs sont observés le long des falaises au N-E de l'agglomération (figure 8). Elles proviennent de la désagrégation mécanique et chimique des calcaires gréseux et des grès qui s'étendent sur plusieurs kilomètres.

Conclusion

L'allure du substratum marneux conditionne le contexte hydrogéologique du plateau d'Oran. Ainsi, les eaux infiltrées dans les formations Pliocènes, arrêtées par les marnes, s'écoulent suivant une direction générale sud-nord. Par ailleurs l'existence d'ondulations du substratum dans le sens transversal a pour conséquence l'accumulation de l'eau dans les points bas, donnant ainsi naissance à des sources de trop plein, visibles le long du talus sous le front de mer. Les écoulements superficiels et les infiltrations peuvent provoquer des risques potentiels d'effondrement, particulièrement ceux du centre-ville d'Oran. Il est fondamentalement important de signaler qu'une bonne partie des constructions du centre-ville sont érigées sur une formation de remblai, étalées à l'ère coloniale pour combler les oueds et aménager le front de mer. Ces remblais instables dans le temps, vont provoquer au sein des constructions une fissuration importante des murs et des affaissements du sol, résultant le plus souvent de l'imbibition de ce remblai par les venues d'eau d'infiltration, suralimentées continuellement par un réseau d'assainissement défectueux.

La ville d'Oran, connue pour des problèmes d'instabilité de terrain se trouve confrontée à de nombreuses instabilités de terrain ayant générées la fissuration du réseau routier et des affaissements ayant un grand impact sur la dégradation du bâti urbain. Deux causes principales ont été identifiées :

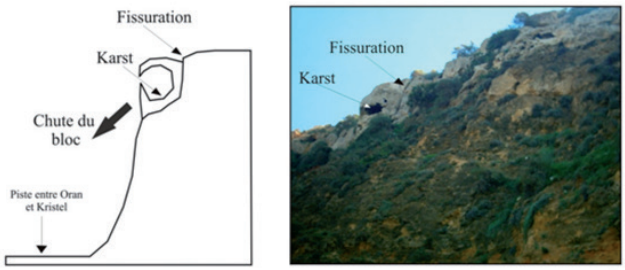


Fig. 8. — Schématisation des phénomènes d'effondrement dans les formations carbonatées.

– Construction et aménagement d'une partie du centre-ville érigée sur du remblai qui a servi au comblement des vallées.
– Phénomène de dissolution des formations géologiques : Il y a lieu de signaler un phénomène de dissolution affectant d'une part les calcaires gréseux, développant une structure karstique et d'autre part des lentilles de calcaires gypseux, générant de véritables cavités souterraines, qui sous le poids du bâti existant aura un impact conséquent sur la stabilité des immeubles.

À ces risques hydrogéologiques urbains, s'ajoutent les risques d'origine anthropique, liés à un réseau de drainage et d'assainissement défectueux. Les dégradations par fissuration des parois et obstruction de l'ensemble des barbacanes de drainage des remblais par des calcaires sont particulièrement localisés sur les tronçons d'ovoïde traversant les anciens ravins remblayés.

Bibliographie

Belkebir L., *Le Néogène de la bordure nord-occidentale du massif du Dahra (Algérie). Biostratigraphie, paléoécologie, paléogéographie*, thèse univ. Marseille, 1986, 289 p., 19 pl., 64 fig.

Benabdellah M., *Mise en évidence des phénomènes dynamiques contrôlant le littoral oranais, de la Calère à la Pointe de Canastel : étape fondamentale pour une cartographie des risques géologiques*, thèse magist. univ. Oran, 2010, 273 p., 234 fig.

Gourinard Y., *Recherches sur la géologie du littoral Oranais, Épirogénèse et nivellement. Service de la carte géologique de l'Algérie, Bull.* n° 6, 1958, 111 p.

Joseph A., *Notice explicative de la carte hydrogéologique d'Oran*, 1979, 66 p., 47 fig.

Laboratoire des Travaux Publics d'Oran (LTPO)., *Construction d'un complexe immobilier, pont Zabana, Oran*, 2005, Rapport d'études géotechniques.

Mansour H., *Hydrogéologie du complexe dunaire à l'Est d'Oran du Cap Falcon (Oran) à Terga (Beni saf)*, thèse magistère, université d'Oran, 1989, 368 p., 133 fig.

Mansour H., Zeroual I., Nadji A., Foukrache M., *Utilisation de l'imagerie spatiale dans la gestion du risque géologique : bilan et perspectives. Deuxièmes journées d'études sur la géologie algérienne*, Oran 14-15 décembre 2009, univ. Oran, Algérie.

Mansour H., Foukrache M., Zeroual I., Nadji A., *La déminéralisation des eaux souterraines du champ captant de Brédéah. Impact du rejet de saumures sur son écosystème environnemental, Algérie Nord occidentale*, Colloque international sur les ressources en eau et le développement durable (4CIREDD'11), 22-23 février 2011, Alger, p. 154-160.

Mahammad D., Mansour H., Toubal A.C., Benzeguir A., « Utilisation de la géophysique électrique et du géoradar pour la détection d'anomalies souterraines dans les sites de construction de l'agglomération d'Oran (Algérie) », *Annales des Mines et de la Géologie de Tunisie* ; n° 44, 2010, p. 57-67.

Somatre (Société Maritime des Travaux, Reconnaissances et Expertises). *Expertise du réseau d'assainissement des ovoïdes du grand Oran*, 2005, Rapport interne.

Zidouri A., *Contribution à l'étude hydrogéologique du bassin d'alimentation de Ras El Ain*, mémoire d'Ingénieur univ. d'Oran, 1986, 124 p., 54 fig.

Chapitre 2
Pratiques de gestion

7 Mémoire des catastrophes socio-environnementales dans la société japonaise

Retour d'expérience et révision des mesures de prévention dans le Kansai, l'ouest du Chūbu et le sud est de la péninsule de Kii

Grégory Beaussart
Centre d'Anthropologie Sociale (LISST-CAS), Maison de la recherche. Université Toulouse II — Le Mirail. 5 allées Antonio Machado — 31 058 Toulouse Cedex 9
Nemeise@gmail.com

Résumé. — Typhons, séismes, coulées de boues, le Japon est familier de ces aléas naturels qui peuvent se révéler parfois destructeurs. Construire des sociétés dans un pays situé à la fois sur une zone tectonique très active et sur la route de formation de violents typhons n'a pas été chose aisée. Aussi, les populations japonaises ont dû très vite mettre en place des stratégies pour prévenir les impacts de ces aléas naturels. Celles-ci ont été construites et incorporées par les collectivités soudées contre ces agresseurs. Ces collectivités ont dû également concevoir des moyens d'assimiler, de conserver puis de transmettre l'expérience acquise par leurs prédécesseurs afin de réduire progressivement l'impact socio-environnemental des aléas naturels. Ce sont toutes ces stratégies, technologiques mais surtout humaines, qui ont évolué et se sont diversifiées au fil du temps pour mener au système de gestion actuel du risque socio-environnemental au Japon.
Mots-clés. — catastrophe socio-environnementale, expérience, mémoire, transmissions.

Title. — *On the memory of socio-environmental disasters in japanese society — Experience feedback and disaster prevention politics reviewing in Kansai, western chūbu and south-eastern coast of Kii peninsula*

Abstract. — *Typhoons, earthquakes, landslides, these are potentially destructive natural hazards which Japan is accustomed with for long ago. For Japanese populations, building societies in such a land located both on an active tectonic area and a route for huge typhoons must have been a problematic enterprise. Thus, they had to set some strategies in order to prevent any severe impact from natural hazards. These strategies had been built and incorporated by communities gathered against the enemy. These communities had to figure out some ways to assimilate, keep up and pass experience acquired by ancestors on next generations so that they can step by step reduce negative impact from natural hazards. These strategies, technological but based on human ability to react in the first place, have evolved and got diversify though the course of time to reach to the actual system of management of socio-environmental risk in Japan.*

Keywords. — *Socio-environmental Disaster, Experience, Memory, Transmission.*

La péninsule de Kii se situe dans la région du Kansai, dans la partie centrale de l'île de Honshū. C'est une zone montagneuse couverte de forêts qui concentre chaque automne des pluies qui figurent parmi les plus violentes de tout le pays. En plus des inondations régulières, elle est frappée chaque année par des typhons particulièrement violents qui provoquent fréquemment des glissements de terrain et des coulées de boues. En outre, l'histoire a montré que ses côtes furent à plusieurs reprises ravagées par des tsunamis induits par des séismes de forte magnitude (>8.0), qui se produisent avec une fréquence d'un à trois tous les 90 à 150 ans. La péninsule est bordée au sud par la plaque tectonique des Philippines, dont la limite est marquée par la fosse des Mariannes : c'est cette faille sismique qui a produit les séismes qui ont marqué la péninsule de Kii.
Les chercheurs nippons spécialistes des séismes de la faille Nankai distinguent trois zones : A, B et C, pour lesquels les séismes présentent une double périodicité : une périodicité indépendante, qui est propre à chacune de ces zones et qui correspond à une rupture sur l'une ou l'autre portion A, B

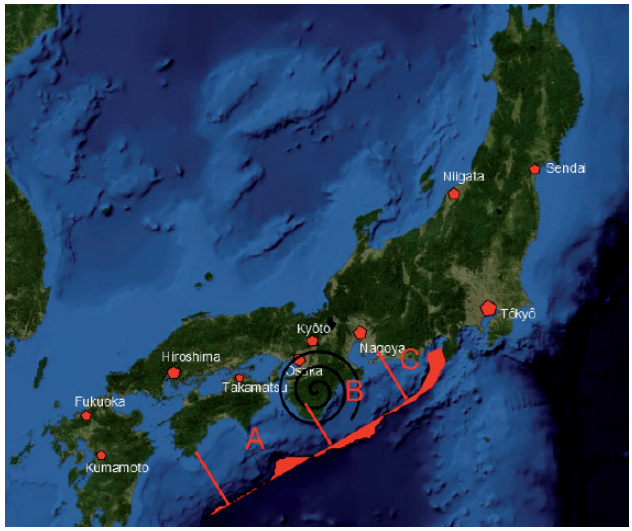


Fig. 1. — La péninsule de Kii face aux zones séismiques de la faille Nankai. (Échelle de la carte de base originale 1 : 7 500 000, source : map.yahoo.co.jp).

ou C de la faille Nankai (figure 1), et une périodicité harmonique, qui correspond à la rupture simultanée le long de ces trois zones. À l'est de la péninsule (zone indiquée par la spirale), on trouve la zone C, qui produit les séismes désignés par le terme vernaculaire « séismes de la zone Tōkai » (tōkai jishin 東海地震), au sud-est, on trouve la zone B, qui produit les séismes de la zone Tōnankai (tōnankai jishin 東南海地震) et enfin au sud-ouest se trouve la zone A, qui produit les « séismes de la zone Nankai » (nankai jishin 南海地震). Les séismes historiques étudiés dans mon travail de thèse se sont produits essentiellement dans les zones A et B, et les derniers en date se sont produits en 1944 (zone B) et 1946 (zone A). Dans sa partie centrale, les plus hautes montagnes de la région de Nara arrêtent de grosses masses nuageuses océaniques qui produisent des pluies très abondantes chaque été de juin à septembre. Sa situation propice à l'occurrence d'aléas naturels violents rend cette région particulièrement intéressante pour étudier la gestion des aléas et des catastrophes socio-environnementaux, dans le quotidien des populations locales.

L'enquête ethnographique que j'ai menée dans le Kansai, et plus particulièrement dans la péninsule de Kii, avait pour objectif d'effectuer une première enquête combinant observations préliminaires et collecte de données concernant la mémoire des catastrophes. Elle s'est déroulée entre le 23 août et le 19 novembre 2012, entre Ōsaka et Nagoya pour sa partie la plus septentrionale et Kushimoto pour sa partie la plus méridionale, en longeant la côte est/sud-est de la péninsule par Ise et Kumano

Ces zones constamment exposées aux aléas naturels ont été affectées par plusieurs grandes catastrophes socio-environnementales, qui ont marqué l'histoire de la péninsule et qui sont communes à la quasi-totalité des localités visitées lors de cette enquête. Elles sont récurrentes dans les archives des villages visités, et ont laissé des traces physiques et culturelles. On compte parmi ces évènements le séisme de l'ère Hōei et le tsunami qui a suivi (Hōei jishin-tsunami 宝永地震津波, 1707), le séisme de l'ère Ansei et son tsunami induit (Ansei jishin-tsunami 安政地震津波, 1854), les séismes de l'ère Shōwa et les tsunamis qu'ils ont déclenchés (Shōwa nankai/tōnankai jishin-tsunami 昭和南海・東南海地震津波,1944 et 1946), le typhon de la baie d'Ise (Isewan taifū 伊勢湾台風,1959), les pluies torrentielles du Tōkai (Tōkai gōu 東海豪雨, 2000) et le typhon du Kishū oriental (Higashi kishū no taifū 東紀州の台風, 2011). Au total, treize localités et micro-localités (Ōsaka, Kyōto, Nagoya, Ise, Kihoku, Owase, Kuki, Kumano, Ōdomari, Shingū, Kushimoto, Shimo-Kitayama, Kōbe), réparties au nord-ouest, au nord-est puis entre la côte sud-est et les montagnes du centre de la péninsule, furent l'objet d'investigations. L'observation portait principalement sur les infrastructures et la préparation des collectivités locales aux aléas naturels, afin de déterminer leurs points cohérents et leurs failles, tout en évaluant le rôle de ces phénomènes géodynamiques dans la construction et le développement des collectivités, mais aussi la manière dont les populations composent avec ce risque, dans leur vie quotidienne. Dans un deuxième temps, les entretiens, divisés en deux parties, portaient sur le ressenti et la préparation mentale individuelle. Ils questionnaient alors la perception des aléas « naturels », des catastrophes socio-environnementales et les discours produits à travers les récits de mémoire, ainsi que les dispositifs sociaux et culturels mis en place avant, pendant et

Fig. 2. — Parcours de l'ethnographie multisituée de 2012. (Échelle 1:1 100 000, source : International travel maps, Japan, 2007).

après la catastrophe. L'enquête fit émerger quelques aspects intéressants, notamment en ce qui concerne le rôle assuré par le processus du retour d'expérience dans l'appréhension et la préparation aux catastrophes à venir. Celui-ci articule mémoire des catastrophes et savoirs scientifiques, afin de juguler l'impact des aléas à venir, illustrant ainsi d'une manière particulièrement intéressante le rapport des collectivités locales à leur histoire et à leur environnement, à différentes échelles.

Cet article abordera quelques aspects du processus de transmission et d'assimilation de l'expérience d'une génération à l'autre, des collectivités à l'individu ou encore au groupe, ainsi que certaines mesures de préparation qui en résultent.

7.1 Théories et concepts dans une perspective d'étude en ethnologie du Japon

7.1.1 Notion d'aléa et de catastrophe socio-environnementaux

Dans un premier temps, pour fixer une terminologie qui fera référence tout au long de ce travail, il convient de définir anthropologiquement les notions d'*aléa naturel* et de *catastrophe*, ainsi que le terme trop général de *risque*. Les notions d'*aléas* et de *catastrophes naturelles* sont largement usitées, parfois de manière incorrecte, quand il s'agit d'une application dans l'un des nombreux champs des sciences sociales. Dans la majorité des langues occidentales, où ces notions sont le résultat du mélange des savoirs scientifiques

vulgarisés et des raccourcis faits dans le langage populaire, la notion d'*aléa naturel* désigne fondamentalement un phénomène auto-formé, issu du monde extérieur à la société. Cette notion, prise en dehors de tout contexte, apparaît alors comme un phénomène autonome et aléatoire, qui exclut toute implication de l'être humain. Dans le langage courant, il est souvent assimilé, à tort, à la *catastrophe naturelle* elle-même. L'anthropologie américaine des catastrophes ajoute une dimension humaine supplémentaire, et il devient un phénomène « issu de la sphère naturelle ou technologique », imaginé comme un « agent potentiellement destructeur » (Oliver-Smith A., Hoffman S.M., 2000 : 5). Par conséquent, si l'on extrapole cette conception, son origine peut être un phénomène géodynamique auto-formé ou biocénotique, se développant au sein d'un réseau de relations écologiques incluant l'homme. Les sciences de la terre, notamment la géographie, donnent une définition de l'aléa légèrement différente de celle posée par A. Oliver-Smith et S. Hoffman. Les géographes Michael J. Crozier et Thomas Glade (2005), spécialistes des risques de l'université de Wellington et de Vienne, en proposent une définition impliquant également une relation entre l'« agent potentiellement destructeur » et l'homme, mais en ajoutant cette fois la notion essentielle de « valeur ». En outre, cette définition met en avant la multiplicité des types aléas et l'imprécision de ce terme générique, qu'il conviendrait d'affiner à travers la réflexion proposée par ce travail de thèse.

> Dans leur sens non technique, les aléas sont définis comme des processus et des situations, des actions ou des non actions qui ont le potentiel de provoquer des dommages, des pertes ou des effets défavorables à ce à quoi l'homme attribue de la valeur. Le concept est alors applicable à tous les aspects de la vie. Dans l'industrie, un aléa pourrait être une coupure de courant ou une panne d'ordinateur, dans les finances cela pourrait être une faille dans la sécurité ou un mauvais investissement et pour l'écologie, cela peut prendre la forme d'une fuite de substance toxique ou d'un glissement de terrain dévastateur. Bien que la potentialité qu'un phénomène défavorable se produise soit reconnue [par la société], le moment où l'aléa va réaliser son potentiel est incertain, aussi la menace est généralement exprimée sous forme de chances ou de probabilité d'occurrence. (M.J. Crozier, T. Glade, 2005 :1)

On est alors en mesure de poser comme postulat que l'*aléa naturel*, autrement dit l'interaction d'un processus naturel auto-formé avec une monde vidé de son intentionnalité et de sa valeur subjective, c'est-à-dire dont l'homme est exclu, n'existe pas à proprement parler. L'aléa n'existe que dans sa relation avec les « éléments à risque » (Papathoma-Kohle M., Neuhauser B., Ratzinger K., Wenzel H., et Dominey-Howes D., 2007 : 765-779), c'est-à-dire les éléments auxquels l'homme attribue une valeur, autour duquel se construisent des enjeux socio-culturels, et qui sont dès lors susceptibles de subir des dommages[1]. Il conviendrait alors de distinguer, sur le plan conceptuel, les phénomènes géodynamiques et biocénotiques des aléas qui les impliquent dans une relation phénomène auto-formé/société humaine, que l'on pourrait dès lors qualifier d'aléas socio-environnementaux. Je distinguerai donc dans la présente réflexion, le *typhon* (phénomène géodynamique), par exemple, de l'*aléa-typhon*. Pour prendre en considération le point de vue des sciences physiques, sociales et des savoirs populaires, à partir de cette étape de la réflexion, le terme d'*aléa socio-environnemental* sera substitué à celui d'*aléa naturel* et désignera alors, au moins dans le cadre de ce travail, l'ensemble des phénomènes géodynamiques et biocénotiques existant dans leur relation avec les sociétés humaines et leurs infrastructures, de telle sorte qu'ils représentent intrinsèquement une menace pour ceux-ci.

Après cette mise au point sur le cas de l'aléa « naturel » et avant de proposer une redéfinition anthropologique de la catastrophe « naturelle », il me semble opportun de présenter les concepts couramment employés dans la langue japonaise. Du fait d'un registre lexical très développé, présentant une grande quantité de synonymes et de possibilités de créations de termes, plusieurs termes sont couramment utilisés en japonais pour désigner l'impact des aléas naturels sur les sociétés humaines. Toutefois, les termes les plus utilisés actuellement sont *shizen saigai* 自然災害 ou encore, plus rare car considéré comme obsolète par les savoirs scientifiques, *tensai* 天災. Tout deux signifient littéralement « désastre naturel », autrement dit, par extension, « désastre causé par la nature ». Les termes habituellement employés pour désigner l'aléa socio-environnemental, dans les sciences sociales japonaises, sont également nombreux. On trouve notamment les termes vernaculaires *kiken* 危険, ou encore des mots d'origine étrangère comme *hazādo* ハザード (de *hazard* en anglais), bien qu'ils désignent par leur étymologie non seulement les phénomènes géodynamiques, les aléas socio-environnementaux, mais aussi les aléas en général, c'est-à-dire les agents potentiellement dangereux, quelque soit leur origine. L'emploi d'un vocabulaire issu de l'anglais est dû au rôle important qu'ont joué les *disaster studies* américaines dans le développement de l'étude des catastrophes au Japon, après la seconde guerre mondiale. Si ces termes désignent les aléas, leurs conséquences, elles, sont désignées principalement par le terme *saigai* 災害 ou de manière métaphorique par *kiki* 危機. Ce dernier signifie « crise » ou « situation critique », et l'utilisation du terme *crisis*, dont il est l'équivalent, par les chercheurs américains, n'est sans doute pas étrangère à son emploi par les pouvoirs publics japonais, pour désigner une catastrophe socio-environnementale. L'expression *catastrophe naturelle*, en raison de l'emploi de l'adjectif *naturel* qui possède une valeur intrinsèque de normalité et d'évidence, puisqu'il implique un processus global et inévitable (la nature, perçue comme une entité autonome et transcendante), sous-entend qu'il s'agit d'un évènement dont la cause est dénuée de tout lien avec une éventuelle intentionnalité humaine, qu'elle est imprévisible et inévitable. Or, cette conception est, me semble t-il, erronée. L'homme, ainsi que les sociétés qu'il a construites, représentent deux éléments fondamentaux de l'équation. Aussi, l'évènement dramatique n'est ni hasardeux ni inévitable, mais tout au plus aléatoire quant au moment où il se produira. Au contraire, il cristallise dans le présent une tension grandissante entre pressions environnementales et pressions sociales qui s'est développée dans un passé plus ou moins proche, et qui est conditionnée par la construction sociale et culturelle de l'espace d'une population donnée. À l'inverse, un tsunami engloutissant une plage déserte ne ferait aucun dommage sur une quelconque société humaine, et on ne parlerait alors pas de catastrophe ni de *saigai*, mais tout simplement de tsunami, de phénomène naturel, ou encore de phénomène géodynamique, etc., en fonction du

1. Dans la même logique, on peut poser une distinction conceptuelle entre « dégât » et « dommage ». Le premier impliquerait alors objectivement la dégradation d'un objet matériel, tandis que le deuxième désignerait subjectivement les dégâts subits par un objet auquel une tierce personne attribue une valeur (objet précieux, infrastructure, être vivant, etc.).

paradigme de savoir[1] au sein duquel il est décrit. On peut donc dire que la *catastrophe*, au sens d'évènement désastreux et dramatique, ne peut exister sur le mode discursif que parce que l'être humain est présent sur les lieux où l'aléa se produit, et qu'il en subit l'impact. La *catastrophe* mise en récit est l'expression d'un sentiment de désarroi vécu par ceux qui en font l'expérience, et c'est la raison pour laquelle elle est difficilement, par essence, objectivable par l'esprit humain. En outre, l'homme est inévitablement lié à la société dans laquelle il évolue, et la perception de la catastrophe, qui n'affecte pas un individu mais un système socioculturel dans son ensemble, est étroitement liée au rapport que l'homme entretient à son environnement. Il convient donc de parler, à mon sens, de *catastrophe socio-environnementale* et non de *catastrophe naturelle*. Il convient, au même titre, de bien dissocier *aléa socio-environnemental* et *catastrophe socio-environnementale* qui ne sont, de fait, pas deux phénomènes similaires, mais une cause environnementale et sa conséquence circonstanciée, appliquée aux sociétés humaines qui la construisent et tentent de l'objectiver socialement et culturellement, à travers divers modes d'expression subjectifs. La *catastrophe socio-environnementale* est donc, au delà de la simple notion de *catastrophe naturelle*, un évènement perçu collectivement comme dramatique, qui a pour origine première une mauvaise gestion et/ou un rapport dysfonctionnel sur le long terme, entre l'homme, ou plutôt ses comportements, ses constructions, son environnement social et son environnement naturel.

7.1.2 Catégorisation des aléas et des catastrophes socio-environnementaux dans la région du Kansai et dans le Japon en général

Les aléas socio-environnementaux présents dans l'imaginaire collectif des populations de la péninsule sont principalement ceux qui sont à l'origine des catastrophes historiques de la région, mais également des dommages saisonniers. On retrouve en première position le typhon (taifū 台風) et les averses (gōu 豪雨) (la pluviométrie annuelle de certaines régions de la péninsule, comme la région de Kumano, est l'une des plus importante de tout le pays), suivis des coulées de boues (dosharyū/dosaryū 土砂流 ou dosha-kuzure/dosakuzure 土砂崩れ), généralement consécutives aux typhons et aux averses. Viennent ensuite les marées invasives (takashio 高潮), souvent engendrées par les typhons le long des côtes, puis les vents violents (kyōfū 強風 ou bōfū 暴風), plus fréquents du côté d'Ōsaka que dans le sud de la péninsule et pour finir les tourbillons ou rafales de vent (toppū 突風 et tsumujikaze 旋). Pour finir, réguliers mais beaucoup plus rares, viennent les séismes (jishin 地震) et les tsunamis (tsunami 津波 / 津浪), que la grande majorité des habitants ne connaissent qu'à travers les récits et les photographies, présentées dans les expositions. La plupart de ces aléas peuvent se combiner ou fonctionnent en chaîne : le typhon provoque de fortes pluies, des vents violents et des marées invasives, mais surtout presque toujours des coulées de boues, dans les jours qui suivent. Ainsi on comprend mieux pourquoi l'aléa-typhon, qui présente pour caractéristique d'être le moteur géodynamique de plusieurs aléas potentiellement destructeurs, se trouve en tête des craintes des habitants des zones rurales. L'incendie est également un aléa très présent dans l'imaginaire collectif, mais les mesures anti-incendies contemporaines ont drastiquement diminué le nombre de ces aléas, en particulier dans les zones rurales, aussi il est peu représenté dans les causes avérées de *saigai* et/ou de catastrophes, au cours des dernières décennies, excepté dans le cas des catastrophes sismiques majeures.

Parmi les grandes catégories de *saigai,* l'une des plus courantes désigne les dégâts sismiques (*shinsai* 震災), incluant les séismes et tous les dégâts liés aux vibrations telluriques, les dégâts telluriques provoqués par un écoulement de matière (*dosha saigai* 土砂災害) comprenant par exemple les coulées de boue, les glissements de terrain et les éboulements. On trouve un type en apparence curieux, réunissant les dégâts des eaux et du vent dans la catégorie double des « dégâts des eaux et vents » (*fūsuigai* 風水害) comprenant les dommages causés par les typhons, les averses prolongées et de manière générale les aléas climatiques, relevant des vents, et aquatiques. On trouve parfois au sein de cette dernière catégorie une subdivision particulière pour les crues et les inondations, (*suigai* ou *kōzui(gai)* 水害 / 洪水（害）), mais généralement pas pour les dégâts causés par les vents. Pour finir, on trouve aussi la catégorie des dégâts ignés (*kasai* 火災), comprenant les incendies et les éruptions volcaniques, et occasionnellement une autre catégorie détachée du reste, les aléas dits climatiques (*kikō/kishō saigai* 気候 / 気象災害) comprenant les sécheresses, les vagues de chaud et de froid, la grêle, le blizzard, qui sont moins fréquents ou très localisés, donc moins médiatisés et par conséquent beaucoup moins présents dans l'imaginaire collectif. On constate l'existence de catégories redondantes, qui font doublon par les objets qu'elles incorporent. La raison en est, à mon sens, la persistance extrêmement fragmentaire d'une pensée élémentaliste ancienne, propre aux cultures de l'Asie extrême-orientale, initialement développée par la Chine, puis la Corée et au Japon dans l'antiquité. Cette construction élémentaliste des catégories d'objets naturels est, de toute évidence, étroitement liée à la construction de ces catégories de *saigai*, et *vice-versa*. En Europe, elle est connue chez les sinisants sous le nom de la théorie des « cinq phases » (wuxing 五行 en chinois), qui a été adaptée par certaines classes de la population japonaise au cours de l'époque Heian (784-1185), lorsque la culture des élites chinoise était un référentiel. Selon cette conception, qui présente en certains points des similitudes avec la pensée alchimiste que nous connaissons et la théorie des quatre éléments de Platon, tous les objets et les phénomènes naturels relèvent fondamentalement de la combinaison d'un nombre restreint d'éléments dits primordiaux. En Chine, ils sont le métal (jīn 金), le bois (mù 木), l'eau (shuǐ 水), le feu (huǒ 火) et la terre (tǔ土) alors qu'au Japon, selon son équivalent, la théorie des « cinq grands » (godai 五大), les éléments primordiaux sont la terre (*chi* ou *tsuchi* 土), l'eau (*sui* ou *mizu* 水), le feu (*ka*, *ho* ou *hi* 火), le vent (*fū* ou *kaze* 風) et le vide (*kū* ou *sora* 空), parfois associé au ciel et par extension au « paradis ». Ainsi, on peut pointer du doigt la remarquable correspondance entre les cinq

1. En référence à la définition qui en est faite par T. Kuhn (Kuhn Thomas, 2008 :7-27), c'est-à-dire un ensemble de savoirs issu de « découvertes scientifiques universellement reconnues qui, pour un temps, fournissent à une communauté de chercheurs des problèmes types et des solutions. Quand j'utilise le terme de paradigme, j'ajoute à cette notion la connotation que lui ont donnée les sciences sociales, c'est-à-dire un prisme de pensée regroupant un ensemble de concepts cohérents entre eux, proposant un ensemble de solutions à un ensemble de problèmes et de questions concernant le monde social et le monde physique. Cela inclut donc aussi bien les savoirs scientifiques que les savoirs populaires, spécifiques et/ou non scientifiques.

Tabl. 1. — Préoccupations des populations en matière d'aléas (1).
Tableau présentant de manière synthétique le classement de divers aléas dans les préoccupations d'un panel d'enquêté au Japon, sur une enquête réalisée à l'échelle nationale (Source : Bureau des enquêtes d'Ōsaka, 1975 :42)

Désignation aléa/préoccupation au quotidien	1ère position			2ème position			3ème position			Global		
		Votes	%		Votes	%		Votes	%		Votes	%
Séisme	1	227	64		44	12		32	9	1	303	85
Typhon	2	74	21	1	162	46		40	11	2	276	78
Inondation	3	24	7	2	52	15	2	67	19		143	40
Eboulement/Coulée de boue		12	3		25	7	3	43	12		80	23
Eruption volcanique		5	1		5	1		15	4		25	7
Tsunami		2	1		7	2		10	3		19	5
Autre		4	1		12	3		37	10		53	15
Sans réponse		7	2	3	48	14	1	111	31	3	166	47
Total		355			355			355			355	

éléments primordiaux de ce système de pensée ancien, et la construction des catégories émiques de *saigai* causés par les aléas socio-environnementaux[1]. On pourrait même pousser la remarque plus loin et constater que la théorie japonaise, qui diffère en plusieurs points de la théorie chinoise dont elle s'inspire grandement, épouse, par une heureuse coïncidence, parfaitement les types de *saigai* les plus récurrents au Japon. Il est toutefois difficile de rassembler des éléments précis pouvant alimenter de manière satisfaisante l'hypothèse selon laquelle la pression constante exercée par les aléas socio-environnementaux sur la société japonaise aurait pu influencer la construction de certains pans de la pensée métaphysique et conceptuelle japonaise ancienne, mais cela reste une piste très intéressante à explorer.

7.2 Savoirs empiriques, savoirs théoriques, retour d'expérience

7.2.1 Lien entre impact des aléas sur la société japonaise et conscience du risque

Deux des phénomènes géodynamiques les plus courants émergent comme fondement de cette catégorisation : le séisme et le typhon, qui concrétisent à eux seuls les catégories *shinsai* et *fūsuigai*. Ce fait suggère qu'ils ont une place particulièrement importante dans l'imaginaire collectif, et il est possible de mettre cela en corrélation avec le fait que la plupart des mesures préventives prises contre les aléas naturels dans les régions étudiées concernent les séismes et les typhons. Une enquête d'opinion, menée auprès des populations (Ōsaka-shi kajimukyoku chōsa-ka, 1975 : 42-44) habitant différentes zones du pays et de différentes situations (zones rurales ou urbaines), à propos des aléas les plus craints dans la vie quotidienne, montrent qu'à l'échelle du pays, le séisme et le typhon sont les plus fréquemment mentionnés, respectivement en première et deuxième position (64 et 21 %), devant les inondations en troisième position (7 %), comme le montre le tableau ci-dessus.

Ce tableau indique le nombre de fois respectives où chaque aléa a été mentionné comme étant le plus sujet à des préoccupations significatives, en première position, puis en deuxième et enfin en troisième. Chaque colonne est divisée en trois sous-colonnes, la première indique le classement de l'aléa relatif à la position indiquée, la deuxième le nombre de personnes qui ont voté pour cet aléa comme étant en position x dans leur évaluation des aléas qui les préoccupent le plus au quotidien, et la troisième la proportion des votes par rapport au total des participants, sachant que sur un panel de 544 personnes sélectionnées, seules 355 ont répondu à l'enquête. Pour donner un exemple concret, on voit dans la colonne « 2e position » que le typhon a été placé en deuxième par 46 % des enquêtés, tandis que d'après la colonne « 1re position », les tsunamis ont été placées en premier par deux personnes uniquement. On déduit simplement de ces deux observations que les séismes et les typhons, qui sont fréquemment nommés en première position, sont des préoccupations « majeures » pour les enquêtés, alors que les tsunamis, qui sont plus fréquemment cités en troisième position qu'en première, sont des préoccupations « mineures ». Si l'on observe ces classements en fonction des régions concernées, on pourra faire émerger d'autres corrélations entre les régions et les préoccupations en matière d'aléas.

Le tableau 2 résume une étude à l'échelle nationale, comme le précédent, mais dont les résultats sont cette fois triés par région. De la même manière qu'à l'aide du tableau 1, on déduit des colonnes « 1re position » et « 2e position » que de manière générale sur l'archipel, lorsque le séisme est placé en première position des préoccupations, le typhon est placé en deuxième et *vice versa*. On en conclut alors que ces deux aléas sont les plus craints, de manière générale dans l'archipel, selon un panel d'enquêtés relativement restreint. On peut retirer deux autres informations importantes de ce tableau : d'un part, on constate que dans toutes les régions situées dans le Japon oriental et central (Hokkaidō, Kantō, Chūbū, Kinki), le séisme est le plus redouté, alors que dans toutes les régions occidentales (Chūgoku, Shikoku, Kyūshū), c'est le typhon qui est placé en première position, avec une

1. *Chi* correspondrait alors aux aléas et dégâts telluriques, *sui* aux aléas et dommages d'origine aquatique, combinés aux aléas et dommages d'origine aérienne *fū*, pour donner les *fūsui-gai*. Les dommages ignés correspondraient parfaitement à l'élément *ka*, et *kū*, le vide ou le ciel, feraient référence aux aléas et dommage d'origine météorologique.

Tabl. 2. — Préoccupations des populations en matière d'aléas (2)

Tableau présentant de manière synthétique, et selon les différentes régions de l'archipel, le classement de divers aléas dans les préoccupations d'un panel d'enquêtés, sur une enquête réalisée à l'échelle nationale (Source : *Ibid.*, p. 43, note : S = séisme, T = typhon, I = inondation, C = coulée de boue)

Bloc région cible	Nombre de personnes retenues pour l'enquête	Nb de pers. ayant répondu à l'enquête		Total								
				1ère position			2ème position			3ème position		
			%		Nb	%		Nb	%		Nb	%
Hokkaidō/Tōhoku	69	37	54	S	31	84	T	25	68	I	13	35
Kantō	128	92	72	S	89	97	T	66	72	I	30	33
Chūbu	105	71	68	S	60	85	T	54	76	I	40	56
Kinki	87	62	71	S	59	95	T	53	85	I	22	35
Chūgoku/Shikoku	78	50	64	T	37	74	S	35	70	I	24	48
										C	14	33
Kyūshū/Okinawa	77	43	56	T	34	79	S	28	65	I	14	33

Tabl. 3. — Compte des séismes majeurs subis par le Japon

Séismes majeurs enregistrés par l'observatoire astronomique de Tōkyō pour la période allant de 599 à 1972. Source : *Ibid.*, p. 2)

Région/ Magnitude	5.0~5.9	6.0~6.9	7.0~7.9	8.0~8.9	Incertain	Total	%age
Hokkaidō	4	9	6	4	3	26	5.9
Tōhoku	11	24	29	4	16	84	19.1
Kantō	5	36	22	2	18	83	18.9
Chūbu	11	48	15	4	14	92	20.9
Kinki	1	37	18	6	20	82	18.6
Chūgoku/Shikoku	3	14	8	1	2	28	6.4
Kyūshū	3	21	8	1	12	45	10.2
Total	38	189	106	22	85	440	100.0

Tabl. 4. — Impact des aléas-typhons sur l'archipel japonais

Formation et impact des aléas-typhons, selon différentes situations, sur le territoire japonais, entre 1951 et 2014 (source : données publiées sur le site de l'Agence météorologique japonaise, rubrique « données sur les typhons du passé », `www.data.jma.go.jp/fcd/yoho/typhoon/statistics/index.html`). Le total des occurrences pour Kyūshū, Shikoku et le Chūgoku supérieur au chiffre total s'explique par le fait qu'un typhon en situation de *sekkin* touche plusieurs département et/ou régions à la fois, produisant un compte multiple indépendant du nombre total d'occurrences d'aléa-typhons qui ont atteint le territoire en situation de *sekkin*

Type d'impact de l'aléa typhon	Nombre total d'occurrences à l'échelle du pays (Kyūshū/Shikoku/Chūgoku)	Moyenne annuelle d'occurrence (Kyūshū/Shikoku/Chūgoku)
Formation d'un système dépressionnaire qualifié de typhon (phénomène géodynamique, sans considération de son impact) (hassei jōtai 発生状態)	1653	25.8
Impact depuis l'espace côtier sur les terres (œil = 0~300 km des côtes) (sekkin jōtai 接近状態)	725 (453/207/179)	11.3 (7.1/3.2/2.8)
Impact depuis les terres (œil situé sur la terre ferme) (jōriku jōtai 上陸状態)	182	2.8

mention des coulées de boues pour les régions du Chūgoku et de Shikoku. Cela concorde avec les données géodynamiques et les observations que j'ai faites sur le terrain : la partie occidentale et le centre du Japon ont été bien plus marqués par les séismes et les catastrophes qui en découlent (blessures corporelles voire décès, destruction des infrastructures, éboulements, glissements de terrain et incendies dans les terres, tsunami près des côtes), que la sa partie occidentale, comme le montre le tableau 3.

On constate que la partie occidentale et centrale du Japon cumule 83,4 % de tous les plus importants séismes enregistrés au cours des 14 derniers siècles. À l'inverse, la partie occidentale a subi surtout beaucoup de dommages de la part des typhons (blessures corporelles voire décès, destruction des infrastructures par le vent, crues, inondations, coulées de boue, etc.), qui atteignent très souvent cette partie de l'archipel, comme le montrent les données publiées par l'Agence météorologique japonaise, résumées dans le tableau 4. Parmi la totalité des impacts (situation *sekkin* et *jōriku* cumulées), plus de la moitié de ces aléa-typhons ont touché les régions du Japon occidental. Enfin, dernier apport démontrant le lien entre l'impact régulier des typhons et la préoccupation des populations envers ces aléas, il se trouve que parmi le top 10 des départements qui ont le plus cumulé d'impact d'aléa-typhons en situation de *jōriku* entre 1951 et février 2015, six de ces départements font partie des trois régions du Japon occidental évoquées précédemment, regroupant ainsi 67 % de l'ensemble des impacts de ce classement (Agence météorologique japonaise, 2015 : *ibid.*).

D'autre part, on relève des divergences dans l'intérêt des populations pour la prévention des catastrophes liées à aux aléas socio-environnementaux, à travers le taux de participation aux enquêtes. Le tableau 2, en particulier, montre que les taux de réponse sont les plus élevés dans les régions du Kantō, du Kinki (Kansai) et du Chūbu (taux moyen de 70 %), alors qu'il est beaucoup plus bas dans les régions de Hokkaidō, Kyūshū et Okinawa (taux de réponse moyen de 58 %). Ces faits sont à relier à un intérêt variable de ces populations pour le risque que représentent les aléas socio-environnementaux, et qui peut s'expliquer par divers facteurs sociaux et culturels : aléas plus ou moins rares, imprévisibles ou au contraire prévisibles et/ou bien connus, infrastructures présentes ou absentes, efficacité ou inefficacité des mesures de préventions, etc. En conclusion de cette sous-partie, on peut donc considérer qu'il est tout à fait possible de faire une corrélation directe entre la fréquence et l'impact des aléas de type séisme et typhon sur la société japonaise et les préoccupations des populations concernant ces aléas. Autrement dit, à l'échelle des pouvoirs publics comme des populations, l'analyse des faits passés permet de détecter des failles, des problèmes, des attentes et des besoins, ou au contraire une satisfaction des populations envers les mesures actuelles existantes pour leur sécurité.

7.2.2 De l'expérience à la mémoire : transmission du savoir expérientiel et théorique

La désignation d'un évènement comme une catastrophe, dont découle sa conservation dans la mémoire collective et sa transmission entre les individus, est un processus subjectif qui se déroule à différentes échelles de la société, et au sein de divers groupes d'acteurs sociaux. De la validation de ce statut ou de son invalidation vont dépendre plusieurs enjeux. Parmi les enjeux les plus importants, se trouvent notamment la désignation de responsables (souvent des groupes politiques, les pouvoirs publics, un ou plusieurs organismes, des entreprises, une entité immatérielle, etc.), qui vont, si possible, payer leur faute, et la reconnaissance d'un statut de victimes pour les partis lésés, qui se construit en miroir par rapport aux responsables. Mais surtout, de ces débats sur la scène publique vont émerger les solutions à mettre en place pour le rétablissement de la société. Je renvois ici de manière générale au travail de Sandrine Revet et de Julien Langumier, traitant des enjeux politiques de la catastrophe. À ce titre, les processus généraux de mise en discours de la catastrophe, décrits par S. Revet (2007 : 309-334), se révèlent être une pierre angulaire de la faculté de résilience d'un groupe social après une catastrophe importante, et sont également valables dans le contexte des catastrophes se produisant au Japon, comme dans beaucoup d'autres sociétés par ailleurs.

L'incorporation de l'expérience issue des catastrophes socio-environnementales se fait, dans le cas des localités de la péninsule de Kii, à travers une dynamique activée par plusieurs processus de mémorialisation fonctionnant à deux vitesses : l'échelle individuelle et collective. L'expérience est ensuite assimilée et traitée différemment par les deux types d'acteurs sociaux. L'individu a plutôt tendance à se servir de cette expérience pour mettre au point un arrangement de son environnement au quotidien, permettant une gestion optimale du risque socio-environnemental et des techniques de survie en cas d'urgence ; tandis que la collectivité l'utilisera pour mettre au point une stratégie de prévention profitable aux individus qui la composent. Les données recueillies sur le terrain concernant le sud-est de la péninsule de Kii sont en contradiction avec l'idée préconçue d'un communautarisme généralisé dans les sociétés du Japon. L'individu enrichit la collectivité ou la communauté au prix de ses efforts et en retour cette collectivité/communauté lui porte secours et assistance en cas de danger. Il se produit donc un jeu d'aller-retour entre individu et collectivité dans une relation bilatérale de don et de contre-don, et non unilatérale au profit unique de la collectivité, comme de nombreuses études orientalistes peuvent le soutenir. Au contraire, chaque individu reçoit pour consigne de la collectivité de sauver sa propre vie en cas de danger, avant même de penser à mettre autrui à l'abri, bien que dans la pratique cela ne soit pas souvent réalisé.

Du point de vue de l'anthropologie des catastrophes, les individus d'une population donnée peuvent donc se diviser en deux catégories : ceux qui ont vécu et ceux qui n'ont pas vécu de catastrophe. Ceux qui n'ont pas vécu de catastrophe sont, de fait, majoritairement des enfants ou de jeunes adultes. La transmission et l'acquisition d'expérience diffère tout d'abord en fonction de cet état. Chez les individus ayant vécu directement un aléa ou un *saigai*, l'expérience est directement assimilée par le biais du vécu et par un processus auto-réflexif, une fois les périodes de deuil et de mise en marge de la société passées. C'est un savoir expérientiel acquis par l'expérience de la douleur. La période de recul et la période de retour à la normale peuvent s'accompagner dans certains cas d'une formation individuelle de base à travers la recherche personnelle. En effet, chez les personnes présentant un vécu positif aux *saigai* et auprès desquelles j'ai enquêté, j'ai remarqué une excellente connaissance moyenne des phénomènes géodynamiques à l'origine du *saigai* concerné, accompagnée

dans certains cas d'une connaissance des techniques de survie associées. L'expérience directe, bien que traumatisante dans de nombreux cas, est en tant qu'exercice pratique par excellence le moyen le plus efficace pour appréhender les éventuelles catastrophes à venir en permettant de réaliser en conditions réelles quels sont les comportements et les objets directement utiles lors de l'urgence. Le corps même joue alors le rôle de support de la mémoire et de l'expérience pour l'individu. Le cas de figure inverse a également été constaté sur le terrain, à travers les entretiens.

Lors d'une catastrophe, ceux qui la vivent acquièrent de l'expérience, s'ils survivent, et peuvent occasionnellement la transmettre à un autre individu et/ou un groupe : un enfant, des amis, des voisins, par l'intermédiaire de la transmission orale ou *via* un support matériel (photos, vidéos, etc). Dans ce cas, on dit qu'il y a transmission directe d'individu à individu et je parlerai d'expérience par procuration ou indirecte, pour le receveur. Si l'on considère les récits collectés sur le terrain auprès de gens ayant des proches qui ont subi une catastrophe au cours de leur vie, il semblerait que ce type de transmission ait pour particularité de présenter une dimension empathique qui confère au récit une réalité plus marquante, et qui a pour effet de faire réfléchir celui qui reçoit le récit en plus de favoriser la mémorisation. Une dimension émotionnelle se met en place lors de l'acte de parole et touche directement le ou les receveurs. Je ne mentionnerai pour ce cas qu'un seul exemple. Alors que je visionnais un film qui récapitulait l'histoire des catastrophes du Kansai et de Kyōto dans le centre de prévention des catastrophes de cette ville, j'écoutais parler deux petits enfants, âgés visiblement de 6 ou 7 ans au plus. L'un d'eux réagit immédiatement en présence de la photographie relativement connue de l'autoroute de Kōbe affaissée telle quelle sur son flanc. Il s'écria : « *Ah ! Hanshin-awaji !* » Ce nom fait référence au violent séisme de Kōbe, encore appelé séisme de Hanshin-Awaji du nom de la localité Hanshin, à Kōbe, et de l'île d'Awaji qui fait face à la ville. Cet évènement, survenu en 1995, était donc connu d'un enfant né plus de dix ans après la catastrophe. En les écoutant parler, j'ai pu comprendre que la grand-mère de ce petit garçon avait perdu sa maison lors de ce séisme. Il est donc manifeste que l'expérience de cette catastrophe, vécue par la grand-mère, a été transmise via le récit oral à l'enfant. Le fait qu'un enfant en si bas âge garde en mémoire, et de manière raisonnée, un évènement antérieur à sa naissance démontre que le récit possède une valeur de transmission (d'humain à humain) supérieure à la transmission impersonnelle, telle qu'on peut la retrouver à l'école ou dans les centres éducatifs.

Toutefois, ce schéma de transmission est en pratique plus rare que le deuxième : la transmission d'une expérience de la collectivité à l'individu. En effet, dans le domaine de la mémoire des catastrophes, la transmission orale n'est pas la règle générale. Parmi les personnes que j'ai pu interroger, près de 90 % d'entre elles m'ont confié n'avoir jamais parlé de souvenirs de catastrophes ou même de prévention avec leurs parents. Dans la plupart des cas de la faible part restante, il s'agissait d'une simple mise au point ou d'une mise en garde superficielle des parents contre des aléas naturels locaux et le nécessaire vital pour s'y préparer.

J'aborderai maintenant un autre aspect de l'assimilation de l'expérience par l'individu. Il s'agit d'une transmission de la collectivité à l'individu sur le mode impersonnel. Les moyens de transmission sont alors des structures ou des institutions mises en place par les collectivités locales et l'État. Dans les zones fortement urbanisées telles qu'Ōsaka, Kyōto et Nagoya, qui se trouvent juste au nord de la péninsule de Kii et dans l'ouest du Chūbu pour Nagoya, on trouve à l'origine de ce mode de transmission des centres de prévention des catastrophes[1] et des musées d'histoire. Les centres de prévention des catastrophes sont particulièrement intéressants, car en plus de diffuser largement l'expérience collective acquise et cristallisée par l'histoire des catastrophes, qui est un domaine de recherche à part entière au Japon, ils proposent aux personnes n'ayant jamais vécu de catastrophes d'en expérimenter directement le ressenti, à travers une mise en conditions et la reconstitution des grandes catastrophes du passé, à l'aide de la technologie de pointe et des données historiques précises. Ces reconstitutions ne sont que des ersatz plus ou moins bien réalisés d'évènements réels, mais ils ont néanmoins un impact pour le sujet qui expérimente, sur le plan cognitif, en parvenant à créer l'expérience de la peur et de la puissance des éléments. Le sujet va, par le biais de cette peur et de la méfiance engendrée, être plus enclin à réfléchir et à se prémunir contre ces potentiels dangers, sans toutefois subir le traumatisme engendré par l'expérience réelle. Si ces expériences de substitution ne permettent pas de développer d'aussi bons réflexes que chez les personnes ayant directement expérimenté la catastrophe socio-environnementale, elles permettent à l'individu de réaliser certaines vulnérabilités inhérentes à son environnement direct et familier, mais aussi de diminuer l'effet de surprise. L'objectif final de ces simulateurs est donc d'amortir l'impact de l'aléa sur l'individu préparé et, en multipliant l'expérience à l'échelle individuelle, de diminuer l'impact sur les collectivités. On peut dire qu'ils agissent sur le principe du vaccin : une version atténuée de la réalité pour préparer le corps et le mental. Les technologies du numérique et de la « réalité augmentée » permettent actuellement aux individus d'expérimenter un évènement qui s'est produit avant leur naissance, et de leur procurer un vécu intime qui va devenir un support de prévention à l'échelle individuelle. Je désignerais ce phénomène comme un retour d'expérience substitutionnel différé. Ces centres cumulent aussi le rôle de musées, en présentant une grande quantité de documents liés à un thème (l'histoire des catastrophes de la région ou d'une catastrophe en particulier) et des ateliers de recherche individuels ouverts au public proposant une grande quantité de documents ciblés et des outils de recherche. Ils remplissent donc une fonction de diffusion, d'expérimentation et d'autonomisation pour les individus. Les musées, bien que présentant une plus grande variété de documents, manquent d'un aspect expérimental et varié. C'est pour cette raison qu'ils touchent une couche de population plus restreinte. De plus, l'accès aux expositions permanentes est gratuit, et ces bâtiments font partie intégrante des mesures des pouvoirs publics afin d'améliorer ce qu'ils appellent « l'esprit de prévention » (bōsai ishiki 防災意識). Ils sont notamment usités, en convention avec ceux-ci, lors de certaines excursions scolaires, comme support de l'éducation à la prévention des catastrophes, et sont également

1. Communément appelés centres de prévention des catastrophes (*bōsai sentā* 防災センター), ils présentent divers ateliers découverte, généralement séparés en atelier d'exposition historique en photos et en images, atelier pédagogique où les visiteurs peuvent apprendre par le jeu et l'interaction, et salles de simulation où l'on peut expérimenter de façon reconstituée des catastrophes anonymes, voire certaines catastrophes du passé.

un espace d'échange entre professionnels de la prévention des catastrophes, parents et enfants.

Il existe d'autres supports de la mémoire et de l'histoire des catastrophes, telles que les stèles commémoratives, que l'on trouve en grand nombre dans la péninsule et qui ont fait l'objet d'un article (Beaussart Grégory, 2015 : 31-51), mais dont je ne parlerai pas ici. Le dernier grand type d'institution que je présenterai est le système scolaire. Tous les programmes, de l'école primaire au lycée, comportent nécessairement un ou plusieurs axes sur l'histoire et la prévention des catastrophes. Cette formation scolaire contient un axe théorique et un axe pratique, basés sur l'enseignement de l'histoire et des comportements à adopter en cas de catastrophe pour la partie théorique, et aussi sur l'expérimentation des séismes pour la partie pratique. Celle-ci est réalisée par le biais d'une camionnette, financée par le département, qui comprend un mécanisme de simulation très perfectionné et fait la tournée des écoles du département pour permettre aux élèves d'expérimenter les effets directs d'un séisme. La peur répétée sous forme de jeu est ainsi domptée et contrôlée. Ceci a pour objectif de favoriser des comportements raisonnés et efficaces si une catastrophe se produit. L'observation et la collecte de récits m'ont permis d'établir que l'influence de la réaction de l'autre n'est pas négligeable lors de l'occurrence d'aléas naturels. En particulier, dans de nombreux cas, la réaction humaine en chaîne est primordiale. Ainsi, quelques comportements de panique isolés causent très vite une panique générale, qui peut être la cause de beaucoup de morts. Aussi, la maîtrise de la peur chez l'individu contribue, par expansion et « contagion » bénéfique, à dominer la peur collective qui survient en cas de danger, et à favoriser l'ordre et les comportements corrects, ce qui permet de limiter le nombre potentiel de victimes.

7.2.3 Processus de retour d'expérience et révision des mesures de prévention

Au sein des localités rurales de la péninsule de Kii, mais aussi de manière généralisée dans celles de l'archipel, le processus de retour d'expérience se fait selon deux vitesses : dans la sphère administrative et dans la sphère publique, et s'articule autour de plusieurs types d'organismes bien spécifiques eux-mêmes diversifiés en plusieurs organes fonctionnels. Les rôles sont également partagés entre fonctionnaires et citoyens. Dans les communes de la côte sud-est de la péninsule, entre Kihoku et Kumano, les décisions concernant les mesures à mettre en place sont issues de discussions entre des volontaires citoyens et les fonctionnaires en charge de la section désignée responsable de la gestion des crises et des catastrophes[1]. Toutefois, toutes les décisions qui concernent les mesures d'urgence sont prises par un comité spécialisé issu des pouvoirs publics, généralement appelé « quartier général de gestion des crises » (*kiken kanri honbu* 危険管理本部), qui siège dans les locaux de la mairie pour la plupart des cas, ou du centre de prévention des catastrophes dans d'autres, comme c'est le cas pour la ville d'Owase. La particularité de ce système et ce qui fait sa spécificité, est d'intégrer à la conception des mesures de prévention des civils non spécialistes et des volontaires réunis en une association par quartier, généralement appelée « comité (ou organisation) autonome de prévention des sinistres » (*jishu bōsai-kai* 自主防災会ou *jishu bōsai soshiki* 自主防災組織). Ces associations ont alors le statut de collectivités autonomes (jichitai 自治体). Elles jouent le rôle de médiateurs entre les pouvoirs publics et les civils. Ils ne prennent pas part aux décisions d'urgence, mais bien à leur exécution, auprès des populations. En dehors du temps de crises, elles exercent notamment le rôle de porte parole des populations auprès des autorités. Les lieux désignés comme refuges, les itinéraires de secours pour fuir en cas de tsunami, tout cela est décidé en accord avec le comité autonome de prévention des sinistres. À Kushimoto, par exemple, à la pointe sud de la péninsule, une réhabilitation de l'itinéraire de secours de la commune en cas de tsunami, tombé en désuétude après le dernier grand tsunami de 1944 et qui menait des bas quartiers à la montagne, est actuellement en discussion entre l'administration locale et le comité autonome de prévention des sinistres. Cette décision fait suite à la large médiatisation de la triple catastrophe du 11 mars 2011, le grand séisme du Kantō-Tōhoku (Kantō-Tōhoku daishinsai 関東東北大震災), dont le tsunami consécutif a effrayé les populations bien au-delà des régions directement sinistrées. Ces structures socio-politiques suggèrent que l'une des clés de la prévention des catastrophes socio-environnementales réside dans l'organisation et la préparation des collectivités micro-locales (quartiers et villages) et locales (communes), qui sont elles-mêmes autonomes et participent activement à leur défense en parallèle des mesures prises au niveau gouvernemental.

Les outils mis en place pour bénéficier d'un retour d'expérience sont principalement l'enquête de terrain et l'analyse statistique, bien que les médias et les expositions permettent aussi de repenser les catastrophes en attirant l'attention du public sur leurs réalités. Les données sont collectées localement et stockées pour être traitées au niveau national, puis elles sont transformées en outils pratiques, tels que des cartes des risques socio-environnementaux (*hazādo mappu* ハザードマップ), disponibles gratuitement dans toutes les mairies, mais dont l'utilité réelle est aujourd'hui remise en question par certaines autorités japonaises. L'analyse statistique porte sur l'information brute relevée sur le terrain concernant les mesures de divers paramètres concernant à la fois l'aléa responsable, mais aussi les dégâts causés sur les structures humaines. Elles sont consignées dans des recueils sous forme de tableaux et présentés à des commissions qui vont en retirer une connaissance des aléas et de leur impact afin de concevoir des solutions technologiques et humaines permettant de les réduire. D'une manière générale et qui n'est pas propre au cas nippon, la révision des mesures de prévention se base sur une accumulation importante de données empiriques archivées et traitées statistiquement par des organismes spécialisés. Toutefois, l'une des spécificités japonaises réside dans le système de réunions intra et inter-localités — aspect central de la gestion des catastrophes qui ne sera pas traité ici — qui rassemblent élus, citoyens et acteurs intermédiaires dans une discussion autour des révisions de prévention déjà existantes.

1. Cette section peut porter diverses appellations selon les villes. Cela peut être chambre de gestion des risques (*kiken kanri-shitsu* 危険管理室), section de gestion des risques (*kiken kanri-bu* 危険管理部), chambre de gestion des crises (*kiki kanri-shitsu* 危機管理室), département de gestion des crises (*kiki kanri-ka* 危機管理課), bureau préposé aux mesures de prévention des catastrophes (*bōsai taisaku-kakari* 防災対策係), etc. Les appellations sont nombreuses mais toutes désignent le département interne à l'administration locale en charge de la conception et de l'exécution des mesures de prévention et d'urgence en cas de problème lié aux aléas naturels.

Pour conclure sur un constat lui-même issu d'un processus de retour d'expérience sur l'enquête de terrain, je signalerai que la gestion des aléas, du risque et des catastrophes socio-environnementaux comporte un paradoxe. En effet, l'imaginaire occidental a tendance à présenter le Japon comme un pays à la pointe des NTIC. On serait alors en droit de penser que la gestion des aléas et des catastrophes socio-environnementaux passe par une gestion tout-numérique ou tout-technologique. En réalité, mes observations ont montré que le recours à la technologie dans le Kansai et l'ouest du Chūbu ne se fait que dans un but de négociation avec les aléas naturels. C'est à dire qu'il se borne dans la plupart des cas à créer une zone tampon qui permet une réduction finale de l'impact par le gain de temps et la réduction des forces en action. Cependant, cette technologie de pointe ne prétend pas et ne peut prétendre régler le problème intégralement. Ce phénomène, encore plus prégnant dans les zones rurales, témoigne d'un rapport empirique des populations japonaises à leur environnement social et naturel, qu'elles connaissent bien. En effet, celles-ci ont compris que face à la violence indomptable des tsunamis, de certains typhons et des séismes, aucune technologie ne peut protéger intégralement la vie des gens à l'heure actuelle. C'est la leçon qu'ont enseignée, malgré eux, les infortunés disparus du tsunami du 11 mars 2011 qui, confiants en leurs infrastructures pensées pour parer « les plus grands tsunamis », ont négligé l'ampleur et la puissance de la vague qui dépassait les prévisions, et par conséquent n'ont pas ressenti la nécessité de fuir. Le relâchement de la vigilance et la dépendance à la technologie protectrice a causé la mort de près de 20 000 personnes, ce qui même pour un tsunami reste un record en terres nippones. La gestion des aléas socio-environnementaux, dans le quotidien des populations du Kansai et en particulier de la péninsule de Kii, semble donc être basée sur une négociation constante entre la prise de risque et la retenue dans chaque décision, dont les limites sont sans cesse remises en question à travers un processus répété de retour d'expérience, partagé entre pouvoirs publics et populations civiles. L'enjeu de cette négociation n'est pas de savoir si la catastrophe reviendra, mais quand et où elle frappera.

Bibliographie

Documents en langue occidentale

Crozier M.J., Glade T., « Landslide hazard and risk : Issues, Concepts and Approach », *Landslide hazard and risk*, Wiley, Chichester, 2005, p. 1-40.

Kuhn Thomas, *La structure des révolutions scientifiques*, Flammarion, Paris, 1983 [1967].

Langumier J., Revet S., « Une ethnographie des catastrophes est elle possible ? Coulées de boue et inondations au Venezuela et en France », *Cahiers d'anthropologie sociale*, n° 7, 2011, p. 77-90.

Langumier J., Girard V., « Risque et catastrophe. De l'enquête de terrain à la construction de l'objet », *Genèses*, n° 63, 2006, p. 128-142.

Oliver-Smith A., Hoffman S.M., *The angry earth : Disaster in anthropological perspective*, Routledge (Taylor and Francis), New York, 2000, p. 1-15.

Papathoma-Köhle M., Neuhäuser B., Ratzinger K., Wenzel H., Dominey-Howes D., « Elements at risk as a framework for assessing the vulnerability of communities to landslides », *Natural Hazards and Earth System Science*, 2007, 7 (6), p. 765-779. <hal-00299477>

Revet Sandrine, *Anthropologie d'une catastrophe — Les coulées de boue de 1999 sur le Littoral Central vénézuelien*, IHEAL, université de Paris III la Sorbonne, 2007, 368 p.

Revet Sandrine, « Le sens du désastre. Les multiples interprétations d'une catastrophe « naturelle » au Venezuela », *Terrain*, n° 54, 2010, p. 10-27.

Documents en langue japonaise

Beaussart Grégory, « Stèles funéraires, stèles commémoratives — Du support des victimes des catastrophes socio-environnementales et de leurs victimes dans la péninsule de kii (Bohi to kinenhi — Kii hantō ni okeru shakai-kankyōteki saigai to saigai giseisha no kioku wo sasaeru mono) », *Recherches sur la vie et la mort et l'éthique pratique (Shiseigaku-Ōyōrinrigaku kenkyū)*, vol. 20, université de Tōkyō – Centre d'étude de la vie et de la mort, Tōkyō, 2015, p. 31-51, <hal-01127687> (version française : <hal-01120857>).

Nomoto Kan.ichi, « Le discours environnemental dans les légendes (Densetsu kara no kankyōron) », *Environnement, région, mentalité — Les possibilités de l'ethnologie (Kankyô, chiiki, shinsei — Minzokugaku no kanôsei)*, Iwada Shoin, Tōkyō, 2004, p. 63-80.

Ōsaka-shikai jimukyoku chōsa-ka (éd.), « Rapport d'enquête : mesures de prévention des dégâts sismiques (Chōsa repōto : shinsai taisaku) », *Journal d'enquête (Chōsa jānaru)*, vol. 3, Ōsaka-shikai jimukyoku chōsa-ka, Ōsaka, 1975, p. 1-48.

Site de l'Agence météorologique japonaise : www.jma.go.jp

Remerciements

Je tiens à remercier ma femme, Aurore Deramond, qui a été un soutien indéfectible et capital pour ce travail, qui s'est déroulé dans des conditions particulièrement difficiles, et sans qui la communication, et cet article qui en découle, n'auraient peut être pas été portés à terme.
Je souhaiterais également remercier l'équipe organisatrice du colloque Georisque 2013, qui m'a permis de réaliser ma toute première communication dans un colloque scientifique.

8 Accepter ponctuellement et partiellement la submersion marine pour mieux en maîtriser les risques

Évolution de la perception et de la gestion des risques par les ingénieurs techniciens anglais et néerlandais

Servane Gueben-Venière
Docteur en géographie. École doctorale de géographie de Paris. Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne. U.M.R. 8586 Laboratoire PRODIG. 2, rue Valette, 75005 Paris
Post-doctorante. U.M.R. 8134 LATTS
14/20, bd Newton — Cité Descartes, 77 447 Marne-la-Vallée
servaneveniere@yahoo.fr

Résumé. — L'élévation du niveau marin déjà engagée, les incertitudes scientifiques sur son ampleur à venir ainsi que sur l'évolution des évènements tempétueux ont incité les gouvernements anglais et néerlandais à repenser la gestion du littoral de façon systémique et à promouvoir des solutions alternatives au rehaussement systématique des digues de défense contre la mer, dont l'innovation doit se lire dans la combinaison des techniques mises en œuvre. Cette démarche témoigne aussi d'une évolution de la façon d'envisager le littoral. Ce dernier n'est plus perçu par les gestionnaires, et en particulier par les ingénieurs, comme un simple trait de côte à maintenir à tout prix, mais comme une zone côtière et un système dynamique à envisager dans sa globalité et dans sa complexité. Deux exemples — la pointe de Selsey-Medmerry en Angleterre et Hondsbossche zeewering en Petten aux Pays-Bas — étudiés en 2010 et 2011 dans le cadre d'un travail de thèse, achevé en juillet 2014, illustreront ces propos.
Mots-clés. — littoral, représentations, gestion, ingénieurs, Angleterre, Pays-Bas.

Title. — *Partial Acceptance of Marine Submersion for Better Risk Control. Evolution of Perception and Risk Management by English and Dutch Technical Engineers*
Abstract. — *With sea-level rise already in evidence, uncertainties remaining as to both its scale and the severity of storms, British and Dutch governments have been left with no option but to reconsider their position on coastal management. Over the last decade, the coast has come to be thought of in a more systemic way in order to promote alternative solutions whose innovation must be understood in terms of the combination of techniques used. The coast is no longer conceived of by engineers as a simple coastline that should be maintained at all cost, but rather as a coastal system whose dynamics have to be viewed as both comprehensive and complex. It is hoped that by offering two case studies undertaken in 2010 and 2011 — Selsey-Medmerry in the UK and Hondsbossche zeewering en Petten in the Netherlands — we may better illustrate this proposition from within a framework of a doctoral thesis.*

Keywords. — *Coast, Representations, Coastal Management, Engineers, United-Kingdom, the Netherlands.*

Introduction

En 1953, les Pays-Bas ont vécu un véritable traumatisme tempétueux à l'origine de 1 836 décès, détruisant des dizaines de milliers d'habitations et inondant des centaines de milliers d'hectares. Depuis le Moyen-Âge cette région d'Europe a connu de nombreuses tempêtes réputées pour leur violence, mais celle de 1953 a définitivement marqué un tournant dans la façon des ingénieurs néerlandais de protéger leur pays. Les travaux gigantesques de lutte contre la mer, engagés dès 1955, ont constitué une démonstration hors normes des capacités techniques de ces derniers, leur conférant une réputation mondiale d'excellence en la matière. Si l'Angleterre a été touchée dans une moindre mesure par cette tempête, la côte sud du royaume — la plus densément peuplée — a pourtant également fait l'objet de nombreux aménagements durant la même période, consistant principalement en l'édification de digues de béton et ayant conduit à une très forte artificialisation de la côte. L'élévation du niveau marin déjà engagée, les incertitudes scientifiques sur son ampleur à venir ainsi que sur l'évolution des tempêtes auraient pu laisser croire en une intensification de ces techniques d'endiguement dite « dures », prônées par les corps d'ingénieurs, uniques acteurs de l'aménagement côtier pendant des décennies, voire des siècles pour les Pays-Bas. Mais c'est une toute autre attitude que ces techniciens adoptent et l'on peut noter une réelle évolution dans leur façon de se représenter le littoral qu'ils aménagent. Une des solutions innovantes consiste en effet à préconiser une acceptation partielle et ponctuelle de la submersion marine pour mieux en maîtriser les risques. Deux cas, étudiés dans le cadre d'une thèse achevée en 2014 (Gueben-Venière, 2014), illustreront ce constat. Cet article a ainsi pour objectif de répondre à la question suivante : quelles sont les logiques ayant conduit les ingénieurs techniciens à proposer cette nouvelle forme de gestion côtière pour les deux cas étudiés ?
D'un point de vue méthodologique, il s'appuie sur la réalisation de 72 entretiens semi-directifs approfondis (45 aux Pays-Bas et 27 en Angleterre) dont 13 sont directement reliés aux deux études de cas présentées. Parmi les 45 acteurs néerlandais, 18 avaient une formation initiale en génie civil et ont été regroupés dans la catégorie d'acteurs « ingénieurs », tandis que 27 avaient une autre formation et ont été regroupés

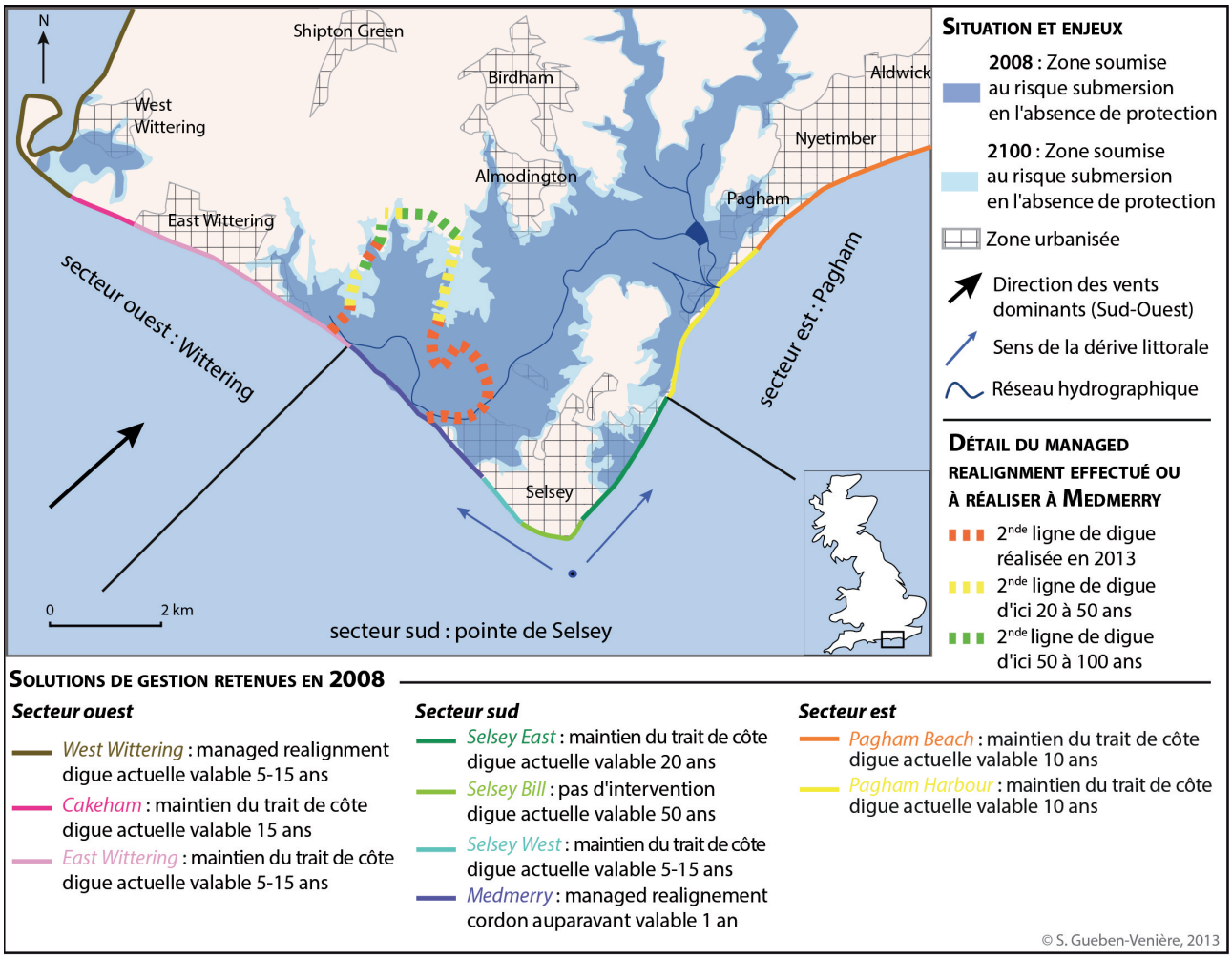


Fig. 1. — Solutions de gestion retenues à Selsey-Medmerry, Angleterre. Sources : Environment Agency, 2007, 2008; Université de Southampton : www.southampton.ac.uk ; Google Earth, 2013 ; entretiens réalisés en été 2011.

dans la catégorie « autres scientifiques ». De même en Angleterre, 10 « ingénieurs » et 17 « autres scientifiques » ont été interviewés. L'étude de cas et la réalisation d'entretiens semi-directifs avaient pour double objectif d'analyser les pratiques et discours des acteurs, et d'expliquer l'évolution des comportements observés. Par ailleurs, ces entretiens ont été complétés par l'utilisation de cartes mentales afin de spatialiser les représentations recueillies sur le littoral. Le détail de la méthode mise en œuvre pour la réalisation et l'analyse des cartes mentales est développé *infra*.

8.1 De l'équipement du trait de côte à la gestion du littoral

8.1.1 Passage d'une protection dite « dure » à une protection dite « souple » utilisant les dynamiques naturelles

Force est de constater, en Angleterre comme aux Pays-Bas, une évolution des pratiques de gestion des ingénieurs en charge de l'aménagement du littoral. C'est une réflexion générale qui s'est opérée depuis deux décennies autour de la notion de risque. En effet, il ne s'agit plus tant de contrer uniquement l'aléa submersion marine que de réfléchir à la meilleure façon de diminuer la vulnérabilité des populations littorales et par conséquent le risque de submersion marine, à moindre coût et dans le respect de la législation environnementale européenne. Ainsi, les solutions dites « souples » de protection du littoral utilisant les dynamiques naturelles sont de plus en plus recherchées et largement préférées aux solutions dites « dures », lorsque cela est possible.

Par le biais de conquêtes successives de terres sur la mer, Selsey, située sur la côte sud de l'Angleterre, à l'ouest de Portsmouth, a perdu son caractère insulaire au début du XIXe siècle. Aujourd'hui fortement menacée par la submersion marine, la pointe de Selsey fait l'objet d'un programme de protection complexe dont l'innovation doit se lire dans la combinaison des techniques mises en œuvre. Si certaines portions de digue seront renforcées de part et d'autre du cap — point de divergence de la dérive littorale locale — afin de protéger les 10 000 habitants présents, le cordon de galet protégeant Medmerry, plus à l'Ouest, a fait l'objet d'un réalignement contrôlé en janvier 2014, c'est-à-dire d'un retour maîtrisé du va-et-vient des marées. Cette solution est proposée par l'Agence de l'Environnement (Environment Agency) en charge de la gestion côtière depuis 2008, dont le rôle est comparable, dans une certaine mesure, à celui des Ponts et Chaussées français (figure 1).

Fig. 2. — Vue aérienne vers le nord de Hondsbossche zeewering en Petten, Pays-Bas. Source : Rijkswaterstaat, 2005.

Cette évolution des pratiques de gestion côtière se traduit principalement aux Pays-Bas par une politique de rechargement en sable des dunes, mais aussi au devant de certaines digues de mer en béton. C'est ce qui est envisagé à Hondsbossche zeewering en Petten (figure 2). Le sable sera prélevé au large en mer du Nord puis dispersé de façon à permettre une reconquête des dunes par la végétation. Si la question du volume de sable à déposer au droit de la digue fait encore l'objet de débats, la protection de l'arrière littoral par le rehaussement des digues en place est définitivement exclue, que ce soit par le *Rijkswaterstaat*, équivalent des Ponts et Chaussées français, ou par *Natuurmonumenten*, dont l'action reste comparable à celle du Conservatoire du littoral. Cette solution conduirait en effet à relever de 5 m des digues atteignant d'ores et déjà 15 m de haut, et à les élargir de 50 à 100 m, détruisant ainsi le pré salé existant en amont. Or ce milieu devenu saumâtre, voire salé par endroits, par infiltration d'eau de mer sous la digue, présente un intérêt écologique suffisant pour retenir toute l'attention de *Natuurmonumenten*, propriétaire d'une partie des polders protégés. Qu'il s'agisse des écologues de *Natuurmonumenten* ou des ingénieurs du *Rijkswaterstaat*, la question de la préservation de ce milieu est entendue. En revanche, le débat s'articule aujourd'hui autour de la rigidité des standards de débordement des digues, mis en œuvre dès 1955 lors de l'élaboration du plan Delta, et systématiquement réévalués depuis.

8.1.2 Une remise en question des standards de protection des digues aux Pays-Bas

Depuis la tempête de 1953, les Pays-Bas ont mis en œuvre un système de standards de sécurité drastique auquel doivent répondre les systèmes de protection côtière mis en place. Ces standards sont doubles. Il s'agit d'une part du standard de sécurité allant d'un risque sur 2 500 par an à un risque annuel sur 10 000 de submersion des terres (The Delta Commissie, 2008). Ces normes sont établies en fonction de la valeur économique globale des terres protégées en amont. D'autre part, le standard de débordement des digues. Ce dernier est actuellement de 1 l/s d'eau de mer par mètre linéaire de digue. Or, dans le cas de Hondsbossche zeewering en Petten, des ingénieurs et écologues de *Natuurmonumenten* proposent d'élargir cette norme et d'accepter ainsi une submersion de 10 l/s d'eau de mer par mètre linéaire de digue en cas de forte tempête, c'est-à-dire en cas de vents soufflant pendant douze heures consécutives et dépassant 120 km/h. Cette proposition ne remettrait pas pour autant en question le niveau général de sécurité actuel équivalant à un risque annuel de submersion marine sur 10 000 dans la zone étudiée. Cette solution, encore discutée aujourd'hui, présenterait un avantage à la fois économique et écologique. Accepter un standard de débordement ponctuel et partiel plus important reviendrait à recharger en sable le pied de digue dans une moindre quantité et par conséquent à diminuer les coûts de protection. Par ailleurs, un moindre volume de sable au devant de la digue maintiendrait les infiltrations d'eau de mer, à l'origine du développement d'un milieu saumâtre très riche écologiquement en arrière de l'ouvrage.

L'existence même d'un tel débat met en exergue une évolution dans la façon de concevoir la gestion du littoral. Il ne s'agit plus de protéger un trait de côte, mais bien de réfléchir à la protection d'un système littoral impliquant une réflexion à différentes échelles spatio-temporelles.

8.1.3 Une réflexion multi-scalaire envisagée à longs termes

Qu'il s'agisse de rapports nationaux (le plan Delta 2 aux Pays-Bas), régionaux (les Shoreline Management Plans en Grande-Bretagne) ou locaux, tous font valoir une approche par emboîtement d'échelles spatio-temporelles. En 1990, l'Angleterre a été le premier pays européen à mettre en œuvre des plans de gestion du littoral calqués sur les unités et sous-unités sédimentaires présentes. Définies comme le « cycle complet de sédimentation, incluant les sources de production sédimentaire, la mobilisation des sédiments, leur transport et enfin leur dépôt » (EUROSION, 2004), les cellules sédimentaires sont désormais systématiquement prises en compte dans les projets anglais et néerlandais. Ainsi les conséquences en aval de la dérive littorale locale d'un équipement ponctuel sont plus facilement appréhendées. Cette vision dynamique du littoral suppose également la prise en compte d'un volume littoral évoluant selon différents pas de temps. Les composantes spatiales se déclinent du mètre jusqu'à la dizaine de kilomètres pour la fondation côtière, plus connue sous le nom de *kustfundament* en néerlandais et dont la limite en mer atteint les 20 mètres de profondeur. Les composantes temporelles regroupent les mouvements tidaux journaliers jusqu'aux cycles d'évolution dunaire de plusieurs décennies. Au-delà de la conception dynamique du littoral, les politiques de gestion du littoral affichent une volonté de se projeter à long terme (2100 pour l'Angleterre) et à très long terme (jusqu'en 2200 pour les Pays-Bas). L'avant-propos du dernier rapport de la commission Delta précise ainsi : *« we have been asked to come up with recommendations, not because a disaster has occurred, but rather to avoid it »* (The Delta Commissie, 2008 : 7).

Plusieurs raisons justifient cette évolution. Des raisons d'ordres économique, environnemental et bien sûr physique — liées aux incertitudes scientifiques relatives à l'ampleur à venir de l'élévation du niveau marin et à l'évolution potentielle des tempêtes — que l'on peut qualifier de facteurs déclencheurs.

8.2 Incertitudes scientifiques, contexte économique fragile et promotion environnementale : trois facteurs déclencheurs de cette évolution

8.2.1 L'adoption de solutions flexibles et réversibles : une réponse à l'incertain

Les données marégraphiques — bien que relativement peu précises car inégalement distribuées à la surface terrestre et difficiles à analyser (Paskoff, 2001) — ont indiqué une élévation moyenne du niveau marin de 15 cm pour le XXe siècle, soit une élévation moyenne annuelle comprise entre 1 et 2 mm par an. L'altimétrie spatiale, mise en œuvre depuis 1992 grâce au satellite Topex-Poséïdon, a montré un renforcement de ces valeurs : + 1,8 mm par an entre 1961 et 2003 et + 3,1 mm par an entre 1993 et 2003 (Paskoff, 2001). Cette accélération devrait se poursuivre au cours du siècle comme l'indiquent les données fournies par le GIEC. Cependant, de nombreuses incertitudes scientifiques demeurent quant à l'ampleur de cette accélération et orientent les décideurs vers la prudence. L'Angleterre comme les Pays-Bas ont ainsi choisi de retenir les fourchettes supérieures des projections émises par l'IPCC 2014 (+ 1 m d'ici 2100 pour l'Angleterre et + 1,3 m d'ici 2100 pour les Pays-Bas). À ceci s'ajoute une question laissée sans réponse aujourd'hui : l'évolution à venir des tempêtes, par ailleurs connues pour leur violence depuis le Moyen-Âge dans cette région d'Europe. D'autres facteurs, relatifs à la vulnérabilité des populations littorales, doivent également être pris en compte. Les deux pays subissent en effet un affaissement naturel continu particulièrement marqué dans le delta zélandais et au sud-est de l'Angleterre, auquel s'ajoute une subsidence d'origine anthropique liée à la conquête de terres sur la mer pendant près d'un millénaire. Le drainage des polders, incontournable pour en préserver les usages, entraîne une aération puis une oxydation du sol constitué presque exclusivement de tourbe. Par conséquent, du CO2 se dégage de la terre et la surface du sol s'affaisse de quelques millimètres et jusqu'à un centimètre par an dans certaines zones. Ainsi, depuis le Moyen-Âge, les tourbières néerlandaises se sont affaissées de 2 à 3 m (Huisman, 2006). Ce phénomène pourrait s'accentuer de 0,5 m dans certaines zones d'ici 2050 et d'une dizaine de centimètres pour le même horizon en Angleterre. Sachant que 10 % de la population anglaise et galloise (ce qui correspond à 50 % du PIB) étaient déjà considérés comme étant vulnérables à la submersion marine en 2008, cette tendance ne fera que s'intensifier dans les décennies à venir, qui plus est dans un contexte de littoralisation croissante. Les enjeux humains et économiques sont particulièrement importants pour les Pays-Bas dont les deux tiers du territoire se situent sous le niveau marin : 65 % du PIB néerlandais est d'ores et déjà vulnérables à la submersion marine, et près de 70 % de la population le sera à l'horizon 2100.

L'ensemble de ces considérations conduisent les deux pays à opter, lorsque cela est possible et acceptable humainement, pour des solutions dites « douces », c'est-à-dire flexibles et adaptées à la dynamique naturelle de la côte, afin de maintenir leur caractère réversible en cas d'échec ou de non atteinte des objectifs de gestion fixés. En effet, la construction systématique de digues de béton, ou leur rehaussement le cas échéant, n'offre que peu de marche de manœuvre, et contribue à renforcer l'affaissement des sols et par conséquent l'élévation relative du niveau marin. Par ailleurs, les incertitudes scientifiques mentionnées ci-dessus incitent les aménageurs à une plus grande réserve. Une fois les politiques d'aménagement définies, les équipements correspondants se doivent d'être efficaces sur une période maximale de vingt ans. Autrement dit, un équipement qui pourrait avoir des conséquences au-delà de cette durée, n'est généralement pas retenu. Un ingénieur néerlandais rencontré en entretien expliquait ainsi l'importance de « faire des choix que l'on ne regrettera pas dans les décennies à venir et sur lesquels on pourra revenir[1] ».

Enfin, il s'avère que ces nouvelles solutions de gestion peuvent être moins coûteuses que les solutions classiques. Ces économies potentielles prennent tout leur sens dans un contexte économique particulièrement fragile.

8.2.2 Une augmentation des coûts de protection classique

La crise économique sévissant en Europe depuis 2008 a forcé les gouvernements anglais et néerlandais à réajuster

1. Extrait de l'entretien d'un ingénieur néerlandais, enregistré en juillet 2010.

les budgets alloués à l'aménagement du littoral. Bien que la protection des personnes et des biens relève d'une obligation légale aux Pays-Bas et que le budget annuel consacré à la protection côtière soit considérable dans ce pays (2,8 milliards d'euros par an contre £ 550 millions en Angleterre pour la gestion côtière et fluviale), le budget du projet de protection de Hondsbossche Zewering en Petten a été abaissé de 90 millions d'euros. De même, les budgets réservés à la protection du littoral ont également baissé en Angleterre. Or le confortement classique des digues est de plus en plus coûteux pour les sociétés et s'avère souvent plus onéreux qu'une solution d'acceptation ponctuelle et partielle de submersion dans les espaces faiblement habités. Ainsi, le rehaussement du cordon de galets ou la construction d'une digue au-devant de Medmerry représenterait un coût de £ 80 millions contre £ 28 millions par « *managed realigment* ». De même, le rehaussement de la digue coûterait environ 300 millions d'euros pour le cas néerlandais contre 200 millions d'euros environ par rechargement en sable et élévation du standard de débordement à 10 l/s d'eau de mer par mètre linéaire de digue. En revanche, pour le cas de la pointe de Selsey, abritant plus de 10 000 habitants, le rehaussement de la ligne de digue coûterait trois fois moins cher qu'une solution de « *managed realignment* », qui supposerait la relocalisation complète des personnes et des biens.

Ces considérations économiques représentent certes un argument de taille en faveur de la recherche et la mise en œuvre de nouvelles solutions de gestion, mais ces dernières offrent également l'avantage de répondre aux exigences d'une législation environnementale européenne contraignante et de promouvoir une qualité du cadre de vie, tant recherchée par les deux pays.

8.2.3 La promotion environnementale des nouvelles solutions de protection côtière

L'Angleterre, le pays de Galles comme les Pays-Bas sont soumis aux directives « Oiseaux » (1979) et « Habitats » (1992). Au « sommet de la Terre » de Rio de Janeiro, ces directives ont été entérinées par la mise en œuvre du réseau de sites écologiques NATURA 2000 — ce dernier ayant pour objectif d'assurer la survie des espèces et habitats particulièrement menacés, à forts enjeux de conservation en Europe. Cette législation européenne est particulièrement contraignante pour les deux pays. Pour des raisons d'ordre démographique et par conséquent alimentaire, nombre de marais et de milieux humides ont été asséchés puis poldérisés au cours des derniers siècles afin d'être mis en culture (Goeldner-Gianella, 2013). Par ailleurs, la perspective d'une accélération de l'élévation du niveau marin renforcera le phénomène de « coastal squeeze » d'ores et déjà particulièrement engagé en Angleterre. Ce dernier correspond à un rétrécissement de la zone intertidale, résultant de la combinaison de la remontée du niveau marin et de la présence de barrières permanentes de protection, empêchant la migration de la zone intertidale, et par conséquent des prés salés, plus en amont vers les terres (Haslett, 2008). Ainsi est-il nécessaire mais aussi de plus en plus difficile de conserver, restaurer ou recréer les habitats intertidaux perdus. Pourtant, ces contraintes législatives sont finalement envisagées comme autant « d'opportunités » à saisir pour façonner sur le long terme un littoral sûr et attractif. Avec près de 410 hab./km^2, la défense et la préservation d'une qualité de vie optimale reste une priorité aux Pays-Bas. Une démarche explicitement affichée dès l'avant-propos du rapport de la dernière Commission Delta : « *The fundamental question, central to this report, is "How can we ensure that future generations will continue to find our country an attractive place in which to live and work, to invest and take their leisure ?"* » (The Delta Commission, 2008 : 7).

De son côté, l'Angleterre « doit » beaucoup à la vague d'industrialisation précoce dont elle a fait l'objet. Dans son ouvrage *In Nature We Trust*, C.-F. Mathis explique de quelle façon et avec quelle intensité les paysages anglais et par conséquent le « rapport de l'homme à la nature » ont été bouleversés durant l'ère industrielle. La rapidité et la violence avec lesquelles le pays s'est industrialisé et urbanisé a développé parallèlement de nouvelles angoisses et posé la question de la pollution et de la disparition des milieux : « les contemporains s'accordent pour déceler une aggravation terrible de l'état des rivières à partir des années 1830-1840, tandis que les cieux semblent s'obscurcir sous les vastes nuages de fumée de charbon émis par les industries que par les foyers domestiques » (Mathis, 2010 : 265). Quelques années plus tard, le *Times* déplore qu'il ne « reste [que] quelques rares espaces verts en Angleterre » (Saturday Review, 25 août 1977, in Mathis, 2010:289). C'est pourquoi, avant la fin du XIXe siècle, le pays se préoccupe fortement des conséquences de l'industrialisation pour les générations futures : «We have to consider, not ourselves only, but the interests of those who will come after us» (R. Somervell, 1977 : 13, in Mathis, 2010 : 339). Ce bagage culturel est encore aujourd'hui bien présent dans les esprits. Plusieurs personnes interviewées en 2011 — ingénieurs, écologues ou autres scientifiques — ont mentionné de façon spontanée l'histoire industrielle du pays comme étant à l'origine d'une attention accrue portée à la protection et la préservation des milieux dits naturels. La qualité de l'environnement, qu'il s'agisse des Pays-Bas ou de l'Angleterre, constitue désormais un objectif prioritaire et fait parallèlement l'objet d'une promotion que l'on pourrait presque qualifier de « nouvel objet marketing ».

Le contexte socio-économique et législatif explique pour une grande part les fondements de cette évolution. Cependant, la réalisation d'entretiens approfondis a permis de mettre en évidence d'autres facteurs d'orientation secondaire mais néanmoins essentiels pour étayer les tendances constatées. Il s'agit principalement de l'amélioration des connaissances scientifiques du système dynamique littoral et de leur diffusion, de l'évolution de la formation des ingénieurs et du développement de la concertation pluridisciplinaire désormais incontournable.

8.3 Représentations et évolution sociales : facteurs d'orientation secondaire

8.3.1 Amélioration et diffusion des connaissances sur le système littoral, évolution de la formation des futurs ingénieurs techniciens

La compréhension du fonctionnement littoral s'est réellement développée à partir des années 1940 pour ce qui concerne l'Europe, principalement grâce aux travaux d'A. Guilcher (Corlay, 1995). La recherche sur la dynamique littorale n'a depuis cessé d'évoluer et de se moderniser. Si l'amélioration

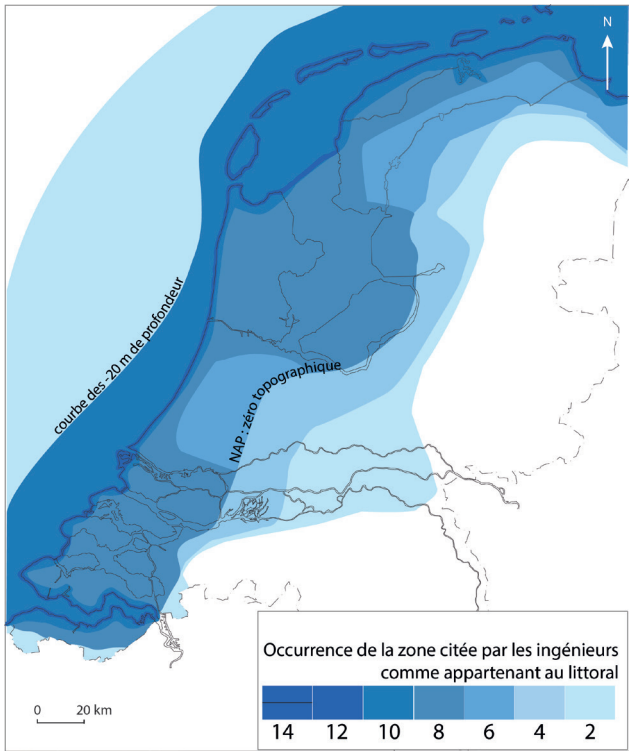


Fig. 3. — Les limites du littoral néerlandais selon les ingénieurs du génie civil. NAP : Normal Amsterdam Peil (Niveau normal d'Amsterdam).

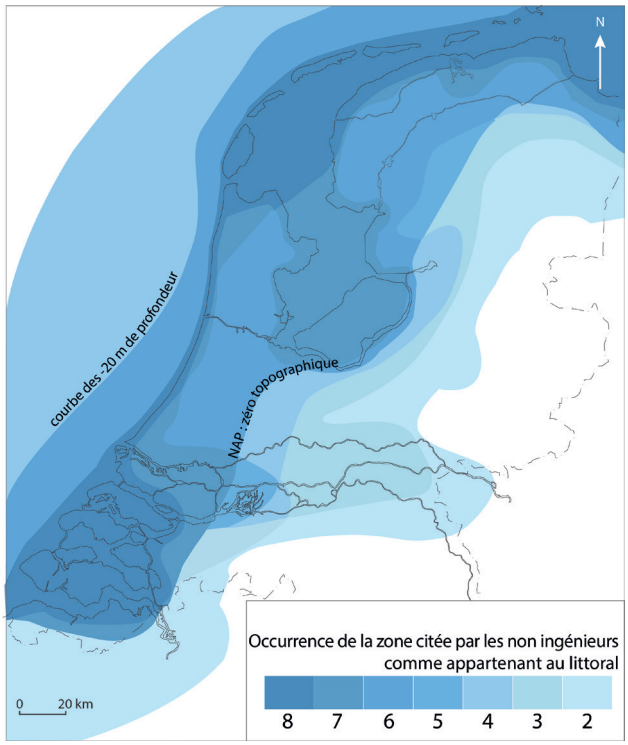


Fig. 4. — Les limites du littoral néerlandais selon d'autres scientifiques. NAP : Normal Amsterdam Peil (Niveau normal d'Amsterdam).

des connaissances scientifiques sur le système littoral est évidemment fondamentale dans l'élaboration de politique de gestion côtière, la diffusion de ces connaissances auprès des aménageurs n'en est pas moins importante. Or ce n'est véritablement que depuis les années 1990 que la circulation des connaissances entre universitaires et aménageurs a eu lieu[1]. Il est, par exemple, de moins en moins rare aux Pays-Bas de cumuler une fonction d'enseignant-chercheur à l'université à mi-temps et d'ingénieur de recherche dans un bureau d'études, tel Deltares, le reste du temps. Cette souplesse professionnelle permet de combiner enseignement, recherche fondamentale et recherche appliquée, et par conséquent de favoriser la circulation des connaissances acquises. En Angleterre, depuis quelques années, certaines universités, telle l'université de Plymouth, proposent des formations courtes de quelques jours sur un point précis de connaissances, à des personnes déjà diplômées et en activité souhaitant se tenir informées et comprendre les nouvelles avancées scientifiques. Plusieurs ingénieurs rencontrés à l'Agence de l'Environnement ont déjà suivi au moins une fois ces formations intensives aussi appelées *Knowledge Transfer Partnership (KTP)*, dont le format est particulièrement adapté aux besoins des ingénieurs en exercice.

Par ailleurs, la formation elle-même des ingénieurs est en pleine évolution. Des universités réputées pour leur très haut niveau technique telle TUDelft, commencent à proposer des options « environnement » dans les cursus de formation. L'objectif affiché est de permettre aux futurs ingénieurs d'être en mesure de comprendre le langage et le raisonnement des écologues, des géographes et d'autres scientifiques avec lesquels ils seront amenés à travailler. Autrement dit, la formation technique des ingénieurs du génie civil reste fondamentale, mais n'est plus suffisante : la technique ne peut, à elle seule, répondre à tous les problèmes de gestion côtière. C'est pourquoi la concertation pluridisciplinaire est désormais incontournable et largement mise en avant par le concept de GIZC (Gestion intégrée des zones côtières).

8.3.2 Une concertation pluridisciplinaire désormais incontournable

Lancée dès le début des années 1970, lorsque les États-Unis votent pour le « Coastal Zone Management Act », l'idée de concertation a lentement mûri dans les esprits avant de se révéler incontournable parmi les éléments à prendre en compte pour assurer une gestion côtière réussie. Cet effort de concertation est particulièrement visible aux Pays-Bas et à un échelon national de décision. En effet, la composition de la première commission Delta, formée en 1955, deux ans après la tempête meurtrière de 1953, et dont le but était de tracer les lignes directrices de la politique côtière à mettre en œuvre, a fortement évolué. Composée exclusivement d'ingénieurs, cette première commission Delta, avait pour objectif d'assurer la sécurité en repoussant la mer au-delà des barrages. La deuxième commission Delta, établie en 2008, a adopté une tout autre attitude et défend l'idée de vivre avec l'eau pour mieux s'en protéger. Cette commission est pluridisciplinaire et se compose d'ingénieurs certes, mais aussi d'économistes, d'une architecte paysagiste, d'un écologue, d'un climatologue, d'un aménageur urbain (Gueben-Venière, 2011b).

1. Propos avancés d'après une vingtaine d'entretiens réalisés en Angleterre et aux Pays-Bas auprès d'universitaires et d'ingénieurs ayant une expérience professionnelle supérieure à vingt ans.

Cette pluridisciplinarité s'observe également en Angleterre au sein de l'Agence de l'Environnement qui tend depuis quelques années à élargir son recrutement. En effet, l'institution n'embauche plus uniquement des ingénieurs techniciens, experts des structures, mais de plus en plus de géomorphologues et d'écologues, dont les connaissances scientifiques concernent plus largement le fonctionnement dynamique du littoral. Ainsi, une géomorphologue embauchée en 1999 par l'Agence de l'Environnement, me confiait lors d'un entretien :

> The issue of not necessarily defending, not necessarily building something, has become much more common to discuss. But when I joined in 1999, it was very, very new.

Son collègue, chargé de mission, a ajouté :

> We've just gone through quite a big change I think, because we had the older, old men usually, engineers who had been here for a very long time, before the Environment Agency, when it was still the River's Board. Many have recently left because of cuts, and so the older generation of engineers have gone[1].

Ces propos, qui ont par ailleurs été confirmés par d'autres entretiens qualitatifs, témoignent d'un changement profond dans la façon d'appréhender la gestion du littoral. Le savoir technique est nécessaire et fondamental, mais il ne présente un intérêt que s'il est associé à des connaissances sur le système dynamique littoral et à une certaine capacité au dialogue avec le public. En effet, les décisions ne sont plus imposées par les ingénieurs techniciens, mais discutées dans une certaine mesure et tout au moins expliquées au public.

8.3.3 Une influence certaine sur les représentations que les ingénieurs se font de la notion même de *littoral*

L'ensemble de ces facteurs contribue à modeler les représentations que les ingénieurs se font de leur propre rôle ainsi que du littoral qu'ils aménagent. L'utilisation complémentaire de cartes mentales lors des entretiens menés auprès d'ingénieurs et d'autres scientifiques néerlandais a permis de vérifier cette hypothèse. À partir d'un fond de carte, il a été demandé à chaque interviewé de représenter le littoral. Autrement dit, la question sous-jacente consistait à délimiter cet espace entre terre et mer. Les cartes mentales recueillies ont été intégrées dans un SIG et numérisées une à une. Une grille de résolution adéquate a ensuite été appliquée à la superposition des dessins, révélant l'occurrence des zones citées comme appartenant au littoral. Cette technique a ainsi permis d'établir une carte mentale « moyenne » des représentations partagées par le groupe professionnel des ingénieurs, puis de comparer cette dernière à la carte mentale « moyenne » produite par les écologues et autres scientifiques (figures 3 et 4) (Gueben-Venière, 2011).
Il ressort de cette comparaison deux éléments majeurs. D'une part, la majorité des ingénieurs ne considère plus seulement un trait de côte, mais une zone littorale terrestre (12 sur 14) et un volume sous-marin (10 sur 14). D'autre part, les caractéristiques du littoral des ingénieurs se rapprochent de celles des autres scientifiques interrogés. L'opposition entre une vision linéaire et statique du littoral, longtemps imputée aux ingénieurs, et celle, plus large et systémique, généralement attribuée aux autres scientifiques, s'estompe.

1. Extrait de l'entretien réalisé auprès d'une géomorphologue et d'une personne chargée de mission à L'Environment Agency, août 2011.

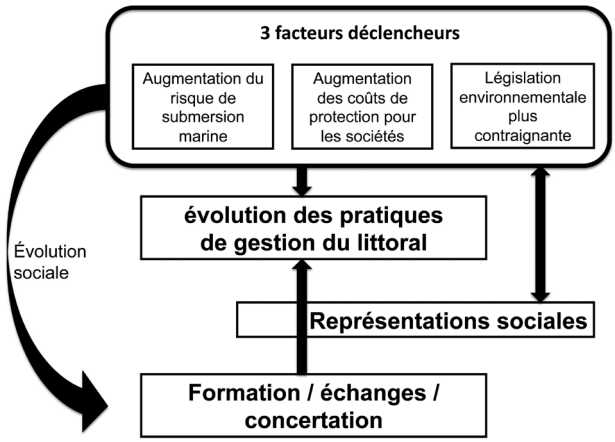


Fig. 5. — Schéma de synthèse des relations de cause à effet expliquant l'évolution des pratiques de gestion côtière observées.

Conclusion

Après avoir protégé les populations littorales pendant des décennies, voire des siècles, en repoussant toujours plus loin la mer au-delà des digues et des barrages, les ingénieurs, experts des structures, modifient leurs pratiques de gestion côtière. Ces nouvelles pratiques, plus souples et plus prudentes, résultent d'une combinaison de facteurs liés au contexte physique et économique. Pourtant, seuls, ces facteurs déclencheurs ne sauraient expliquer entièrement le cheminement qui conduit aujourd'hui les aménageurs — et en particulier les ingénieurs — à envisager partiellement et ponctuellement la submersion marine comme solution de gestion à part entière. Une profonde réflexion autour de la notion d'environnement a modifié les besoins et les attentes de protection côtière. Par conséquent, la diffusion des connaissances scientifiques et la façon d'envisager et d'enseigner l'aménagement du littoral ont évolué, et en parallèle, les représentations que les ingénieurs se font du littoral qu'ils aménagent (figure 5).

Bibliographie

Bertrand F., Goeldner L., « Les côtes à polders, les fondements humains de la poldérisation », *L'information géographique*, 2, 1999, p. 78-86.

Corlay J.-P., « Géographie sociale, géographie du littoral », *Norois*, 165, 1995, p. 247-265.

Driessen P., Leroy P., van Vierssen W., *From Climate Change to Social Change*, International Books (Ed.), Utrecht, 2010, 177 p.

Dronkers, J., *Coastal zone adaptation to sea-level rise : a sediment strategy*, Proceedings Littoral Conference, London, 2010, p. 1-8.

EA (Environment Agency), *Planning for the future. Pagham to East Head, Coastal defence strategy*, 2007, 19 p.

EA (Environment Agency), *Planning for the future. Pagham to East Head, Draft coastal defence strategy,* 2008, 23 p.

EA (Environment Agency), *Adaptating to Climate Change : Advice for Flood & Coastal Erosion Risks Management Authorities*, 2011, 31 p.

EEA (European Environment Agency), *Vulnerability and adaptation to climate change in Europe*, EEA Technical Report, 7, 2005, 56 p.

EEA (European Environment Agency), *Climate change : the cost of inaction and the cost of adaptation,* EEA Technical Report, 13, 2007, 72 p.

EUROSION, *Vivre avec l'érosion côtière en Europe : espaces et sédiments pour un développement durable. Lignes directrices pour la gestion de l'érosion côtière en Europe : les enseignements,* Rapport pour la direction générale de l'environnement de la Commission européenne, 2004, 40 p.

French P. W., « The changing nature of, and approaches to, UK coastal management at the start of the twenty-first century », *The Geographical Journal*, 170, 2, June 2004, p. 116-125.

Goeldner-Gianella L., *Dépoldériser en Europe occidentale. Pour une géographie et une gestion intégrées du littoral*, PUS, collection « Territoires en mouvements », Paris, 2013, 350 p.

Gueben-Venière S., « How can mental maps, applied to the coast environment, help in collecting and analyzing spatial representations ? », *Echogéo*, 17, 2011, p. 7.

Gueben-Venière S., *Des ingénieurs de plus en plus verts ? Évolution du regard des ingénieurs en charge de la gestion du littoral néerlandais*, Poster scientifique, École doctorale de géographie de Paris, 2011b : `http://echogeo.revues.org/12585?file=1`.

Gueben-Venière S., *Vers une gestion renouvelée du littoral nord-ouest européen : des ingénieurs néerlandais, anglais et français de plus en plus « verts » ?,* Thèse pour l'obtention du doctorat de géographie, université Paris 1 Panthéon-Sorbonne, 2014, 466 p.

Gueben-Venière S., Goeldner-Gianella L., Decroix G., « Face au changement climatique, les polders des Pays-Bas ont-ils un avenir ? », *Grande Europe, La Documentation Française,* 19, 2010, p. 1-11.

Haslett S.K., *Coastal Systems*, Routledge, London, 2008, 218 p.

Huisman P., *Water in the Netherlands. Managing checks and balances,* Netherlands Hydrological Society (Éd.), Utrecht, 2006, 132 p.

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), « The Physical Science Basis », *IPCC Working Group I Contribution to AR5*, 2013, 1535 p.

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), « Impacts, Adaptation, and Vulnerability », *IPCC Working Group II Contribution to AR5*, 2014.

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), « Mitigation of Climate Change », *IPCC, Working Group III Contribution to AR5*, 2014 b.

Mathis C.-F., *In Nature We Trust. Les paysages anglais à l'ère industrielle*, PUPS, Paris, 2010, 681 p.

Paskoff R., *L'élévation du niveau de la mer et les espaces côtiers*, Institut océanographique, Gap, 2001, 190 p.

The Delta Commissie, *The Delta Commissie Report*, 2008, 110 p.

Sites Internet

Site de l'Environment Agency : `www.environment-agency.gov.uk` ;

Site du Rijskwaterstaat : `www.rijkswaterstaat.nl/en/`

9 Perception de la cartographie hydrogéomorphologique en France et perspectives d'évolution

Antonin Montané[1, 2] & **Freddy Vinet**[2]
1. BURGEAP, Agroparc — 940 route de l'Aérodrome — BP 51260, 84911 Avignon Cedex 9, France
2. — Centre IRD de Montpellier — UMR GRED Université Paul-Valéry Montpellier 3 et IRD — BP 64501 34394 Montpellier cedex 5.
antonin.montane@gmail.com
freddy.vinet@univ-montp3.fr

Résumé. — Afin de répondre à l'enjeu croissant de la connaissance de l'aléa inondation, les pouvoirs publics demandèrent dès les années 1990 de réaliser des Atlas de Zones Inondables (AZI). La méthode hydrogéomorphologique fut employée pour la production de ces cartographies, essentiellement dans le sud de la France, où elle fait aujourd'hui partie des données incontournables pour la connaissance de l'aléa inondation. Dans cet article, nous proposons d'analyser l'utilisation de la cartographie hydrogéomorphologique dans les AZI en France. Dans l'optique de comprendre les disparités d'utilisation, nous verrons quels sont, selon les services techniques de l'État, les atouts et les faiblesses de la méthode. Enfin, dans un contexte où la connaissance des crues extrêmes prend une place plus importante, nous nous demanderons si la cartographie hydrogéomorphologique permet de communiquer efficacement sur celles-ci.
Mots-clés. — Inondations, hydrogéomorphologie, risque, France, AZI.

Title. — *Perception of Hydrogeomorphological Mapping in France and Outlook*
Abstract. — To meet the growing challenge of the flood hazard knowledge, the French government started in the 1990s to make Atlas des Zones Inondables (Flood Zone Atlas). The hydrogeomorphological method was used for the production of these maps, mostly in the South of France, where it is now one of indispensable data for the understanding of the hazard flood. In this article, we propose to analyze the use of the hydrogeomorphological mapping in the Atlas des Zones Inondables in France. In order to understand the differences of use, we will see what are, according to the technical services of the State the strengths and weaknesses of the method. Finally, in a context where knowledge of extreme floods takes a more important place, we ask whether the hydrogeomorphological mapping allows communicating effectively on them.
Keywords. — *Flood, Hydrogeomorphology, Hazard, France, AZI.*

9.1 Implantation de la cartographie hydrogéomorphologique en France

9.1.1 Historique du développement de la cartographie hydrogéomorphologique en France

Dès 1984, des universitaires, des bureaux d'étude privés et le CETE Méditerranée (Masson, 1983) profitent de la réflexion apportée par la mise en place des Plans d'exposition aux risques (PER) pour réaliser des cartographies de zones inondables par approche hydrogéomorphologique. Ces cartographies gardent encore un aspect expérimental et ne sont pas utilisées par les services techniques de l'État. En 1996, la parution du guide méthodologique de « cartographie des zones inondables par approche hydrogéomorphologique » (Masson *et al.*, 1996) apporte une réponse directe au besoin croissant de connaissance de l'aléa inondation, à un coût plus faible que les modélisation hydrauliques qui ont montré des limites lors d'évènements extrêmes dans le Sud de la France (Garry *et al.*, 2002).
Après plus de 10 ans d'utilisation de la cartographie hydrogéomorphologique en France, un bilan devient nécessaire. Cette méthode est-elle utilisée de manière homogène sur le territoire ? Quels sont les points positifs et négatifs que relèvent les services techniques de l'État ?

9.1.2 Les Atlas de Zones Inondables (AZI) hydrogéomorphologiques : des approches différentes, mais un objectif commun

Les AZI qui utilisent une interprétation géomorphologique sont difficiles à référencer en France, en raison de l'hétérogénéité de leurs formes et de leurs modes de diffusions. La figure 1 présente une agrégation des différentes cartographies d'aléa inondation disponible en France, issues de la plateforme « Cartorisque » (`http://cartorisque.prim.net/`) et des plateformes de cartographies interactives des DREAL, « CARMEN ».
La majorité des AZI produits en France n'utilisent pas l'hydrogéomorphologie, comme l'ont déjà noté (Chemitte, 2008) et (Gerin, 2011), mais en priorité des cartographies de crues historiques ou de crues centennales modélisées. Du point de vue de la répartition spatiale des AZI hydrogéomorphologiques, seules cinq régions présentent une couverture complète ou quasi-complète qui révèle une réelle appropriation de l'hydrogéomorphologie de la part des DREAL concernées.
Les régions PACA, Languedoc-Roussillon et Corse correspondent au secteur d'influence du Centre d'étude technique de l'équipement (CÉTÉ) Méditerranée, basé à Aix-en-Provence et où par l'impulsion de Marcel Masson (Masson, 1983 ; Masson

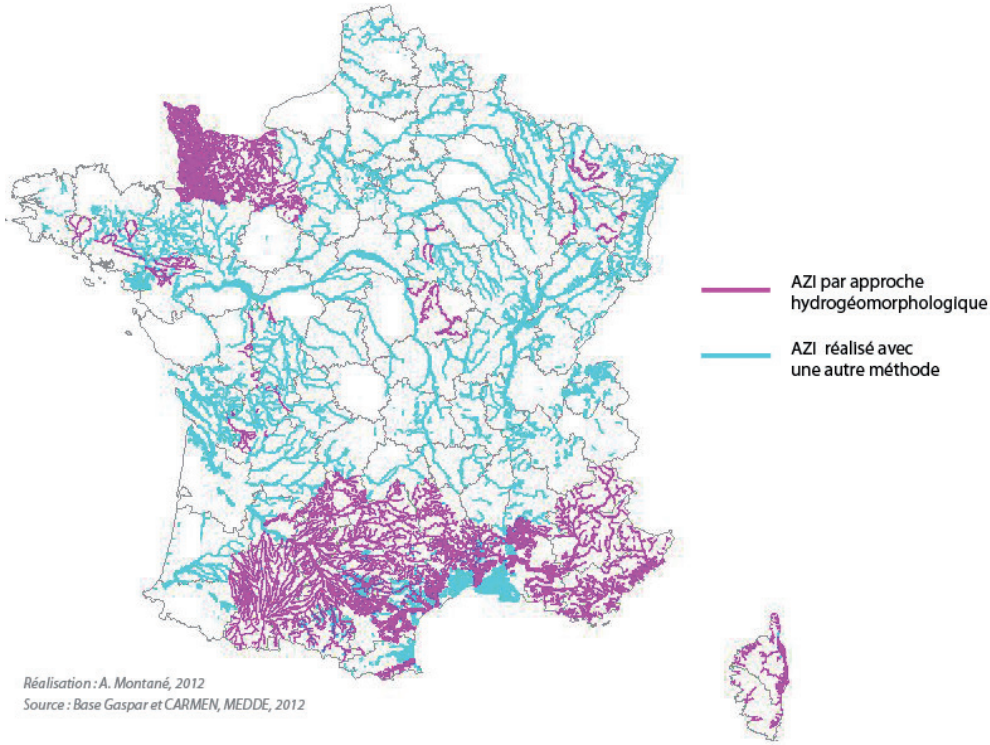


Fig. 1. — Cartographie des AZI hydrogéomorphologiques en France.

et al., 1996), la méthode fut systématiquement intégrée à la cartographie des zones inondables (figure 2a). La région PACA concrétisa cette appropriation de la méthode en publiant en 2007 le guide méthodologique intitulé « L'approche hydrogéomorphologique en milieux méditerranéens. Une méthode de détermination des zones inondables. »

Les deux autres régions où l'hydrogéomorphologie est largement utilisée dans le cadre des AZI sont les régions Midi-Pyrénées et Basse-Normandie. Les méthodes employées diffèrent légèrement de celles utilisées en Méditerranée par l'utilisation plus importante des données de crues historiques. Dans la région Midi-Pyrénées, c'est la méthode développée par des géographes de l'université Toulouse-le-Mirail (Lambert *et al.*, 2001) qui sert de référence pour la réalisation de la Cartographie informative des zones inondables (CIZI), permettant une homogénéité des rendus cartographiques jusque dans les PPRI fondés sur ces mêmes CIZI (Préfecture de la région Midi-Pyrénées, 2008) (figure 2b). Cette combinaison entre des données historiques et géomorphologique fut favorisée par l'abondance de repères de Plus Hautes Eaux Connues (PHEC) dans la région.

Dans la région Basse-Normandie figure 2c, la concomitance entre la volonté de l'État de cartographier les zones inondables (Ministère de l'Équipement, des Transports et du Tourisme, 1994) et la survenue des inondations de 1995 justifient la réalisation d'Atlas de zones inondables, comme nous le confiait Hubert Clapet, de la DREAL Basse-Normandie, lors d'un entretien (Montané, 2014). Ceux-ci utilisent des informations historiques dans les zones à enjeux et sont complétés par une cartographie hydrogéomorphologique dans les zones plus rurales. Cette méthode dont la définition débute dès 1995 (DIREN Basse-Normandie, 1996 ; 2006) donne à la région Basse-Normandie une des couverture d'AZI les plus complètes de France.

Il existe également des AZI hydrogéomorphologiques réalisés ponctuellement en France, comme par exemple dans la Vienne (figure 3a) (DDE de la Vienne, 2009), en Saône-et-Loire (figure 3b) (DIREN de Bourgogne, 2009), ainsi qu'en outre-mer (figure 3c) (DIREN de Guadeloupe, 2008). Ces AZI sont le plus souvent réalisés avec les mêmes méthodes et légendes que pour les cours d'eau méditerranéens ; leur réalisation est confiée à des géomorphologues travaillant habituellement dans le sud de la France.

L'hétérogénéité des rendus cartographiques laisse toutefois apparaître un point commun, à savoir la représentation de l'extension maximale des zones inondables, qui est l'atout majeur de la méthode.

9.1.3 Hydrogéomorphologie et Plan de Prévention des Risques d'Inondation (PPRI)

L'AZI constitue une étape préalable précieuse pour la réalisation de PPRI car ils permettent d'obtenir une information cartographique homogène des zones inondables sur un bassin versant entier. Ceux-ci sont souvent cités dans les rapports de présentation des PPRI comme une information de base pour la réalisation technique de l'étude.

L'état des lieux de l'utilisation de la cartographie hydrogéomorphologique pour la réalisation des PPRI a fait l'objet d'un article fondé sur l'analyse de 282 rapports de PPRI (Montané *et al.*, 2015). L'article met en évidence que l'existence d'un AZI hydrogéomorphologique a un impact significatif sur sa prise en compte dans le PPRI. Par ailleurs, une autre particularité des régions dans lesquelles l'hydrogéomorphologie s'est bien développée est l'importance des crues historiques récentes qui apportent une légitimité à la méthode.

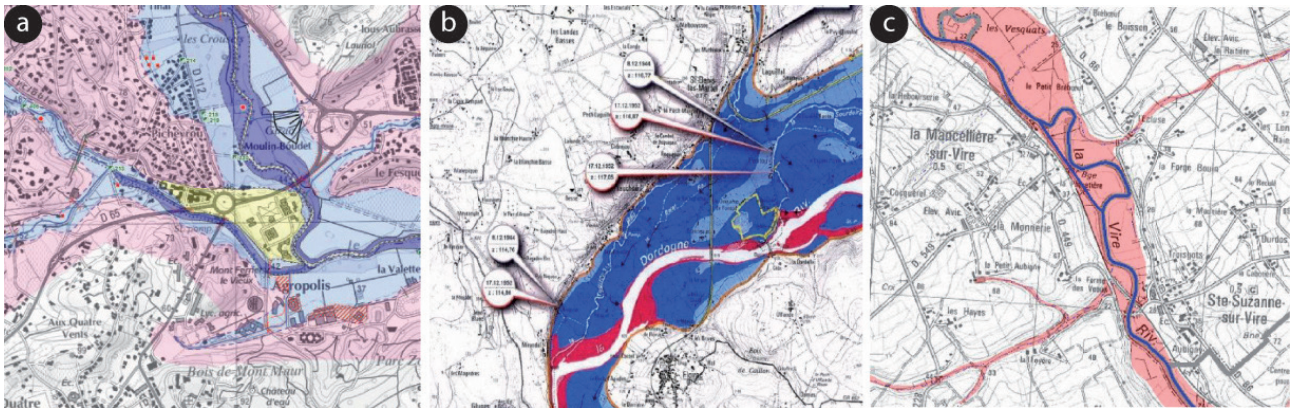


Fig. 2. — Extraits de cartographies hydrogéomorphologiques en Languedoc-Roussillon (a), Midi-Pyrénées (b) et Basse-Normandie (c).

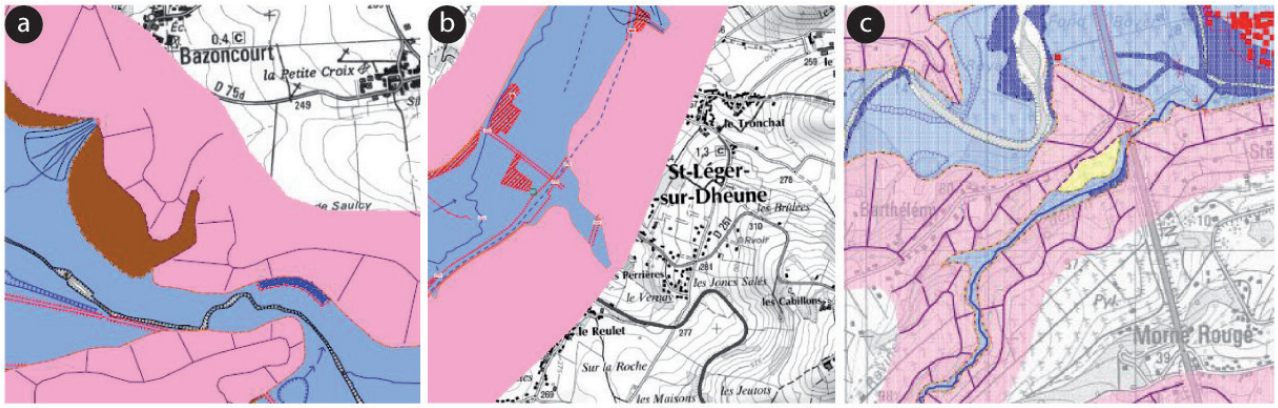


Fig. 3. — Extraits de cartographies hydrogéomorphologiques dans la Vienne (a), la Saône-et-Loire (b) et Guadeloupe (c).

9.2 Perception de la cartographie hydrogéomorphologique

9.2.1 La vision des services déconcentrés de l'État

Comment les services de l'État qui doivent gérer le risque inondation en France perçoivent-ils la cartographie hydrogéomorphologique ? C'est ce que cherche à résoudre deux questionnaires envoyés à des employés des directions départementales des territoires (DDT) qui ont notamment la charge d'élaborer les PPRI et les directions régionales de l'environnement, de l'aménagement et du logement (DREAL) qui ont la charge de réaliser les AZI. 28 représentants de DDT et 13 de différentes DREAL ont accepté de répondre.

Les atouts de la cartographie hydrogéomorphologique

À la question « quels-sont selon vous les principaux atouts de la cartographie hydrogéomorphologique ? », les réponses sont diverses. L'élément le plus souvent cité correspond au fait que la cartographie hydrogéomorphologique délimite l'extension maximale de la zone inondable, ce qui permet d'avoir une vision d'ensemble de la plaine alluviale. Le coût faible de la méthode en comparaison à un modèle hydraulique est également largement mis en avant, tout comme sa capacité à couvrir rapidement un linéaire de cours d'eau important de manière fiable. Un autre point cité est l'aspect naturaliste de la méthode qui permet de communiquer efficacement avec des élus et la population via des visites de terrain ; le terme « réalité du terrain » est mentionné plusieurs fois. Du point de vue de son utilisation dans un cadre règlementaire, les services de l'État considèrent la méthode comme une étape préalable utile voire indispensable à la réalisation d'un modèle hydraulique car elle permet de combler les lacunes en informations hydrologiques sur les petits bassins, elle décrit le fonctionnement des cours d'eau et elle « […] permet d'avoir un œil critique sur les résultats ». Cette méthode qui fut, comme certaines personnes interrogées l'admettent « imposée par circulaire » pour des raisons de budget, fut validée lors de crues récentes qui ont marqué leur territoire. Les trois exemples cités sont ceux des crues de 1995 en Basse-Normandie, la crue du Madon (affluent de la Moselle) en octobre 2006 et la crue de novembre 1999 sur le Thoré (Tarn). Ils apportent un complément aux autres comparaisons entre des crues historiques et une cartographie hydrogéomorphologique cantonnées aux cours d'eau méditerranéens, comme l'Ouvèze (Arnaud-Fassetta *et al.*, 1993), l'Aude (Ballais *et al.*, 2011, 2007; Chave, 2002) ou le Gardon (Ballais, 2006).

À la question de la correspondance entre la crue de faible probabilité demandée par la phase de cartographie de la « Directive Inondation » (U.E., 2007), les personnes interrogées se sont montrées plutôt confiantes, mais nuançant leur propos en raison de l'absence de quantification de l'aléa.

Les limites de la cartographie hydrogéomorphologique

« Pas de quantification de l'aléa. » C'est la principale critique à l'encontre de la cartographie hydrogéomorphologique. Si l'absence d'informations sur les vitesses d'écoulement est regrettée, c'est bien le manque de hauteurs d'eau et

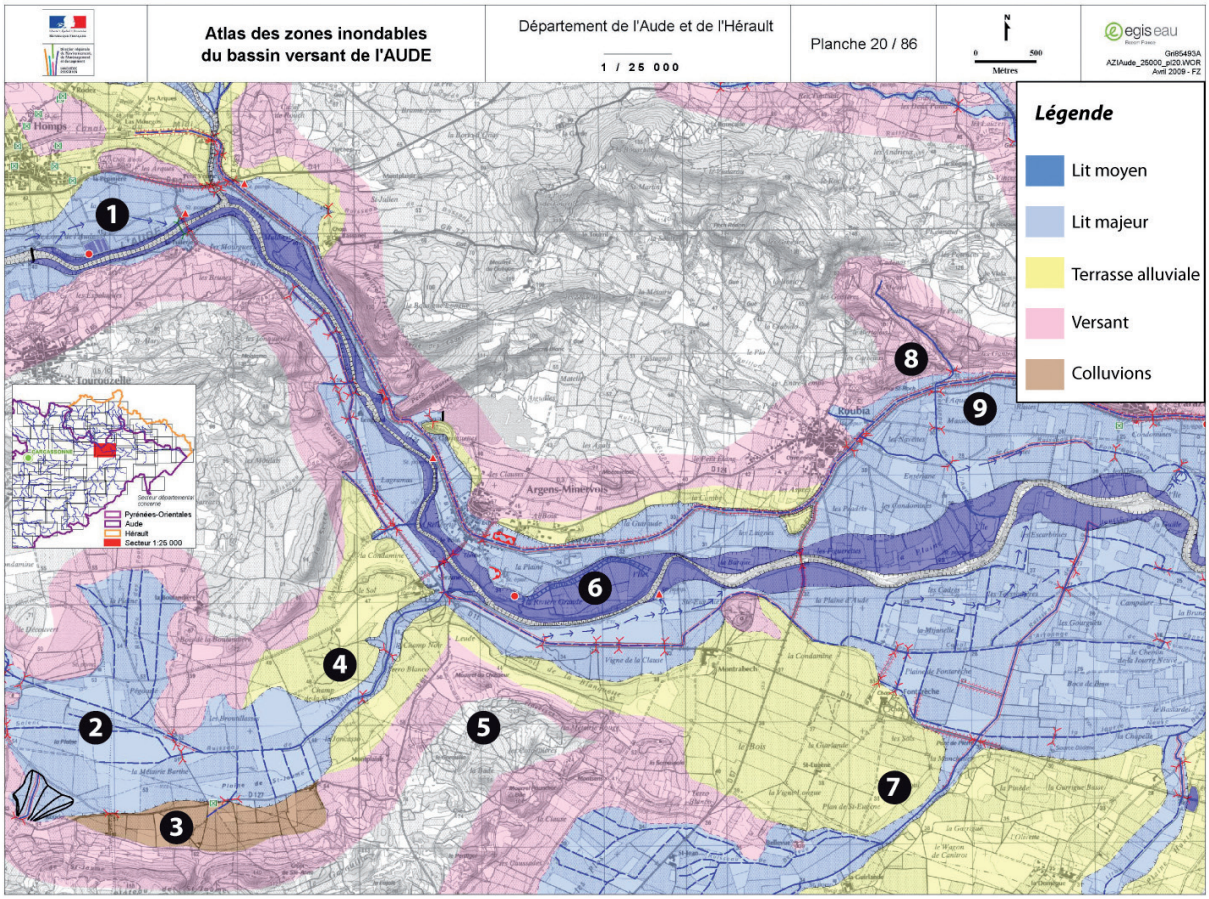


Fig. 4. — Extrait de l'AZI de l'Aude.

surtout d'une cote de crue qui est fustigé. Une cartographie hydrogéomorphologique est considérée comme « fragile juridiquement » dès que celle-ci doit servir dans le cadre de l'élaboration d'un PPRI, notamment vis-à-vis de l'application du R 111-2 du code de l'urbanisme. Certains tempèrent leurs propos en ajoutant que « la modélisation hydraulique ne (leur) paraît pas pour autant supérieure dans sa représentation de l'aléa inondation mais (leur) permet une instruction plus aisée des actes d'urbanisme ». Pour expliquer cette méfiance à l'encontre de l'hydrogéomorphologie, Hubert Clapet insiste sur « l'effet rassurant des résultats chiffrés », ajoutant que « même si la précision n'est pas meilleure, un calcul hydraulique pèse souvent plus lourd dans les esprits » (Clapet, 2013).

Si la capacité de la méthode à pouvoir bien communiquer auprès du grand public est évoquée dans les points positifs, certains considèrent que « la crue hydrogéomorphologique dépasse souvent l'entendement des habitants et des élus », mettant ainsi en exergue le fait qu'il existe des doutes sur l'inondabilité de certaines portions de lits majeurs. Lorsqu'elle est utilisée règlementairement l'hydrogéomorphologie peut en effet être sujette à controverses, comme ce fut le cas en 2005 lorsque le sénateur du Calvados Ambroise Dupont posa une question au sujet de la valeur règlementaire des AZI de la région Basse-Normandie[1]. Les zones inondables cartographiées par les AZI hydrogéomorphologiques sont qualifiés de « tout à fait improbables », faisant l'écho du mécontentement des maires du Calvados quant à l'intégration dans les PPRI de la cartographie hydrogéomorphologique par les services instructeurs de l'État. Ce contentieux fut réglé en appliquant plus de nuances dans les zonages réglementaires (Clapet, 2013).

La cartographie hydrogéomorphologique est considérée par certains comme inadaptée pour des cours d'eau à crue lente et compliquée dans les secteurs très anthropisés. Le caractère subjectif de la cartographie est mis en avant ; une interprétation peut varier d'un géomorphologue à l'autre.

9.2.2 Communication sur les crues extrêmes : une sémiologie graphique inadaptée

Yves Guermond (1998) définit la carte comme « […] l'aboutissement du travail du géographe, sa manière d'exposer son point de vue au public […] ». Il précise par ailleurs que si des « […] cartes thématiques ont besoin pour être comprises, d'un commentaire […], c'est qu'elles sont mal faites » ou qu'elles ne sont pas adaptées au public qui les lit. Il paraît légitime de se demander si la sémiologie graphique d'une cartographie hydrogéomorphologique est bien adaptée au message qu'elle veut faire transmettre, à savoir la localisation des zones inondables.

Afin de vérifier l'efficacité de la cartographie hydrogéomorphologique, 108 personnes ont répondu à un questionnaire par Internet. Les personnes ayant répondu ne sont pas

1. Sénat. Séance du 8 mars 2005 (compte rendu intégral des débats). Question de Serge Lepeletier. www.senat.fr/seances/s200503/s20050308/s20050308002.html#Q8.

représentatives du grand public (majorité d'étudiants en géographie) puisque deux tiers des personnes interrogées disent avoir déjà réalisé une carte, 44 % ont suivi une formation en géomorphologie et 46 % connaissent la cartographie hydrogéomorphologique des zones inondables. La principale question posée se réfère à une cartographie hydrogéomorphologique issue de l'AZI de l'Aude (DIREN Languedoc-Roussillon, 2010).

La cartographie n'est volontairement pas accompagnée d'un commentaire précisant l'inondabilité ou non de chacune des unités géomorphologiques. La question posée est la suivante : « D'après la figure ci-dessus, quel(s) point(s) se trouve(nt) en zone inondable ? » Selon la cartographie hydrogéomorphologique, seuls les point situés dans le lit majeur et dans le lit moyen sont inondables (teintes bleues). Les réponses correctes sont 1, 2, 6 et 9. Seules 52 personnes sur 108 ont répondu correctement. Les principales erreurs proviennent les terrasses alluviales (points 4 et 7) que respectivement 31 et 33 personnes considèrent comme inondable. Les colluvions (point 3) sont considérés comme inondables par 20 personnes et les versants (point 8) par et les versants par 8 personnes.

Ces résultats mettent en avant que la cartographie hydrogéomorphologique présentée à un public sans fournir d'explications peut être source de confusions, en particulier en raison des unités de l'encaissant (colluvions, terrasses et versants). Cette cartographie s'adresse véritablement à un public disposant d'une expertise en géomorphologie et dans l'aléa inondation, mais la communication autour de l'aléa inondation est rendue plus délicate. Comme le précisent De Golbéry et Orhan (1996), la puissance d'une carte « découle du principe central que la carte doit être conçue comme une image », or ce n'est pas le cas de la cartographie hydrogéomorphologique.

Conclusion

La cartographie hydrogéomorphologique des zones inondables est une méthode qui est choisie et adaptée par différentes DREAL en France pour la réalisation de leurs AZI. L'approche a été choisie pour son rendement (linéaire/coût) et sa fiabilité éprouvée lors d'inondations historiques.

Certains points négatifs sont relevés. Il existe tout d'abord des réticences quant à son utilisation dans les PPRI en raison de l'absence de quantification de l'aléa et notamment des cotes de crue. Une sémiologie graphique pas nécessairement adaptée à la communication autour des crues extrêmes est également préjudiciable. Enfin, cette cartographie ne peut pas être utilisée en l'état pour la cartographie de la crue de faible probabilité demandée par la « Directive Inondation » (U.E., 2007) en raison de l'absence de hauteur d'eau.

La pérennité de l'interprétation hydrogéomorphologique se trouve également dans la réalisation de cartes de hauteurs d'eau correspondant à l'extension des zones inondables. Celles-ci permettraient de mettre en valeur le développement des modèles numériques de terrain Lidar, de mieux correspondre aux attentes de la réglementation et de fournir un outil de communication efficace sur les crues extrêmes.

Bibliographie

Arnaud-Fassetta G., Ballais J.-L., Béguin E., Jorda M., Meffre J.C., Provensal M., Roditis J.C., Suanez S., « La crue de l'Ouvèze à Vaison-la-Romaine (22 septembre 1992). Ses effets morphodynamiques, sa place dans le fonctionnement d'un géosystème anthropisé », *Revue de géomorphologie Dynamique*, 1993, p. 34-48.

Ballais J.-L., « Le Gardon d'Anduze et la méthode hydrogéomorphologique », *Études de Géographie Physique*, 2006, p. 5-12.

Ballais J.-L., Chave S., Delorme-Laurent V., Esposito C., « Hydrogéomorphologie et inondabilité », *Géographie physique et Quaternaire*, 61, 2007, p. 75-84.

Ballais J.-L., Chave S., Dupont N., Masson É., Penven M.-J., « La méthode hydrogéomorphologique de détermination des zones inondables », *Physio-Géo*, 2011, 168 p.

Chave S., « Pertinence de la cartographie hydrogéomorphologique dans l'approche des inondations rares à exceptionnelles : exemples de sept bassins fluviaux dans les Corbières et le Minervois », *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, n° 8, 2002, p. 297-306.

Chemitte J., *Adoption des technologies de l'information géographique et gestion des connaissances dans les organisations. Application à l'industrie de l'assurance pour la gestion des risques naturels*, thèse de doctorat de l'École des Mines de Paris, 2008, 267 p.

DDE (Direction Départementale des Territoires) de la Vienne, *Atlas des Zones Inondables de 27 cours d'eau dans le département de la Vienne par analyse hydrogéomorphologique*, 2009, 32 p.

De Golbéry L., Orhan J.-M., « Sémiologie graphique : le retour ? », *Actes de la 17e conférence cartographique internationale (Barcelone, 3-9 septembre 1995)*, *Comité français de Cartographie*, 1996, p. 148-152.

DIREN (Direction Régionale de l'Environnement) Basse-Normandie, *Atlas des zones inondables du Calvados, de l'Orne et de la Manche*, 1996, 21p.

DIREN (Direction Régionale de l'Environnement) de Basse-Normandie, *L'Atlas des Zones Inondables de Basse-Normandie*, 2006.

DIREN (Direction Régionale de l'environnement) de Bourgogne, *Atlas des zones inondables de la Petite Grosne et autres rivières, Rapport d'étude*, 2009, 24 p.

DIREN (Direction Régionale de l'Environnement) de Guadeloupe, *AZI des cours d'eau de la Basse Terre par des techniques d'analyses hydrogéomorphologiques*, 2008, 126 p.

DIREN (Direction Régionale de l'Environnement) Languedoc-Roussillon, *Cartographie des zones inondable par analyse hydrogéomorphologique. Atlas des zones inondables sur le bassin versant de l'Aude*, 2010.

DIREN (Direction Régionale de l'Environnement) PACA, *L'approche hydrogéomorphologique en milieux*

méditerranéens. Une méthode de détermination des zones inondables, 2007.

Garry G., Ballais J.-L., Masson M., « La place de l'hydrogéomorphologie dans les études d'inondation en France méditerranéenne », *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, n° 8, 2002, p. 5-15.

Gerin S., *Une démarche évaluative des Plans de Prévention des Risques dans le contexte de l'assurance des catastrophes naturelles : Contribution au changement de l'action publique de prévention*, thèse de doctorat de l'université Paris 7, 2011, 296 p.

Guermond Y., « Mappemonde dans l'ère post-moderne », *Mappemonde*, n° 86, 1998, p. 42.

Lambert C., Gazelle M., Gholami M., « La cartographie informative des zones inondables. L'exemple de Midi-Pyrénées », Actes du colloque « *Au chevet d'un catastrophe*», Presses universitaires de Perpignan, Perpignan, 2001, p. 147-164.

Masson M., *Essai de cartographie des champs d'inondation par photo-interprétation*, rapport technique, CÉTÉ Méditerranée, 1983, 47 p.

Masson M., Garry G., Ballais J.-L., *Cartographie des zones inondables. Approche hydrogéomorphologique*, Guide méthodologique, Éditions villes et territoires, Paris, 1996, 100 p.

Ministère de l'Équipement, des Transports et du Tourisme, « Circuaire du 24 janvier 1994 relative à la prévention des inondations et à la gestion des zones inondables », *Journal officiel de la République française*, 1994.

Montané A., *L'approche hydrogéomorphologique : pratiques, valorisation et développement d'une méthode de cartographie des zones inondables*, thèse de doctorat de l'université Montpellier 3, 2014, 280 p.

Montané A., Vinet F., Buffin-Bélanger T., Vento O., Masson M., « Cartographie hydrogéomorphologique: émergence de pratiques règlementaires en France », *Physio-Géo*, vol. 9, 2015, p. 37-60.

Préfecture de la région Midi-Pyrénées, *Document de référence des services de l'État en région Midi-Pyrénées pour l'évaluation du risque inondation et l'élaboration des PPRI*, 2008, 32 p.

U.E. (Union Européenne), *Directive cadre européenne du Parlement européen et du Conseil, relative à l'évaluation et à la gestion des risques d'inondation, 2007/60/CE*, 2007.

10 Vers une approche collaborative entre assureurs et acteurs publics pour l'amélioration des connaissances sur les dégâts causés par les inondations

David Bourguignon
MRN et U.M.R. GRED — 1 rue Jules Lefebvre, 75431 Paris Cedex 09
david.bourguignon@live.fr

Résumé. — L'étude du coût des inondations passées, indépendamment de leur intensité, est essentielle pour permettre aux parties prenantes, publiques et privées, d'améliorer la gestion et la prévention des risques. Les retours d'expérience sur les dommages économiques sont notamment utiles aux gestionnaires de bassin pour justifier leurs mesures de protection ou aux assureurs pour évaluer l'exposition réelle de leurs portefeuilles.
Pourtant seuls les évènements les plus meurtriers, coûteux ou médiatiques sont étudiés de manière approfondie. Même si elles sont rares, il existe des informations et des données sur des évènements moins dommageables, plus locaux et fréquents ; mais elles sont difficiles à exploiter car produites par des acteurs très variés qui communiquent peu entre eux et agissent sur des périmètres différents.
En exploitant les concepts de périmètres spatio-temporels des évènements naturels, l'évaluation des dommages causés par les inondations et les notions d'observation territoriale, l'objectif de la recherche est de favoriser le partage d'informations entre assureurs et acteurs locaux pour améliorer les connaissances sur la sinistralité et proposer des pistes d'amélioration dans la prévention des inondations.
Mots-clés. — Inondation, évènement catastrophique, assurance, dommages, données de sinistralité, partenariats public-privé, observation des territoires.

Abstract. — *Cost analysis of past flood events, regardless of their intensity, is essential for public and private stakeholders to improve the management and risk prevention. For instance, past events lessons learnt allow floodplain managers to justify their preventive measures or insurers to comfort by experience the assessments made on their portfolio's exposure.*
Yet only the most deadly, costly or mediatized floods are being studied. Few in number, information and data are available on less damaging events which are more local and frequent, but they are difficult to use because they are produced by a variety of actors who do not communicate with each other and have different scopes of actions.
The aim of the research is to promote the sharing of knowledge between public and private stakeholders to better understand the origin of the claims and propose new ways to improve the flood prevention.

Keywords. — *Flood, Disaster Event, Insurance, Losses, Claims Data, Public-Private Partnership, Territorial Observatories.*

Introduction

Les études sur le coût des inondations sont rares, en particulier dans le domaine de la géographie des risques. Ce défaut de connaissance est principalement dû à l'absence de communication régulière ou au manque de complémentarité entre assureurs, pouvoirs publics, collectivités, communauté scientifique, etc. (Bourrelier, 1997).
Pourtant, dans le secteur de l'assurance, le projet de réforme du système d'indemnisation des catastrophes naturelles (CatNat) et les nouvelles exigences européennes en termes de solvabilité[1] ne permettent plus de se contenter d'une connaissance sommaire des niveaux d'exposition aux risques naturels et aux inondations notamment. Par ailleurs, les acteurs publics tels que les gestionnaires de bassin ont également besoin de connaissances plus fines sur les dommages, dans le cas d'analyses coûts-bénéfices (ACB) par exemple, pour justifier des projets de prévention.
L'étude[2] a suscité un contexte favorable, puisque le ministère de l'Écologie du Développement Durable et de l'Énergie (MEDDE) à travers la Direction Générale de la Prévention des Risques (DGPR), plusieurs gestionnaires de bassin et un échantillon de sociétés d'assurances formant ensemble une part représentative du marché national ont accepté de fournir certaines de leurs données. Cette forme de collaboration originale permet d'expérimenter sur quelques territoires une méthode de reconstitution des évènements inondations d'un passé récent pour mieux caractériser l'origine des coûts.
La méthodologie employée consiste dans un premier temps à collecter, décrire et uniformiser les données fournies par les acteurs publics ; dans un second temps à exploiter ces données sur des terrains d'études sous forme de réunions d'échanges et de la conduite d'un questionnaire ; et dans un troisième temps à valoriser les résultats sur la caractérisation des évènements (coûts moyens par nature d'aléas, facteurs explicatifs de sinistralité) et l'évaluation de l'impact des outils de prévention (structurels et non-structurels) sur l'exposition du territoire.

1. Réforme règlementaire européenne « Solvency II », adoptée en mars 2009.
2. Thèse CIFRE encadrée par l'association Mission des sociétés d'assurance pour la connaissance et la prévention des risques naturels (MRN) et l'université Montpellier 3.

La phase d'expérimentation sur un échantillon de territoires tests n'étant pas achevée, l'objet de cette communication est de dresser un premier panorama des informations existantes sur la sinistralité inondation en France puis de détailler et de discuter de la méthodologie employée pour enrichir cette connaissance.

10.1 Que savent les assureurs sur la sinistralité due aux inondations ?

10.1.1 Éléments de contexte

Le régime français d'indemnisation des catastrophes naturelles[1] est fondé sur un principe de solidarité conférant à l'État le pouvoir d'encadrer les conditions d'assurance des principaux risques naturels, excepté les effets du vent, de la grêle ou du poids de la neige[2]. Ainsi à l'inverse des britanniques par exemple, tout assuré en France bénéficie automatiquement d'une couverture contre les CatNat pour une somme relativement modique.

Néanmoins ce système est souvent considéré comme déresponsabilisant (Bourrelier, 1997). D'abord parce qu'il ne récompense pas les efforts de prévention que peuvent initier certains assurés et, à l'inverse, il ne sensibilise pas les enjeux les plus exposés. Ensuite, il n'incite pas les assureurs eux-mêmes à améliorer leurs connaissances ou leurs pratiques dans l'évaluation de ce type de risques. En effet, dans la mesure où le niveau d'exposition à un aléa CatNat n'influe pas sur la tarification et où le processus d'indemnisation est encadré par le législateur, les sociétés d'assurance n'ont pas besoin de valoriser, autant que pour le risque incendie ou automobile par exemple, leurs données sur les CatNat.

La Caisse Centrale de Réassurance (CCR[3]) est le seul organisme à faire ce travail de collecte des données de sinistralité CatNat à l'échelle du marché, auprès de ses cédantes, dans le cadre de ses activités de réassureur.

Dès lors, que sait-on de la sinistralité inondation à l'échelle du marché ?

Alors que la partie 10.1.2 présente les informations existantes à plusieurs échelles territoriales (nationale, départementale, communale), la partie 10.1.3 aborde la sinistralité sous l'angle des évènements, en exposant les avantages et les limites d'une telle approche.

10.1.2 Le marché de l'assurance comme source d'information

Niveau national

Il existe différentes manières d'estimer la part des inondations dans la sinistralité globale. D'abord, en volumétrie, l'analyse du nombre d'arrêtés CatNat montre que la moitié des arrêtés publiés entre 1982 et 2009 sont la conséquence d'inondations (56 %). Cette évaluation a été réalisée à partir de la base de données CCR, alimentée en interne par CCR au fil des réunions de la commission interministérielle CatNat, dont elle assure le secrétariat. La base de données publique

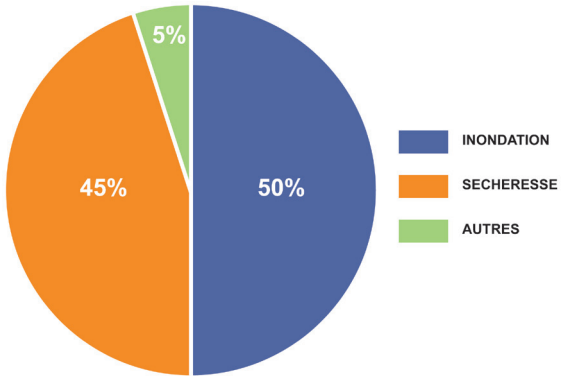


Fig. 1. — Répartition du coût des CatNat par nature de périls (1982-2009). Source : CCR.

GASPAR du MEDDE, permet également d'approcher cette estimation, mais elle est alimentée par les agents des services déconcentrés de l'État avec une périodicité variable[4]. De fait le compte des arrêtés CatNat semble légèrement différent entre les deux bases, celle de CCR étant celle retenue comme base référence par l'Observatoire National des Risques Naturels (ONRN). Par ailleurs de nombreuses incertitudes pèsent sur la véracité de certains arrêtés. Par exemple, certaines communes ont bénéficié de l'état de catastrophe naturelle pour des inondations alors qu'en réalité, elles ont été impactées par d'autres phénomènes (tempête, grêle, etc.) (Douvinet & Vinet, 2012).

Ensuite, en valeur, la charge totale indemnisée au titre des CatNat sur la période 1982-2009 est également due pour moitié aux inondations[5] (figure 1) (source CCR).

Toujours à l'échelle nationale, il est possible d'évaluer approximativement le montant des indemnités versées annuellement au titre des catastrophes naturelles pour les inondations depuis 1982, en utilisant le coût global historique (en millions d'euros), par exercice de survenance, d'après les états réglementaires de liquidation des sinistres CatNat (tableau 1) (source FFSA-GEMA6). Cette évaluation est subordonnée à une méthode conventionnelle qui consiste à ne retenir que le montant vu fin de 1re année pour ne conserver que l'effet des inondations. En effet, les sinistres dus à la sécheresse ne sont enregistrés que plus tardivement et ne sont donc pris en compte que dans le dernier état connu.

En résumé :

- Montant vu fin de 1re année = Inondation
- Dernier état connu = Inondation + sécheresse

Néanmoins, pour certaines années, la charge vue fin de première année est supérieure à celle du dernier état connu (conséquence d'une surévaluation de certains évènements majeurs, qui s'avèrent en réalité moins coûteux au fur et à mesure de la liquidation des sinistres). Dans ce cas, c'est le montant du dernier état connu qui doit être pris en compte. Il est à noter que cette méthode ne permet pas de dissocier les inondations des autres aléas tels que glissements de terrains, séismes, avalanches, etc. Cependant, la part des périls autres

1. Loi n° 82-600 du 13 juillet 1982.
2. Ces périls sont pris en charge par la garantie « TGN ».
3. CCR est une entreprise de réassurance qui intervient pour délivrer aux sociétés d'assurance qui en font la demande une couverture de réassurance illimitée, bénéficiant de la garantie de l'État, pour les risques de catastrophes naturelles en France (www.ccr.fr).
4. Téléchargeable sur : http://macommune.prim.net/gaspar/.
5. Part probablement plus importante si l'on comptabilise les années 2010 et 2011, suite aux évènements « Xynthia 2010 », « Var juin 2010 » et « Var novembre 2011 ». L'effet des années 2010 et 2011 est visible par ailleurs sur la carte des coûts cumulés par commune dans la partie 10.1.3, fig. 2.
6. Fédération française des sociétés d'assurances et Groupement des entreprises mutuelles d'assurance (www.ffsa.fr & www.gema.fr).

Tabl. 1. — Évolution du coût global (en millions d'euros) par exercice de survenance. Source : FFSA-GEMA

VU FIN DE	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994[1]	1995	1996	1997
1ère année	370	310	24	14	39	151	367	27	267	53	361	654	305	580	340	210
5ème année	345	325	24	15	55	200	335	163	584	217	485	698	380	710	690	470

VU FIN DE	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	Total depuis 1982
1ère année	335	1 030	490	490	1 095	1 380	195	395	355	615	500	515	1 635	710	13 812
5ème année	455	805	420	385	1 200	2 250	170	555	315	640	510	480	1 580	710	16 171

Tabl. 2. — Extrait des résultats CatNat cumulés 1988-2011. Source : FFSA-GEMA

		FREQUENCE EN ‰	INDEMNITE MOY. (milliers euros)	S/P EN %	INDEMNITE MOYENNE DES PARTICULIERS (milliers euros)		CM MAX* (milliers euros)
		ENSEMBLE DES RISQUES			INONDATIONS	AUTRES	ENSEMBLE
01	AIN	0,5	11,7	21,4	5,1	6,4	12,4
02	AISNE	1,5	10,8	73,5	11,5	6,2	19,2
03	ALLIER	0,5	5,6	13,3	4,4	4,8	3,4
04	ALPES (HTE PROVENCE)	0,6	7,9	27,4	6,9	4,7	13,7
05	ALPES (HAUTES)	0,3	10,2	11,1	8,0	5,4	14,2
06	ALPES MARITIMES	1,4	13,4	57,0	9,4	7,9	7,7
07	ARDECHE	1,1	7,6	39,7	5,7	5,7	19,7

que la sécheresse ou les inondations dans la charge totale indemnisée ne représente qu'une part minime (moins de 5 % pour les séismes, glissements de terrains et les avalanches).
Actualisation des montants de dommages : Pour pouvoir comparer la charge globale annuelle il est nécessaire d'actualiser les coûts. En règle générale l'actualisation est faite en valeur à partir de l'indice FFB[1]. Cependant pour une meilleure représentativité, il conviendrait d'actualiser également en volume, en prenant en compte l'évolution du nombre de biens potentiellement exposés (évolution du parc de logement de l'INSEE par exemple).

Niveau départemental
Le service statistique FFSA-GEMA fournit dans son rapport annuel « L'assurance des catastrophes naturelles » la sinistralité par département de 1988 à 2010 à travers différents indicateurs (tableau 2). Ces chiffres sont issus de données recueillies par une enquête spécifique sur les catastrophes naturelles adressée aux sociétés membres de la FFSA et du GEMA, complétées par les informations provenant des états comptables réglementaires.
Les trois premiers indicateurs concernent l'ensemble des risques (automobiles, particuliers et professionnels) et tous les aléas CatNat confondus.

- Le premier représente la fréquence (en ‰), c'est-à-dire le nombre de sinistres rapporté au nombre de contrats en portefeuille.
- Le deuxième est l'indemnité moyenne (en milliers d'euros 2010, actualisés par l'indice FFB).
- Le troisième fait état du rapport sinistres/primes, soit la charge des sinistres de l'année divisée par le montant des primes acquises à cette même année. Dans les brochures FFSA, il s'entend net de recours.

Pour le quatrième indicateur, soit l'indemnité moyenne des particuliers (en milliers d'euros 2010, actualisés par l'indice FFB), les inondations ont été dissociées du reste des aléas.
Il correspond au coût moyen maximal (en milliers d'euros 2010, actualisés par l'indice FFB) pour l'ensemble des risques, c'est-à-dire l'indemnité moyenne pour la fréquence annuelle maximale observée.
À partir de ces informations il est possible d'établir la moyenne nationale de chaque indicateur et ainsi de pouvoir comparer les niveaux de sinistralité entre départements.
Concernant uniquement les inondations, la FFSA et le GEMA mettent à disposition un indicateur départemental : l'indemnité moyenne des particuliers (en millions d'euros 2010, actualisés par l'indice FFB) depuis 1988.
CCR propose également une batterie d'indicateurs départementaux, accessibles à partir du site E-Risk[2], qui renseignent sur la période 1995/2009 et par nature d'inondation (inondation tous types, inondation et/ou coulée de boue, inondation par remontée de nappe et inondation par submersion marine) : le coût cumulé ; la fréquence ; le coût moyen et le rapport sinistre sur prime.

Niveau communal
Dans le cadre des travaux de l'ONRN, CCR a fourni des éléments sur la sinistralité inondation en déclinant la batterie d'indicateurs départementaux présentés plus haut à l'échelon communal (figure 2). La carte ci-dessous illustre par exemple les coûts cumulés des inondations, par tranche, de 1995 à 2010 (réévalués en euros 2008 sur la base de l'évolution des primes acquises en assurance CatNat[3]). Les données qui ont permis de construire les indicateurs diffusés sur le site de l'ONRN sont téléchargeables librement et sont complétées par des fiches indicateurs, qui indiquent

1. Indice trimestriel du coût de la construction, calculé par la Fédération française du bâtiment (FFB) depuis le 1er janvier 1941.

2. https://erisk.ccr.fr/faces/erisk-autres-description-synt-inondation.jsp.
3. Portail cartographique des indicateurs consultables sur www.onrn.fr.

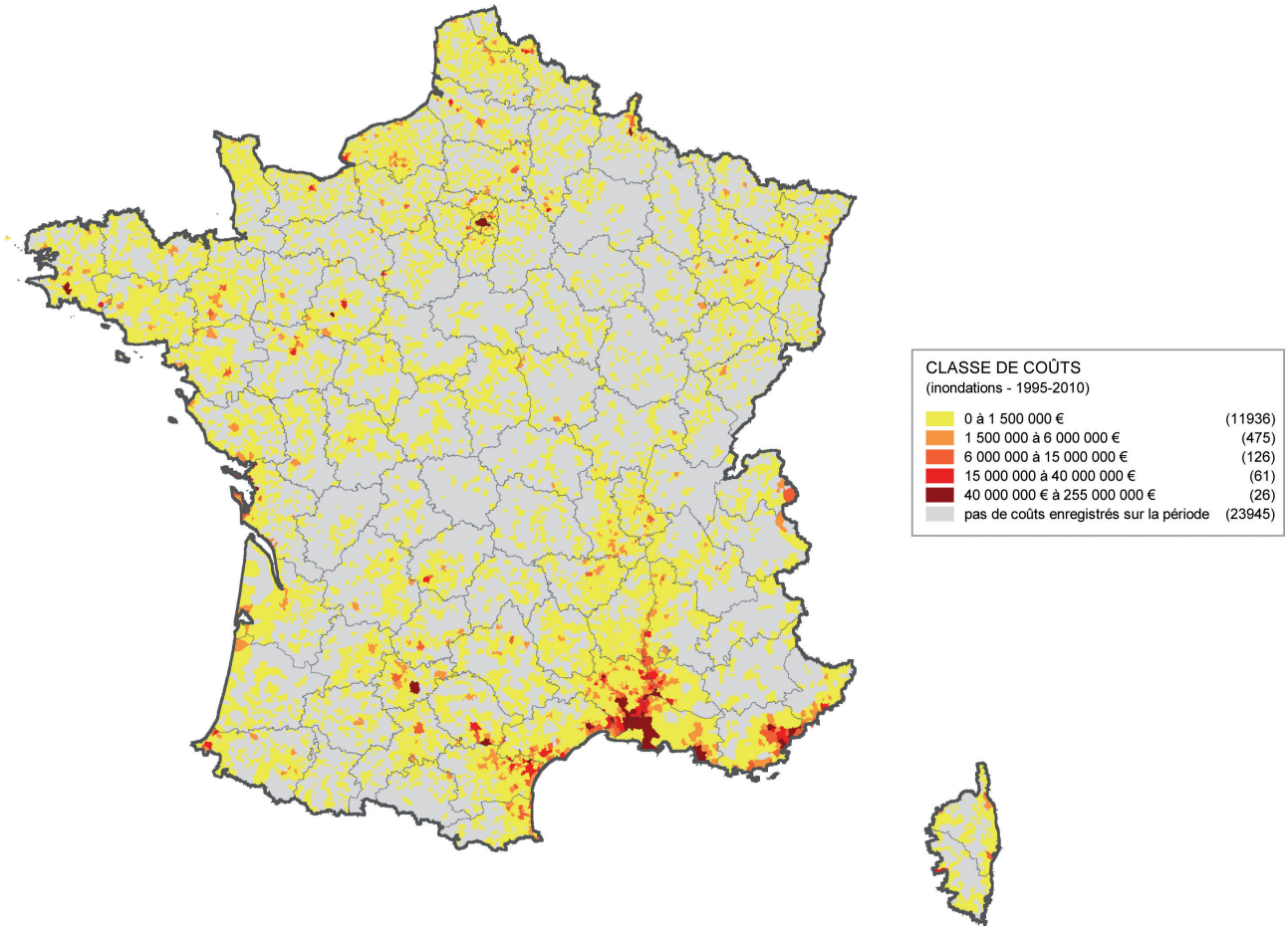


Fig. 2. — Représentation cartographique de l'indicateur : Coûts cumulés des inondations par commune de 1995 à 2010, en France. Source : ONRN/CCR.

notamment les précautions d'usage et les incertitudes inhérentes aux données.

Néanmoins, cette vision à l'échelle du marché n'est pas suffisante pour avoir une idée précise de la diversité des inondations et de leurs conséquences. Ainsi, que sait-on des coûts à l'échelle du sinistre ?

10.1.3 Les connaissances sur l'endommagement, à l'échelle de l'évènement

Un manque d'information sur la sinistralité par évènement

La charge totale indemnisée par évènement inondation pour l'ensemble du marché de l'assurance français n'est connue que pour les catastrophes ayant fait l'objet d'études spécifiques de la part de la profession (FFSA-GEMA) ou de CCR — soit environ 30 inondations sur 2 500 recensées depuis la création du régime CatNat en 1982.

Bien que ces catastrophes représentent 50 % des dommages assurés enregistrés sur la période, 98 % des inondations passées sont donc méconnues à l'échelle du marché. Même si elles sont rares, il existe des informations et des données sur ces évènements moins dommageables, plus locaux et fréquents ; mais elles sont difficiles à exploiter car produites par des acteurs très variés qui communiquent peu entre eux et agissent sur des périmètres différents.

Le manque de retours d'expérience réguliers permettant des analyses *a posteriori* des dommages a favorisé le développement de méthodes d'évaluation *a priori*, soit des outils de modélisation qui simulent les dommages potentiels pour un scénario d'inondation donné (Hubert & Ledoux, 1999).

La modélisation des dommages

L'estimation de la sinistralité d'après les méthodes d'évaluation *a priori* se structure globalement en trois phases : la modélisation hydraulique de l'aléa ; le recensement et la caractérisation des enjeux potentiellement inondés et l'application de fonctions de dommages (relation entre l'endommagement et l'aléa) aux enjeux retenus (Torterotot, 1993). Cette démarche est relativement récente en France, contrairement par exemple aux anglo-saxons qui entretiennent une véritable culture économique des risques (Hubert & Ledoux, 1999 ; Vinet, 2010).

Bien qu'à l'échelle du marché les connaissances sur la sinistralité inondation par le secteur de l'assurance soient limitées, les sociétés font parfois appel à titre individuel à des agences de modélisation pour évaluer l'impact de certains risques majeurs, tels que les CatNat, sur leurs portefeuilles. Cela permet de répondre à différents besoins métier, tels que l'évaluation des cumuls d'exposition et donc la planification de l'achat de réassurance, le contrôle de la politique de souscription, etc.

Toutefois, les modèles commercialisés par ces agences sont parfois critiqués pour leur manque de transparence (Luzi, 2012). En croisant directement des données issues des por-

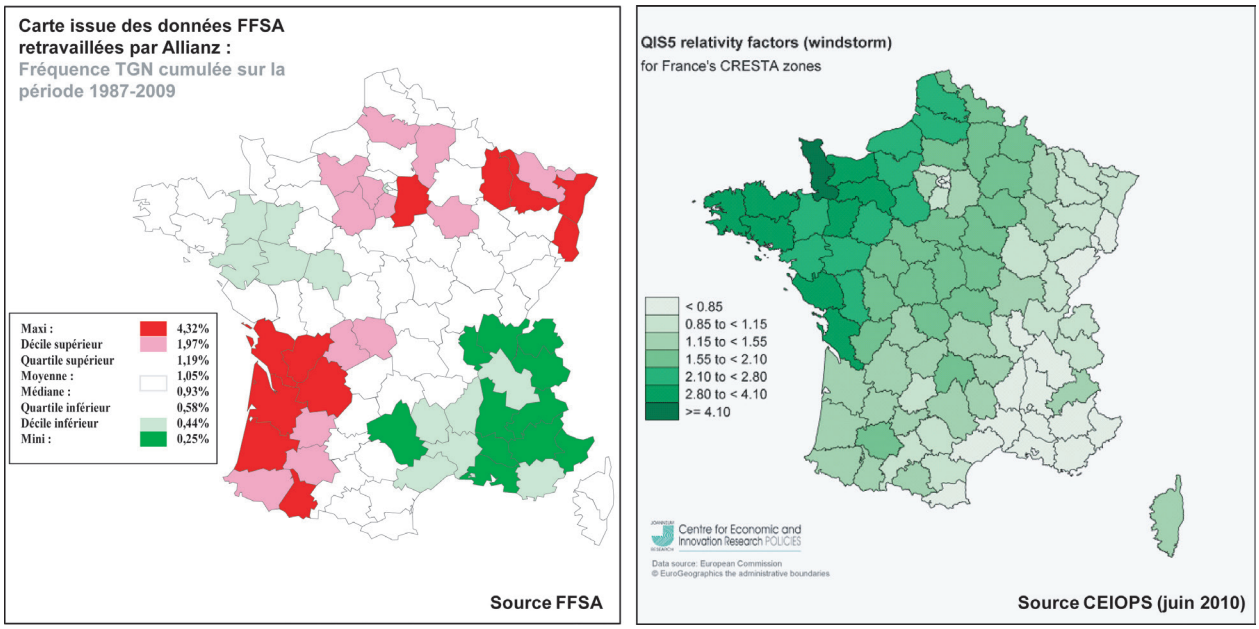


Fig. 3. — Comparaison à la maille départementale entre la fréquence TGN observée sur la période 1987-2009 (source FFSA) et les facteurs de pondération du risque de tempête recommandés pour l'application de la Directive Solvency 2 par les entreprises d'assurances (source CEIOPS, selon modélisation tempête).

tefeuilles de leurs clients avec des modèles hydrauliques et des fonctions d'endommagement élaborés en interne, certains ont en effet tendance à afficher une corrélation parfaite entre aléa et dommages sans pour autant souligner les incertitudes qui pèsent sur les résultats obtenus.

Les cartes ci-dessus illustrent, pour le risque tempête, les écarts pouvant exister entre les sinistres observés et les sinistres potentiels modélisés (figure 3[1]).

Par ailleurs, la modélisation des sinistres en fonction des niveaux d'endommagement est utilisée par certains acteurs publics dans le cadre d'analyses coûts-bénéfices, qui ont été rendues obligatoires pour justifier certains projets de prévention des inondations (MEDDTL, 2011[2]).

Hypothèses et pistes d'amélioration

Comment tendre vers plus de robustesse dans la caractérisation de la sinistralité ? Est-il possible d'estimer un coût moyen par nature d'inondation sur différents territoires ? Pour répondre à ces questions les travaux s'orientent vers une évaluation *a posteriori* et non *a priori* du coût assuré des inondations, soit la reconstitution d'une sinistralité observée plutôt que l'utilisation d'un modèle probabiliste. Cette approche remet en question le paradigme aléa centré qui consiste à dire que le même paramètre d'aléa (hauteur d'eau, durée de submersion, etc.) produit les mêmes dégâts sur un certain type d'enjeux partout en France. L'objectif est donc de tester si d'autres paramètres, liés à des particularismes territoriaux, géographiques ou socio-économiques, peuvent expliquer de manière plus pertinente la sinistralité observée.

10.2 Vers une nouvelle méthodologie pour estimer la sinistralité par évènement

10.2.1 Comprendre et analyser la corrélation évènements/dommages

Un enrichissement nécessaire des connaissances sur les évènements passés

Un protocole de collecte et de préparation des données a été mis en place, pour permettre le travail de reconstitution de la sinistralité passée sur des territoires tests.

Cette phase amont s'est déroulée en trois étapes qui ont permis de :

- définir la notion d'évènement ;
- concevoir des bases de données inédites en collectant, structurant et homogénéisant des informations et données diverses (connaissances sur les inondations passées et données de sinistralité des assureurs) ;
- croiser ces bases de données pour obtenir des informations détaillées et exploitables sur des terrains tests.

Comment définir la notion d'évènement ?

Pour évaluer le coût des dommages provoqués par une inondation et *a fortiori* le coût moyen d'une « catégorie » d'inondation (ruissellement, débordement, crue rapide — voire submersion marine et remontée de nappe), il est nécessaire de circonscrire le périmètre spatial et temporel de cette dernière (Douvinet & Vinet, 2012).

Les trois partenaires de l'ONRN (CCR, DGPR, MRN) travaillent déjà sur cette notion d'évènement inondation et ses représentations, notamment CCR qui propose une cartographie des évènements majeurs *via* son site E-risk ou la DGPR qui a produit des rapports sur les évènements naturels dommageables en France et dans le monde[3] (MEEDDM — DGPR,

1. CEIOPS : Commitee of European Insurance and Occupational Pensions Supervisor (autorité de contrôle européenne dans le secteur de l'assurance, aujourd'hui nommée EIOPA).

2. Dans le cadre de programmes d'action et de prévention des inondations (PAPI) : actions dont l'investissement représente 25 % du montant total du programme ou dont le montant dépasse 2 millions d'euros.

3. La MRN a par ailleurs pris contact avec les auteurs de ces ouvrages pour obtenir de plus amples informations.

2007). Pour garder une cohérence d'ensemble il a donc été décidé de définir de manière conventionnelle la notion d'évènement. Ainsi, un évènement inondation est considéré comme groupement d'arrêtés CatNat (maille communale) circonscrit dans un périmètre spatio-temporel cohérent, causé par un épisode hydrométéorologique particulièrement intense. Au regard des données collectées dans le cadre de cette étude, la méthode d'identification ainsi retenue permet d'associer les évènements d'une part à des informations sur leur fréquence ou leur intensité et d'autre part à des montants indemnisés.

10.2.2 Collecte des données à l'échelle nationale

Conception d'une base de données sur les inondations de 1982 à 2012

Un recensement des différentes sources de données apportant des renseignements sur des évènements connus, sur le territoire national, a été fait :

- Montants historiques et actualisés (en valeur) des principales inondations depuis 1988, soit une vingtaine (rapports FFSA-GEMA) ;
- Les coûts et les périmètres des principaux évènements depuis 1990, soit une trentaine d'évènements, comprenant la vingtaine référencée par FFSA-GEMA[1] (source CCR) ;
- Informations hétérogènes contenues dans les rapports officiels de retours d'expériences des inondations les plus marquantes ;
- Informations fournies par le MEDDE telles que le projet de la Base de Données Historique des Inondations (BDHI) élaboré en partenariat avec IRSTEA[2] et des historiens, le recensement des évènements du passé contenu dans les rapports EPRI[3] par grand bassin hydrographique ou encore les rapports sur les évènements naturels dommageables ;
- Des sites Internet détenant des informations météorologiques tels que : Météo France – Pluies Extrêmes[4], Météo Paris[5] (qui possède des archives intéressantes sur les évènements extrêmes observés depuis plus d'un siècle).

Toutes les informations recueillies à partir de ces sources ont été rassemblées et homogénéisées au sein d'une base de données permettant de mieux caractériser les évènements identifiés, intitulée « BD Évènements connus ». Cette dernière comporte notamment des champs sur : le périmètre temporel de l'évènement (date de début, date de fin…), le périmètre spatial de l'évènement (commune, code postal, cours d'eau, département…), les caractéristiques de l'aléa (périodes de retour hydrologiques, hauteurs d'eau…), les conséquences économiques et humaines de l'évènement (coûts assurés et non assurés, nombre de victimes…).

Au total environ 600 évènements ont été identifiés et qualifiés sur la période.

Relation arrêtés CatNat et évènements de 1982 à 2011

En parallèle une autre table a été créée dans le but d'attribuer à chaque arrêté CatNat un code évènement et ainsi obtenir une liste de tous les évènements indemnisés au titre du régime CatNat, pour les inondations seulement. Cette base a été nommée « BD Évènements CatNat ». Ci-dessous une présentation sommaire de la méthodologie employée pour relier les arrêtés aux évènements.

Trois critères ont été retenus pour distinguer un évènement :

- Le type de phénomène : seules les communes déclarées en état de catastrophe naturelle et sinistrées par un aléa de type inondation (ruissellement, débordement, submersion marine, coulée de boue…) peuvent constituer le périmètre de l'évènement.
- Le périmètre temporel : l'évènement n'est considéré comme unique et distinct que lorsque les dates de début de ce dernier sont semblables[6]. En outre, la période de survenance du phénomène dommageable doit être similaire entre les communes retenues, soit comprise entre 1, 2 ou 3 journées. Toutefois les conditions météorologiques ou le type d'aléa inondation à l'origine de l'évènement peuvent conduire à élargir de manière empirique le périmètre temporel de ce dernier.
- Le périmètre spatial : si des inondations surviennent de manière synchrone c'est la distribution spatiale de ces dernières qui permet de les regrouper en un ou plusieurs évènements. Si par exemple deux phénomènes ont lieu dans des secteurs hydro-géographiques fortement dispersés, alors ils seront considérés comme deux évènements distincts. Les évènements difficilement identifiables ont été cartographiés pour raffiner l'analyse et valider ou non leurs périmètres. Font toutefois exception les inondations générées par des conditions météorologiques généralisées (épisode spatialement très étendu) et affectant pendant la même période des secteurs parfois dispersés.

Des limites sont cependant à souligner, notamment la difficulté d'identifier avec certitude le périmètre spatio-temporel d'un évènement (Douvinet & Vinet, 2012). Son extension géographique peut être trop étendue (exemple d'orages généralisés) ou sa durée trop importante (exemple des remontées de nappes dans la Somme en 2001 sur plusieurs mois). Ainsi, un indice sur une échelle de 1 à 4 a été créé pour qualifier arbitrairement la fiabilité de l'évènement identifié.

Grâce à cette base, plus de 2 500 évènements ont été attribués à environ 60 000 arrêtés CatNat inondation publiés de 1982 à 2011. Par ailleurs, 70 % des évènements associés aux arrêtés CatNat correspondent à des inondations référencées dans « BD Évènements connus ».

Base de données des sinistres assurés en CatNat inondation

Dans le même temps, une base de données sur la sinistralité a été conçue grâce à la collecte de données d'assurances, fournies par plus de 50 % du marché, qui renseignent les lieux et les coûts des sinistres CatNat inondation (à l'adresse ou agrégés à la commune ou code postal), par date de survenance ou par évènement, depuis 2000, 1999 pour certains cas. La table homogénéisant l'ensemble des données sinistres comporte au minimum les champs suivants : charge sinistre, code postal du lieu de survenance et/ou adresse de souscription, date de survenance du sinistre, type d'enjeu impacté (professionnel ou particulier) ; et parfois des informations telles que : valeur assurée du contenu, nombre de pièces, nature (maison ou appartement), usage (propriétaire

1. Consultable sur : `https://erisk.ccr.fr/faces/erisk-accueil.jsp`.
2. Institut national de recherche en sciences et technologies pour l'environnement et l'agriculture (ex CEMAGREF).
3. Évaluation Préliminaire du Risque Inondation, 1re étape de la Directive Inondation adoptée en 2009.
4. `http://pluiesextremes.meteo.fr/`.
5. `www.meteo-paris.com/chronique`.
6. Les dates de début d'évènement sont renseignées dans la base de données des arrêtés CatNat (BD Gaspar, mai 2012).

Tabl. 3. — Premiers résultats du croisement entre données sur les évènements et les sinistres

Territoire	Période 1999-2012	Décembre à Février inclus	Mars à Mai inclus	Juin à Août inclus	Septembre à Novembre inclus
France	Nombre de contrats sinistrés (particuliers)	134 000	13 000	35 000	70 000
	Charge moyenne particuliers France	3 700	4 300	5 100	5 200
	Nombre d'évenement	70	201	484	197
BASSIN Y *(Pourtour méditerranéen)*	Nombre de contrats sinistrés (particuliers)	44 000	600	8 500	23 500
	Charge moyenne par particulier	1 500	4 500	10 500	5 000
	Nombre d'évenement	19	14	23	63
BASSIN F *(Seine amont)*	Nombre de contrats sinistrés (particuliers)	93 000	2 200	11 100	24 000
	Charge moyenne par particulier	1 500	3 800	8 900	4 800
	Nombre d'évenement	22	33	80	71

ou locataire), valeur assurée du contenant, étage/sous-sol, informations sur le bâti.
Il faut rappeler que ces données n'ont pas pour but de construire des courbes d'endommagement[1] mais de fournir des ordres de grandeurs sur des coûts moyens par évènement, type de territoire et catégorie d'inondation. Par ailleurs, comme toutes autres données, des traitements ont été effectués pour contrôler les biais et incertitudes.
La représentativité partielle de l'échantillon et la forte volatilité des résultats nécessite toutefois d'aller plus loin dans l'appréhension des montants de sinistre au travers d'analyses spatiales et temporelles des données.

10.2.3 Croisement des bases et études de cas sur des territoires tests

D'après l'échantillon recueilli, sur la période 1999-2012, le coût moyen indemnisé pour un sinistre inondation est de 4 000 € pour les particuliers et 13 000 € pour les professionnels. Mais comment se distribuent les coûts moyens en fonction de leur période d'occurrence d'une part et de leur répartition géographique d'autre part ?
Les premiers résultats présentés dans le tableau ci-dessus (tableau 3), pour les particuliers seulement, montrent qu'il existe un effet de saisonnalité sur le nombre de contrats sinistrés à l'échelle nationale. La période hivernale, de décembre à février inclus, correspond à des crues « lentes » par débordement qui impactent un grand nombre d'enjeux. Par ailleurs, en termes d'évènement ce sont les épisodes orageux, plus localisés, de juin à août inclus, qui sont le plus représentés. Concernant les coûts moyens, ils semblent légèrement plus faibles en hiver et printemps qu'en été et automne, mais les écarts ne sont pas flagrants.
Une analyse complémentaire par territoire est effectuée pour approfondir ces observations. En comparant par exemple le littoral méditerranéen (bassin Y) et le bassin de la Seine amont (bassin F), des différences et similarités en termes de profil d'exposition sont mises en avant.
D'abord il y a deux fois plus de contrats impactés, en nombre, dans le bassin F que dans le bassin Y pour la période décembre-février. Les différences de superficies des surfaces inondés, selon les profils hydrologiques des cours d'eau de chaque bassin, expliquent notamment cet écart. En nombre d'évènements cette fois, c'est la saison des épisodes cévenols qui est logiquement la plus représentée pour le bassin Y contrairement au bassin F où le plus grand nombre d'évènements est situé entre juin et août.
Néanmoins, les coûts moyens sont sensiblement équivalents entre les deux territoires quelle que soit la saisonnalité. À l'image des constats nationaux les coûts les plus élevés concernent des évènements orageux survenus entre juin et août. Outre le périmètre spatial et temporel, d'autres facteurs doivent être considérés pour comprendre la relation entre sinistralité, territoire et évènement.
Ainsi, des évènements récents ont été sélectionnés, indépendamment de leur intensité, sur des territoires pour lesquels certains gestionnaires des risques locaux ont accepté de fournir des informations pour mieux comprendre l'origine des dégâts occasionnés par ces évènements.
Des enquêtes de terrains sont donc en cours sur cinq territoires aux profils d'exposition différents (urbain — ruraux, crues rapides — crues lentes, avec PAPI — sans PAPI, etc.) :

- Communauté d'agglomération dracénoise (Var) sur les inondations de juin 2010 et novembre 2011 ;
- Partie aval du bassin versant de la Zorn (Bas-Rhin) sur les coulées de boue de mai 2008 ;
- Basses plaines de l'Aude sur les crues de novembre 1999, septembre 2005 et janvier 2006 ;
- Agglomérations du Havre et de Rouen (Seine-Normandie) pour des épisodes fréquents de ruissellement ;
- Bassin du Noyonnais (Oise) pour les crues de la Verse en juin 2007.

Conclusion et perspectives

Les derniers résultats sont en cours de validation et des analyses d'incertitudes doivent encore être réalisées. Néanmoins l'originalité de la démarche et le caractère inédit des données utilisées permettent d'ores et déjà d'apporter des éléments nouveaux dans la réflexion sur l'analyse du coût des inondations. Un travail de restitution cartographique des résultats est en cours d'élaboration pour valoriser l'intérêt de l'approche géographique.
Les perspectives de l'étude sont multiples : la méthodologie et les résultats seront proposés à l'Observatoire National des Risques Naturels, ils peuvent également contribuer,

1. Même si elles renseignent sur un montant de sinistre, elles sont beaucoup moins précises que les rapports ponctuels effectués par les experts d'assurance suite à un évènement, notamment en termes de qualification des enjeux assurés.

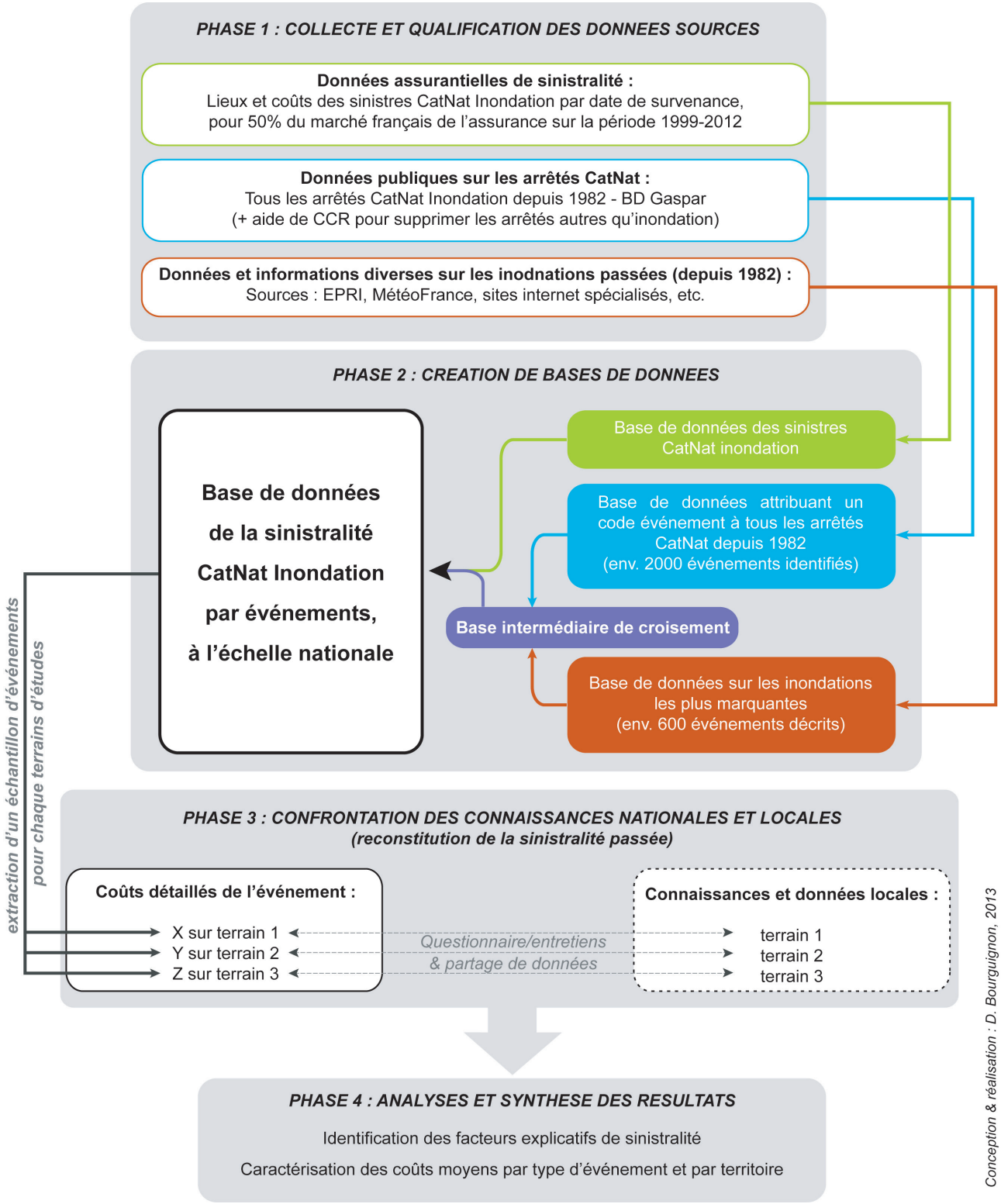


Fig. 4. — Schéma récapitulatif.

à une échelle plus locale, au calage de certains outils de modélisation des risques et d'estimation des coûts[1].

Remerciements

L'auteur remercie le département des études statistiques FFSA-GEMA, CCR et la MRN pour leur collaboration et leur contribution à cette étude.

Bibliographie

Bourrelier P.H., *La prévention des risques naturels*, Comité interministériel de l'évaluation des politiques publiques & Premier ministre, Commissariat général du Plan, Rapport de l'instance d'évaluation, Éditions La documentation française, 1997, 703 p.

Douvinet J. & Vinet F., *La carte des arrêtés « CatNat » pour les inondations* : 1) Analyse spatio-temporelle, M@ppemonde, n° 107, 2012, 10 p.

Hubert G. & Ledoux B., *Le coût du risque… L'évaluation des impacts socio-économiques des inondations,* Presses de l'École Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, 1999, 231 p.

Luzi M., « *Le dossier technique des tempêtes », Revue Risques/Les cahiers de l'assurance,* n° 91, septembre 2012, p. 42-46.

MEEDDM – DGPR., *Les évènements naturels dommageables en France et dans le monde en 2007*, 2007, 43 p.

MEDDTL, *Programmes d'action de prévention des inondations (PAPI). De la stratégie aux programmes d'action,* Cahier des charges, 2007, 28 p.

Torterotot J.-P., *Le coût des dommages dus aux inondations : estimation et analyse des incertitudes*, Thèse de l'ENPC-CERGRENE, Noisy-le-Grand, 1993, 436 p.

Vinet F., *Le risque inondation : diagnostic et gestion,* coll. « Sciences du risque et du danger », série *Innovations*, Éd. Lavoisier Tec&Doc, 2010, 328 p.

1. Pour davantage de détails sur la méthode et les résultats, il est possible de télécharger le manuscrit de la thèse qui, depuis la présentation des travaux au colloque Géorisques, a été soutenue : `www.biu-montpellier.fr/florabium/jsp/nnt.jsp?nnt=2014MON30042`.

11 La résilience en question(s)

Serge Lhomme
Université Paris-Est (EIVP). 80 rue Rebeval, 75019 Paris
serge.lhomme@eivp-paris.fr

Résumé. — Alors même que la résilience est au cœur de nombreux discours et de nombreux projets, il semble pertinent de s'interroger sur « le succès » actuel de ce concept. Pourquoi ce concept soulève-t-il actuellement des attentes importantes chez les gestionnaires ? Existe-t-il alors un décalage important entre les approches « opérationnelles » et les approches « théoriques » de la résilience ? Quelles sont *in fine* les spécificités de ce concept et des stratégies pouvant lui être associées ? Pour répondre à ces questions, il est nécessaire d'aborder la polysémie du concept, sa pluridisciplinarité, la difficile mise en pratique par les gestionnaires des approches systémiques des territoires, le rapport étroit entre théorie et pratique en matière de gestion des risques, les écueils du cadre théorique « classique » de la géographie des risques.
Mots-clés. — Résilience, risque, vulnérabilité, aléa.

Title. — *Understanding Resilience*
Abstract. — *Resilience is a "buzzword" used in many discourses and many projects. That is why it seems relevant to analyze accurately this trend. Why resilience raises high expectations among risk managers ? Is it a large gap between "operational" and "theoretical" approaches ? What are the strategies related to this concept ? To answer to these different questions, it is necessary to address the multiple meanings of the concept, the numerous difficulties raised by the implementation of systemic approaches, the closeness between theory and practice concerning risk management, the limits of theoretical framework in risk geography.*
Keywords. — *Resilience, Vulnerability, Risk, Hazard.*

Introduction

Les politiques d'amélioration de la résilience urbaine menées dans des projets européens, comme FloodResilienCity, ou promues par des campagnes internationales, comme celle de l'ISDR (International Strategy for Disaster Reduction), tendent à promouvoir le concept de résilience. Ainsi, la résilience est « à la mode » aussi bien chez les gestionnaires que chez les scientifiques (Klein *et al.* 2003 ; Comfort *et al.*, 2010 ; Reghezza *et al.*, 2012). Ce recours croissant au concept de résilience peut être interprété comme émanant d'un besoin croissant de résilience dans des sociétés technologiques qui deviendraient de plus en plus complexes et vulnérables (Boin *et al.*, 2007).

En effet, les gestionnaires sont à la recherche de concepts opérationnels nouveaux, permettant de tenir compte de contraintes économiques, historiques, culturelles et sociologiques, afin d'établir des politiques de gestion des risques efficaces jugées acceptables par les populations. Dans ce contexte, le développement du concept de résilience soulève des attentes opérationnelles importantes. Or, l'introduction de ce concept dans les cindyniques n'est pas si récente (Timmerman, 1981). Ainsi, le concept de résilience a été introduit en France en même temps que celui de vulnérabilité (Fabiani & Theys, 1987). Dans les faits, le concept de résilience a mis du temps pour s'imposer, les chercheurs lui préférant dans un premier temps celui de vulnérabilité, en particulier en France où la résilience n'est pas un terme vernaculaire.

Alors même que la résilience est au cœur de nombreux discours et projets, il semble justifié de s'interroger sur « le succès » actuel de ce concept. S'il n'est plus possible aujourd'hui de présenter la résilience dans le domaine académique comme un concept émergeant soulevant l'enthousiasme de la communauté scientifique (Reghezza *et al.*, 2012), pourquoi ce concept soulève-t-il actuellement des attentes importantes chez les gestionnaires ? Existe-t-il alors un décalage important entre les approches « opérationnelles » et les approches « théoriques » de la résilience ? Quelles sont *in fine* les spécificités de ce concept et des stratégies pouvant lui être associées ? Pour répondre à ces questions, cet article reviendra dans un premier temps sur la genèse du concept de résilience en géographie des risques et analysera plus généralement son prétendu « succès » à l'aide d'une étude bibliométrique. Dans un deuxième temps, la résilience sera appréhendée en abordant les principaux questionnements attachés au concept. Enfin, la résilience sera envisagée comme une opportunité pour repenser le cadre théorique des risques en géographie.

11.1 La résilience en géographie des risques : un développement « à rebours » au sein des recherches sur la vulnérabilité

La genèse de la résilience en géographie des risques est éminemment liée à celle de la vulnérabilité. En effet, en géographie des risques, la résilience est très peu étudiée par elle-même. Ainsi, « depuis la fin des années 1990, la résilience est devenue un concept incontournable des recherches sur la vulnérabilité » (Reghezza, 2006). Par conséquent, dans ce cadre, la résilience est généralement abordée par le prisme de la vulnérabilité. Pour comprendre comment la résilience

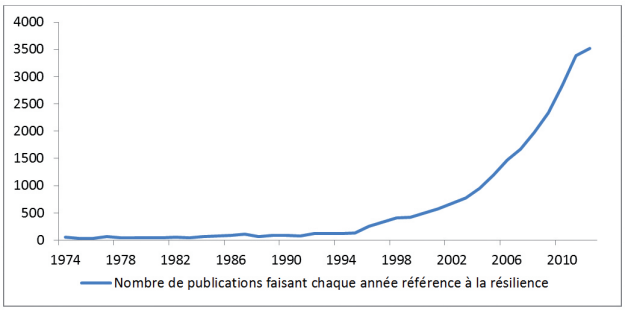


Fig. 1. — Nombre de publications scientifiques faisant chaque année référence à la résilience (SCOPUS).

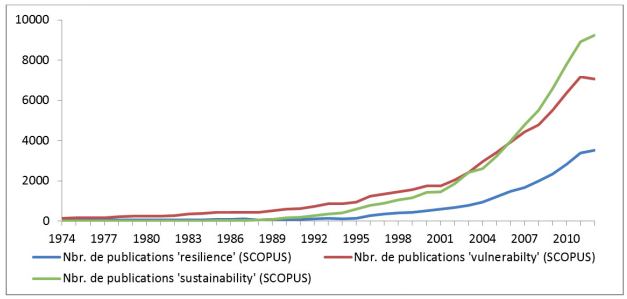


Fig. 2. — Comparaison du nombre de publications scientifiques faisant chaque année référence à la résilience avec celles faisant référence à la vulnérabilité et à la durabilité.

est abordée en géographie des risques, il est alors pertinent de revenir sur l'utilisation du concept de vulnérabilité.

Les études de vulnérabilité se divisent en deux groupes : les travaux qui étudient la vulnérabilité dite « biophysique » et ceux qui étudient la vulnérabilité dite « sociale » (Reghezza, 2006 ; Vinet, 2010). Les études de vulnérabilité qualifiées de « biophysiques » étudient de façon analytique les vulnérabilités de différents enjeux. Ces vulnérabilités sont fonction du degré d'exposition à un aléa et d'une sensibilité face à celui-ci (Reghezza, 2006). Cette approche très « techno-centrée » de la vulnérabilité a longtemps dominé (et dans la pratique domine encore largement) les études de vulnérabilité. Cependant, l'approche biophysique ne tient pas compte des capacités des sociétés à faire face à un aléa, c'est-à-dire de leur capacité de réponse et d'adaptation (Provitolo, 2009). Ces études sont alors apparues insuffisantes pour caractériser la vulnérabilité d'un territoire. C'est pourquoi, la prise en compte d'une vulnérabilité « sociale » s'est trouvée nécessaire afin de compléter l'approche biophysique. La vulnérabilité sociale, qui a contribué à faire émerger le concept de vulnérabilité en géographie (White et Haas, 1975), a très souvent été étudiée indépendamment des facteurs d'exposition et de sensibilité des objets physiques exposés. Or, la vulnérabilité sociale, qui se propose d'étudier la réaction des sociétés face aux risques (capacité d'adaptation, capacité à faire face), est désormais en partie « assimilée » à une résilience sociale (Cardona, 2003). La résilience est apparue en géographie des risques par ce biais.

Afin de dépasser cette segmentation des études de vulnérabilité, il a été proposé de s'appuyer sur un triptyque, exposition-sensibilité (ou au contraire résistance)-résilience, qui définirait une vulnérabilité dite « globale » ou « synthétique » (Pelling, 2003). Ainsi, comme le souligne Dauphiné, « la vulnérabilité intègre trois composantes : l'exposition à l'aléa, la résistance et la résilience » (Dauphiné et Provitolo, 2007). Dans ce contexte, la vulnérabilité peut s'évaluer à l'aide d'une formule du type : vulnérabilité = (exposition x sensibilité)/résilience. Le produit du degré d'exposition et de la sensibilité permet de déterminer le potentiel d'impact de l'aléa sur les enjeux, soit une approche « biophysique ». Ce produit traduit le lien immuable entre endommagement et vulnérabilité. Le potentiel d'impact peut alors être rapporté sur la capacité de résilience des sociétés (il est possible de faire référence aux capacités adaptatives sans que la frontière avec le concept de résilience soit clairement établie), correspondant à une approche plus « sociale ». Le potentiel d'impact sera alors augmenté ou diminué par le niveau de résilience.

Cette étude de la résilience par le prisme de la vulnérabilité implique deux interprétations, toutes les deux contestables. La première interprétation limite le concept de résilience en géographie des risques au champ des sciences sociales qui ne représente qu'un champ disciplinaire étudiant la résilience. Ainsi, la résilience n'apporte rien de très novateur, puisqu'elle correspond dans ce cadre aux études qui contribuèrent à faire émerger le concept de vulnérabilité (White et Haas, 1975 ; Wisner *et al.*, 1976). La résilience remet alors en exergue l'importance des solutions non techniques, car « ces nouvelles formes de gestion sont très différentes des approches technologiques qui ne sont pas toujours bien adaptées au milieu ou à la société » (Dauphiné et Provitolo, 2007). Ainsi, en termes de stratégie, la résilience s'oppose à une stratégie de résistance : « mettre en place une stratégie de résilience, c'est accepter la catastrophe, l'inondation, mais tout faire pour en réduire les impacts » (Dauphiné et Provitolo, 2007). La deuxième interprétation tend à favoriser le discours d'opposition entre résilience et vulnérabilité puisque, si l'on simplifie, pour augmenter la résilience il est nécessaire de diminuer la vulnérabilité et pour diminuer la vulnérabilité il faut augmenter la résilience. Or, la relation entre vulnérabilité et résilience semble être en réalité plus complexe (Cutter *et al.*, 2008 ; Klein *et al.*, 2003).

Une analyse bibliométrique pluridisciplinaire de la résilience se révèle alors particulièrement intéressante. Ainsi, si l'on se focalise uniquement sur le nombre de publications scientifiques faisant référence à la résilience, il apparait clairement que le terme est de plus en plus utilisé (fig. 1). Le concept de résilience serait donc bien à la mode. Ces premiers résultats corroborent dès lors les discours présentant la résilience comme un « *buzzword* » et comparant son développement à celui d'autres notions en vogue comme la durabilité (Gallopin, 2006). Néanmoins, la comparaison bibliométrique avec ces autres notions en vogue laisse entrevoir une réalité plus complexe (fig. 2). Dans les faits, si l'émergence du concept de résilience correspond à peu près à celles d'autres notions en vogue — pour la durabilité (Meadows, 1972) et pour la résilience (Holling, 1973) — le développement de la résilience se révèle beaucoup moins rapide.

La comparaison avec le concept de vulnérabilité met en évidence le développement « à rebours » de la résilience (fig. 2). Ainsi, le terme de résilience est toujours moins usité que celui de vulnérabilité, même si la résilience rattrape désormais son retard en la matière (fig. 3). De plus, il apparait que la vulnérabilité tend à englober la résilience, notamment dans

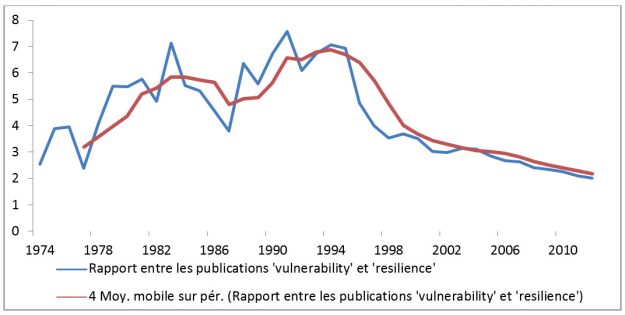


Fig. 3. — Évolution de l'utilisation des termes de vulnérabilité et de résilience depuis 1974 dans SCOPUS.

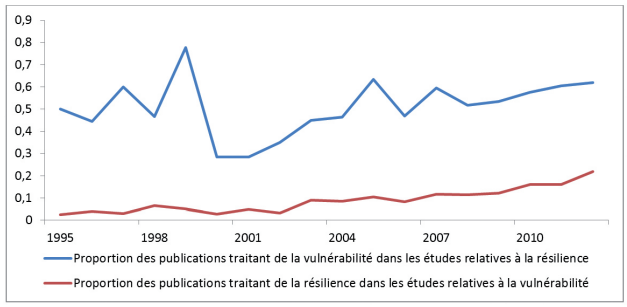


Fig. 4. — Proportion des publications faisant référence à la vulnérabilité dans les études relatives à la résilience et inversement.

les études de risques. Ainsi, à l'aide d'analyses bibliométriques, il est possible d'obtenir le nombre de publications faisant référence au concept de résilience dans les études traitant de la vulnérabilité et inversement. Il ressort qu'il est difficile de ne pas faire référence à la vulnérabilité lorsque l'on fait référence à la résilience. Inversement, les travaux faisant référence à la vulnérabilité ne font généralement pas référence à la résilience (fig. 4). Néanmoins, il semble tout de même de plus en plus courant d'évoquer la résilience dans les études de vulnérabilité.

11.2 Les principales questions soulevées par la résilience

Une analyse de la genèse du concept de résilience en géographie des risques conjuguée à une analyse bibliométrique a permis de mettre en exergue le développement « à rebours » de ce concept. Par ailleurs, la résilience est souvent considérée comme un facteur explicatif de la vulnérabilité, le concept de vulnérabilité apparaissant dès lors englober celui de résilience. De ce fait, bien que le terme de résilience soit de plus en plus utilisé dans les publications scientifiques, en particulier dans les cindyniques, l'intérêt croissant des gestionnaires pour ce concept soulève de nombreuses interrogations dans le domaine académique.

11.2.1 Pourquoi ce concept soulève-t-il actuellement des attentes importantes chez les gestionnaires ?

Des campagnes internationales aux appels à projet nationaux, les gestionnaires s'intéressent particulièrement à la résilience. En effet, l'augmentation avérée des coûts liés aux catastrophes naturelles remet fortement en question les pratiques actuelles, alors même que les outils réglementaires n'ont jamais été aussi complets afin de prévenir les risques naturels (Ledoux, 2005 ; Vinet, 2010) et que les budgets consacrés à la prévision, à la prévention et à la protection, n'ont jamais été aussi importants. Dans les faits, cette hausse des coûts sonne comme un constat d'échec, puisque les risques semblent corrélativement augmenter. Ainsi, en matière de prévention des risques d'inondations, « l'impression est souvent celle d'un échec perpétuel, comme si les efforts de prévention ne pouvaient compenser l'augmentation avérée des risques » (Vinet, 2010). C'est pourquoi, les gestionnaires sont à la recherche de nouvelles stratégies leur permettant de faire face à ces catastrophes. De plus, les gestionnaires doivent faire face à de nouveaux défis. Par exemple, les gestionnaires sont confrontés à la prise en compte d'incertitudes croissantes, comme celles liées à l'évolution climatique dont les effets sont encore assez méconnus sur les phénomènes météorologiques. Dans le même temps, les ruptures de certains systèmes de protection censés protéger les populations ont finalement contribué à augmenter les impacts de certaines catastrophes. La gestion des risques naturels se situe donc actuellement entre un certain constat d'échec, des défis anciens ou nouveaux à relever et une volonté de changement marquée notamment par la recherche de nouvelles stratégies de prévention.

Néanmoins, l'augmentation du nombre de catastrophes naturelles (et de leurs impacts) ne doit pas être énoncée sans un minimum de recul. Ainsi, les pertes humaines ont tendance à baisser dans tous les pays développés, tandis qu'elles ont tendance à augmenter dans les pays « pauvres » (Dauphiné, 2004). Dans le même temps, les pertes financières causées par ces évènements catastrophiques ont globalement augmenté (Vinet, 2010), mais cette évolution apparait irrégulière (`www.emdat.be`). De plus, ces pertes financières accrues doivent être mises en rapport avec une croissance des richesses se révélant plus régulière et continue. La comparaison entre l'évolution des coûts induits par les catastrophes et l'évolution du PIB fait alors émerger une situation plus contrastée (fig. 5), la croissance des coûts apparaissant plus relative. Les tendances sont identiques lorsque l'évolution des coûts induits par les catastrophes est mise en relation avec l'évolution de l'urbanisation.

Plus spécifiquement, concernant les catastrophes consécutives à des inondations, les coûts ont tendance à stagner depuis le milieu des années 1990. Cela se traduit par une baisse significative relativement au PIB après une forte augmentation durant la décennie 1990-2000. À l'échelle européenne, cette stagnation est plus récente. Elle est consécutive aux inondations de grande ampleur ayant touchées l'Europe centrale en 2002. D'ailleurs, plus les analyses deviennent fines, en se focalisant par exemple sur certains territoires ou sur un aléa particulier, plus l'évolution économique des catastrophes se révèle irrégulière, puisque l'échantillon statistique devient très sensible aux valeurs extrêmes (`www.emdat.be`). L'efficacité de nouveaux modes de gestion est alors difficile à évaluer à l'aide de ces seules données économiques, sachant de surcroit que ces modes de gestion prennent du temps pour être efficaces. Par exemple, en France, « les mesures non structurelles peuvent être considérées comme une approche récente comparée aux mesures structurelles. Aussi, leur efficacité peut croitre si les gestionnaires mais

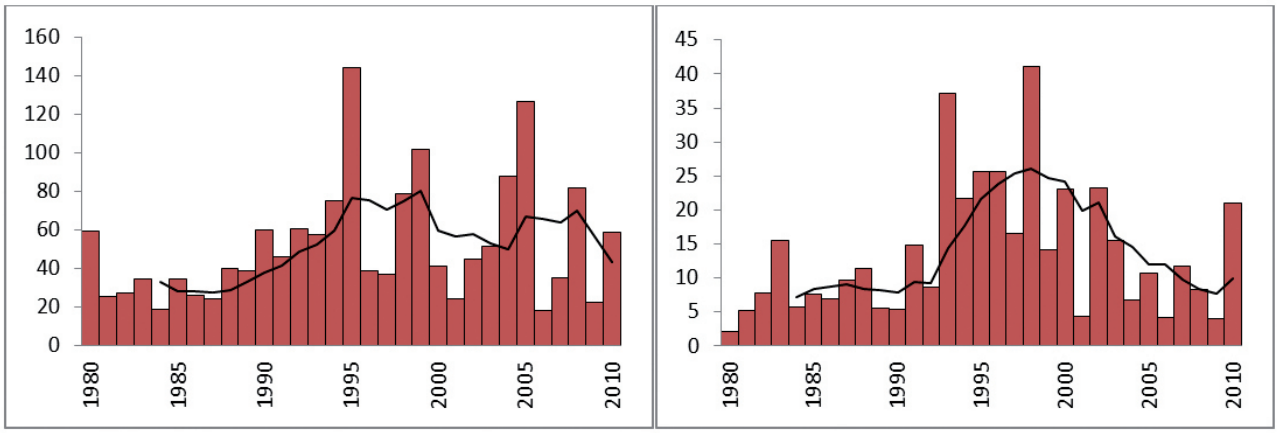


Fig. 5. — Coûts des catastrophes par point de PIB de 1980 à 2010 (source : CRED et FMI). À gauche les catastrophes naturelles. À droite les catastrophes inondations.

aussi les politiques et les populations décident d'accorder plus de place à ce type d'outils » (Defossez, 2009).

Croissance économique et croissance urbaine semblent être des caractéristiques inhérentes aux sociétés contemporaines empêchant une critique simpliste des politiques de gestion des risques par la seule analyse des coûts liés aux catastrophes. La situation est donc complexe, puisque la hausse de ces coûts semble être la contrepartie inhérente à ce binôme. C'est pourquoi, sachant que plus les sociétés sont riches et urbanisées, plus les coûts des catastrophes ont tendance à augmenter, il est fort probable que ces coûts continuent à augmenter.

Dans un premier temps, les attentes soulevées chez les gestionnaires par le concept de résilience ne semblent donc pas justifiées, car d'une part l'augmentation des coûts liés aux catastrophes est à relativiser (la nécessité de trouver de nouveaux concepts n'étant pas si évidente) et d'autre part de nouvelles stratégies pourront difficilement réduire les coûts corrélatifs à l'urbanisation et à la croissance des biens et des richesses, nourrissant une nouvelle fois le sentiment d'un échec perpétuel.

11.2.2 Quelles sont *in fine* les spécificités de ce concept et des stratégies pouvant lui être associées ?

Au-delà de ces considérations économiques, il convient de s'interroger sur les apports possibles du concept de résilience en matière de gestion des risques. En effet, si le concept de résilience permet de faire émerger des pratiques innovantes, l'intérêt des gestionnaires serait alors justifié. Pour cela, il est possible d'étudier concrètement comment le concept de résilience est mis en pratique. Par exemple, ce concept est utilisé dans les politiques de gestion des risques d'inondation et dans ce cadre la résilience s'applique à différentes échelles — du bâtiment au bassin versant — avec des mesures qui sont extrêmement diverses.

Ainsi, il est possible de trouver une littérature relative à la résilience des bâtiments de plus en plus importante et complète. Cette expression regroupe toute une série de stratégies tendant à diminuer les impacts causés par une inondation sur un bâtiment et sur les éléments situés à l'intérieur de ce bâtiment. Les stratégies de résilience des bâtiments se placent donc dans un paradigme d'acceptation des inondations et des dommages associés. Ces stratégies concernent aussi bien l'ingénierie que l'architecture du bâtiment, voire même son aménagement intérieur (fig. 6). Les stratégies contribuant à rendre le bâti résilient se placent dans la continuité des travaux visant à réduire la vulnérabilité des bâtiments, correspondant à des mesures de mitigation. Ainsi, dans ces études, résilience et vulnérabilité sont très souvent considérées comme des antonymes. En matière de résilience des bâtiments, il s'agit principalement d'appliquer des solutions déjà existantes, qui ne sont donc pas innovantes, même si ces solutions sont parfois peu mises en pratique. La résilience contribue alors à remettre ces solutions au goût du jour.

L'échelle du quartier est, quant à elle, intéressante pour mettre en place de nouvelles politiques d'aménagement. Ainsi, à l'image des éco-quartiers, des initiatives sont apparues pour mettre en place des quartiers résilients. C'est le cas par exemple pour le quartier de Zollhafen à Mayence en Allemagne ou encore pour l'île de la rivière Wall à Nimègue au Pays-Bas. L'expression de « quartier résilient » est rarement explicitée de manière claire en faisant appel à une définition reconnue. Néanmoins, cette expression fait référence à des quartiers aménagés afin d'appréhender spécifiquement les problématiques de risques. La gestion des risques est alors mise au centre de l'aménagement de ces quartiers. C'est une pratique plutôt rare en matière d'aménagement urbain. Concernant les inondations, l'objectif est de redonner sa place à l'eau au sein de ces quartiers, afin d'une part de sensibiliser les populations à l'existence de cet élément « naturel » et d'autre part de réhabituer les populations aux fluctuations de cet élément naturel. Le principe est de ne pas opposer la gestion des inondations à l'urbanisation, mais bien de chercher à concilier l'urbanisation et la gestion des inondations. Comme il n'est pas possible de gérer l'aléa à cette échelle, la résilience des quartiers nécessite la mise en place de moyens de protection « légers » pour assurer la protection de certains enjeux. Dans la plupart des cas, les solutions restent très techniques et ne bouleversent pas les pratiques, mais la promotion de cette expression, aussi floue soit elle, ne peut apparaître que positive concernant la gestion des risques.

Que ce soit à l'échelle du bâti ou du quartier, la résilience des communautés (ou des populations) apparait indispensable pour faire face aux aléas naturels. Ainsi, à chaque échelle étudiée précédemment, il est fait référence à la culture du risque et à la sensibilisation de la population. Il semble que

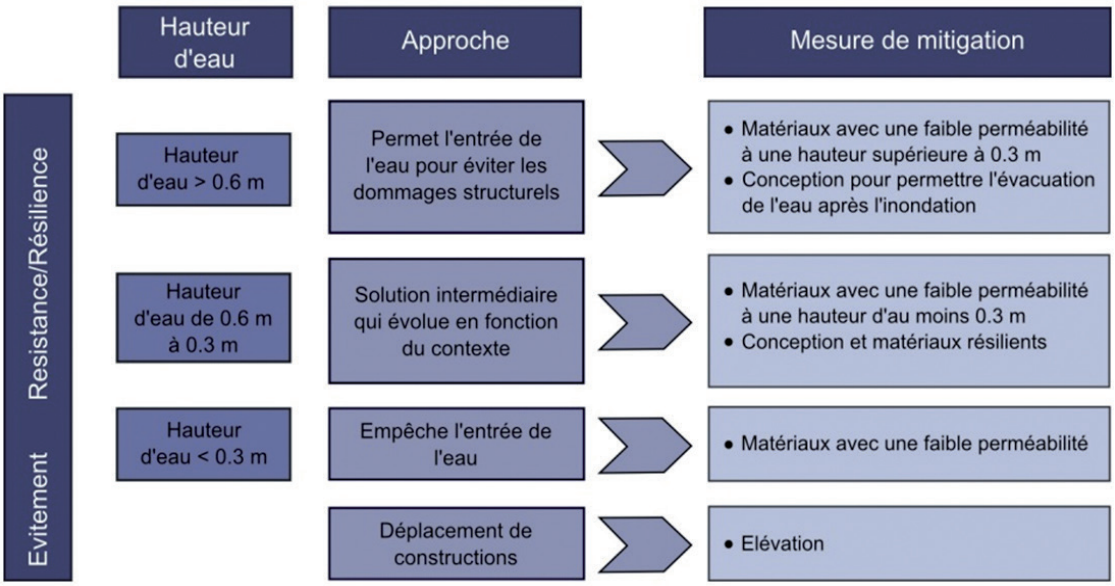


Fig. 6. — La résilience des bâtiments selon l'Environmental Agency.

cette expression caractérise une capacité des populations à faire face aux évènements perturbateurs. Plus exactement, des communautés résilientes possèderaient les connaissances qui leur permettraient de minimiser leurs dommages et d'assurer leur sécurité (Boin *et al.*, 2010). Elles auraient aussi accès aux informations permettant de mettre en pratique efficacement ces connaissances. De plus, ces communautés seraient en mesure d'assurer le mieux possible la phase de récupération et éventuellement de reconstruction. L'idéal étant que cette reconstruction soit rapide et permette de mieux gérer les risques à l'avenir. Un bon exemple de ces pratiques est donné par la CERA (Canterbury Earthquake Recovery Authority) qui a mis en place un « community resilience programme » consécutivement au séisme de Christchurch (Nouvelle-Zélande) de 2011. Une fois encore, ces aspects ont déjà été traités en dehors des stratégies de résilience, dans le cadre de la vulnérabilité. Seuls les aspects liés à la reconstruction peuvent apparaître novateurs.

11.2.3 Comment appréhender ce concept polysémique ?

Dans le domaine académique, un premier écueil est très vite souligné dans la littérature relative à la résilience. En effet, la résilience est un concept polysémique et les chercheurs ont du mal à s'accorder sur sa définition. Ainsi, si l'étymologie est très souvent sollicitée pour appuyer les définitions de la résilience et si cette étymologie fait globalement consensus, ce n'est pas le cas pour la genèse du concept scientifique (Klein *et al.*, 2003). Selon les sources, la résilience apparaitrait par le biais des sciences de l'ingénieur, de l'écologie ou de la psychologie. Chacun s'accorde toutefois sur le fait que le concept est pluridisciplinaire (Cutter *et al.*, 2008 ; De Bruijne *et al.*, 2010) et qu'il s'est largement répandu en dehors de ses champs disciplinaires d'origine. Cette pluridisciplinarité serait d'ailleurs pour certains à l'origine de la polysémie du concept (Brand et Jax, 2007). Néanmoins, cette vision est un peu « simplificatrice », puisque au sein même d'une seule discipline plusieurs courants peuvent exister. Ainsi, il existe aujourd'hui au moins deux courants distincts étudiant la résilience en écologie : l'« *ecological resilience* » et l'« *engineering resilience* » (Holling, 1996). Ces deux courants illustrent deux conceptions antagonistes de la stabilité entrainant, par là même, deux types de management des écosystèmes.

Dans les faits, en introduisant le concept de résilience, l'écologie a dans le même temps complexifié sa conception des écosystèmes. Ainsi, l'écologie a premièrement étudié des systèmes stables situés autour d'un point d'équilibre puis des systèmes instables situés loin de l'équilibre avec plusieurs points d'équilibre (*i.e.* correspondant à des systèmes « multistables »). Cette complexification a alors nécessité une certaine extension de la définition de résilience, qui insiste dès lors sur les phénomènes de transformation, d'apprentissage et d'innovation au sein des systèmes (Brand et Jax, 2007). Or, par ce biais, la résilience gagnerait en applicabilité dans les sciences sociales, alors qu'elle perdrait en précision en écologie (Brand et Jax, 2007). Il ne faut donc pas associer la polysémie du concept uniquement à sa pluridisciplinarité. Le concept tend en effet à évoluer en même temps qu'évolue la conception des systèmes étudiés. Quoi qu'il en soit, il est désormais reconnu que la résilience étudie des systèmes : que ce soit des écosystèmes, des systèmes sociaux, des systèmes économiques, des systèmes spatiaux… Par cet ancrage systémique, la résilience favorise des approches pluridisciplinaires étudiant des systèmes de natures différentes. Il semble d'ailleurs pertinent de faire référence à une résilience systémique par opposition aux résiliences disciplinaires (Dauphiné et Provitolo, 2007 ; Provitolo, 2009).

De plus, malgré les diverses acceptations attachées à la résilience, il ne faudrait pas surestimer sa polysémie. En effet, à partir d'une étude pluridisciplinaire, il est possible d'en proposer une définition (Lhomme *et al.*, 2010), puisque deux termes semblent se dégager des définitions afférentes aux différentes acceptations du concept : l'absorption et la récupération. Afin d'appréhender la résilience, il semble donc nécessaire d'abandonner les analogies et les utilisations métaphoriques, qui pourront mener à des contresens, pour fonder ses réflexions sur une analyse précise des principales

acceptations du concept. Malgré tout, la résilience est au cœur de nombreux débats dans le domaine académique. En effet, même si le concept est bien défini, il semble parfois soulever des problématiques trop générales ne permettant pas de faire émerger des approches qui soient très structurées et vérifiables empiriquement. Autrement dit, si les questions soulevées par l'émergence de la résilience interrogent les scientifiques, ce qui est positif, il n'en reste pas moins que dans toutes les disciplines, de nombreux chercheurs s'interrogent toujours sur la pertinence heuristique du concept. Dans une même continuité, les chercheurs doutant de sa pertinence pratique sont encore plus nombreux.

11.2.4 Existe-t-il un décalage important entre les approches « opérationnelles » et les approches « académiques » ?

Lorsque l'on analyse précisément les pratiques attachées à la résilience, il ne semble pas avoir actuellement de bouleversement avec les pratiques passées. C'est pourquoi, des projets de recherche sont lancés pour trouver les solutions innovantes pouvant émerger de ce concept : comme le projet Resilis ou l'appel à projet « la résilience des territoires face aux risques dans un contexte de nouvelles approches de gestion et de risques émergents » du MEDDE. De plus, comme le concept de résilience fait l'objet de nombreux débats dans le domaine académique, ce qui le rend par conséquent difficile à appréhender, il peut paraître paradoxal que certains gestionnaires revendiquent de le mettre en œuvre. Existe-t-il alors un décalage important entre la mise en œuvre du concept et les travaux académiques qui émergent ?

Par exemple, dans le domaine académique, au moins deux courants existent en matière de résilience face aux inondations (Lhomme *et al.*, 2013). Un premier courant considère la résilience comme englobant l'ensemble des approches entreprises pour gérer les risques, les stratégies classiques de protection y étant alors incluses. Un deuxième courant tend à distinguer, voire à opposer, les stratégies de protection et les stratégies de résilience, la gestion des risques pouvant combiner ces deux approches (De Buijn, 2005). Or, si les gestionnaires se réfèrent généralement à la résilience d'une manière assez englobante, leur politique de gestion fait généralement abstraction des problématiques de rétablissement après une inondation. Cet aspect est pourtant présent dans les deux courants académiques identifiés et semble donc constituer une des caractéristiques principales de la résilience. Il existe donc bien un décalage entre les actions entreprises par les gestionnaires et les positionnements académiques.

De plus, une méthodologie récemment développée, qui s'appuie sur un raisonnement théorique et qui peut aussi se justifier par une analyse d'un certain nombre de retours d'expérience, met en exergue l'absence de vision systémique des territoires en matière de gestion des risques (Lhomme *et al.*, 2013). Généralement, l'absence de vision systémique au sein des territoires où les gestionnaires mettent en avant dans leurs discours des politiques de résilience peut sembler surprenante, alors même que la résilience est un concept issu du paradigme de la complexité. Les politiques menées en matière de gestion des risques ont encore pour objectif de diminuer les risques à zéro et ne reposent alors pas sur une acceptation des dommages consubstantiels aux inondations nécessitant dès lors de se focaliser sur le fonctionnement des territoires durant ces endommagements (*i.e.* sur les capacités d'absorption de ces territoires) et sur le rétablissement des territoires à ces endommagements (*i.e.* sur les capacités de récupération de ces territoires).

11.3 La résilience comme opportunité pour repenser le cadre théorique de la géographie des risques

L'approche traditionnelle en géographie concernant les risques naturels repose sur la distinction entre deux composantes du risque, l'aléa, qui désigne le processus physique source du danger et la vulnérabilité, qui renvoie à la propension de l'enjeu à subir un endommagement (Reghezza, 2006). Néanmoins, « si les définitions du risque tournent autour du binôme aléa-vulnérabilité, elles évoluent d'un chercheur à un autre sans qu'elles donnent pleine satisfaction pour autant » (Pigeon, 2005). En effet, comme la première partie l'a présenté, le concept de vulnérabilité se révèle polysémique. Ainsi, différents courants, correspondant à différentes manières d'appréhender la vulnérabilité, peuvent être identifiés (Reghezza, 2006), le risque se révélant alors polysémique. Au-delà des problèmes sémantiques, si au premier abord la dichotomie entre aléa et vulnérabilité est commode pour mettre en évidence la dimension sociale du risque et son irréductibilité au processus physique, cette dichotomie pose cependant un certain nombre de difficultés théoriques et méthodologiques. En effet, cette dichotomie plutôt simple favorise notamment les approches analytiques au détriment des approches systémiques (Meschinet de Richemond et Reghezza, 2010). C'est pourquoi dans les faits, « les méthodes et les notions que les chercheurs géographes emploient afin d'identifier et de comprendre les risques à partir des terrains qu'ils étudient posent des problèmes dont ils ont conscience » (Pigeon, 2005). Ce binôme favorise donc une lecture segmentée des phénomènes, « dans la mesure où d'un côté, les risques sont étudiés en fonction de l'aléa qui leur a donné naissance (on a ainsi des risques naturels, des risques technologiques, des risques sociaux, etc.), de l'autre, la vulnérabilité est appréhendée analytiquement, enjeu par enjeu, même si un travail d'intégration globale est ensuite mené » (Meschinet de Richemond et Reghezza, 2010). Cette approche segmentée permet de retrouver les spécialités traditionnelles de la géographie (telles que la géographie physique, la géographie humaine, la géographie urbaine), les risques offrant aux chercheurs qui s'en réclament un moyen de valoriser l'aspect appliqué de leurs réflexions (Pigeon, 2005).

> Or, certains risques mettent en jeu, par effet domino, des chaînes d'endommagement qui amplifient les conséquences de la perturbation de départ, multiplient le nombre et la nature des dommages, déplacent et diffusent les conséquences de l'aléa bien au-delà de la zone d'impact initiale. Une étude segmentée se heurte alors très vite d'une part à la multiplicité des aléas et d'autre part, au nombre et à la variété des enjeux présents sur des espaces hétérogènes.
> (Meschinet de Richemond et Reghezza, 2010)

Les classifications traditionnelles des risques, qui sont insatisfaisantes, sont révélatrices des problématiques liées à ce binôme théorique. Au sein de ce binôme, « l'exposition directe à l'aléa devient alors un critère commode de recensement des enjeux vulnérables. Ce qui signifie ipso facto que dans la plupart des cas, seuls les enjeux matériellement vulné-

rables sont recensés et font l'objet de mesures de gestion » (Meschinet de Richemond et Reghezza, 2010). En matière de gestion des risques, les problématiques liées à ce binôme sont évidentes, car tout élément situé en dehors d'une zone d'aléa peut difficilement être caractérisé comme étant à risque. De fait, ce binôme élude les relations complexes que les risques entretiennent avec les territoires. En effet, ce binôme met en exergue les aspects matériels du risque au détriment des aspects fonctionnels.

C'est pourquoi, il s'est révélé nécessaire de complexifier la notion d'endommagement qui traduit de manière tangible un des aspects de la réalisation du risque. Désormais, trois niveaux d'endommagement peuvent être distingués : le niveau matériel, le niveau structurel et le niveau fonctionnel (Gleyze et Reghezza, 2007). L'endommagement matériel implique le contact direct des différents enjeux matériels avec l'aléa et selon le système se traduira plus ou moins fortement par un endommagement fonctionnel. Les endommagements fonctionnels peuvent alors dépasser très largement les endommagements matériels circonscrits à la zone d'aléa. Or, « pour comprendre comment on passe d'un niveau à un autre, il est souvent nécessaire d'introduire un niveau intermédiaire » (Reghezza, 2006) : le niveau structurel. Ce niveau caractérise la mise en relation des composants d'un système, *i.e.* sa mise « en réseau ». Il requiert d'étudier l'organisation spatiale du système, *i.e.* sa configuration spatiale, et peut être analysé en termes de vulnérabilité, comme par la vulnérabilité structurelle des réseaux de transport dans un contexte de risque (Gleyze, 2005).

Néanmoins, cette focalisation sur l'endommagement renvoie presque uniquement au concept de vulnérabilité. Par exemple, cette grille de lecture néglige l'émergence de nouveaux aléas induits par ces endommagements, comme par exemple les aléas industriels engendrés par un aléa naturel. Cette approche est par conséquent restrictive. De plus, cette grille de lecture ne met pas en évidence les problématiques de remise en service et de reconstruction qui font notamment référence au concept de résilience. Abandonner les concepts traditionnels du risque, pour privilégier l'analyse concrète des processus de réalisation du risque ne semble pas une bonne solution. C'est pourquoi, il peut sembler pertinent de fonder un cadre théorique sur les concepts d'aléa, de vulnérabilité et de résilience. Ce triptyque permettrait notamment d'éviter les apories couramment attachées aux dichotomies.

Un nouveau cadre théorique propose d'associer respectivement les concepts d'aléa, de vulnérabilité et de résilience aux notions d'évènement, d'impact et de réponse (fig. 7). Chaque concept peut alors être considéré comme un prisme de lecture trouvant dans le système de réalisation des risques une traduction tangible, tandis que chaque notion met en exergue un des aspects centraux des concepts d'étude du risque, sans pour autant que ces concepts puissent y être réduits : l'aléa est étroitement associé à la notion d'évènement, la vulnérabilité à celle d'impact et la résilience à celle de réponse. Comme les trois notions interagissent fortement (puisque les évènements engendrent des impacts, ces impacts engendrant de nouveaux évènements, ces évènements et ces impacts nécessitant des réponses pour y faire face), il n'est pas possible de fixer précisément les limites entre chaque concept. Les trois concepts retenus pour définir le système de production du risque se placent donc dans un même *continuum*

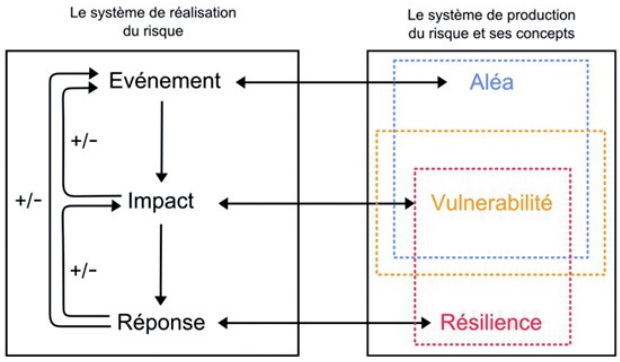


Fig. 7. — Proposition d'un nouveau formalisme du risque (Lhomme, 2012).

et se recoupent plus ou moins. Les trois notions permettent, quant à elle, de définir un véritable système de réalisation du risque, pouvant alors être formalisé mathématiquement à l'aide d'équation différentielle. La résilience apparaît donc comme une opportunité pour repenser le cadre théorique de la géographie des risques.

Conclusion

Le concept de résilience soulève beaucoup de questions qui restent encore sans réponse. Il est dès lors difficile d'aborder de manière exhaustive l'ensemble de ces questions. Néanmoins, il apparaît que certaines problématiques sont soulevées par des utilisations imprécises ou métaphoriques de la résilience pouvant être résolues à l'aide d'analyses approfondies et rigoureuses. Par exemple, la polysémie du concept de résilience ne doit pas être trop exagérée. De plus, comme la résilience se révèle être une opportunité pour repenser certains cadres théoriques, la pertinence heuristique du concept est réelle.

D'un point de vue pratique, la résilience semble en revanche soulever des attentes illégitimes. En effet, compte tenu des nombreuses interactions entre les concepts d'aléa, de vulnérabilité et de résilience, beaucoup de stratégies rentrant dans le cadre de la résilience ont déjà été mises en pratique dans le cadre de la gestion des aléas et des vulnérabilités. Cet état de fait remet donc fortement en question l'aspect novateur du concept de résilience. Malgré tout, comme les politiques menées par les gestionnaires négligent encore les rapports complexes existants entre les risques et les territoires, tandis qu'au contraire une analyse de la résilience des territoires met précisément en exergue cette complexité (Lhomme, 2012), les travaux sur la résilience pourraient à terme faire émerger des pratiques de gestion des risques plus innovantes.

Bibliographie

Boin A., McConnell A., « Preparing for Critical Infrastructure Breakdowns : The Limits of Crisis Management and the Need for Resilience », *Journal of Contingencies and Crisis Management*, 15(1), 2007, p. 50-59.

BRAND F. S., JAX K., « Focusing the meaning(s) of resilience : resilience as a descriptive concept and a boundary object », *Ecology and Society*, 12(1), 2007.

CARDONA O. D., « The Need for Rethinking the Concepts of Vulnerability and Risk from Holistic Perspective: A Necessary review and Criticism for Effective Risk Management », in BANKOFF G. and FRERKS D. H., *Mapping Vulnerability : Disasters, Development and People*, Earthscan Publishers, Londres, 2003.

COMFORT L. K., BOIN A., DEMCHAK C., *Designing Resilience. Preparing for Extrem Events*, Pittsburgh, University of Pittsburgh Press, 2010, 360 p.

CUTTER S., BARNES L., BERRY M., BURTON C., EVANS E., TATE E., WEBB J., « A place-based model for understanding community resilience to natural disasters », *Global Environmental Change*, 18(4), 2008, p. 598-606.

DAUPHINÉ A., *Risques et catastrophes*, Paris, Armand Colin, 2004, 276 p.

DAUPHINÉ A., PROVITOLO D., « La résilience : un concept pour la gestion des risques », *Annales de Géographie*, nº 654, 2007, p. 115-125.

DE BUIJN K. M., *Resilience and flood risk management — A systems approach applied to lowland rivers*, thèse de doctorat, Delft University Press (Hydraulics select series), 2005, 210 p.

DE BRUIJNE M., BOIN A., VAN EETEN M., « Resilience exploring the concept and its meanings, in *Designing Resilience », Preparing for Extrem Events*, ed. COMFORT L. K., BOIN A., DEMCHAK C., Pittsburgh, University of Pittsburgh Press, 2010, p. 13-32.

DEFOSSEZ S., *Évaluation des mesures de gestion du risque inondation. Application au cas des basses plaines de l'Aude*, thèse de doctorat de l'université de Montpellier 3, 2009, 420 p.

FABIANI J. L., THEYS J., *La société vulnérable*, Presses de l'E.N.S., 1987, 674 p.

GALLOPIN G. C., « Linkages between vulnerability, resilience and adaptive capacity », *Global Environmental Change*, 16(3), 2006, p. 293-303.

GLEYZE J. F., *La vulnérabilité structurelle des réseaux de transports dans un contexte de risque,* thèse de doctorat, université Paris VII, Laboratoire COGIT-IGN, 2005, 826 p.

GLEYZE J. F., REGHEZZA M., « La vulnérabilité structurelle comme outil de compréhension des mécanismes d'endommagement », *Géocarrefour*, vol. 82/1-2, 2007.

HOLLING C. S., « Resilience and stability of ecological systems », *Annual Review of Ecology and Systematics*, n°4, 1973, p. 1-23.

HOLLING C. S., « Engineering resilience *vs* Ecological resilience », in SCHULZE P.C. (ed.), *Engineering within ecological constraints*, Washington DC : National Academy Press, 1996.

KLEIN R. J., NICHOLLS R. J., THOMALLA F., « Resilience to Natural Hazards : How Useful is the Concept ? », *Environmental Hazards*, vol. 5, n° 1-2, 2003, p. 35-45.

LEDOUX B., *La gestion du risque inondation*, Tec et Doc, 2005, 770 p.

LHOMME S., *Les réseaux techniques comme vecteur de propagation des risques en milieu urbain. Une contribution théorique et pratique à l'analyse de la résilience urbaine*, LAGANIER R. & SERRE D. (sous la dir.), thèse de doctorat, université Paris Diderot, 2012, 365 p.

LHOMME S., SERRE D., LAGANIER R., DIAB Y., « Les réseaux techniques face aux inondations ou comment définir des indicateurs de performance de ces réseaux pour évaluer la résilience urbaine », *Le bulletin de l'association des Géographes français*, 2010, p. 487-502.

LHOMME S., SERRE D., LAGANIER R., DIAB Y., « La résilience de la ville de Dublin aux inondations : de la théorie à la pratique », *Cybergeo*, 2013.

MEADOWS D. H., *The Limits to growth ; a report for the Club of Rome's project on the predicament of mankind*, New York : Universe Book, 1972.

MESCHINET DE RICHEMOND N., REGHEZZA M., « La gestion du risque en France : contre ou avec le territoire ? », *Annales de géographie*, 673(3), 2010, p. 248-267.

PELLING M., *The Vulnerability of Cities : social resilience and natural disaster*, Earthscan, London, 2003.

PIGEON P., *Géographie critique des risques*, Economica, collection « Anthropos », Paris, 2005, 217 p.

PROVITOLO D., *Vulnérabilité et résilience : géométrie variable des deux concepts, séminaire résilience urbaine de l'ENS*, Paris, 2009.

REGHEZZA M., *Réflexions sur la vulnérabilité métropolitaine. La métropole parisienne face au risque de crue centennale*, thèse de doctorat, université Paris X – Nanterre, 2006.

REGHEZZA M., RUFAT S., DJAMENT-TRAN G., LEBLANC A., LHOMME S., « What resilience is not : Resilience use and abuse », *Cybergeo*, 2012.

TIMMERMAN P., *Vulnerability : resilience, and the collapse of society : a review of models and possible climatic applications*, University of Toronto, Institute of Environment Studies, 1981.

VINET F., 2010, *Le risque inondation*, Diagnostic et gestion, Éditions Tec & Doc Lavoisier, coll. « Science du Risque et du Danger (SRD) », 2010, 318 p.

WHITE G. F., HAAS J. E. « Assessment of research on natural hazards », Cambridge, MA: The MIT Press, 1975.

WHITE G. F., KATES R., BURTON I., « Knowing better and losing even more : The use of knowledge in hazard management », *Environmental Hazards*, vol. 3, 2001, p. 81-92.

WISNER B., O'KEEFE P., WESTGATE K., « Taking the Naturalness out of Natural Disaster », *Nature*, vol. 260, n° 5552, 1976, p. 566-567.

Chapitre 3
Outils de gestion

12 Accidents technologiques induits par une inondation (phénomène Natech) : développement de scénarios génériques

Carine El Hajj, Éric Piatyszek, Alicja Tardy & Valérie Laforest
Institut Henri-Fayol, École des Mines de Saint-Étienne (EMSE.SE). 158, Cours Fauriel, 42023 Saint-Étienne
elhajj@emse.fr

Résumé. — Les accidents technologiques ayant pour cause un aléa naturel (évènements dit Natechs) bien que rares peuvent avoir des conséquences assez catastrophiques comme lors du tremblement de Terre Tohoku et du tsunami du 11 mars 2011 au Japon. Ces évènements peuvent donc profondément déstabiliser des territoires et des sociétés. Malgré ce fait, l'analyse bibliographique souligne un manque d'expertise, de guides pour aider les industriels et les autorités dans leur politique de prévention et de protection. C'est pourquoi, basé sur un retour d'expérience, une méthode d'analyse de risque a été développée et a abouti à la construction de 3 scénarios génériques d'accidents décrivant l'ensemble des causes techniques et des conséquences d'un évènement Natech inondation. Ces scénarios, représentés sous forme de nœuds papillon, constituent la première étape de l'élaboration d'un outil de diagnostic et servent pour l'identification de mesures de prévention et de protection.
Mots-clés. — Natech, accidents déclenchés par une inondation, retour d'expérience, nœud papillon, MADS MOSAR.

Title. — *Industrial Accidents Triggered by Floods (Natech events) : Development of generic scenarios*
Abstract. — *Interactions between natural events and industrial installations may lead to dangerous phenomena. According to bibliographical research, the industrial sector is often unprepared to these natural-technologic or Natech events mainly because of the lack of guidelines on how to apply Natech regulations and the lack of information on the dynamics of Natechs. In order to fill the gaps and based on lesson learned, a systematic risk analysis methodology was developed and resulted in proposing three general accidental scenarios triggered by flood events. These scenarios are represented using the bow-tie tool and validated in three industrial sites threatened by floods. These bow-ties were designed as a first step for the development of a diagnosis tool, along with a list proposing preventive and protective measures, to be used by operators in order to decrease the vulnerability of their industrial facilities to technological accidents triggered by floods.*
Keywords. — *Natech, Accident Triggered by Floods, Lessons Learned, Bow-tie, MADS MOSAR.*

Introduction contexte

Les accidents technologiques ayant pour cause un aléa naturel restent somme toute assez rares. En effet, ils représentent entre 2 et 7 % du total des accidents (Sengul *et al.*, 2012 ; Rasmussen, 1995). Néanmoins, il est intéressant de noter que ces évènements ont tendance à augmenter (Young *et al.*, 2004 ; Sengul *et al.* 2012). Bien que rares, les conséquences de tels accidents peuvent être assez catastrophiques. Il suffit pour cela de se remémorer les images de la centrale nucléaire de Fukushima suite au tsunami du 11 mars 2011 sur la côte de Tohoku. Ces interactions entre aléa naturel et sites industriels aboutissant à un accident technologique et notamment des rejets de substances dangereuses, sont souvent caractérisées sous le terme d'accidents « Natech » (Showalter et Myers, 1994 ; Cruz, 2003 ; Steinberg *et al.*, 2008 ; Kon *et al.*, 2010).
En ce qui concerne la prévention, ces phénomènes Natech sont peu étudiés. Les mesures de sécurité, prises notamment à partir de l'étude de danger, sont conçues pour prévenir les accidents technologiques dans les installations industrielles, mais ne sont généralement pas faites pour prendre en compte les rejets de substances dangereuses déclenchés et simultanés aux catastrophes naturelles (Cruz, 2003 ; Cruz *et al.*, 2004; Young *et al.*, 2004). De plus, l'analyse des lois en vigueur (notamment loi n° 2003-699 du 30 juillet 2003, décret n° 2005-1466, 2010-1254, 2010-1255 et l'arrêté du 24 janvier 2011) montre qu'elles ont pour objectif principal de s'assurer notamment que les sites industriels sont conçus et bâtis pour résister aux aléas naturels. Enfin, il y a très peu de textes ou dispositifs réglementaires qui associent la gestion technique et organisationnelle des deux risques couplés et qui régissent la performance de mesures non-structurelles et des interventions d'urgence pendant une catastrophe naturelle (Cruz et Norio, 2008).
Même si souvent l'ampleur de tels phénomènes n'atteint pas, et heureusement, la gravité des évènements japonais de mars 2011, de par sa nature, la gestion du risque Natech est relativement complexe. Car ces accidents technologiques surviennent alors que le « système qui doit assurer la résilience » et les moyens technico-juridiques mis en place par la gouvernance des risques (services départementaux de secours, équipes industrielles…) sont déjà en période de « stress » dû à l'aléa naturel (Kraussman et Mushtaq, 2008). Les accidents Natech sont également problématiques du fait des évènements en cascade qui peuvent avoir lieu plus probablement durant une catastrophe naturelle que durant le fonctionnement normal d'une installation industrielle vu que l'aléa naturel est susceptible de toucher plusieurs fonctions au niveau du site provoquant plusieurs défaillances simultanées.

Le retour à la « normale » suivant un accident Natech est, quant à lui, beaucoup plus difficile que dans le cas d'un accident technologique classique, étant donné que les conditions économiques et sociales de l'installation industrielle et de son entourage peuvent être gravement altérées suite à la catastrophe naturelle (Steinberg *et al.*, 2008).
L'ensemble de ces constatations démontre que les évènements Natech peuvent profondément déstabiliser des territoires et des sociétés. L'objectif des travaux présentés dans cet article est de mieux comprendre la vulnérabilité physique des entreprises exposées aux inondations de manière à identifier et définir des mesures de prévention et de protection adéquates qui permettront d'éviter ou du moins réduire les conséquences d'un accident technologique imputable à une inondation. Il s'agit d'identifier les mécanismes et les causes menant de l'aléa naturel inondation à la survenue d'un accident technologique. Ces connaissances seront formalisées sous forme de scénarios génériques d'accidents. Ce travail est mené en analysant des retours d'expérience, et en exploitant ces informations par le biais de méthodes d'analyse de risque consacrées (MADS/MOSAR et nœuds papillons) afin d'aboutir à des scénarios génériques d'accidents qui seront finalement validés auprès de trois sites industriels du bassin versant de la Loire. Ces trois étapes de la démarche font l'objet des trois paragraphes de cet article.

12.1 Retour d'expérience sur les accidents Natech Inondation

12.1.1 Notion de Retour d'Expérience et difficultés rencontrées

Le Retour d'expérience (REX) peut être défini au sens large comme « la formalisation d'un évènement passé pour tirer des enseignements d'une expérience vécue afin d'en éviter la répétition » (Wassenhove et Garbolino, 2008). Dans le domaine de la prévention des risques, le REX consiste le plus souvent en une étude analytique causale des différents facteurs impliqués dans la genèse des incidents ou accidents. Dans ce cadre, les accidents de type Natech inondation sont ainsi analysés afin d'en tirer des enseignements et de comprendre le comportement réel d'un système industriel face à ce risque.
Toutefois, ce REX se heurte à un écueil de taille qui est la faible quantité d'information disponible. En effet, malgré le fait que le risque Natech soit un risque émergent qui attire de plus en plus l'attention depuis ces vingt dernières années (Kraussman et Mushtaq, 2008) (Cruz *et al.*, 2004), il existe très peu d'informations sur ce risque du fait notamment d'un manque de rapports et de données standardisés d'accidents (Cruz *et al.*, 2004 ; Köppke, 2012). De plus, la plupart de ces études concernent des accidents Natech déclenchés par des tremblements de terre (Reitherman, 1982 ; Lindell et Perry, 1997 ; Cruz et Steinberg, 2005 ; Cozzani *et al.*, 2010 ; Krausmann, Cruz et Affeltranger, 2010 ; Krausmann et Cruz, 2013) et quelques une portent sur les conséquences des ouragans (Cruz et Krausmann, 2008, 2009 ; Santella *et al.*, 2010).
Malgré ce verrou, ce REX s'est appuyé sur trois types de source d'information principale (au total plus d'une trentaine de références ont été consultées, les plus importantes sont mentionnées dans le corps de cet article) :

- une analyse directe de la base de données ARIA,
- la consultation d'analyses de bases d'accidentologie réalisées par des tiers,
- une analyse directe d'une série d'accidents Natech inondation mentionnés dans des rapports d'accidents et des publications scientifiques.

12.1.2 Principales connaissances acquises

Interaction aléa-Entreprise : vers la notion d'impacts induits
Une inondation peut provoquer trois types de conséquences au niveau d'une industrie : des impacts directs, des impacts indirects et des impacts induits (Ledoux et Hubert, 1999 ; Mangual, 2005).

- Les impacts directs sont les conséquences (généralement des pertes/dommages) causées par les eaux d'inondation sur les biens, les équipements et les personnes.
- Les impacts indirects sont les conséquences particulières engendrées par les dommages directs (chômage, coût du nettoyage, perte d'exploitation). Elles affectent l'installation et ne génèrent pas de risque supplémentaire pour son environnement.
- Les impacts induits représentent les conséquences environnementales des accidents technologiques déclenchés par des inondations. Ils s'observent lorsque les impacts directs deviennent une source supplémentaire de danger (un évènement est déclenché par un autre évènement), et génèrent un risque technologique pour le voisinage de l'entreprise. C'est ce troisième type d'impact qui amène l'accident NATECH et qui sera étudié dans la suite de l'article.

Vision macroscopique du phénomène Natech
De manière très macroscopique et schématique, un accident Natech est caractérisé par (Fendler, 2008, Young *et al.*, 2004, Kon *et al.*, 2010) :

- Une interaction entre un aléa naturel et une installation industrielle, sous forme de dommages à l'installation industrielle. Les types de dommages concernés sont ceux qui sont responsables de rejets de substances dangereuses et de défaillance de systèmes industriels de contrôle.
- Ces dommages peuvent provoquer des accidents technologiques : la pollution de l'environnent, les incendies et les explosions.
- Les accidents technologiques peuvent porter atteinte à l'extérieur du site industriel : aux habitants aux alentours, aux industries avoisinantes et à l'environnement.

Étude des mécanismes amenant à un accident Natech inondation

– Introduction de la notion d'équipement critique.

Ce sont les rejets de substances dangereuses provoqués par l'inondation qui peuvent évoluer en phénomènes dangereux (incendies, explosions, pollutions). Ceci implique que l'inondation peut toucher plusieurs parties de l'entreprise mais seulement certains équipements sont considérés comme potentiellement critiques vis-à-vis des accidents Natech inondation. Il s'agit des équipements qui contiennent ces substances dangereuses (El Hajj *et al.*, 2012).

Dans le cas de l'inondation d'une installation industrielle, les réservoirs de stockage atmosphériques, les réacteurs atmosphériques et les canalisations aériennes sont les équipements critiques qui ont été le plus fréquemment endommagés (Cozzani *et al.*, 2010). Bien sûr, en fonction de l'intensité de l'aléa inondation, les eaux peuvent induire des catégories différentes de dommages structuraux (appelés évènements critiques) aux équipements critiques.

– Analyse des dommages sur les équipements critiques.

L'analyse REX a démontré que les évènements critiques (dommages structuraux aux équipements critiques) peuvent résulter soit d'effets directs des eaux d'inondation sur les équipements critiques soit d'effets indirects.

Les effets directs correspondent aux impacts directs sur les équipements critiques des eaux d'inondation ou de matériaux transportés par ces eaux. Il peut s'agir des impacts :

– des eaux d'inondation,
– de débris externes contenus dans les eaux d'inondation,
– d'équipements industriels charriés par les eaux d'inondation,
– avec des équipements industriels adjacents (mise en mouvement de l'équipement critique),
– avec des structures de bâtiment charriées par les eaux d'inondation.

Les effets indirects sont les impacts des eaux d'inondation ou de matériaux contenus dans les eaux d'inondation sur d'autres équipements industriels qui à leur tour vont provoquer des dommages structuraux aux équipements critiques. Il s'agit de :

– défaillances de systèmes de contrôle de température qui peuvent causer une variation de température de l'équipement critique,
– défaillances de système de chauffage ou de refroidissement provoquant une variation de température de l'équipement critique,
– défaillances de systèmes électriques qui peuvent être responsables de coupure électrique, d'onde de chaleur, potentielle source d'incendie endommageant l'équipement critique,
– effets domino des phénomènes dangereux déclenchés (incendies et explosions) qui peuvent être responsable d'onde de chaleur, de choc et/ou de missiles provoquant des dommages supplémentaires aux équipements critiques.

– Analyse des conséquences

Les dommages aux équipements industriels dits critiques peuvent provoquer un rejet de substances dangereuses (en anglais, LOC : *Loss of Containment*). Et les rejets de substances dangereuses à leur tour seront responsables des accidents technologiques (pollutions, incendie, explosion).

Les accidents induits par les LOC dépendent des propriétés des substances rejetées. Dans le cas des accidents Natech inondation, quatre types de substances dangereuses peuvent provoquer des phénomènes dangereux : les substances inflammables, toxiques, réagissant violemment avec l'eau et réagissant avec les incendies et autres ondes de chaleur (Cozzani *et al.*, 2010). Ces scénarios dépendent également des conditions des rejets tels que : la présence de source d'ignition qui va conditionner l'inflammabilité de certaines substances rejetées ou le confinement qui va conditionner l'explosion d'autres substances dangereuses rejetées.

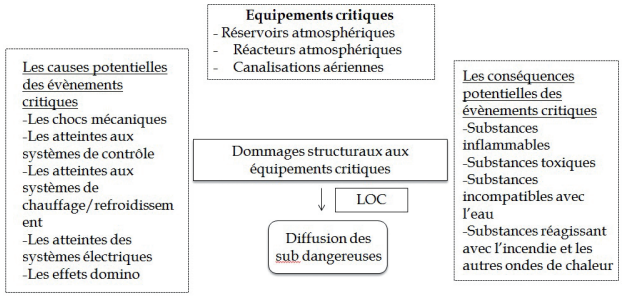


Fig. 1. — Synthèse des éléments tirés du REX.

12.1.3 Synthèse

Ce retour d'expérience a permis de mieux comprendre les mécanismes susceptibles d'engendrer un accident Natech lors d'une inondation. Il ressort que :

– les accidents Natech sont imputables à un *rejet de matière dangereuse* (ou LOC) sur des *équipements dit critiques* (canalisation, réservoir de stockage, réacteur) contenant les dites substances dangereuses ;
– Les dommages aux équipements critiques amenant à ces rejets sont dus à des *impacts directs ou indirects* des eaux d'inondation sur les dits équipements ;
– Les rejets de matières dangereuses vont généralement amener à 3 types d'accidents (incendie, pollution, explosion) en fonction de 4 types de matières dangereuses concernés : les substances inflammables, toxiques, réagissant violemment avec l'eau et réagissant avec les incendies et autres ondes de chaleur.

Ces éléments sont synthétisés figure 1.

12.2 Développement de scénarios génériques d'accidents technologiques induits par l'inondation

L'élaboration de ces scénarios génériques d'accidents nécessite d'identifier des points critiques et des défaillances potentielles provoquées par l'inondation d'une installation industrielle. Ceci a été notamment réalisé avec le REX précédent. Cette analyse *a posteriori* va venir avantageusement compléter une analyse de risque *a priori* utilisant des outils des « Science du Danger » à savoir MADS-MOSAR.

12.2.1 Présentation de MADS-MOSAR

Cette méthode d'analyse de risques a été développée par Pierre Perilhon du Commissariat à l'Énergie Atomique en collaboration avec des universitaires de Bordeaux (Lesbats, 2012 ; Périlhon, 2007 ; Perilhon *et al.*, 1993). La méthode MADS-MOSAR s'appuie sur un modèle de référence : le processus de danger. Ce modèle « définit l'accident comme un évènement non souhaité résultat de l'atteinte d'une ou plusieurs cibles de danger par un flux de danger lui-même issu d'une source de danger. Des évènements internes ou non au système étudié peuvent aggraver la situation » (Gardes, 2001) (figure 2).

Ce processus montre l'enchainement des évènements qui, à partir de l'évènement initiateur, conduit à un changement d'état de la cible (Périlhon, 2007). Il repose sur les notions :

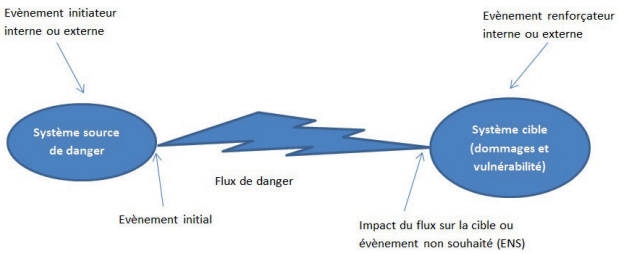


Fig. 2. — Processus de danger (adapté de Périlhon, 2007).

- de système source : système à l'origine des flux de danger donc des évènements non souhaités ;
- de système cible : système sensible aux flux de danger et subissant des dommages ;
- d'évènement initial : évènement qui caractérise le changement d'un système qui passe d'un état ou d'une situation normale à un état ou une situation défaillante ;
- d'évènement non souhaité ; de flux de danger ; d'évènement initiateur et d'évènement renforçateur.

En s'appuyant sur ce modèle de processus, la méthode d'analyse de risque MADS-MOSAR comporte notamment les étapes suivantes :

– Modéliser l'objet d'étude dans son contexte : découpage de l'objet en sous-systèmes,
– Identifier les sources de danger : en quoi chaque sous-système précédent peut être une source danger et identification des différents processus de danger,
– Identifier des scénarios de risque : l'étude des interactions entre les différents processus de danger permet de construire des scénarios de risque.

C'est cette démarche qui est employée pour bâtir les scénarios génériques d'accidents Natech et qui est développée dans les paragraphes suivants.

12.2.2 Modélisation systémique de l'entreprise et de son environnement

Le but de cette étape est de diviser le système installation industrielle en plusieurs sous-systèmes, responsables du déclenchement d'accidents technologiques majeurs suite à l'inondation du site. Chaque sous-système peut être, dans le cadre de l'analyse de risque, soit un système source de danger, soit un système cible, soit les deux.
En s'inspirant de la méthode MADS-MOSAR, la représentation systémique suivante (figure 3) a été élaborée.
Le système principal constituant le contexte d'étude est l'installation industrielle. Plus précisément, ce sont les parties de l'industrie qui sont impliquées, directement et indirectement, dans la génération d'accidents technologiques induits par l'inondation (les sources de danger) qui ont été prises en considération :

– SS1 : Les équipements identifiés comme étant critiques. Il s'agit des équipements qui contiennent des substances dangereuses : réservoirs de stockage atmosphériques, réacteurs atmosphériques et canalisations aériennes.
– SS2 : Les structures du bâtiment et les équipements non critiques (autres équipements industriels classés non critiques). Ce sous-système est notamment responsable d'onde de choc susceptible d'endommager les équipements critiques.

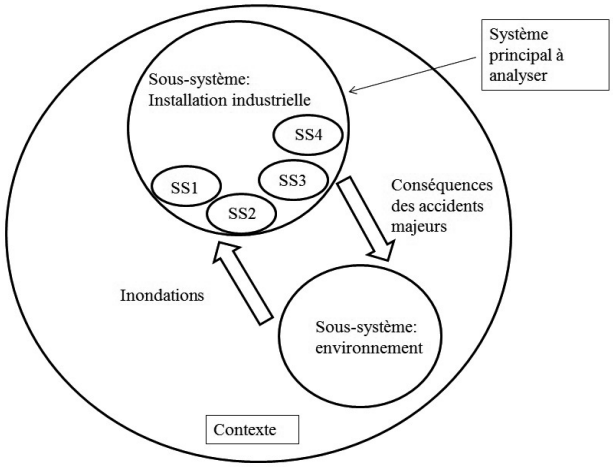


Fig. 3. — Représentation systémique du contexte d'étude.

– SS3 : Les équipements électriques qui peuvent être responsables de coupures électriques, d'ondes thermiques suivies d'incendies.
– SS4 : Les systèmes de contrôle de température, de refroidissement et de chauffage qui peuvent provoquer des déclenchements de réactions endommageant les équipements critiques.

Le second sous-système constituant le contexte est le sous-système environnement SS5 (figure 3). Il est constitué de l'eau, le sol, l'air et les habitants, leurs biens et les autres entreprises situés aux alentours de l'installation industrielle. Il va à la fois générer les inondations puis subir les conséquences de l'accident technologique induit par ces inondations.

12.2.3 Identification des sources de danger

Chaque sous-système du système « installation industrielle » est analysé afin de comprendre comment il peut être, suite à une inondation, système source et/ou cible de danger d'accidents majeurs. Il s'agit de mettre en évidence les interactions entre les différents sous-systèmes. Ces interactions sont concrétisées sous forme de processus de dangers (au sens de la figure 2).
Lors de cette analyse, il a été possible d'identifier :

– en quoi chaque élément des sous-systèmes peut être source ou cible de danger d'accidents majeurs suite à l'inondation du site industriel, et donc toutes les sources et cibles de danger d'une installation industrielle ;
– les processus de danger que peuvent générer les systèmes sources par rapport aux systèmes cibles qu'ils peuvent atteindre.
– des évènements critiques correspondants aux différents équipements critiques (comme définis au 12.1.2) pris en compte dans cette étude.

Concernant ce dernier point, cette analyse a permis de définir trois évènements critiques qui peuvent toucher les différents équipements critiques d'une installation industrielle :

– La brèche du contenant : Il s'agit de la rupture de la paroi des équipements critiques réacteur industriel (fermé ou ouvert) et réservoir de stockage/réservoir de stockage intermédiaire de produits chimiques.
– Le renversement de l'équipement : Il s'agit du renversement instantané de l'ensemble du contenu d'un réacteur

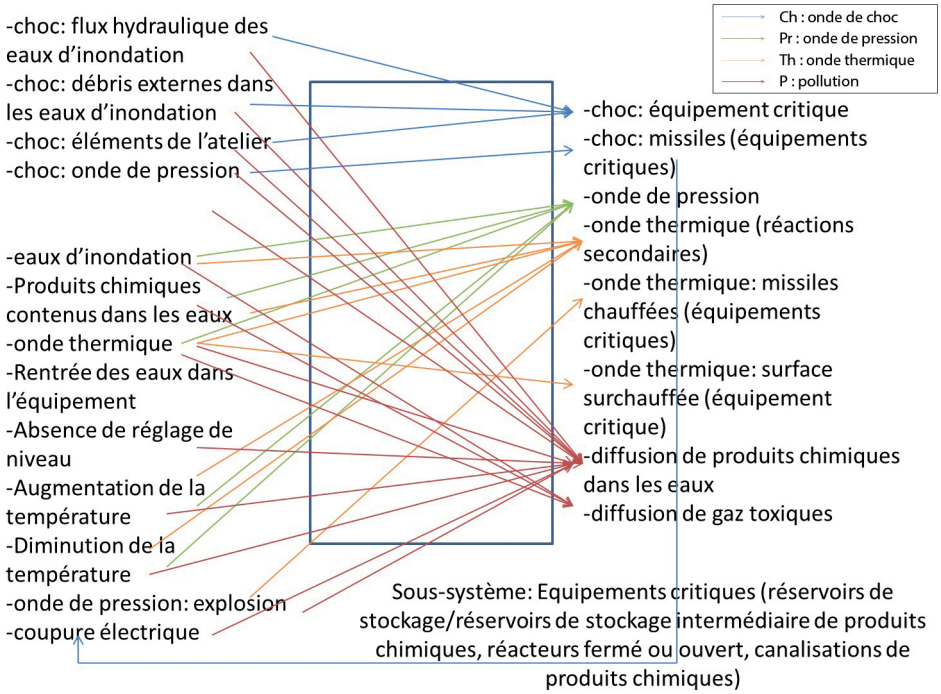


Fig. 4. — Boîte noire correspondant au sous-système « Équipement critique ».

ou d'un réservoir de stockage/réservoir de stockage intermédiaire de produits chimiques.

– La rupture de canalisations : Il s'agit d'une rupture totale ou partielle d'une canalisation, ce qui peut provoquer des rejets de substances dangereuses.

12.2.4 Identification des scénarios de risque

L'approche MADS-MOSAR s'appuie sur la technique des boîtes noires pour construire des scénarios. Il s'agit de la recherche des interactions entre les différents processus de danger (identifiés antérieurement dans l'étape 12.2.3). Chaque sous-système du système principal identifié constitue une boîte noire (figure 4). Pour chaque boîte noire, il a été identifié :

– des scénarios courts : Il s'agit des scénarios linéaires entre entrées et sorties,
– des scénarios longs :
  - les scénarios obtenus à partir d'évènements issus de combinaisons d'évènements en entrée et en sortie de la boîte noire ;
  - les scénarios de rétroaction entre les entrées et les sorties de la boîte noire.

Ensuite, en reliant les différents sous-systèmes (représentés ici sous forme de boîtes noires) d'autres scénarios longs sont générés. L'ensemble des interactions (au sens processus de danger) des différents systèmes identifiés dans la phase de modélisation, est ainsi pris en compte et représenté graphiquement (figure 5).

12.2.5 Développement des scénarios génériques de risque Natech inondation

Comme il a été précisé en synthèse du REX (12.1.3), les accidents Natech sont imputables à un rejet de matière dangereuse sur des équipements dit critiques (canalisation, réservoir de stockage, réacteur) contenant les dites substances dangereuses. Ces rejets surviennent suite à des dommages structuraux (ou évènements critiques) sur ces équipements. L'analyse MADS-MOSAR a permis d'identifier 3 grands types d'évènements critiques (12.2.3) :

– La brèche du contenant :
– Le renversement de l'équipement
– La rupture de canalisations.

Ces trois évènements sont donc à l'origine des accidents NATECH dus à une inondation. Grâce à l'analyse de risque précédente et notamment la représentation boîte noire (figure 5), il va être possible de construire les trois scénarios concourant à la réalisation de ces trois évènements critiques. Ces trois scénarios sont représentés sous forme de trois arbres des causes (figure 6). L'ensemble des causes amenant à un accident Natech sur une installation ICPE inondée a ainsi été synthétisé à l'aide de ces trois arbres.

Également, il est possible d'élaborer un scénario montrant les conséquences (ou impacts) sur l'environnement de la survenue de ces trois évènements critiques. Ce scénario prend la forme d'un arbre des conséquences. Un seul arbre de conséquence est nécessaire (figure 7). En effet, les trois évènements critiques vont tous aboutir à la libération de matière dangereuse (donc une conséquence directe unique et identique). Le REX a mis en évidence que 4 types de substances dangereuses peuvent provoquer des phénomènes dangereux durant un accident Natech inondation : les substances inflammables, toxiques, réagissant violemment avec l'eau et réagissant avec les incendies et autres ondes de chaleur (12.1.3). Ainsi, l'arbre de conséquences développé est divisé en quatre branches différentes. Chaque branche correspond à un type de substance dangereuse et représente les scénarios d'accidents relatifs au rejet de ce type de substance dangereuse.

Finalement en réunissant un arbre de défaillances et un arbre d'évènements, centrés sur un même évènement redouté, on

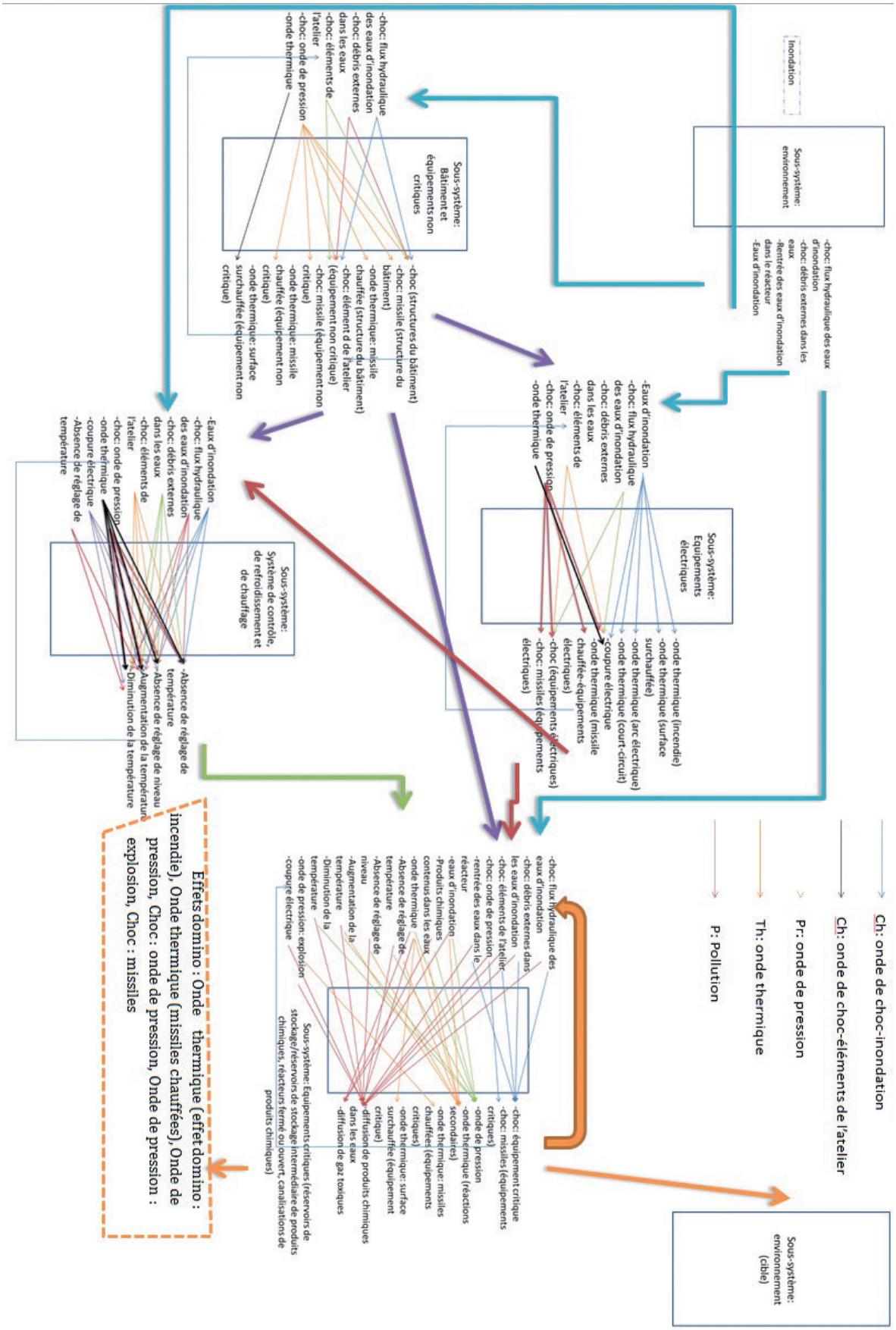


Fig. 5. — Interaction entre les boîtes noires correspondant aux différents sous-systèmes.

Evènement indésirable		Détails des causes directs		Causes directs		Evènement critique
Inondation	OU			choc: flux hydraulique	OU	Brèche du contenant
				Emportement/flottaison de l'équipement		
				choc: débris externes dans les eaux d'inondation		
		Affouillement du sol		Atteinte aux fondations de l'équipement		
Inondation	OU	choc: flux hydraulique		choc: équipement critique		
Equipement critique		choc: débris externes dans les eaux d'inondation				
		choc: éléments de l'atelier				
		choc: onde de pression				
Inondation	OU	choc: flux hydraulique (Affouillement du sol)		choc: structure du batiment		
Batiment		choc: flux hydraulique				
		choc: débris externes dans les eaux d'inondation				
		choc: éléments de l'atelier				
		choc: onde de pression				
		onde thermique				
Inondation	OU	choc: flux hydraulique		choc: équipement non critique		
Equipement non critique		choc: débris externes dans les eaux d'inondation				
		choc: éléments de l'atelier				
		choc: onde de pression				
Inondation	OU	choc: flux hydraulique		choc: équipement électrique		
Equipement électrique		choc: débris externes dans les eaux d'inondation				
		choc: éléments de l'atelier				
		choc: onde de pression				
Effet domino: explosion	OU	Missiles		choc: équip crit, non crit, élec, str. du bat		
		onde de pression		choc		
		explosion/incendie (interne)		stress mécanique		
Effet domino: incendie	OU	incendie		onde thermique		
		Dilatation du contenu		stress mécanique		
		dégagement de gaz internes		stress mécanique		
		explosion/incendie (interne)		stress mécanique		
choc: flux hydraulique	OU	Défaillance du système de contrôle de température (augmentation de la T)	OU	réaction d'emballement/stress mécanique		
choc: débris externes dans les eaux d'inondation				réaction chimique secondaire/stress mécanique		
choc: éléments de l'atelier						
choc: onde de pression						
coupure électrique						
effet domino: incenide, explosion						
choc: flux hydraulique	OU	Défaillance du système de refroidissement	OU	réaction d'emballement/stress mécanique		
choc: débris externes dans les eaux d'inondation				réaction chimique secondaire/stress mécanique		
choc: éléments de l'atelier						
choc: onde de pression						
coupure électrique						
effet domino: incenide, explosion						
Absence de réglage de température						
choc: flux hydraulique	OU	Défaillance du système de contrôle de température (diminution de la T)		réaction chimique secondaire/stress mécanique		
choc: débris externes dans les eaux d'inondation						
choc: éléments de l'atelier						
choc: onde de pression						
coupure électrique						
effet domino: incenide, explosion						
choc: flux hydraulique	OU	Défaillance du système de chauffage		réaction chimique secondaire/stress mécanique		
choc: débris externes dans les eaux d'inondation						
choc: éléments de l'atelier						
choc: onde de pression						
coupure électrique						
effet domino: incenide, explosion						
Absence de réglage de température						
Inondation		flash court-circuit		onde thermique: incendie		
Equipement électrique						

Fig. 6. — Arbre de causes correspondant à l'évènement critique « brèche du contenant ».

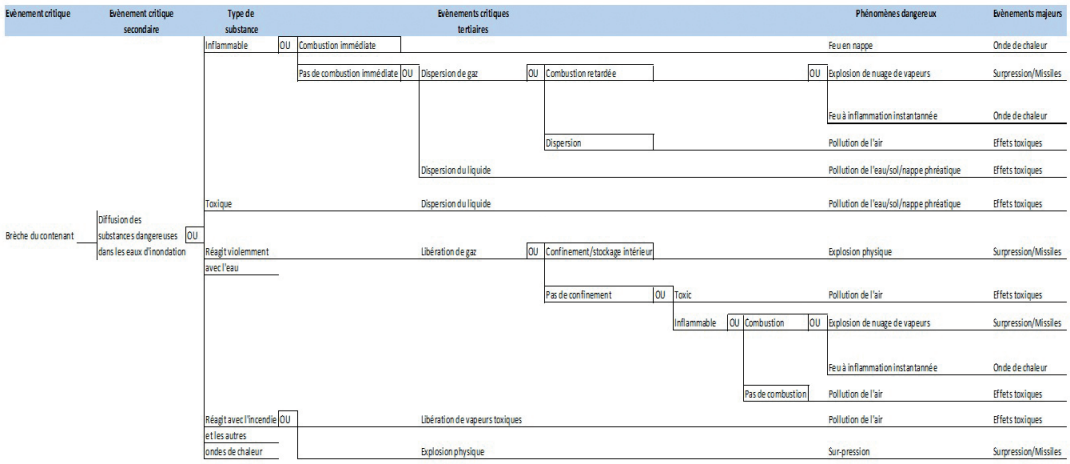


Fig. 7. — Arbre de conséquences ici associé à l'évènement critique « Brèche du contenant ».

construit un nœud papillon (IDDIR, consulté le 19 janvier 2011). Dans le cadre de ce travail, l'évènement redouté central est un des trois évènements critiques définis précédemment. La partie gauche du nœud papillon est constituée par l'arbre de causes du dit évènement critique et la partie droite par l'arbre d'évènements.
Ainsi, ce travail a abouti au développement de trois nœuds papillons (scénarios) génériques qui permettent de représenter les causes et les conséquences des accidents Natech survenant lors d'une inondation d'une installation industrielle.

12.3 Validation des scénarios génériques en secteurs industriels

Cette validation a un double objectif :

- S'assurer de la complétude des scénarios proposés. C'est-à-dire de vérifier si les situations rencontrées dans ces entreprises sont effectivement représentées soit dans l'arbre des causes soit du côté des conséquences. Dans le cas contraire, il faudra compléter les arbres.
- Confirmer la plausibilité des situations décrites dans ces scénarios. Il s'agit d'identifier les situations décrites par les branches des arbres qui se sont effectivement déroulées lors de crue, ou en se basant sur la connaissance des industriels, les situations qui pourraient avoir lieu.

La validation s'effectue en deux temps. Une analyse *a posteriori* si le site a déjà subi des inondations, et une analyse *a priori* prospective, au cours de laquelle des situations plausibles sont envisagées avec l'industriel afin de rechercher ce qui pourrait se passer et comment cela pourrait arriver. Pour cela, plusieurs entreprises du bassin ligérien ont été contactées. En date de rédaction de cet article, trois entreprises ont répondu favorablement.

12.3.1 Entreprise E1

L'entreprise E1 située à Saint-Galmier est une usine agro-alimentaire. Elle a pour activité principale l'embouteillage et le conditionnement d'eau minérale. E1 se situe au bord de la Coise, affluent direct de la Loire. La dernière crue importante date du 2 novembre 2008. Cette crue a fortement endommagé le site sans néanmoins provoquer d'accident technologique. L'analyse de cet évènement (analyse *a posteriori*) a permis de montrer que plusieurs branches de l'arbre des causes s'étaient réalisées (par exemple dommages provoqués par des débris externes charriés par les eaux d'inondation) sans toutefois amener à la perte de confinement du fait de la présence de mesure de prévention. L'analyse prospective, quant à elle a montré la complétude des trois scénarios proposés.

12.3.2 Entreprise E2

L'entreprise E2 est une PME située à Saint-Étienne. Elle a comme activité principale le revêtement de surface, plus particulièrement le chromage dur, le nickelage chimique et le nickelage-chromage. L'entreprise E2 est située au bord du Furan, affluent de la Loire, en zone inondable rouge du PPRI. Malgré cet emplacement et heureusement pour elle, cette entreprise n'a jamais été inondée. La validation n'a donc porté que sur l'analyse *a priori*. Cette analyse a également mis en avant la plausibilité de certaines branches des scénarios génériques et a montré leur complétude (aucune nouvelle situation à la fois en termes de cause que de conséquence n'a pu être identifiée).

12.3.3 Entreprise E3

L'entreprise E3 est une PME située à Saint-Étienne. Elle a comme activité principale le revêtement de surface, plus particulièrement le zingage, le zingage-nickelage, l'argentage, le cuivrage. Le PPRI du bassin du Furan indique que E3 est située dans la zone hachurée par rapport au risque d'inondation et est donc soumise à un risque de ruissellement urbain comme le confirme trois inondations (2003, 2007, 2008) dues à des remontées par les réseaux. Ces trois inondations n'ont pas provoqué d'accident Natech mais sérieusement endommagé l'entreprise notamment lors de celle 2003. L'analyse a posteriori de ces trois évènements a confirmé la plausibilité de plusieurs causes de dommage (partie gauche des scénarios), notamment :

- Des court-circuits des équipements électriques touchés par les eaux d'inondation,
- la flottaison d'équipements industriels accompagnés du détachement des canalisations qui lui sont reliées.

L'analyse *a priori* a confirmé la plausibilité des scénarios, notamment pour la partie conséquence.
Ces trois premiers exemples ont permis de valider les trois scénarios génériques bâtis. Néanmoins, il faudra augmenter l'échantillon de validation et notamment essayer de trouver des entreprises ayant subi une inondation suivie d'un accident technologique afin de s'assurer de l'exhaustivité de ces scénarios.

Conclusion

Ce travail a permis d'élaborer des scénarios génériques représentant les causes et les conséquences des accidents Natech survenant lors d'une inondation d'une installation industrielle. La validation qui a suivi leur création semble montrer le caractère exhaustif et plausible de ces scénarios. Ces scénarios vont constituer la base pour la définition de Mesures de maîtrise du risque (M.M.R.) Natech inondation et vont permettre l'élaboration d'un outil de diagnostic de vulnérabilité au risque Natech inondation à destination des industriels.

Bibliographie

Cozzani V., Campbel E., Renni E., Krausmann E., « Industrial accidents triggered by floods events : Analysis of past accidents », *Journal of hazardous Materials* 175, 2010, p. 501-509.

Cruz A. M., *Joint Natural and Technological Disasters : Assessment of Natural Disaster Impacts on Industrial Facilities in Highly Urbanized Areas*. Dissertation. Tulane University, New Orleans, LA., 2003, 212 p.

Cruz A. M., Norio O., « Consideration of natural hazards in the design and risk management of industrial facilities », *Nat Hazards* 44, 2008, p. 213-227.

Cruz A. M., Krausmann E., « Damage to offshore oil and gas facilities following hurricanes Katrina and Rita : An overview », *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 21 (6), 2008, p. 620-626.

Cruz A. M., Krausmann E., « Hazardous-materials releases from offshore oil and gas facilities and emergency response following Hurricanes Katrina and Rita », *Journal of Loss Prevention in the Process Industries,* 22(1), 2009, p. 59-65.

Cruz A. M., Steinberg L. J., « Industry Preparedness for Earthquakes and Earthquake-Triggered Hazmat Accidents during the Kocaeli Earthquake in 1999 : A Survey », *Earthquake Spectra*, 21(2), 2005, p. 285-303.

Cruz A. M., Steinberg L. J., Vetere Arellano A. L., Nordvik J. P., Pisano F., *State of the art in Natech Risk Management (No. EUR 21292 EN)*. Joint Research Center European commission, 2004.

El Hajj C., Piatyszek, E., Laforest V., « Development of generic scenarios of industrial accidents triggered by floods : a first step toward decreasing the vulnerability of industrial facilities », Brebbia, C. A. (éd.), 2013. *8th International Conference on Risk Analysis and Hazard Mitigation — Risk Analysis* 2012 : September 19-21, 2012, Brac, Croatia. WIT Press, ISBN : 978-1-84564-620-2.

Fendler R., « Floods and safety of establishments and installations containing hazardous substances — Conclusions on a reserach project of the german Umweltbundesamt », *Nat Hazards* 46, 2008, p. 257-263.

Gardes L., *Méthodologie d'analyse des dysfonctionnements des systèmes pour une meilleure maitrise des risques industriels dans les PME : Application au secteur de traitement de surface*, Institut des sciences appliquées de Lyon et École nationale supérieure des mines de Saint-Étienne, 2001.

Kon E., Salzano E., Krausmann E., Reimeringer M., *Methodological issues : screening of vulnerability and analysis of Natech accidental risk (EU-Project no. CP-IP 213345-2 iNTeg-Risk — Early recognition, monitoring and integrated management of emerging, new technology related risks)*. EKON, CNR-IRC, JRC, INERIS, 2010.

Köppke K. E., Discussion Document. OECD Workshop on Natech Risk Management ((Natural-hazard triggered technological accidents), OECD, 23-25 May 2012, Dresden, Germany, 2012.

Krausmann E., Cruz A. M., « Impact of the 11 March, 2011, Great East Japan earthquake and tsunami on the chemical industry », *Natural Hazards*, 2013, Online first, DOI 10.1007/s11069-013-0607-0.

Krausmann E., Mushtaq F., « A qualitative natech damage scale for the impact of floods on selected industrial facilities », *Natural Hazards* 46, 2008, p. 179-197.

Krausmann E., Cruz A. M., Affeltranger B., « The impact of the 12 May 2008 Wenchuan earthquake on industrial facilities », *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 23, 2010, p. 242-248.

Ledoux B. & Hubert G., *Le coût du risque... L'évaluation des impacts socio-économiques des inondations*, Presses de l'École nationale des ponts et chaussées, Paris, 1999.

Lesbats M., *Précis de gestion du risque (Risk management/ Science of Danger)*. Book Collection ScienceSup-Dunod Publishers, 2012, 224 p.

Lindell M. K., Perry R. W., Hazardous Materials Releases in the Northridge Earthquake : Implications for Seismic Risk Assessment. *Risk Analysis*, 17 (2), 1997, p. 147-156.

Mangual P. G., *Contribution à la caractérisation de la vulnérabilité des PME-PMI aux inondations : Vers un instrument méthodologique d'autodiagnostic*, École des mines de Paris-Sophia Antipolis, 2005.

Périlhon P., *La gestion des risques : méthode MADS-MOSAR II*, Éd. Demos, 2007, 253 p.

Périlhon P., Penalva J. M., Coudouneau L., Dos Santos J., Lesbats M., Dutuit Y., « Développement d'un modèle de référence en Science du Danger », Conference Paper, *Proceedings of the 1er colloque international des Cindyniques*, Cannes 1993.

Rasmussen K., « Natural events and accidents with hazardous materials », *Journal of Hazardous Materials*, 40(1), 1995, p. 43-54.

Reitherman R. K., « Earthquake-Caused Hazardous Materials Releases », *Hazardous Materials Spills Conference Proceedings*, Milwaukee, April 19-22, 1982, p. 51-58.

Santella N., Steinberg L. J., Sengul H., « Petroleum and hazardous material releases from industrial facilities associated with Hurricane Katrina », *Risk Analysis*, 30(4), 2010, p. 635-649.

Sengul H., Santella N., Steinberg L. J., Cruz A. M., « Analysis of hazardous material releases due to natural hazards in the United States », *Disasters*, 36(4), 2012, p. 723-743.

Showalter P. S., Myers M. F., « Natural Disasters in the United States as Release Agents of Oil, Chemicals, or Radiological Materials Between 1980-90 : Analysis and Recommendations », *Risk Analysis*, 14(2), 1994, p. 169-181.

Steinberg L. J., Sengul H., Cruz A. M., « Natech risk and management : an assessment of the state of the art », *Nat Hazards* 46, 2008, p. 143-152.

Young S., Balluz L., Malilay J., « Natural and technologic hazardous material releases during and after natural disasters : a review », *Science of the Total Environment* 332, 2004, p. 3-20.

Wassenhove W. V., Garbolino E., *Retour d'expérience et prévention des risques — Principes et méthodes*, Éd. Lavoisier, SRD Sciences du risque et du danger, 2008.

13 L'alerte aux tsunamis en Méditerranée occidentale et en Atlantique Nord-Est

Emmanuel Gutierrez-Martinez, Adeline Damicis, Bruno Hernandez, Anne Loevenbruck, Audrey Gailler, Pascal Roudil, Hélène Hébert & François Schindelé
CEA, DAM, DIF — F-91297 ARPAJON, France
emmanuel.gutierrez@cea.fr

Résumé. — En comparaison avec d'autres bassins tel que l'océan Pacifique, l'aléa tsunami est globalement modéré en Méditerranée occidentale et Atlantique Nord-Est ; mais la littoralisation des populations entraîne une croissance continue du risque. Un système d'alerte a été mis en place à cet effet, dont fait partie le CENALT, Centre d'alerte aux tsunamis français. Ce système, opérationnel depuis juillet 2012, permet de prévenir les autorités des pays européens en moins de quinze minutes après la survenue d'un séisme tsunamigène en Atlantique ou Méditerranée. Cependant, la faible occurrence des tsunamis dans ces régions implique la pratique de tests de communication réguliers, ainsi que la vérification de toute la chaîne d'alerte à travers des exercices complets.
Mots-clés. — Tsunami, alerte, Centre d'alerte, Atlantique Nord-Est, Méditerranée occidentale.

Title. — *Tsunami Warning System in Western Mediterranean Sea and North-Eastern Atlantic Ocean*
Abstract. — *Compared with other basins like Pacific Ocean, tsunami hazard is globally moderate in Western Mediterranean Sea and North-Eastern Atlantic Ocean ; but as the coastal population keeps on growing, the risks increases considerably. An alert system was thereto established, within several other national warning centers, like the CENALT, French Tsunami Warning Center. This system, operating since July 2012, is able to warn the Civil Protection Agencies of European countries in less than 15 minutes after the occurrence of a tsunamigenic earthquake. However, the low occurrence of tsunamis in these regions implies that regular communication tests have to be conducted. Moreover, the verification of the whole warning procedure has to be revised through complete tsunami exercises.*
Keywords. — *Tsunami, Warning, Warning Center, North-Eastern Atlantic Ocean, Western Mediterranean Sea.*

Suite au tsunami de Sumatra de décembre 2004, la population mondiale a pris conscience que le risque tsunami n'était pas exclusif à l'océan Pacifique. Bien connu dans cet océan, ce risque était largement sous-estimé dans les autres bassins, tels que l'océan Indien, l'océan Atlantique ou la mer Méditerranée. C'est suite à ce tsunami que la Commission océanographique intergouvernementale, organisation de l'UNESCO, décida de mettre en place un système d'alerte aux tsunamis dans plusieurs bassins, dont ceux de la Méditerranée et de l'Atlantique Nord-Est.

Au sein du Groupe intergouvernemental de coordination s'occupant de l'alerte en Méditerranée et en Atlantique Nord-Est (ICG/NEAMTWS), quelques pays sont à ce jour en train de mettre en place leur centre national d'alerte aux tsunamis. La France a un rôle important car elle est en 2013, avec la Turquie et la Grèce, l'un des trois seuls pays à avoir donné à son centre national, le CENALT (Centre d'alerte aux tsunamis), une mission de surveillance et d'alerte à l'échelle régionale.

Ainsi, le risque tsunami existant dans le bassin Méditerranéen et l'Atlantique Nord-Est sera présenté brièvement, suivi de la présentation du système d'alerte existant dans ce bassin, dont le CENALT fait partie intégrante, depuis ses débuts en 2005 jusqu'à sa prise de fonction opérationnelle en juillet 2012.

13.1 Les Tsunamis en Méditerranée et Atlantique Nord-Est

13.1.1 Description générale d'un tsunami

Un tsunami (du japonais *tsu*, le port et *nami*, la vague) est un phénomène océanique se caractérisant par une suite de baisse et d'élévation du niveau de la mer le long des côtes. En dehors du cas exceptionnel d'un tsunami généré par la chute d'une météorite dans l'océan, ce phénomène est toujours d'origine géologique et est dû :

- soit à un séisme sous-marin ou côtier, dont l'hypocentre est situé à moins de 100 km de profondeur et dont la magnitude est en général supérieure à 6,5 ;
- soit à un glissement de terrain, aérien ou sous-marin, entraînant le déversement d'une quantité importante de matériau dans l'océan ;
- soit à une explosion volcanique.

Ces 3 types d'évènement vont entraîner la création d'un train d'ondes océaniques se propageant à grande vitesse : le tsunami. Par exemple, dans le cas d'un séisme sous-marin, c'est le soulèvement et/ou l'affaissement brutal du fond marin à proximité de la frontière de plaque qui va entraîner la remontée — ou la descente — de toute la colonne d'eau située au-dessus de la faille. C'est ce brusque mouvement qui génère l'onde océanique.

Au large, le tsunami n'est pas ressenti par les navires car son amplitude n'est que de quelques centimètres, voire quelques mètres, alors que sa longueur d'onde est de l'ordre de la dizaine à la centaine de kilomètres. En revanche, lorsque le tsunami s'approche des côtes, sa vitesse (obéissant à la loi vitesse $= \sqrt{g * \text{profondeur}}$) et sa longueur d'onde diminuent brusquement et, l'énergie se conservant lors de ce ralentissement, l'amplitude du tsunami augmente significativement, ce qui entraîne une hausse et/ou un rapide retrait des eaux (en quelques minutes).

Contrairement à ce qui est communément imaginé, le tsunami n'est donc pas une vague déferlant sur le rivage, mais consiste plutôt en un cycle de montées et de descentes des eaux rapide — la période variant entre 10 et 40 minutes — et parfois de très forte amplitude.

Le tsunami est caractérisé par plusieurs paramètres, dont sa hauteur de vague, qui peut être mesurée de trois façons :

- Au large, grâce aux tsunamimètres, qui calculent cette hauteur par une mesure de pression. Ces hauteurs sont beaucoup plus faibles que celles mesurées en bord de côte ;
- Sur un marégraphe, instrument habituellement utilisé pour mesurer les marées, et qui est situé dans les ports ;
- Lorsqu'il atteint les côtes, par une mesure de *run-up*, qui est la différence entre l'altitude maximale atteinte par l'inondation et le niveau moyen de la mer.

La majorité des tsunamis a pour origine un séisme sous-marin ou côtier. En effet, plus de huit tsunamis sur dix sont causés par un évènement sismique majeur. Selon l'amplitude du séisme initial, les tsunamis sont classés en trois catégories :

- Tsunami local (moins de 100 km de portée), engendré par un séisme de magnitude comprise en général entre 6,5 et 7,5 ;
- Tsunami régional (de 100 à 1 000 km de portée), engendré par une éruption volcanique ou un séisme de subduction de magnitude supérieure à 7,5 ;
- Télétsunami (à l'échelle d'un bassin océanique), entraîné par un très fort séisme en zone de subduction.

On observe en moyenne dans le monde entre 5 et 10 tsunamis par an, dont les trois quarts se déroulent dans l'océan Pacifique. Cependant, alors que les populations méditerranéennes sont pour la majorité très peu conscientes du risque, 12 % des tsunamis se produisent en mer Méditerranée ou dans une mer adjacente (Courteau, 2007). Ainsi, à travers ses façades méditerranéenne et atlantique, la France métropolitaine peut être impactée par 1 tsunami sur 5. D'autre part, la France étant présente dans tous les océans du globe, chaque tsunami est potentiellement menaçant pour l'un des territoires français.

13.1.2 Historique de tsunamis

La mer Méditerranée est celle qui, dans l'inconscient collectif, est supposée comme la moins impactée par le risque tsunami. Or, plusieurs tsunamis dévastateurs ont frappé les côtes méditerranéennes tout au long de l'histoire (figure 1, tableau 1). Plus spécifiquement, la Méditerranée occidentale, dont l'alerte au niveau international dans ce bassin est de la responsabilité du CENALT, est régulièrement frappée par des tsunamis.

Un des tsunamis notables, celui du 23 février 1887, a provoqué des vagues atteignant deux mètres de haut dans la région de Cannes et Antibes. De même, le tsunami du 16 octobre 1979 a entraîné des vagues de trois mètres de haut sur Antibes (Sahal, 2011). Il faut noter que ce tsunami n'avait pas une origine sismique, mais a été causé par l'effondrement de terrain au sud de l'aéroport de Nice. Le tsunami le plus récent, quant à lui, date du 21 mai 2003, suite au séisme de magnitude 6,9 à Boumerdès, Algérie. Les hauteurs de *run-up* mesurées dépassent les deux mètres aux Baléares. Le long de la Côte d'Azur, dans certains ports, le niveau de la mer a diminué de 50 cm à 1 m 50 (Alasset, 2006 ; Sahal, 2009).

Par conséquent, l'aléa tsunami n'est pas négligeable en Méditerranée, comme dans l'Atlantique Nord-Est, et le nombre important de personnes vivant le long du littoral génère un risque important. C'est pourquoi un système d'alerte aux tsunamis a été mis en place dans ces bassins, sur le modèle de ceux préexistants dans le Pacifique.

13.2 Le rôle et le fonctionnement du CENALT

13.2.1 Présentation du système d'alerte

L'alerte internationale aux tsunamis date du tsunami destructeur de 1946, dû à un séisme aux Aléoutiennes, qui a ravagé les côtes d'Hawaï. En effet, suite à cet évènement, Hawaï a mis en place le premier centre national d'alerte aux tsunamis américain, en charge de la surveillance des tsunamis sur les côtes américaines. Le Japon créa lui aussi son centre national d'alerte aux tsunamis après avoir subi de lourds dégâts, suite à un évènement au Kamchatka en 1952. Cependant, il a fallu attendre le dramatique tsunami de 1960, engendré par un séisme au Chili, pour que l'ONU fonde dans son organisation nouvellement créée, la Com-

Tabl. 1. — Tsunamis historiques en Méditerranée

Année	Localisation	Hauteur d'eau
-1650	Explosion du Santorin, Grèce	20 mètres
-373	Helike, Grèce	10 mètres
365	Crète, Grèce	10 mètres
1303	Rhodes, Grèce	9 mètres
1365	Alger, Algérie	5 mètres
1755	Lisbonne, Portugal	5 à 10 mètres
1887	Mer Ligure, Italie	2 mètres à Cannes et Antibes
1908	Messine, Italie	8 mètres
2003	Boumerdès, Algérie	1 à 3 mètres aux Baléares 8 ports français impactés

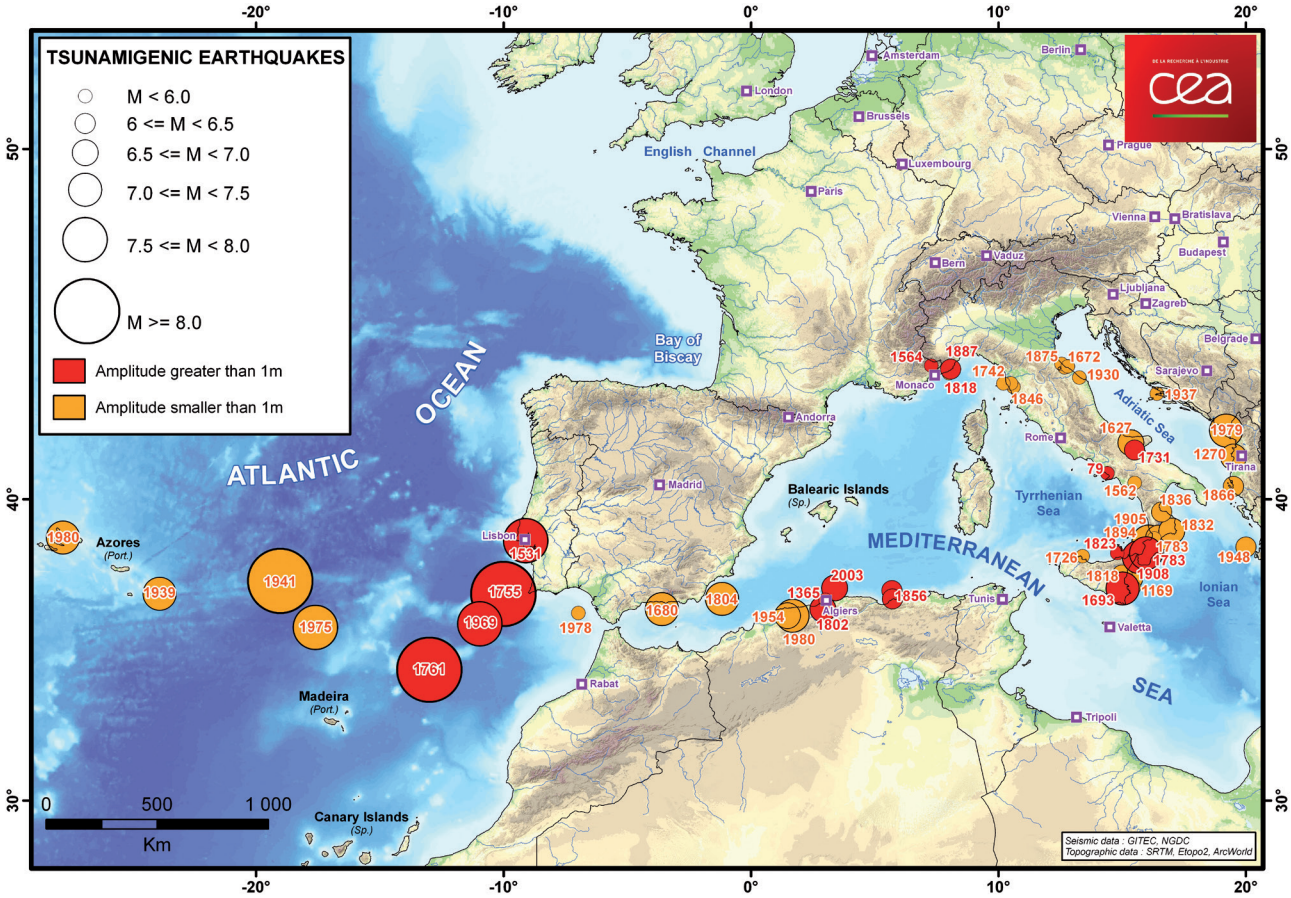


Fig. 1. — Séismes et tsunamis historiques en Méditerranée occidentale et Atlantique Nord-Est

mission océanographique intergouvernementale (COI), un Groupe intergouvernemental de coordination (GIC). Établi en 1965, suite à un autre tsunami dans le Pacifique, ce GIC réunit le Japon, les États-Unis, la Russie ainsi que les pays potentiellement concernés par un tsunami transpacifique. Les États-Unis proposèrent leur centre national comme centre d'alerte du bassin, créant ainsi le PTWC (Pacific Tsunami Warning Center).

Le tsunami de Sumatra survenu en décembre 2004 entraîna la création de 3 autres groupements. En effet, personne ne s'attendait à un tsunami de cette ampleur dans l'océan Indien. La COI décida ainsi d'établir en 2005 trois autres GIC, en plus du GIC Pacifique :

- Le GIC SATOI (Système d'alerte aux tsunamis en océan Indien) ;
- Le GIC SATANEM (Système d'alerte aux tsunamis en Atlantique Nord-Est et Méditerranée) ;
- Le GIC Caraïbes.

Il existe donc actuellement 4 groupes intergouvernementaux de coordination (GIC) sous la tutelle de la COI.

Au sein de chaque GIC, chaque état membre nomme un point de contact national, qui représente l'État, et un point focal opérationnel, qui est l'organisme d'astreinte 24h/24 et 7j/7. Il s'engage à mettre à la disposition de ses opérateurs toutes les informations dont ils ont besoin. Chaque État s'efforce par ailleurs à mettre en place un centre national d'alerte aux tsunamis, et peut proposer que ce centre soit également un fournisseur de messages d'alerte pour les autres pays.

Le point de contact national est la personne qui est chargée de représenter l'état membre auprès du GIC dont il fait partie. Le point focal tsunami, en revanche, est l'organisme de permanence 24h/24 et 7j/7 chargé de la réception des informations ou des alertes émises par le centre d'alerte régional. Il est le premier maillon de l'alerte descendante, c'est-à-dire qu'il assure la mission de prévenir ses autorités de gestion de crise et de protection civile.

Chaque état membre peut créer un centre à vocation régionale. À ce jour, il en existe trois au sein du GIC Pacifique, pilotés par le Japon (NWPTAC, North West Pacific Tsunami Advisory Center) et les États-Unis (PTWC et WCATWC, West Coast and Alaska Tsunami Warning Center). Ces centres régionaux sont les premiers à avoir été créés, ce qui se comprend aisément étant donné que 80 % des tsunamis se produisent dans ce bassin. Il existe également trois centres candidats fournisseurs de message dans l'océan Indien, ainsi que trois centres candidats en Méditerranée : la NOA (Grèce, en charge de l'alerte en Méditerranée centrale et mer Égée), le KOERI (Turquie, en charge de l'alerte en Méditerranée orientale) et le CENALT (France, en charge de l'alerte en Méditerranée occidentale).

Le Groupe intergouvernemental de coordination pour le Système d'alerte aux tsunamis dans l'Atlantique Nord-Est et la Méditerranée (GIC-SATANEM) regroupe quarante-cinq pays appartenant à l'Europe, l'Afrique du Nord, et le Moyen-Orient. Au sein de ces États, la majorité a désigné un point focal, organisme auquel seront envoyés les messages d'alerte aux tsunamis. Certains pays ont mis en place leur propre

centre national d'alerte aux tsunamis, qui est en mesure de lancer une alerte à ses propres centres de gestion de crise lorsque survient un séisme tsunamigène pouvant impacter les côtes de cet état. À l'heure actuelle (juin 2013), seuls le Portugal, la France, la Grèce et la Turquie possèdent leur centre national d'alerte aux tsunamis, le centre italien étant en voie de mise en place.

Le Centre d'alerte aux tsunamis est opéré par le CEA (Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives), en partenariat avec le C.N.R.S. (Centre national de la recherche scientifique) et le SHOM (Service hydrographique et océanographique de la marine). Il est financé par le ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie, ainsi que par le ministère de l'Intérieur. Le CENALT s'inscrit dans le programme d'une convention cadre entre ces 5 partenaires.

13.2.2 Déroulement de l'alerte

Les centres internationaux doivent alerter rapidement les pays concernés par un tsunami, c'est-à-dire moins de quinze minutes après l'évènement sismique. Comme il n'est pas possible d'observer des signaux marégraphiques en si peu de temps, le centre d'alerte envoie tout d'abord un premier message d'alerte, selon la matrice de décision. Ensuite, la confirmation de l'occurrence ou non du tsunami (de laquelle dépend l'annulation ou non de l'alerte) se fait dans un second message, dans un délai dépendant de la distance entre l'épicentre du séisme et les marégraphes ou tsunamimètres les plus proches.

Les messages d'alerte sont envoyés par trois moyens de communication : e-mail, fax, et SMT (Système mondial de télécommunications). Chaque point focal peut communiquer jusqu'à deux numéros de fax et deux adresses e-mail, sur lesquelles les alertes seront envoyées. Concernant le SMT, le CENALT envoie ses messages à Météo France, qui les redirige à tous les centres météorologiques des pays abonnés aux messages SMT du CENALT, qui les renvoient à leur tour au point focal tsunami de leur pays. Ce système, bien que plus robuste, est moins flexible : si le message est envoyé, il doit l'être à tous les pays abonnés, sans possibilité de filtrage par exemple.

Le CENALT a été construit *ex nihilo* en s'inspirant des centres déjà opérationnels dans le Pacifique, bien que la problématique étant différente, de part notamment l'étroitesse du bassin qui impose une très grande rapidité au système. Son système de communication a du être testé avant sa mise en opérationnalité en juillet 2012, c'est pourquoi un test de communication élargi (avec 31 pays) a été mené en mai 2012, et que des tests de communication réguliers sont pratiqués tous les mois entre le CENALT et ses partenaires. De même, toute la chaîne d'alerte a pu être testée lors d'un exercice international d'alerte aux tsunamis, l'exercice NEAMWave12.

13.3 Exercices et tests de communication

Au sein du bassin méditerranéen, tout comme en Atlantique Nord, la faible probabilité de déclenchement d'un tsunami implique que le système d'alerte est rarement utilisé — contrairement au Pacifique, où il y a en moyenne un évènement potentiellement tsunamigène tous les 15 jours. Afin de valider et de maintenir l'opérationnalité du système, il est extrêmement important de mener régulièrement des tests de communication pour s'assurer que les modes de transmission du centre fonctionnent toujours de manière optimale, ainsi que pour vérifier la base de données des points focaux. De même, afin d'être toujours préparé à un éventuel tsunami, des exercices à grande échelle sont nécessaires pour maintenir un haut niveau d'opérabilité auprès de la population, des autorités et des responsables de sécurité civile.

Dans cette optique, le CENALT mène depuis août 2012 des tests de communication mensuels. De même, un exercice complet d'alerte aux tsunamis a été mené en novembre 2012, l'exercice NEAMWave12.

13.3.1 Tests réguliers de communication

Les Communication test exercices (CTE) visent à vérifier le bon fonctionnement du système d'envoi et de réception de messages, depuis le centre d'alerte émetteur jusqu'aux différents points focaux tsunamis. Ces tests consistent en un simple envoi d'un message pré-formaté, contenant des informations similaires à ceux envoyés lors d'une véritable alerte au tsunami, à tous les états membres d'un GIC.

Les objectifs principaux d'un test de communication sont :

- La vérification et la validation des coordonnées des points focaux tsunamis ;
- La vérification du bon fonctionnement des systèmes de transmission (envoi et réception) de messages d'alerte par fax, e-mail et SMT ;
- L'estimation du délai entre l'émission et la réception de ces messages.

Le système SMT est géré par l'OMM, l'Organisation météorologique mondiale. Lorsque le CENALT envoie son message d'alerte, celui-ci est transmis à Météo France par un système sécurisé, et Météo France transmet ce message à un serveur international. Ensuite, tous les organismes météorologiques reçoivent le message sur un poste dédié. Enfin, les pays dont les centres d'alerte ont choisi de s'abonner aux messages émis par la France reçoivent automatiquement ce message sur un poste de leur choix, depuis leur institut météorologique.

Ces tests sont menés en partenariat avec un nombre croissant d'institutions internationales. Le premier test a réuni 4 instituts, et ce nombre a augmenté jusqu'à atteindre 15 institutions depuis février 2013.

Ces exercices montrent le bon fonctionnement des systèmes d'envoi par e-mail et par fax. En effet, 84 % des e-mails émis durant les 9 premiers mois d'exercice ont été reçus, ainsi que 73 % des fax. La plupart des e-mails et des fax non reçus sont dus à des erreurs techniques ou à des erreurs de saisie lors de l'insertion des coordonnées des instituts. Effectivement, sur les 5 mois de 2013, les pourcentages de fax et e-mails reçus atteignent respectivement 94 % et 78 %.

Concernant les délais de réception des messages émis par le CENALT, ils sont en moyenne reçus dans les deux minutes pour les messages envoyés par e-mail et fax, et trois minutes pour ceux envoyés par SMT (étant donné que le message passe par les serveurs des instituts de météorologie). Les temps de réception moyennés figurent en figure 2.

Ces résultats montrent que les messages envoyés par le CENALT sont en moyenne reçus en moins de trois minutes, ce qui permet, en cas de tsunami, d'alerter les pays très rapidement (IOC, 2013).

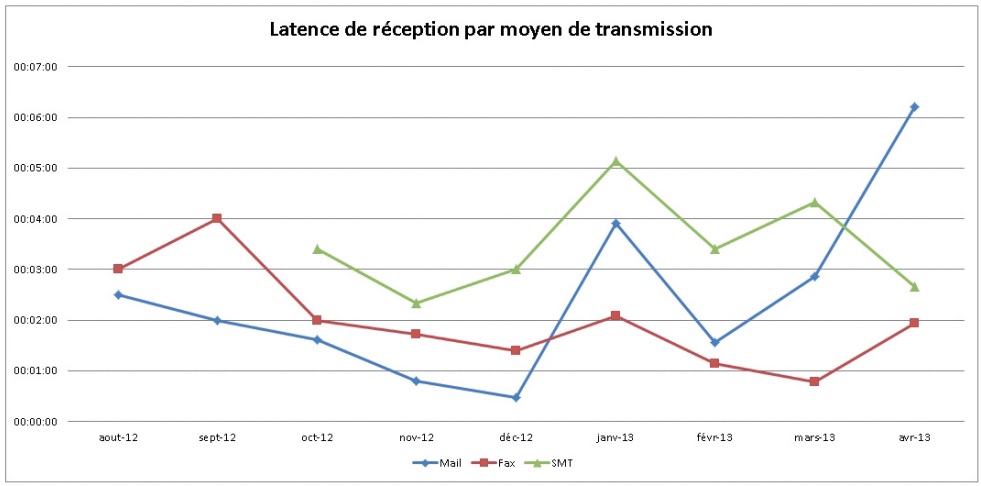


Fig. 2. — Délais de réception moyens des messages de tests de communication.

13.3.2 NEAMWave12

Un exercice complet d'alerte aux tsunamis, l'exercice NEAMWave12, a été organisé en 2012. Il a permis de tester la chaîne d'alerte dans sa totalité, en envoyant plusieurs messages à une trentaine de destinataires dans un créneau de deux heures.

La France a participé à l'exercice NEAMWave12 en novembre 2012, en proposant un scénario de tsunami impactant la Méditerranée occidentale. La Turquie et la Grèce, avec chacun un scénario impactant la Méditerranée orientale, y ont également participé, ainsi que le Portugal, proposant un scénario en Atlantique Nord-Est.

Le CENALT a construit son scénario sur la base d'un séisme de magnitude 7,5 au niveau de la marge nord-africaine, générant un tsunami impactant à la fois l'Algérie, l'Espagne, la France, l'Italie, Monaco et la Tunisie.

Le choix du scénario utilisé pour l'exercice NEAMWave12 a été effectué grâce au logiciel de simulation Calypso. Ce logiciel, développé par le CEA (Heinrich, 1998 ; Hébert, 2001), modélise l'initiation d'un tsunami par un séisme ainsi que sa propagation dans l'océan et sur les côtes. Le modèle mathématique, qui ne sera pas présenté ici, est basé sur les formules d'Okada d'initiation d'un tsunami et sur les équations de St Venant pour le calcul de la propagation des ondes. Le scénario choisi génère des vagues qui impactent les côtes de chaque pays, entraînant plus d'un mètre d'eau à certains endroits le long des côtes françaises, nord-africaines, et espagnoles (Baléares), et plus de 0,6 mètre en Sardaigne et au large de la Costa Brava (figure 3). Un manuel a été rédigé à destination des points focaux pour leur permettre de se préparer à l'exercice (IOC, 2012).

Les messages d'alerte diffusés le jour de l'exercice, similaires aux messages d'alerte, devaient être préparés à l'avance, afin d'être insérés dans le manuel. Quatre messages ont été ensuite envoyés le jour de l'exercice :

- Un message à t0 + 10' (10 minutes après le séisme), comprenant les caractéristiques générales du séisme, un texte descriptif ainsi que les temps d'arrivée du tsunami aux points de prévision et le niveau d'alerte correspondant (message en annexe 2) ;
- Un message à t0 + 60', comprenant les mêmes informations que le premier ainsi que des mesures d'amplitude de vague — virtuellement — constatées aux marégraphes déjà touchés par le tsunami ;
- Le même message à t0 + 150', comprenant l'ensemble des enregistrements marégraphiques (cf. carte en figure 18) ;
- Et un message de fin d'alerte quelques heures après le séisme.

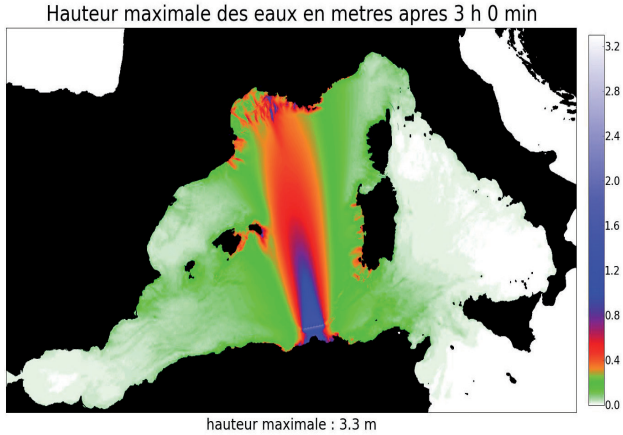


Fig. 3. — Carte des hauteurs d'eau (en mètres) au large, scénario CENALT pour le NEAMWave12.

Les temps d'arrivée estimés ont été extraits de la carte des TTT (Tsunami Travel Time ; Wessel, 2009) synthétique (figure 4). Ils peuvent également être relevés sur les marégrammes tracés à partir des données de la simulation Calypso.

Sept instituts se sont inscrits au scénario proposé par le CENALT pour l'exercice NEAMWave12. Tous les partenaires ont été alertés en moins de cinq minutes, et ce pour les quatre messages (figure 5). De plus, six partenaires sur sept ont été prévenus en moins de deux minutes pour trois messages sur quatre, et en moins de trois minutes pour les quatre messages.

Ces messages d'alerte ont ensuite été relayés, par chacun des instituts récepteurs, à leur centre de protection civile, afin de tester toute la chaîne d'alerte montante. En France, les messages ont donc été envoyés au COGIC, le Centre opérationnel de gestion interministérielle des crises. Les messages ont été envoyés au COGIC par les mêmes moyens que ceux utilisés en cas d'alerte, c'est à dire *via* un terminal connecté

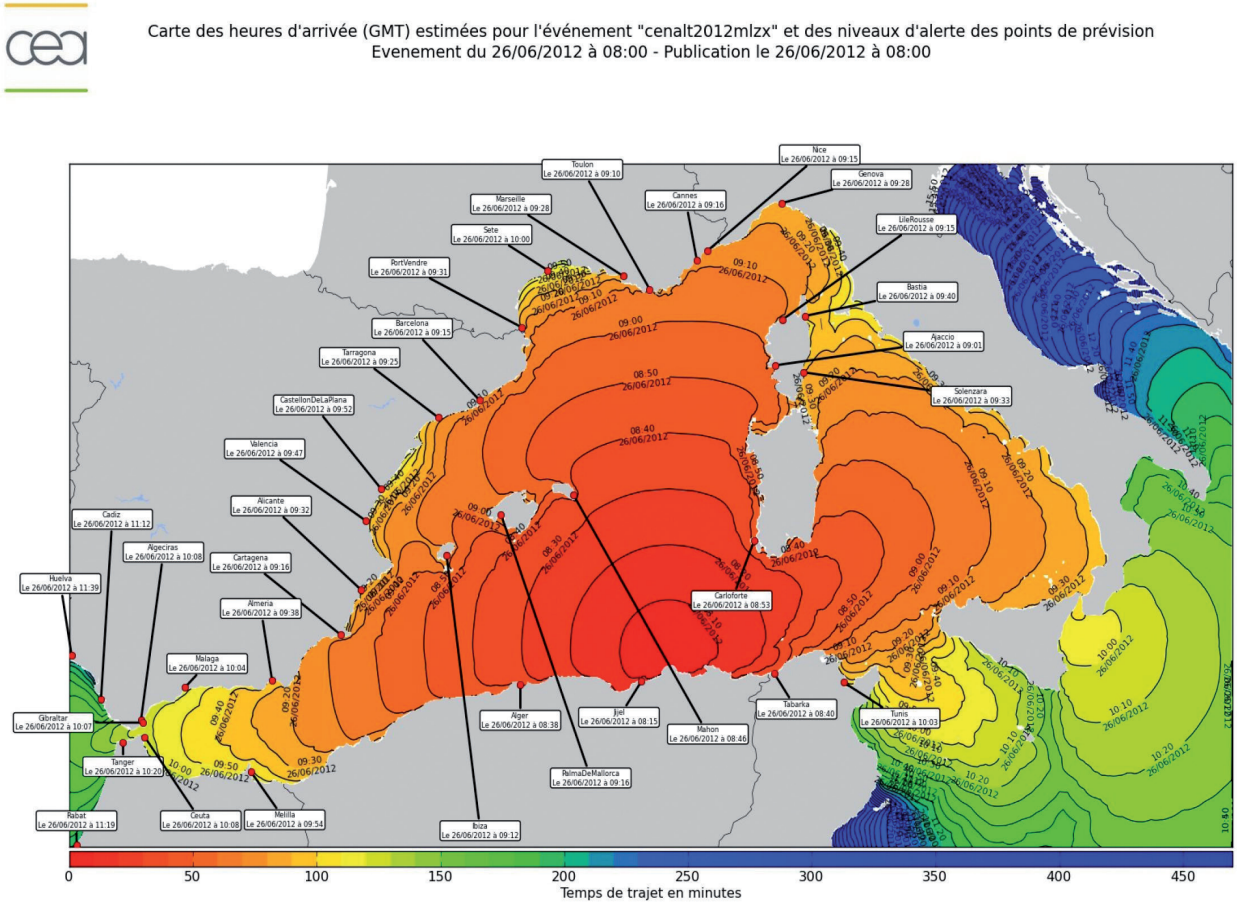


Fig. 4. — Carte des isochrones et des temps d'arrivée du tsunami, scénario CENALT pour le NEAMWave12.

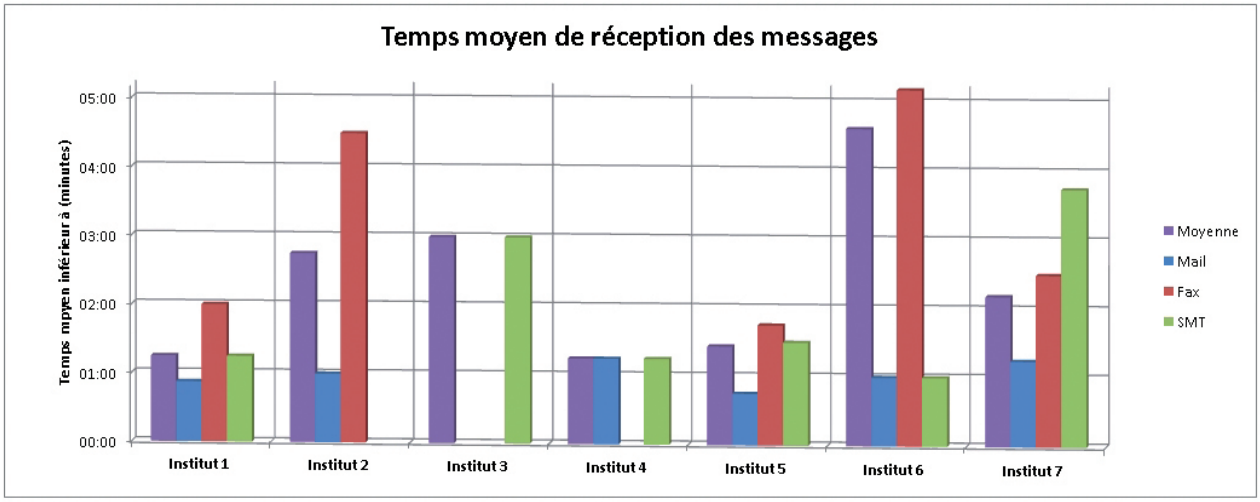


Fig. 5. — Délais de réception des messages du CENALT pour l'exercice NEAMWave12.

directement au CENALT, et une adresse e-mail. Chaque message a été reçu en moins d'une minute au moins par un de ces deux moyens de communication par le COGIC, ce qui confirme l'opérationnalité de la chaîne d'alerte montante.
Ainsi, l'exercice NEAMWave12 a montré qu'en cas de séisme tsunamigène en Méditerranée occidentale, le CENALT est capable de détecter ce séisme et d'alerter les pays concernés en un temps inférieur à 15 minutes. De même, en cas de réception au CENALT d'un message provenant d'un autre centre d'alerte (tel que le centre turc ou le centre grec), les autorités françaises seraient prévenues sous 15 minutes.

Conclusion

En se basant sur le modèle préexistant dans l'océan Pacifique, les États membres de la Commission océanographique intergouvernementale ont réussi à mettre en place, en quelques années, un système d'alerte aux tsunamis robuste et fiable en Méditerranée et Atlantique Nord-Est.
Les tests de communication mensuels, ainsi que la conduite d'un second exercice d'alerte aux tsunamis en 2014 (l'exercice NEAMWave14), vont permettre d'améliorer encore la fiabilité et la robustesse de ce système d'alerte aux tsunamis, ce qui permettra, lors de la survenue du prochain tsunami en Méditerranée ou Atlantique Nord-Est, d'alerter les populations et de rendre plus efficace les interventions locales des secours.
Le premier message officiel a été envoyé par le CENALT le 30 avril 2013 suite au séisme aux Açores de magnitude 5,7, entraînant la diffusion d'un message d'information aux États abonnés aux alertes du CENALT. Ce message a été envoyé dans les temps, et les autorités françaises ainsi que les pays de la côte Atlantique ont été avertis en un délai très court.

Bibliographie

Alasset P.-J., Hebert H., Maouche S., Calbini V., Meghraoui M., *The tsunami induced by 2003 Zemmouri earthquake (Mw = 6.9, Algeria) : modelling and results,* Geophys J., 166, 2006, p. 213-226.

Courteau R., *Rapport sur l'évaluation et la prévention du risque tsunami sur les côtes françaises en métropole et outre-mer*, Collection parlementaire, 2007, 171 p.

Hebert H., Heinrich P., Schindele F., Piatanesi A., « Far-field simulation of tsunami propagation in the Pacific Ocean : impact on the Marquesas Islands (French Polynesia) », *Journal of Geophysical Research*, 106, 2001, p. 9161-9177.

Heinrich P., Schindele F., Guibourg S., Ihmle P.-F., « Modeling of the February 1996 Peruvian tsunami », *Geophysical Research Letters*, 25, 1998, p. 2687-2690.

IOC (Intergovernmental Oceanographic Commission), *Exercise NEAMWave12 — A Tsunami Warning and Communication Exercise for the North-eastern Atlantic, the Mediterranean, and Connected Seas Region — Exercise Manual,* IOC Manuals and Guides, 103, 2012, 28 p.

IOC (Intergovernmental Oceanographic Commission), *NEAMTWS Second Enlarged Communication Test Exercise (CTE2) — Evaluation Report*, IOC Manuals and Guides, 2013, 28 p.

Sahal A., Lemahieu A., « The 1979 Nice airport tsunami : mapping of the flood in Antibes », *Nat. Hazards*, 56, 2011, p. 833-840.

Sahal A., Roger J., Allgeyer S., Lemaire B., Hebert H., Schindele F., Lavigne F., « The tsunami triggered by the 21 May 2003 Boumerdès-Zemmouri (Algeria) earthquake : field investigations on the French Mediterranean coast and tsunami modelling », *Natural Hazards Earth System Sciences*, 9, 2009, p. 1823-1834.

Wessel P., « Analysis of observed and predicted tsunami travel times for the Pacific and Indian oceans », *Pure Appl. Geophys.*, 166 (1-2), 2009, p. 301-324.

14 Développer une application Smartphone face aux inondations rapides : le jeu en vaut-il vraiment la chandelle ?

Johnny Douvinet[1], Jules Sekedoua Kouadio[1] & Loïc Grasland[1]
1. Université d'Avignon et des Pays du Vaucluse — U.M.R. ESPACE 7300 C.N.R.S./SFR Agorantic, 74 rue Louis Pasteur, Case 19, 84029 Avignon Cedex 1
johnny.douvinet@univ-avignon.fr
juleskouadio@alumni.univ-avignon.fr
loic.grasland@univ-avignon.fr

Résumé. — Cet article propose de discuter des enjeux, des contraintes et des possibilités offertes par et pour le développement d'une application Smartphone portant spécifiquement sur l'alerte aux inondations rapides. Cette recherche-action soulève des questions à la fois d'ordre scientifique (efficacité des systèmes pervasifs), réglementaire (usage et gestion des données de géolocalisation, diffusion de l'alerte), technique (structure du système d'exploitation) et cognitif (rapports de l'usager aux téléphones), qui s'inscrivent dans un contexte socio-économique opportun : 24 millions de personnes ont un Smartphone en 2013 en France (ce chiffre dépassant 2,3 milliards à l'échelle mondiale). Le principal objectif de ce travail est de savoir si les personnes mobiles et en situation de danger pourraient devenir des « citoyens-capteurs » en alertant leurs voisins dans un rayon proche (grâce aux données de géolocalisation) et les informant d'un évènement en cours, sans toutefois porter atteinte à la vie privée.
Mots-clés. — Smartphone, inondations, application, contraintes.

Title. — *Develop a Smartphone Application for Dealing With Flash Floods: is the Game Really Worth the Effort?*
Abstract. — *This article aims at discussing problems and constraints and opportunities facing to the development of one application adapted to know and forecast flash floods phenomena. This research assesses questions of scientific nature (as the effectiveness of pervasive systems in case of real-time alert) interacting with legislative rules (use or protection of personal data) and methodological experimentations (the type of exploitation system) and cognitive perceptions (does the local population use its phone during flash flood?). Such topic is opportunistic in the actual economic context as more than 24 millions of persons have one Smartphone in 2013 in France. The main objective is to know if this new application can help mobile persons (not only in displacement) and to inform them on adaptive behaviors they have to conduct without attempting to their personal life.*
Keywords. — *Smartphone, Floods, Application, Constraints.*

Introduction

Les inondations rapides constituent la forme la plus originale et la plus dangereuse des phénomènes observés en France. Elles se caractérisent par un écoulement torrentiel et par leur soudaine apparition, et entraînent des dégâts plus ou moins dramatiques selon l'importance des enjeux et la vulnérabilité des secteurs géographiques affectés (Gaume *et al.*, 2009 ; Vinet *et al.,* 2010). Le temps nécessaire à la mise en sécurité des personnes, incluant le délai de déclenchement de l'alerte et l'évacuation, est toujours supérieur au temps de réaction hydrologique (1 à 2 heures voire moins), ce qui soumet les autorités à des difficultés de prévision ou d'anticipation (Bontron *et al.,* 2003). Alors que les services de l'État (à travers le SCHAPI, Service central d'hydrométéorologie d'appui à la prévision des inondations) surveillent 21 100 kilomètres de linéaires de cours d'eau (juin 2013), 103 000 km (dont 45 % sont des petits tronçons susceptibles de générer des crues rapides) ne font toujours pas l'objet d'une prévision particulière. Ce constat s'explique à plusieurs titres : l'absence de stations hydrométriques sur des tronçons où les enjeux ne sont pas importants (Douvinet, 2008 ; Gaume *et al.*, 2009) ; une méconnaissance des seuils de déclenchement sur de nombreux petits bassins (PUB, 2006) ; les incertitudes des radars pluviométriques, rendant les modélisations hydrologiques ou hydrauliques sujettes à caution (Lobligeois *et al.,* 2012). Suite à la survenue d'inondations dramatiques en 2010 (53 victimes en Vendée le 28 février ; 27 décès en Dracénie le 15-16 juin), l'État a toutefois engagé des réflexions dans le cadre du PSR — Plan submersions rapides (MEDD, 2010). Le travail proposé ici s'inscrit dans l'axe 2 du PSR, intitulé *Amélioration des systèmes de surveillance, de prévision, de vigilance et d'alerte*. Nous voulons savoir dans quelle mesure nous pouvons espérer réduire la vulnérabilité des personnes mobiles (surtout les personnes en déplacement et donc pas uniquement les automobilistes) en faisant appel aux Smartphones car la mobilité est le premier facteur de décès en cas de crues rapides (Antoine *et al.,* 2001). On souhaite également exploiter les données envoyées par les citoyens situés « au plus proche de l'évènement » (devenant ici des « citoyens-capteurs ») pour affiner les connaissances sur les facteurs de déclenchement et sur les facteurs de prédisposition pour lesquels de fortes incertitudes demeurent (Artigue *et al.*, 2012 ; Mathys et Peteuil, 2012).
Plus concrètement, il s'agit de créer une application « volontariste et gratuite » pour faire face aux inondations rapides (à l'image d'applis récentes comme MyPublicAlert, SignAlert) et de la tester par des utilisateurs de Smartphone dans des secteurs sujets à ces aléas. Cette recherche apparaît opportune au regard de l'utilisation croissante et sans précédent de

ces technologies. Pour illustrer ce propos, on peut rappeler que 24 millions d'utilisateurs ont un Smartphone en France (chiffres de 2013), que 4,3 millions de Smartphone ont été vendus entre le 1er janvier et le 1er juin 2013 et que le taux de pénétration est passé de 21 % au 1er trimestre 2011 à 42 % au 1er trimestre 2013 (derniers chiffres disponibles). Avec l'entrée des données de géolocalisation dans le Web Social, le partage d'informations spatiales (coordonnées GPS et déplacements), allant jusqu'à la diffusion sur des réseaux (publics ou professionnels) plus ou moins ouverts, est devenu une pratique courante qui contribue chaque jour à la croissance d'un nouveau monde souvent nommé le « Big Data » (Fienen et Lowry, 2012). D'une façon simpliste, ce terme fait référence aux « traces » que laissent nos contacts avec le monde interconnecté et digital que représentent les technologies de l'information et de la communication. Du fait de leur diversité (origine, créateur ou fournisseur), ces « traces » sont volumineuses mais loin d'être bien structurées (Bezahalf *et al.,* 2011). Cependant, leur utilité n'est plus à démontrer. On pense par exemple à *Google Trend,* outil de suivi de l'évolution de la grippe qui a permis de démontrer un lien entre le nombre d'internautes qui recherchent les termes liés à la grippe et le nombre de personnes ayant réellement les symptômes de cette maladie (Ginsberg *et al.,* 2008).

Au regard des possibilités offertes par le « *Big Data* » et par les données issues des téléphones portables (Fen Chung, 2011), des demandes urgentes émanent de la part de la population pour accéder à des réseaux urgentistes ou à des appels de secours à partir des Smartphones. Le succès d'autres applications comme *La Croix Rouge* (aider une personne démunie), *!ncident* (informer d'un incident en temps réel) ou *Quake-Up* (alerte séisme) l'illustre parfaitement.

Face à des aléas à courte cinétique tels que les inondations rapides, plus la collecte et le traitement des données se fait sur un pas de temps court (proche du pseudo-temps réel), plus la prévision est opérationnelle et plus ces outils deviennent un véritable outil d'aide à la décision. Mais avant de créer/rajouter une application, il faut en mesurer les fondements, les enjeux et les limites. Aussi, il s'agira dans cet article de 1) discuter de la faisabilité du système, 2) réfléchir à la nature des données collectées *in* situ et en temps réel, 3) choisir le meilleur mode de transmission entre l'émetteur et l'utilisateur, 4) intégrer les souhaits des acteurs politiques et opérationnels qui sont les garants du maintien de la sécurité et de l'alerte (diffusion, communication) sur leurs territoires ; 5) vérifier l'acceptabilité de ces technologiques auprès de la population exposée et qui serait susceptible de l'utiliser en situation de crise.

Cet article se focalise ici plus spécialement sur les questions suivantes :

1. Quelles sont les applications existantes face aux risques d'inondation ? Sur quelles bases ont-elles été développées ? Existent-ils des applications spécifiquement dédiées aux inondations rapides ? Ces systèmes sont-ils opérationnels en France ?
2. Quelles sont les contraintes qui peuvent limiter l'utilisation des outils Smartphone ? Peut-on créer un système d'alerte en utilisant les données de géolocalisation ?
3. En créant une application mono-risque, ajoute-t-on une application « de plus » sur le marché ? Contribue-t-on à une meilleure alerte auprès de la population exposée et/ou à une meilleure responsabilisation face aux gestes à tenir en cas de crise ?

14.1 État des lieux des applications développées pour faire face aux risques inondation ou inondation rapide : quelle est la position de la France ?

La téléphonie mobile a été bien accueillie à travers le monde grâce à sa fonctionnalité qui permet aux personnes « mobiles et/ou en déplacement » d'être joignable, presque partout et à tout moment, contrairement à la téléphonie fixe. Depuis 1992, une nouvelle génération de téléphones portables est apparue : les Smartphones. Ces appareils (*i.e.* des *Ordiphones* en français) disposent, au-delà de leur fonction primaire, d'un nombre élevé de fonctionnalités (parmi les plus courantes on peut citer la connectique WIFI, la géolocalisation par GPS, la cartographie couplée au calcul d'itinéraire). Il est possible d'installer des applications additionnelles (plus de 330 000 existent en 2012), voire de supprimer celles livrées lors de l'acquisition de l'appareil, ce qui permet à l'utilisateur de configurer son téléphone selon ses propres usages et envies.

14.1.1 Deux types d'applications face au risque inondation

Une étude a été menée sur 17 applications dédiées aux risques inondation (figure 1), et sélectionnées pour leur disponibilité ou leur facilité de prise en main. Deux groupes apparaissent rapidement : 1) des applications à caractère consultatif (C), permettant à l'utilisateur de visualiser des informations et d'avoir accès à des instructions relatives à un danger (mais sans être associé à la survenue d'un évènement en temps réel) ; c'est le cas pour *FloodWatch* (développé sous iOS6) ou *FloodMap* (sous Symbian OS) ; 2) des applications à caractère participatif (P), automatiquement consultatives et offrant, en plus, la possibilité de localiser le danger ; l'utilisateur devient un véritable « citoyen-capteur » car il déclenche l'alerte ou peut en être averti ; c'est le cas de l'application *Risques* (développée par la ville de Nice) ou de *NOAH (*promue par le gouvernement philippin), les deux étant disponibles sous Android et iOS. Ce second groupe permet à la fois la consultation et la transmission de données ; la décision (alerte, avertissement, etc.) est alors gérée par un centre de décision rattaché à une entité administrative forte (mairie ou État). Si l'on reprend l'exemple de l'application *Risques* de Nice, c'est la ville qui a directement conçu le système expert (avec l'aide d'un bureau d'études), ce qui permet le traitement des informations envoyées par les citoyens pour éviter les fausses alertes, la collecte des données (envoyées par les capteurs ou par la population, ce qui complète ainsi la base de données de référence) et l'envoi de messages d'information sur les mesures à prendre (en faisant un lien direct avec les recommandations issues du Document d'information communal sur les risques majeurs, le DICRIM, instauré en France depuis la loi de 1987 mais sous-utilisé ; Douvinet *et al.,* 2013).

14.1.2 Éclectisme et diversité des applications

D'autres éléments ont servi à comparer les 17 applications choisies (tableau 1). Elles peuvent être mono-risque

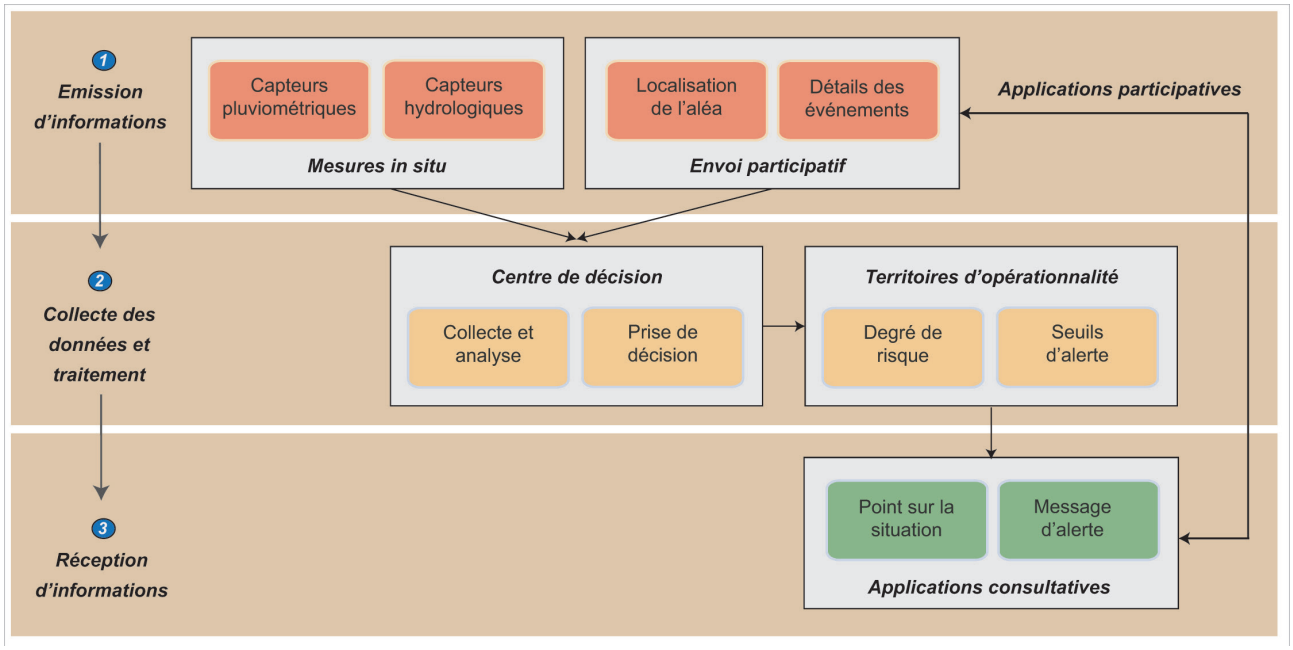


Fig. 1. — Chaîne de traitement de l'information face à un risque et position des 17 applications Smartphone portant plus spécialement sur les inondations.

(5 d'entre elles) ou multirisque (avec une interface unique de contribution ou de consultation, mais pour différents types de phénomènes). L'usage du GPS se fait souvent à travers des modes de cartographie intégrée (à condition que l'utilisateur ait accepté de transmettre ses coordonnées) et des photographies relatives aux phénomènes observés peuvent également être jointes dans le message émis. La taille de l'espace mémoire est suffisamment importante pour le stockage des données, tandis que la gratuité est dans la majorité des cas observée (0 euros pour 13 applis). Nous observons par ailleurs des différences de pro-activité : soit l'utilisateur est obligé d'ouvrir l'application pour savoir s'il y a (ou non) une alerte ; on parle ici de pro-activité applicable ; soit cette pro-activité est systématique, c'est-à-dire que le système expert est capable de déclencher tout seul l'alerte à partir du moment où certains seuils sont franchis au niveau des capteurs. Cette alerte peut aussi dépendre du centre de gestion si ce dernier se base sur les avis/photographies/informations envoyées de la part de la population ; la population participe alors elle-même à cette pro-activité.

14.1.3 Couvertures et territoires d'opérationnalité

En regardant la couverture spatiale des 17 systèmes, une autre différence apparaît : des applications couvrent de vastes

Tabl. 1. — Comparaison entre 17 applications Smartphone dédiées au risque inondation

Nom	Auteur	OS	Type	Risque	Taille	Prix (Euros)	Fonction	GPS	Cartog	APN	RA
FloodMap Mobile	Atkins North America	Windows Phone	P et C	Mono	1 Mo	1,99	Multiple	O	O	N	
River and Stream PRO	Northwest Tech	Windows Phone	C	Mono	4 Mo	0,99	Multiple	O	O	N	O
Emergency Alertes	Decapod Studios	Windows Phone	C	Multi	< 1 Mo	0,99	Multiple	O	N	N	
Flood Patrol	AJWCC	Android,iOS	P et C	Mono	< 1 Mo	0	Multiple	O	O	O	
FEMA	FEMA	Android,iOS , BB	P et C	Multi	< 1 Mo	0	Multiple	O	O	N	N
NOAH	DOST-NOAH	Android,iOS	P et C	Multi	2,2 Mo	0	Multiple	O	O	N	N
ThaiFLood Map	Jirasak submanee	Android,iOS	P et C	Multi	< 1 Mo	0	Multiple	O	O	O	N
Elerts	ELERTS Corporation	Android,iOS	P et C	Multi	6,91 Mo	0	Multiple	O	O	O	O
FEMA 100 Year Flood Zones	GCS Research	Android	C	Mono	6,31 Mo	0	Mono	N	O	N	N
Bandon Flood		Android	C	Mono	2,89 Mo	0	Mono	N	N	N	N
Flood Map	Hard Note ES Co	Symbian Nokia	C	Mono			Mono	O	O	N	N
CMAS	CMAS HOLDINGS	Android,iOS	P et C	Multi			Multiple	O	O	N	N
Croix Rouge,	Croix-Rouge française	Android,iOS	C	Multi	13 Mo	0	Multiple	O	N	N	N
Risques Nices	Ville de Nice	Android,iOS	P et C	Multi	3,3 Mo	0	Multiple	O	N	O	N
Alertes Citoyens	PlayAdz	Android,iOS	C	Multi	2,4Mo	0	Multiple	O	O	N	N
Athis-Mons	Ville d'Athis-Mons	Android,iOS	P et C	Multi	2,4Mo	0	Multiple	O	N	O	N
Météo France	Météo France	Android,iOS	C	Multi	2,4Mo	0	Multiple	O	O	N	N

territoires (Philippines, États-Unis ou Thaïlande) et leur mise en œuvre répond à des demandes étatiques (en lien avec la récurrence et la sinistralité des inondations) tandis que d'autres sont bien plus ciblées, sur des entités communales (comme à Nice ou Athis-Mons en France par exemple) et ont une échelle spatiale très grande (surfaces < à 20 km^2). Les enjeux sont alors très différents et l'opérationnalité n'est pas du même ordre. L'application *River an Stream Pro* permet, par exemple, de surveiller plus de 9 000 rivières composant le réseau hydrographique des États-Unis (dès lors, pourquoi ce système n'est pas développé par le SCHAPI pour la France ?) alors que l'application de Nice concerne 4 petites rivières. Les applications locales dépendent, en réalité, des initiatives politiques émanant des communautés de communes ou des villes ayant décidées d'inclure ces outils dans une politique intégrée de prévention des risques. Développer sa propre application nécessite la mobilisation de ressources (humaines, matérielles, budgétaires) et des autorisations spéciales. De plus, ces systèmes ont été conçus dans des contextes différents, avec des objectifs et des usages différents, n'étant alors pas fonctionnels hors des territoires d'investigation. On peut par ailleurs trouver des petites briques qui permettent de déclarer un incident ou de connaître l'intensité des pluies (*via* Météo France) mais ces données concourent à une « information générale sur les risques » sans inciter à tel ou tel comportement.

14.1.4 Les inondations rapides : un sujet très peu abordé à travers les applis

Sur l'ensemble des applications étudiées, aucune finalement ne porte exclusivement sur les inondations rapides (en 2013, date d'écriture de cet article). Cette absence peut s'expliquer par des lacunes encore existantes sur leur mode de fonctionnement des crues et sur la difficile précision des pluies intenses qui en sont à l'origine à échelle fine. Prévoir une inondation rapide nécessite d'avoir un certain nombre de certitudes sur la survenue du phénomène (pas seulement en étudiant l'intensité des pluies), et les incertitudes sur ces phénomènes sont encore nombreuses (Lobligeois, 2012). Certains cours d'eau sensibles à ce type de phénomènes sont pourtant inclus de façon indirecte dans certaines applications (États-Unis ou Philippines) car les stations hydrométriques ont été intégrées dans un système de prévision élargi. En France, c'est d'ailleurs le cas pour certains cours d'eau (Ouvèze, Narturby, Agout, Brevennes) qui ont été à la source d'évènements dommageables au cours de ces dernières années. Dès lors, au-delà de cette surveillance partielle de certains cours d'eau sensibles à des inondations rapides, comment expliquer ce déficit d'applications en France ? Est-ce par manque d'intérêt ou existe-t-il, plutôt, des contraintes fortes face à leur mise en place ?

14.2 L'absence d'application dédiée aux inondations en France est-elle liée à des contraintes juridiques ou réglementaires ?

Bien qu'alléchant, le développement d'applications basées sur la géolocalisation (*via* le système GPS) et dédiées à l'alerte face aux risques naturels apparaît vite contraignant en France, notamment si on respecte le cadre réglementaire et juridique, alors même que depuis 2014, certaines applications ont vu le jour (*SignAlert*, *MyCitizenAlert*).

14.2.1 Les services de l'État : les seuls autorisés à diffuser l'alerte

Une alerte est un signal qui est donné pour informer une personne ou une population de l'imminence d'un danger. Elle se différencie de l'avertissement par une temporalité beaucoup plus courte vis-à-vis de l'approche du danger. En France, le décret n° 2005-1269 (12 octobre 2005) relatif au code d'alerte national décrit « les mesures destinées à alerter et informer en toutes circonstances la population, soit d'une menace ou d'une agression au sens des articles L. 1111-1 et L. 1111-2 du Code de la défense, soit d'un accident, d'un sinistre ou d'une catastrophe au sens de la loi du 13 août 2004 ». Ces mesures sont mises en œuvre par les « détenteurs » de tout moyen de communication au public, ce qui indique qu'aucune personne ne peut, à titre individuel, véhiculer une alerte *via* les canaux officiels de communication. Le déclenchement de cette alerte est une tâche qui incombe aux mairies (associés à son pouvoir de police), aux préfets ou aux sous-préfets, voire à l'État si l'alerte dépasse les limites départementales. Une telle procédure nécessite une validation et des contrôles à différents niveaux.

En se basant sur leurs capteurs hydrométriques, pluviométriques et/ou des modèles de prévisions, le SCHAPI (avec Météo France) alerte en premier lieu l'un des 22 services de prévisions des crues (SPC) en cas de forte probabilité de survenue d'une crue (liée à un degré de dommages faible, moyen ou élevé). Les informations sont relayées aux services de l'État (mairies, préfectures) et à la population (*via* le site `www.vigicrues.fr` et lors des bulletins de prévisions météorologiques sur les chaînes hertziennes). Le site Internet est quotidiennement mis à jour (à 8 h et 14 h UTC). Quand le niveau de vigilance devient jaune, orange ou rouge, le Centre opérationnel de gestion interministériel de crise (COGIC) est directement informé pour faciliter ensuite les relais avec les acteurs locaux (SDIS, mairie, DDT, police, association de riverains). Dans tous les cas, il s'agit d'une alerte classique partant de l'administration vers les administrés ; l'administration détient exclusivement le pouvoir d'information en cas de risques majeurs (qu'ils soient naturels ou technologiques — selon le Code général des collectivités territoriales) et le maire reste surtout le seul responsable de la sécurité des biens et des personnes sur son territoire en cas de crise (Douvinet *et al*, 2011). Le dispositif actuel apparaît alors fortement technocratique. Il peut même paraître désuet (il date au passage de la seconde guerre mondiale) et bien loin des nouvelles techniques d'information et/ou de communication. Peu de citoyens savent d'ailleurs associer le son des sirènes aux comportements à adopter en période de crise(s). Ce constat s'explique également par l'absence d'exercices de simulation réguliers et par l'excès d'informations, où le citoyen place le risque loin de ses préoccupations centrales.

14.2.2 Les données de géo-localisation : des données à l'usage discutable

À l'heure où les technologies GPS et Internet s'entrecroisent, le Smartphone, quoique bien accueilli, est source de plusieurs problèmes de sécurité. Si on regarde dans un premier temps la réglementation légiférant l'usage des données de géolo-

calisation, il faut rappeler que la protection des personnes physiques à l'égard de l'utilisation et des traitements de ces données est régie en France par les lois 2004-669 du 9 juillet 2004 et 2004-801/182 du 6 août 2004 (portant sur les protections individuelles au sens large). Pour éviter que des personnes non autorisées n'accèdent à ces données, il est obligatoire de prendre des mesures de sécurité (accès à un site avec un identifiant et un mot de passe), selon la norme 51 de la CNIL. Cet usage est également protégé par un ensemble de lois associées au droit pénal (article 226-1 et suivants sur la protection de la vie privée ; article 226-16 relatif aux droits des personnes résultant de traitements informatiques ; loi du 6 janvier 1978). Lorsque les usagers ont donné leur accord, ils peuvent suivre les traces émises par les capteurs inclus dans leur téléphone sur différents sites (*Runkeeper, Locationhistory* ou *Killwitch* ; FenChong, 2012). Mais l'usage de ces données peut aussi se faire sans l'accord explicite des utilisateurs. Une enquête de la Commission nationale de l'informatique et des libertés (CNIL, 2014) indique que la majorité des applications accèdent en permanence (ou dès qu'elles en ont l'occasion) à la mémoire interne, à la liste de contacts, aux données GPS, etc., tout en transmettant ces informations *via* Internet. Des chercheurs ont aussi montré que la société *Apple* enregistrait à leur insu la localisation des détenteurs d'un Smartphone grâce à un système de triangulation (*via* les points d'accès Wifi et les antennes relais ; FenChong, 2012). Ces données sont téléchargées dans un fichier secret lors de la mise à jour du logiciel (du téléphone vers l'ordinateur). Une fois traitées par le ou les détenteurs, les données de géolocalisation sont de véritables mines d'information dont ils n'hésitent pas à se servir. Les données sont recueillies sur « qui nous sommes, ce que nous savons, où nous avons été et où nous avons l'intention d'aller ». La quantité et le type des données collectées sont alors très diversifiés : nos profils, nos dossiers médicaux, nos déplacements, nos recherches effectuées sur les sites Web, voire nos goûts et dégoûts, nos *tweets*, nos courriels, nos photos et vidéos (etc.) peuvent vite se retrouver sur la toile. Et cette liste ne cesse de s'accroître (WEF, 2011). Si au niveau des empreintes digitales il faut douze points pour identifier une personne (sans aucune équivoque), Montjoye *et al.* (2013) montrent que quatre données spatiotemporelles suffisent aujourd'hui pour nous distinguer dans une foule… Dès lors, quelles données peuvent être partagées « en toute sécurité » ? Sous quelle forme et vers qui ? Dans quelle mesure pouvons-nous développer un cadre approprié pour protéger la vie privée ? Comment pouvons-nous empêcher l'utilisation abusive de ces données ? Ces questions peuvent amener, de façon légitime, à ne pas concevoir une application et à ne pas inciter les citoyens à participer à un système d'alerte ouvert et volontariste, au sens défini par Goodchild (2007) et Mericskay et Roche (2010).

14.3 Développer une nouvelle application : quelle forme ? quelle utilité ?

14.3.1 Structure et fonctionnement attendus

La réussite de l'application implique une bonne connaissance de l'environnement dans lequel elle sera déployée, et de ses aptitudes à répondre aux besoins exprimés par ses futurs utilisateurs. Après l'étude des applications et des contraintes législatives existant en France, nous cherchons actuellement à développer un système opérationnel tout en réfléchissant à la meilleure forme et au mode de fonctionnement de l'application que nous pourrions concevoir. Il s'agirait d'une application mono-risque (crues rapides), à caractère participatif (voire volontariste), qui intègrerait les données de géolocalisation, qui ferait appel à l'appareil photographique (validation ou non de l'évènement), qui laisserait le choix à l'utilisateur pour l'installation (sur le téléphone ou vers une version en ligne *via* QRCode). Une fois ouverte, une interface simple et intuitive proposerait à l'utilisateur un pré-formulaire (ce qui permet de le guider vers des choix préconstruits). D'autres technologies seront employées, comme la Réalité Augmentée ou la Synthèse vocale. Après remplissage, le formulaire serait validé et le contenu transmis à un centre de décision (préconçu en amont ou localisé dans un service opérationnel), qui en retour pourrait diffuser l'alerte dans un rayon de 5 kilomètres à partir du point émetteur. La diffusion des messages se ferait ensuite en mode « pair-à-pair », ce qui permet une connexion entre téléphones sans passer par les opérateurs *via* un système de type DTN (*Delay Tolerent Network)*, procédé utilisé dans *GeoCam* par exemple. Les personnes entrant dans le périmètre des 5 kilomètres (des touristes par exemple) seraient également informées des mesures à prendre et des gestes à adopter.

14.3.2 Choix des territoires pour les premiers retours d'expérience

L'expérimentation a été menée dans deux départements sensibles aux crues rapides, à savoir le Vaucluse et le Var (figure 2). Afin d'identifier les territoires potentiellement concernés par l'application (et surtout localiser les communes où des enquêtes seront menées), une première approche a été nécessaire pour : 1) sélectionner puis écarter les tronçons disposant de capteurs hydrométriques intégrés à la vigilance actuelle du SCHAPI ; 2) exclure les communes situées à proximité de ces linéaires ; 3) conserver les communes traversées par des petits cours d'eau sujets à l'apparition de crues rapides ; 4) écarter les canaux circulant dans les plaines car ces derniers sont plus sensibles à des inondations par débordement, donc à des phénomènes ayant une cinématique et un fonctionnement différents. Une fois ces requêtes effectuées sous SIG, 204 communes (sur un total de 304, soit 71 %) sont conservées. Elles présentent, en majorité, de très faibles densités de population (figure 2) et sont localisées dans les régions montagneuses (sud du Mont Ventoux, ouest du Luberon, sud du Massif des Maures, nord de la Sainte-Baume. Les enjeux y étant présents sont peu élevés, ce qui explique sans doute une attention plus faible portée par les services de l'État (ils priorisent leurs interventions dans les secteurs plus vulnérables, ce qui est toute à fait logique). Le nombre de communes conservées chute très vite au-delà du seuil de 63 habitants/km2, la baisse étant plus rapide que le nombre de communes initial (tableau 2). Certaines villes et des communes périurbaines restent sélectionnées (Toulon, La Garde), ce qui confirme cette fois-ci que notre application pourrait être utile à des pôles urbains et non exclusivement aux communes rurales. Une seconde approche a été conduite pour conserver des communes ayant des profils spécifiques par rapport aux données socio-économiques investiguées (INSEE). C'est le cas par exemple de La Roque-Alric (la moins peuplée du Vaucluse, mais cumulant

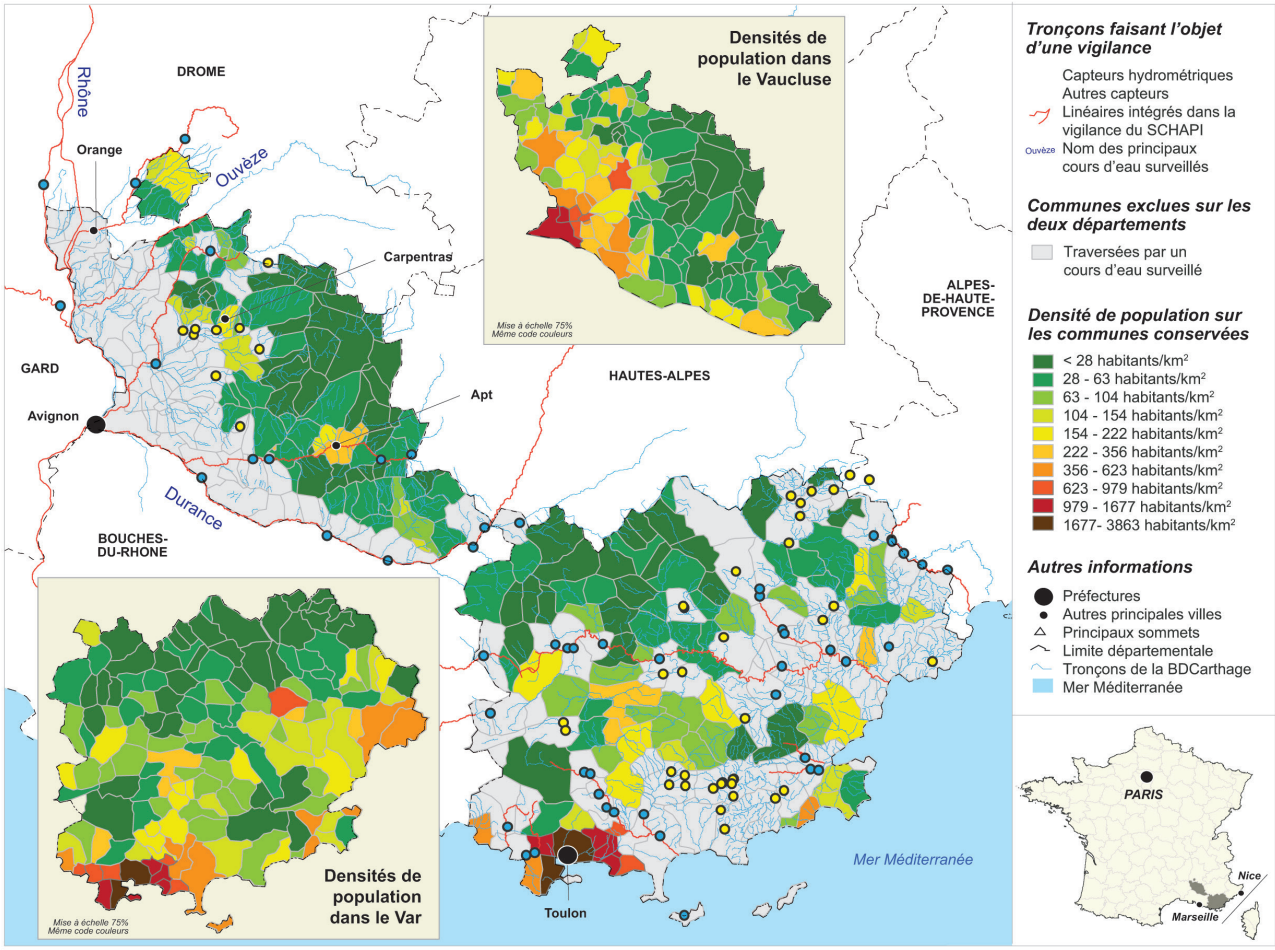


Fig. 2. — Densité de population et localisation des communes conservées.

une forte part d'agriculteurs et la plus forte part de cadres) ou de Montferrat, dans le Var (cumulant la plus faible part d'agriculteurs, la plus faible part de chômeurs et la plus forte part d'ouvriers). 15 communes dans le Vaucluse et 10 dans le Var ont finalement été enquêtées.

14.3.3 Premiers résultats

Les enquêtes semi-directives, conduites entre avril et juillet 2014, ont été développées *via KoboForm* (interface graphique de création d'applications et de collecte de données à partir de terminaux mobiles en mode hors ligne) pour un gain d'efficacité (pas besoin de papier sur le terrain) et de temps (données transférables sous ordinateur et mises en forme de tableur grâce au module *KoboSync*). L'application a été installée sur trois Smartphones fonctionnant sous Android (figure 3). La localisation des interrogés et/ou des marqueurs de crues passés a été possible grâce au module Ushaïdi, avec un lien toujours actif vers une carte interactive (`https://ffhunter.crowdmap.com/`).

322 personnes ont été interrogées sur les 15 communes enquêtées. Des résultats qui se trouvent dans de nombreuses études sont avérés : une faible culture du risque des populations, un manque de connaissances de la part des autorités sur les risques et les outils (alerte, information) dont ils disposent, des inquiétudes de certains citoyens vis-à-vis du risque d'inondation (même là où le risque est considéré comme inexistant pour les autorités compétentes). D'autres sont plus encourageants : plus de 49 % de ces personnes possèdent un Smartphone ; parmi eux, 71 % sont favorables à l'usage des réseaux sociaux numériques et 82 % à l'usage des Smartphones pour l'alerte face à des inondations rapides. En parallèle, la majorité des élus locaux et responsables du risque que nous avons pu rencontrer (17 sur 25) sont abonnés au dispositif d'alerte mis en place par la préfecture, mais reconnaissent ne pas en être satisfaits car ils reçoivent des alertes aux pluies fortes alors que leur commune n'est pas concernée. Ayant à sa disposition une sirène, un PCS et un DICRIM, le responsable d'une commune déclare même être avertie en retard par la préfecture, ce qui est source de difficultés pour la mise en place et la coordination d'une action appropriée. Si les élus et les populations sont favorables à l'idée de faire remonter de l'information via les applications, 62 % ont peur de l'usage et d'une perte de contrôle qui pourrait y être associé.

14.3.4 Poursuites prévues à court terme

Des besoins et une attente réelle vis-à-vis d'un système innovant qui tient compte des contraintes et des réalités locales ont été formulés. Cependant, la réussite et l'adoption de ce système passera par une implication des acteurs locaux dans sa conception (de même que la mise en place des outils réglementaires Douvinet *et al.,* 2013). Il ne s'agit pas de mettre en place un outil révolutionnaire ou la solution miracle, mais il de voir dans quelle mesure l'application proposée pourra

Tabl. 1. — Nombre de communes initiales dans les deux départements étudiés (Vaucluse et Var) et sélection des communes conservées (étape 1 : sujet aux inondations rapides ; 2 : enquêtées)

Densité de population	Nombre total de communes	Nombre de communes écartées	Communes conservées (étape 1)	Communes conservées (étape 2)
< 28 habitants/km²	73	4	64	8
28 – 63 habitants/km²	70	9	61	8
63 – 104 habitants/km²	52	13	39	1
104 – 154 habitants/km²	28	11	17	3
154 – 222 habitants/km²	29	18	11	1
222 – 356 habitants/km²	17	13	4	1
356 – 623 habitants/km²	17	15	2	2
623 – 979 habitants/km²	10	8	2	1
979 – 1677 habitants/km²	6	4	2	0
1677 – 3863 habitants/km²	2	0	2	0
Total	304	95	204	25

s'insérer dans le dispositif en place. La suite à donner à ce projet sera alors d'évaluer la faisabilité du projet avec les prévisionnistes et les gestionnaires des risques aux échelles locales (depuis les maires, les préfectures, le Service de Prévision des Crues SCP-Grand Delta jusqu'au SCHAPI). En complément, des capteurs pourraient être placés sur près de 30 linéaires (en amont des communes enquêtées) pour tester la chaine d'information (de l'émission à la diffusion des messages d'alerte) avec le mode « pair à pair » (sans passer par les opérateurs). Il faudrait aussi discuter de la localisation des serveurs, offrant un accès à plusieurs types d'acteurs tout en assurant le traitement/l'émission des données.

Conclusion et perspectives

Par cette approche, on souhaite exploiter les données envoyées par les citoyens situés « au plus proche de l'évènement » pour en faire de véritables « citoyens-capteurs » ce qui permettrait à la fois d'affiner les connaissances sur les inondations rapides (Artigue *et al.*, 2012 ; Badoux *et al.*, 2012), pallier les limites des outils préventifs réglementaires (Ledoux, 2006 ; Douvinet *et al.*, 2013) et responsabiliser les citoyens, acteurs là aussi de leur propre sécurité. Plus concrètement il s'agit de créer une application volontariste et gratuite pour les utilisateurs de Smartphone en vue d'une alerte plus prompte et un peu mieux ciblée en cas d'inondations rapides. Ce sujet semble très vite opportun au regard de l'utilisation croissante et sans précédent de ces technologies. De façon plus spécifique, des études ont révélé que l'usage des données issues de la téléphonie mobile s'avère être un excellent outil d'aide à la décision l'instauration de pour les politiques publiques. Cela a en effet été confirmé par plusieurs analyses réalisées dans le cadre du projet *Data For Développement* initié par la société Orange France sur les données anonymes provenant des communications extraites du réseau mobile qu'elle détient en Côte d'Ivoire. Ces travaux ont par exemple démontré qu'il y a une relation entre les crises ou des faits majeurs qui se déroulent dans une ville et les appels qui sont émis vers cette dernière quelques heures ou quelques jours à l'avance. Il semble donc possible de prévoir une crise. Notons aussi qu'aujourd'hui, *via* les *smarts grid*, les écrans embarqués, les *widgets* il devient possible d'organiser les réseaux de transport en fonction des lieux où les appels téléphoniques sont les plus émis…

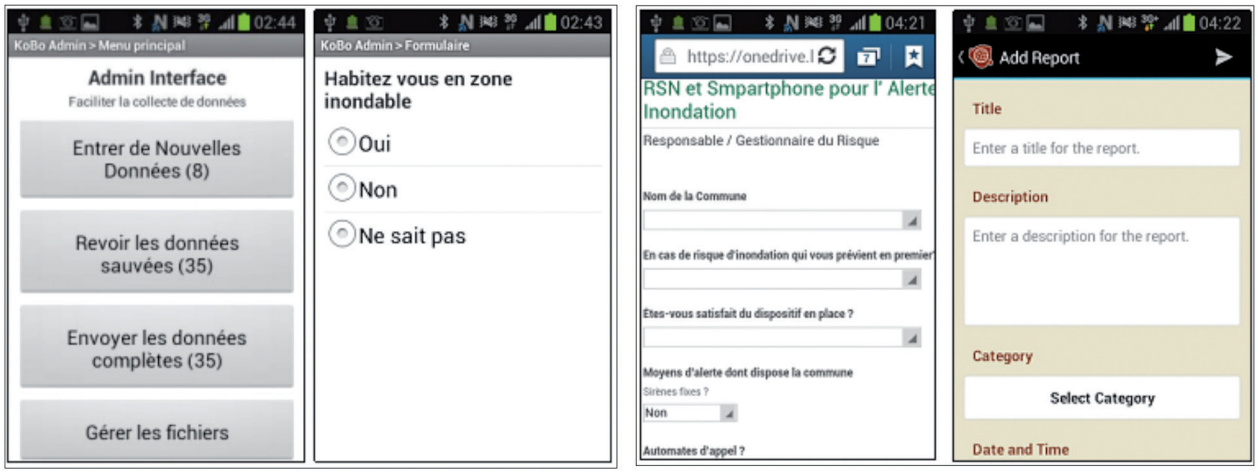


Fig. 3. — Captures d'écran de l'application Kobo/Office on line/Ushaidi.

Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier la Région PACA et le bureau d'études *Risques et développemen*t pour le financement du projet de thèse associé à cette thématique (2012-2015). Il convient aussi de remercier, pour leur soutien financier, l'université d'Avignon et des Pays de Vaucluse et la SFR Agorantic. Un grand merci aux étudiants investis pour les enquêtes : Maxime Hébert et Coraline Lesage-Betch.

Bibliographie

Antoine J. M., Desailly B., Gazelle F., « Les crues meurtrières du Roussillon aux Cévennes », *Annales de géographie,* 110, 2001, p. 597-623.

Artigue G., Dumas D., Mertz C., Wesolek E., *Épisode pluvio-orageux du 15 juin 2010 sur le Var : Retour d'expérience sur la prévision météorologique et hydrologique d'un épisode diluvien exceptionnel*, Éditions Keraunos, 2010, 20 p.

Artigue G., Johannet A., Borrell V., Pistre S., « Flash flood forecasting in poorly gauged basins using neural networks : case study of the Gardon de Mialet basin (southern France) », *Natural Hazards and Earth System Science,* 12, 2012, p. 3307-3324.

Association Française pour la Prévention des Catastrophes Naturelles et l'Institut de Maitrise des Risques, *Prévision, Vigilance, Alerte, Bilan et Perspectives*, 2011, 41 p.

Badoux A., Turowski J. M., Mao L., Mathys N., Rickenmann D., « Rainfall intensity duration thresholds for bedload transport initiation in small Alpine watersheds », *Natural Hazards and Earth System Science*, 12(10), 2012, p. 3091-3108.

Bezahaf M., Lannone L., Dias de Amorim M., Fdida S., « LORD : Tracking Mobile Clients in a Real Mesh », *Ad Hoc Networks*, vol. 9 (8), 2011, p. 1461-1475.

Bontron G., Obled, C., « Prévision à moyenne échéance des pluies intenses en zone méditerranéenne par recherche de situations analogues », *IAHS publication*, 2003, p. 257-262.

Bougeault P., Richard E., Roux F., *L'expérience MAP Sur Les Phénomènes De Mésoéchelle dans Les Alpes*-Premier Bilan, 2011, 43 p.

Douvinet J., *Analyse de la structure et de la dynamique de systèmes spatiaux complexes — Les bassins versants sensibles aux crues rapides du nord du Bassin Parisien*, thèse de doctorat, université de Caen, 2008, 321 p.

Douvinet J., Denolle A.S., Defossez S., Anselle A., Les maires face aux Plans de prévention du risque inondation (PPRI), *L'espace géographique*, 1, 2011, p. 31-46.

Douvinet J., Pallares R., Genre-Grandpierre C., Gralepois M., Rode S., Servain-Courant S., « L'information sur les risques majeurs à l'échelle communale — Occurrence et facteurs explicatifs du DICRIM, un outil préventif sous-utilisé », *Cybergéo*, 2013, n° 658.

Ducrocq V., Gaëtan A. Santurette P, « Les précipitations intenses et les inondations des 12 et 13 novembre 1999 sur le sud de la France », *La Météorologie*, 42, 2003, p. 18-27.

Fen-Chong J., « Des traces individuelles à la ville mobile et aux rythmes urbains », *Rencontres interdisciplinaires sur les systèmes complexes naturels et artificiels*, Rochebrune, 2011, p. 16-22.

Fen-Chong J., *Organisation spatio-temporelle des mobilités révélées par la Téléphonie mobile en Île-de-France*, thèse en géographie, université Paris 1, 2012, 218 p.

Fienen N. F., Lowry C. R., « Social.Water — A crowdsourcing tool for environmental data acquisition », *Computers and géosciences*, 49, 2012, p. 164-169.

Gaume E., Bain V., Bernardara P., Newinger O., Barbuc M., Bateman A., Blaskovicova L., Bloschl G., Borga M. Dumitrescu A., Daliakopoulos I., Garcia J., Irismescu A., Kohnova S., Koutroulis A. Marchi L., Matreat S., Medina V., Preciso E., Sempre-Torres D., Strancalie G., Szolgay J., Tsnais I., Velasco D., Viglione A., « A compilation of data on European flash floods », *Journal of Hydrology,* 367, 2009, p. 70-78.

Ginsberg J., Mohebbi H., Patel S., Brammer L.,Smolinski S., Brilliant L., « Detecting Influenza Epidemics Using Search Engine Query Data », *Nature,* 457 (7232), 2009, p. 1012-1014.

Godart A. *Les Précipitations orographiques organisées en bandes dans la région Cévennes-vivarais : Caractérisation et contribution au régime pluviométrique*, thèse de doctorat, université Joseph-Fourier, Grenoble, 2009, 315 p.

Goodchild M. F. « Citizens as sensors : the world of volunteered geography », *Geo-Journal* 69(4), 2007, p. 211-221.

Goulpié P., *Maximisation numérique et mesures acoustiques des précipitations*, 2004.

Ledoux B., *La Gestion du risque inondation*. Londres, New York, Paris, Éditions du Tec & Doc, Éditions Lavoisier, 2006, 770 p.

Lobligeois F., Andreassian V., Perrin C., Loumagne C., « Investigating the influence of rainfall spatial variability on flow simulation », *Proceedings of the seventh European conference on radar in meteorology and hydrology*. 2012, 4 p.

Marchi L., M. Borga, E. Preciso, E. Gaume, « Characterisation of Selected Extreme Flash Floods in Europe and Implications for Flood Risk Management », *Journal of Hydrology,* 394, 2007, p. 1-2.

Mathys N., Peteuil C., « Synthèse et analyse des données de crues des bassins versants des alpes françaises », *12th Congress INTERPRAEVENT 2012* – Grenoble, 2009, p. 259-268.

MEDD-METL (Ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement durable Ministère de l'Égalité des Territoires et du Logement,) *Plan submersions rapides — Submersions marines, crues soudaines et ruptures de digues*, 2012, 80 p.

MEDD-METL, *Les digues protègent… mais peuvent rompre*, 2010, 4 p.

Mericskay B., Roche S., *La cartographie 2.0 au service de l'intelligence territoriale : de nouveaux outils et de nouvelles méthodes pour la production de connaissances hybrides sur les territoires*, 2010, 12 p.

Montjoye Y.-A., Hidalgo C. A., Verleysen M., Blondel V. D., « Unique in the Crowd : The privacy bounds of human mobility », *Nature Scentific Reports* 3, 1376, 2013, DOI : 10.1038/srep01376.

PUB « Predictions on Ungauged Basins, A catalyst for multidisciplinary hydrology », Transactions. *American Geophysical Union*, 85, 44, 2006, p. 451-457.

Reid I., « Flash flood », In Goudie A. (éd.), *Encyclopedia of Geomorphology*, Routledge, London, 2014, 1156 p.

SPCAN (Service de prévision des crues Alpes du Nord), *Le dispositif de l'État pour la surveillance et la prévision des crues*, rapport interne, 2010, 45 p.

Vinet F., *Le risque inondation. Diagnostic et gestion,* Éditions Tec & Doc, 2010, 245 p.

Vinet F., Leone F., De Richemond N., *Aléas naturels et gestion des risques,* PUF (Licence, ISSN 1967-3329), 2010, 284 p.

WEF (World Economic Forum), *Personal Data : The Emergence of a New Asset Class*, WEF 2011, 40 p.

Chapitre 4
Spatialiser le risque

15 La cartographie du risque glissements de terrain sur le flanc sud-est de l'atlas tellien, NE Algérie

Riheb Hadji
Département des Sciences de la Terre, Institut d'architecture et des Sciences de la Terre, université Farhat-Abbas, Sétif-1, 19000, Sétif, Algérie.
Laboratoire de recherche Environnement sédimentaire, Ressources minérales et hydriques de l'Algérie Orientale, université de Tébessa, 12000, Tébessa, Algérie.
hadjirihab@yahoo.fr

Résumé. — Ce travail présente une approche basée sur des données géologiques, géomorphologiques, environnementales, d'occupation du sol et les SIG, pour l'estimation du risque glissements de terrain dans la région de Souk Ahras et Zaarouria. Les glissements plans, rotationnels et complexes sont les plus significatives ruptures de pentes de la zone d'étude. 219 glissements (1997-2012) ont été inventoriés à l'aide de la visu-interprétation d'images satellitaires suivie d'un travail de terrain. Leur densité atteint 1,06 évènement/Km^2. Ils se répartissent sur une large variété de déclivités et de contextes géologiques. La majorité se produisent sur des pentes $>20^o$ et sont associés aux routes. En utilisant la relation entre l'occurrence des glissements et leurs facteurs causaux, une zonation de l'aléa est estimée. Les glissements sont contrôlés non seulement par les facteurs naturels mais également par les activités humaines surtout l'ouverture des routes. Des cartes de vulnérabilité et de risque sont ensuite établies. D'un point de vue des menaces, les villes et les routes encourent un grand risque.
Mots-clés. — Atlas, glissements de terrain, S.I.G., Cartographie, aléa, vulnérabilité, risque.

Title. — *Landslides Risk Mapping over the South East Flank of Tellian Atlas, NE Algeria*
Abstract. — *This work presents a GIS-based framework, coupling with geological, geomorphological, environmental, land use data and a landslide-inventory map for landslide risk assessment in SoukAhras and Zaarouria region. The most significant slope failures in the study area are planar, rotational and compound landslides. 219 events (1997-2012) were inventoried through images interpretation followed by a fieldwork, their density reach 1.06 events/km^2. The landslides are distributed on a wide range of slope gradient and geological setting. Most of them occurred on slopes exceeding 20° and were associated with roads. Using the relation between the landslides occurrence and their causative factors, hazard zonation is assessed for the study area. The landslides events were controlled not only by natural factors but also by human activities, mainly roads and construction. Vulnerability and risk maps are also established. In terms of being hit by a landslide, cities and roads are at the highest risk.*
Keywords. — *Atlas, Landslides, GIS, Mapping, Hazard, Vulnerability, Risk.*

Introduction

Les glissements de terrain s'imposent comme un risque naturel très marquant pour l'homme et son environnement physique. Dans les parties septentrionales de l'Algérie orientale d'importants dommages sont constamment enregistrés. Les dégâts portent essentiellement atteinte à l'économie, et nécessitent la réhabilitation des voies de communication et le relogement des sinistrés. On se trouve chaque année en train de remédier aux mêmes instabilités surtout après les fortes pluies hivernales. Cette situation est devenue un véritable handicap à n'importe quel développement dans cette région.

Les mouvements de pente résultent de l'association de conditions climatiques, lithologiques et morpho-structurales, favorables à leur genèse (Guettouche *et al.* 2013 ; Bourenane *et al.* 2014). Faisant partie de cet environnement, la zone choisie pour notre étude souffre de la récurrence des glissements de terrain. Leurs préjudices sont aggravés par le manque flagrant d'une cartographie règlementaire pour l'estimation de la probabilité d'occurrence spatiale du phénomène. Cette problématique est intéressante vu le volume des pertes enregistrées chaque année et justifie, raisonnablement, son étude.

À l'aide des technologies SIG, de divers supports cartographiques (cartes géologiques et topographiques en 1:50 000, M.N.T, photos satellitaires, etc.), de données attributaires (mesures pluviométriques, GPS, etc.) et d'un inventaire précis des glissements de terrain dans la zone d'étude, on a pu construire une base de données composée de couches d'information à référence spatiale fondamentale pour le déroulement de cette étude.

Le choix de la méthode d'investigation dépend de plusieurs paramètres tels que : l'échelle de travail, les caractéristiques physiques du terrain, la disponibilité des données, le cadre administratif de gestion, et le fond cartographique existant, etc. Elles se divisent entre les méthodes directes (type qualitatif) et indirectes (type quantitatif) (Grozavu *et al.* 2013). Pour le premier type, l'estimation de la susceptibilité des terrains aux mouvements de pente se fait directement par un zonage qualitatif sur le terrain. Pour le second, l'estimation se fait par une affectation quantitative de niveaux hiérarchiques de susceptibilité (Regmi *et al.* 2014).

L'approche adoptée par notre recherche se base sur un modèle probabiliste définissant statistiquement la relation superposée entre les glissements de terrain et leurs variables prédictives (Anbalagan *et al.* 1992). Cette modélisation permet une évaluation raisonnable des menaces encourues par la zone d'étude à l'aide de cartes thématiques d'aléa, de vulnérabilité et de risque glissement de terrain. La lecture de tels documents permet le repérage des zones potentiellement instables, nécessitant un traitement particulier lors des opérations d'aménagement du territoire.

15.1 Notions de risque, d'aléa et de vulnérabilité

Le risque glissement de terrain est défini comme étant : « la probabilité d'occurrence d'un évènement spécifique menaçant un élément à risque, sans tenir compte des conséquences potentielles » (Vandine *et al.* 2004). Le risque cartographique est la croisée d'un phénomène naturel dommageable et d'enjeux présentant une certaine vulnérabilité : Risque = aléa × vulnérabilité (CERG, 2000).
La notion d'aléa traduit la probabilité d'occurrence spatiale et temporelle, d'un phénomène de nature et d'intensité définie. La probabilité d'occurrence spatiale de l'aléa dépend des caractéristiques physiques de terrain (Hansen, 1984). La probabilité d'occurrence temporelle est la possibilité de chaque zone élémentaire de subir l'impact du phénomène étudié dans une période de temps fixée.
La cartographie de la vulnérabilité identifie, caractérise et hiérarchise des thèmes susceptibles de subir des dommages corporels, structurels ou fonctionnels au sein d'un territoire (D'Ercole et Metzger, 2009).

15.2 Caractéristiques de la zone d'étude

La zone concernée par l'étude occupe la partie centrale de la wilaya de Souk Ahras. Elle se situe entre les latitudes 36°06'04,97'' à 36°19'26,69'' N et les longitudes 07°51'11,38'' à 8°04'19,52''E. Elle englobe les communes de Souk Ahras et Zaarouria et se repartie sur une surface totale de 206 146 km^2 (fig. 1). Elle est limitée au nord par les communes d'El Machroha et Ouled Driss, à l'est par Ouilen et Mrahna, à l'ouest par Hanancha et Tifech et, au sud par Dréa et Taoura. Elle réunit une population résidentielle estimée à 166 493 hab. (ONS, 2008). Elle est caractérisée par une forte dynamique démographique et agricole et présente le futur pôle de développement de la wilaya.
Son couvert végétal est principalement à base de pins d'Alep, de cyprès et d'eucalyptus. Les cultures des céréales sont localisées sur les formations marneuses. Sur les affleurements des calcaires fracturés, les sous-bois, pinèdes, et maquis dominent. Les zones caillouteuses et les encroûtements sont couverts d'une végétation de type steppique.
Le climat est semi-aride avec un été chaud et sec et un hiver froid et humide. Les précipitations moyennes sont de l'ordre de 840,74 mm par an (Fahdi, 2008).
Géomorphologiquement, la zone d'étude a une allure d'une dépression ouverte vers l'est. Ses altitudes varient entre 480 m dans le lit de l'oued Medjerda et 1 090 m dans le Djebel Chouga. Le relief se caractérise par une altitude qui diminue régulièrement du SO vers le NE. Une dissymétrie du relief apparaît transversalement avec une pente NO. Deux directions structurales majeures caractérisent la région ; une direction atlasique NE-SO et l'autre d'orientation NO-SE à ONO-ESE, liée de la tectonique Miocène.
Le réseau hydrographique de la zone d'étude est bien développé. Il est représenté par des petits cours d'eau temporaires bien élaborés aux flancs des versants, s'épandant au large les vallées, dont le plus important oued est la Medjerda. Le modèle topographique montre deux directions d'écoulement : une vers l'ouest suivant la direction topographique des flancs des montagnes et l'autre vers l'est suivant le prolongement géométrique.

15.3 Acquisition des données

Le SIG de notre zone d'étude est constitué de plusieurs couches d'information à référence spatiale (WGS84 UTM32N). Ces couches interprètent les facteurs causatifs jugés responsables de la préparation ou du déclenchement des ruptures de pentes. Elles sont utilisées en fonction de critères spécifiques pour définir un modèle booléen permettant le mappage des cartes d'aléa, de vulnérabilité et de risque glissement de terrain.

15.3.1 Modèle numérique de terrain

Un TIN (*Triangulated Irregular Network*) de la zone d'étude a été créé à partir de l'interpolation des valeurs d'altitude d'un échantillon de points (tableau de plus de 1 000 mesures GPS) et des courbes de niveau (polylignes) vectorisées à partir des cartes topo de Souk Ahras, M'daourouch et Taoura (1 : 25 000) (Fig. 2a). Un MNT (modèle numérique de terrain 5 x 5 m) a été dérivé à partir de ce TIN et a été le sujet de divers traitements (*filling*, *resampling*, etc.) pour améliorer sa qualité. Il comporte 3 644 colonnes et 4 564 rangers (fig. 2b). La carte du réseau hydrographique a été automatiquement généré à partir du MNT en exploitant le module ArcHydroTools 9 d'ArcMap. Le réseau hydrographique a été intégré dans la modélisation en adoptant des buffers d'une distance <50 m, comprise entre 50 et 100 m, et >100 m autour des oueds. Le MNT a servi également à générer les paramètres morpho-métriques de terrain.

15.3.2 Cartes de base

Les thèmes lithologies et failles ont été digitalisés sur un fond composé de la carte géologique de Souk Ahras (n° 77), M'daourouch (n° 100) et Taoura (n° 101), (à 1 : 50 000). Les lignes limitant les affleurements de chaque formation lithologique ont été fermées en polygones. Un tableau d'attribution a été créé, contenant pour chaque unité lithologique le nom de faciès, l'âge, le symbole, la classe de susceptibilité, etc. Les faciès connus pour leur sensibilité aux glissements de terrain sont très abondants dans la zone d'étude. On peut citer : les argiles rouges du Pliocène, les marnes jaunes de l'Éocène, les marnes argileuses du Crétacé et, les formations argilo-gypso-gréseuses du Trias (Hadji *et al.* 2013, a). Les failles ont été séparément digitalisées en polylignes sur le même fond cartographique, (fig. 2c). Elles ont été intégrées dans la modélisation en adoptant des buffers d'une distance < 500 m, comprise entre500 et 1 000 m, et $>1\,000$ m autours des failles (fig. 2d).

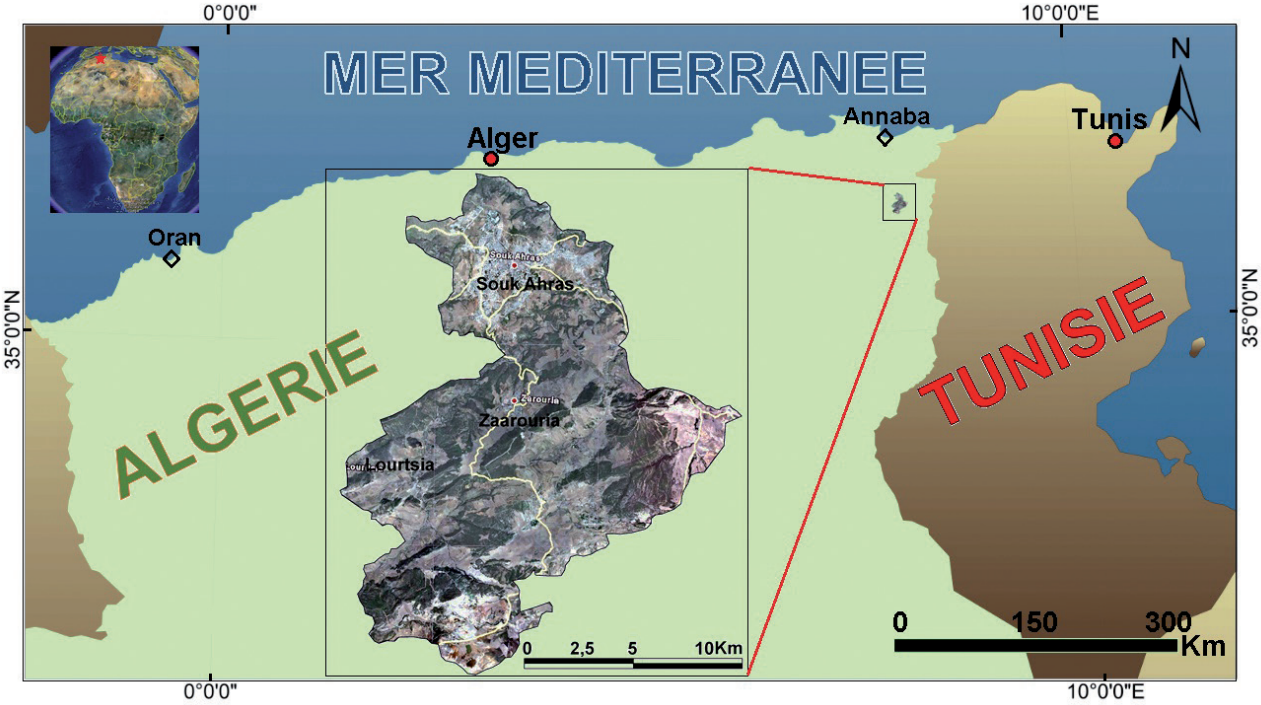


Fig. 1. — Situation géographique de la zone d'étude.

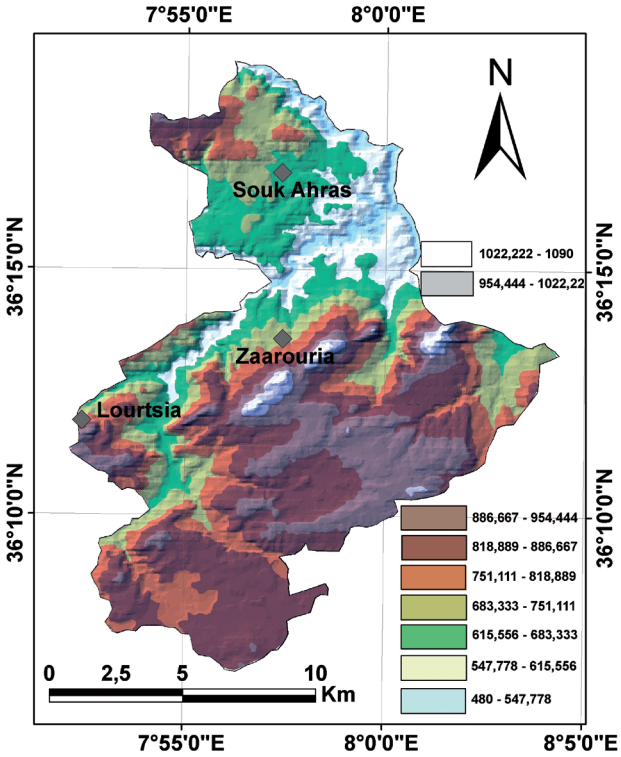


Fig. 2a. — Le « Triangulated Irregular Network » (TIN) de la zone d'étude.

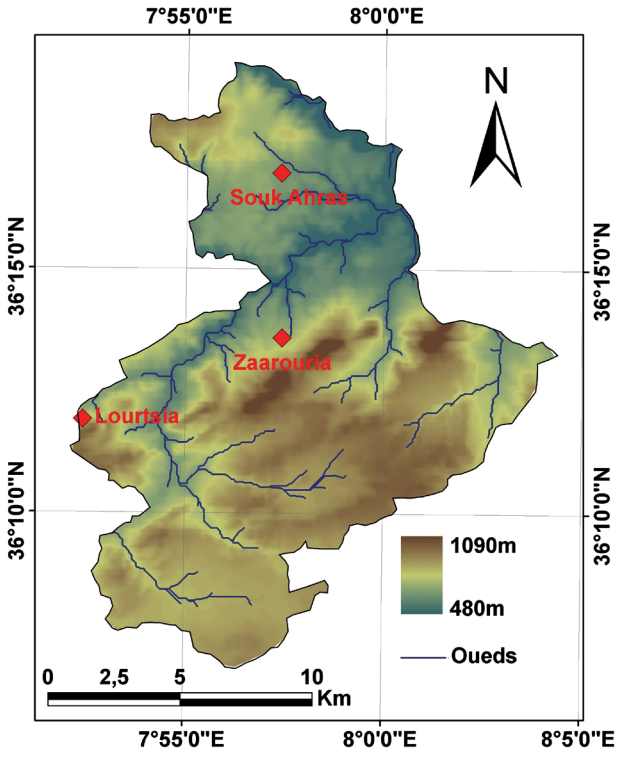


Fig. 2b. — Le modèle numérique de terrain (MNT) couplé au réseau hydrographique.

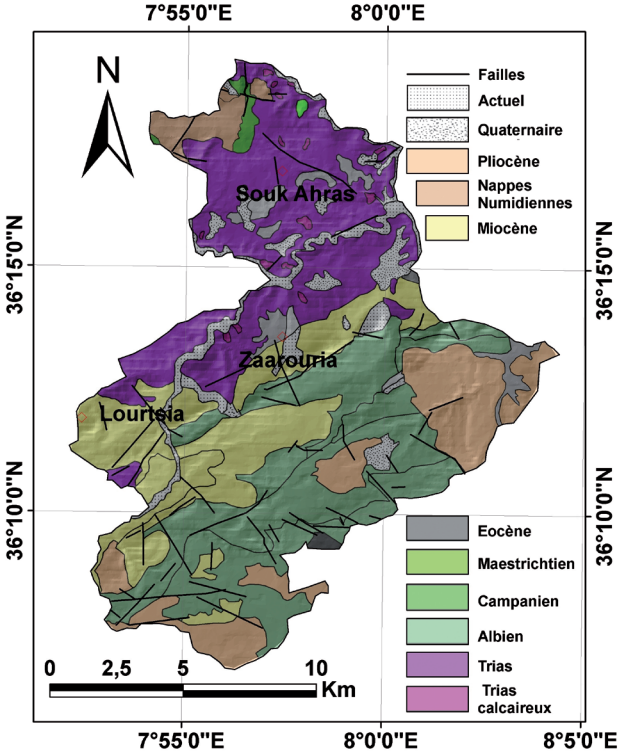


Fig. 2c. — Carte géologique simplifiée de la zone d'étude. Légende : Actuel : alluvions fluviales et formations gravitationnelles ; Quaternaire : alluvions, conglomérats et éboulis de pente ; Pliocène : argiles rouges ; Nappes numidiennes (Oligocène Allochtone) grés quartzeux et argiles verdâtres ; Miocène : siltstones et marnes argileuses ; Eocène : marnes jaunes et calcaires marneux ; Maestrichtien (Crétacé) : marnes argileuses, calcaires marneux et calcaires blanc crayeux : Campanien : marnes argileuses et Marno-calcaires ; Albien : marnes argileuses noires ; Trias : formations argilo-gypso-gréseuses à fragments et blocs de roches diverses : Trias calcareux : calcaires gris et noirs.

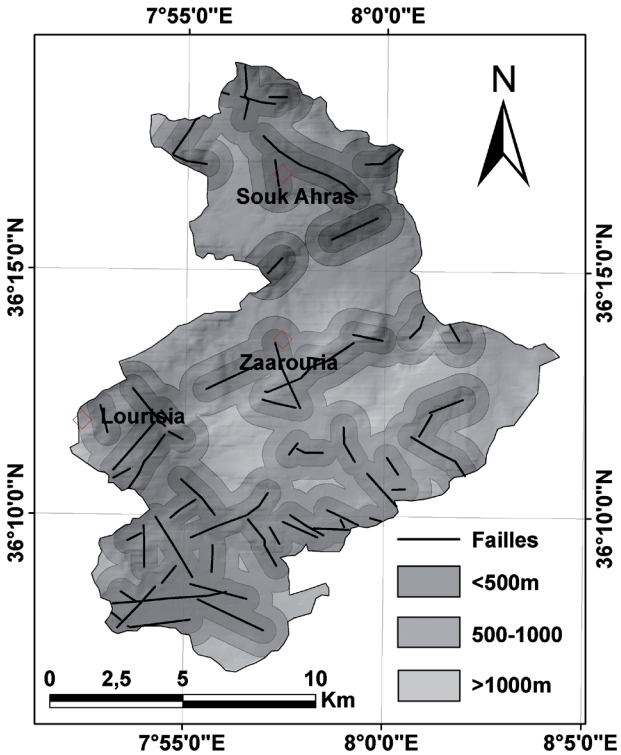


Fig. 2d. — Carte des tampons des failles de la zone d'étude.

15.3.3 Cartes des pentes d'élévations et d'exposition

L'inclinaison des pentes est le principal facteur de prédisposition des terrains aux glissements (Kundu *et al.* 2013). Les pentes de la zone d'étude se répartissent entre 0° et 79°, avec une moyenne d'environ 8,34° et une déviation standard de 7,26° (fig. 2e). Sur la base de mesures de terrain on a choisi une subdivision de la carte des pentes en 5 classes : < 5°,]5-10°],]10-20°],]20-30°] et >30°. Les d'observations montrent qu'en dessous de (5°) aucun évènement significatif n'a été enregistré. La classe [5-10°] n'est pas favorable à la genèse des mouvements de pente. Les pentes de la classe]10-20°] sont peu stables ; celles ayant une déclivité comprise entre 20° et 30° présentent des indices nets d'instabilité ; enfin la plupart des pentes possédant un degré d'inclinaison dépassant les 30° sont quasi-instables. L'abondance des glissements de terrain sur cette classe est due au faciès lithologique de ces pentes. En effet le trias diapirique (argilo-gypseux) favorise l'apparition des glissements rotationnels plus que tout autre type de mouvements de pente.

La carte d'élévations de la zone d'étude a été subdivisée en sept tranches hypsométriques comprises entre 480 et 1 090 m (fig. 2f). Les plus hautes altitudes (1 000-1 090 m) se situent sur les sommets de Djebel Chouga et Djebel Zaarouria et occupent 1 776 km². Les plus basses (480-500 m) se concentrent dans le lit de l'Oued Medjerda avec 1 041 km². L'altitude moyenne est de 769,89 m avec une déviation standard de l'ordre de 116,14 m. La classe 700-800 m a la plus grande superficie, avec 75,526 km².

La carte d'exposition de la zone d'étude exprime l'orientation des pentes par rapport au nord, suivant la direction des aiguilles de la montre (fig. 2g). Elle dévoile les pentes les plus ombrées et par conséquent les plus humides (Pourghasemi *et al.* 2012). Cette humidité présente un facteur de prédisposition positif des ruptures de pente. Les pluies hivernales arrivent du NO, saturent les versants en eau et peuvent perturber leur équilibre.

15.3.4 La carte pluviométrique

Les pluies sont connues pour leur principal rôle dans le déclenchement des glissements de terrain (Conforti *et al.* 2011). La carte des précipitations moyennes interannuelles de la zone d'étude a été extraites de la carte pluviométrique de l'Algérie du Nord (ANRH 1993, Touazi et Laborde, 2000). Ce fond raster a été vectorisé en polygones traduisant des isohyètes de précipitations. La carte résultante comporte cinq classes plus ou moins parallèles (fig. 2h) : la classe < 550 mm (23,913 km²) couvre l'extrême sud de la zone d'étude, l'isohyète [550, 650 mm] (95,082 km²) se situe au nord de la précédente ; la classe [650, 750 mm] (62,013 km²) se situe au centre de la zone d'étude ; celle de [650, 750 mm]

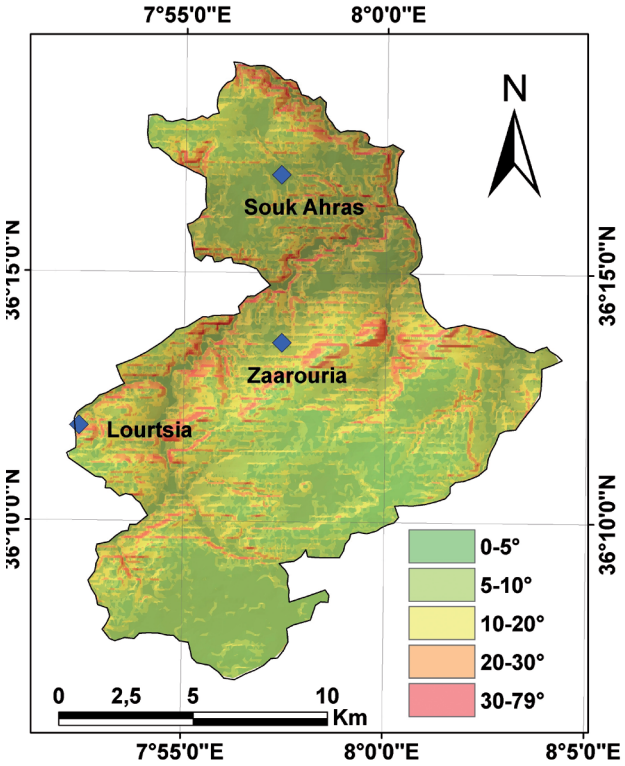


Fig. 2e. — Carte des classes de pente de la zone d'étude.

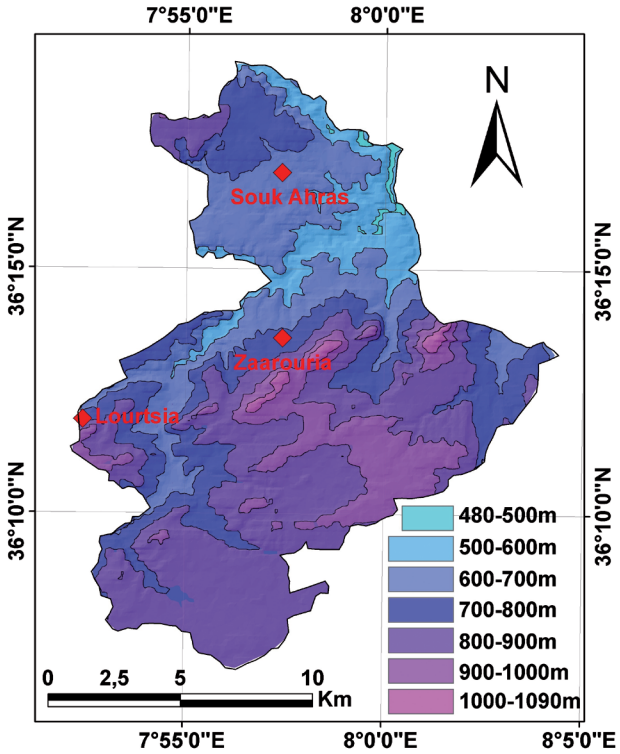


Fig. 2f. — Carte des classes d'élévation de la zone d'étude.

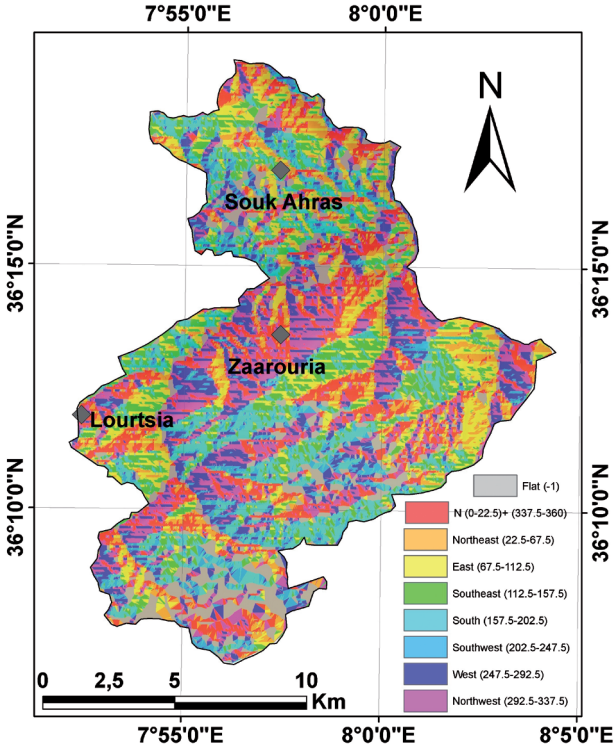


Fig. 2g. — Carte de l'exposition des pentes de la zone d'étude.

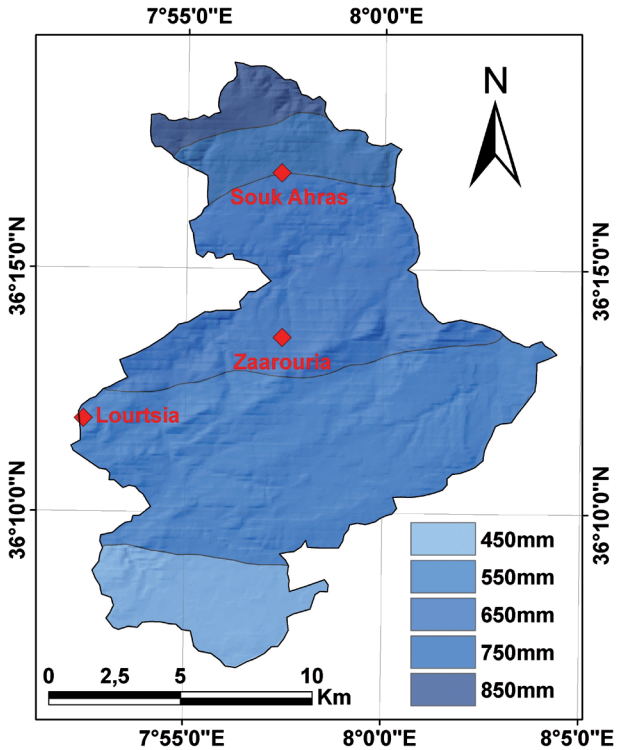


Fig. 2h. — Carte des précipitations annuelles de la zone d'étude.

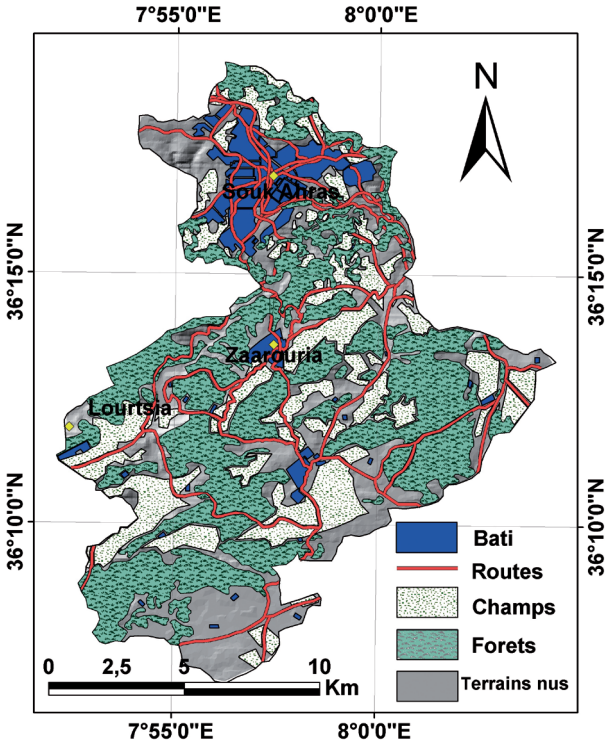


Fig. 2i. — Carte de l'occupation de sol de la zone d'étude.

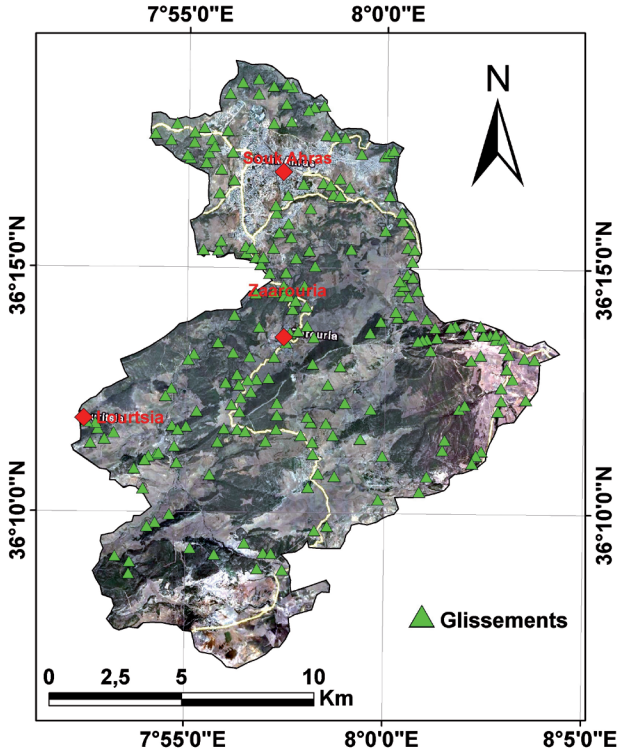


Fig. 2j. — Carte d'inventaire des glissements de terrain dans la zone d'étude.

(15,923 km²) à son nord et, la classe >750 mm : (9,215 km²) à l'extrême nord.

15.3.5 L'occupation des sols

L'occupation des sols de la zone d'étude a été cartographiée en utilisant une base de données multi-sources comportant des images satellitaires, des cartes topographiques complétées par un travail de terrain. Ces informations ont servi pour digitaliser et indexer les thèmes réseaux routiers, bâtis, champs agricoles, forêts et terrains nus, (fig. 2i). Les routes ont été intégrées dans la modélisation en adoptant des buffers de < 25 m, de 25 à 50 m et > 50 m autours des axes routiers et ferrées.

15.3.6 Caractéristiques des glissements de terrain étudiés

Les mouvements de pente qui caractérisent notre zone d'étude sont majoritairement des glissements plans, rotationnels et complexes. Les précipitations qui saturent les versants en eau sont le principal facteur déclenchant de ces glissements (Hadji *et al.* 2013 b). Les sollicitations sismiques même mineures et les activités anthropiques peuvent également déclencher des ruptures de pente (Trustrum *et al.* 1988). L'utilisation de la visu-interprétation de photos satellitaires a permis d'analyser des grandes étendues de terrain, d'où 219 glissements (1997-2012) ont été identifiés dans notre zone d'étude (fig. 2j). Un travail de terrain a suivi cette opération, pour confirmer et identifier les glissements repérés. 70 % des glissements ont été exploités pour la construction du modèle et 30 % (sélectionnés par un processus aléatoire) pour sa validation.

15.4 Méthode d'estimation de l'aléa, vulnérabilité et risque glissement de terrain

15.4.1 Cartographie de l'aléa

L'approche adoptée par notre étude pour la cartographie d'aléa glissement de terrain suit cinq étapes :

- Le visu-repérage des glissements à partir des photos satellitaires.
- La cartographie des facteurs déclenchants, supposés être responsables de l'occurrence des glissements dans la zone d'étude.
- L'analyse de l'importance relative de chaque variable impliquée dans la genèse des glissements.
- L'évaluation et la cartographie de l'aléa glissements de terrain dans la zone d'étude.
- La validation du modèle appliqué dans la modélisation.

On a opté pour la hiérarchisation de la carte d'aléa glissement de terrain en quatre classes (MATE/METL, 1999 ; Loat and Zimmermann, 2004) : aléa fort, modéré, faible et nul. Ces classes probabilistes sont définies en fonction de l'intensité du phénomène et de sa probabilité d'apparition. Chaque surface distinguée sur la carte d'aléa est matérialisée par une limite et une couleur.

Afin d'estimer la relation entre l'apparition des glissements de terrain, les facteurs lithologiques, géomorphologiques et environnementaux, une corrélation entre les couches d'information interprétant ces différents thèmes SIG a été proposée (Dai et Lee, 2002).

Toutes les couches d'information sont rastérisées dans le même format (5 x 5 m) et leurs indices d'aléa sont établis

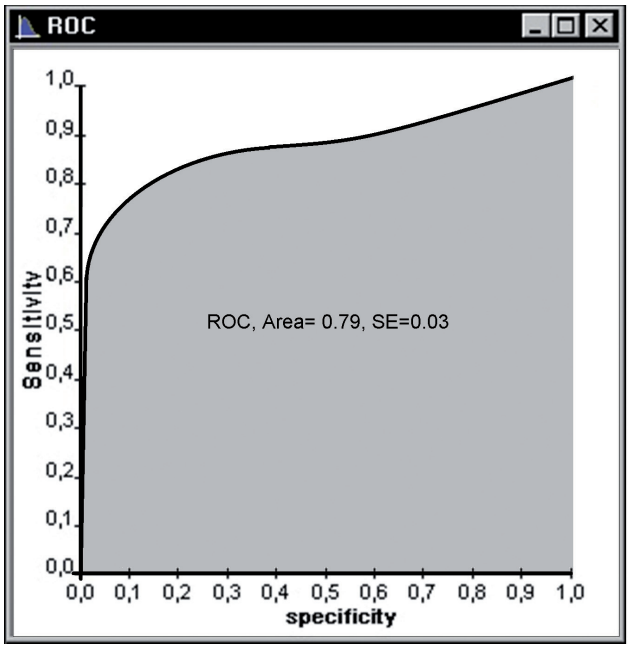


Fig. 3a. — Courbe ROC du model retenu, avec le plus grand AUC = 0,79.

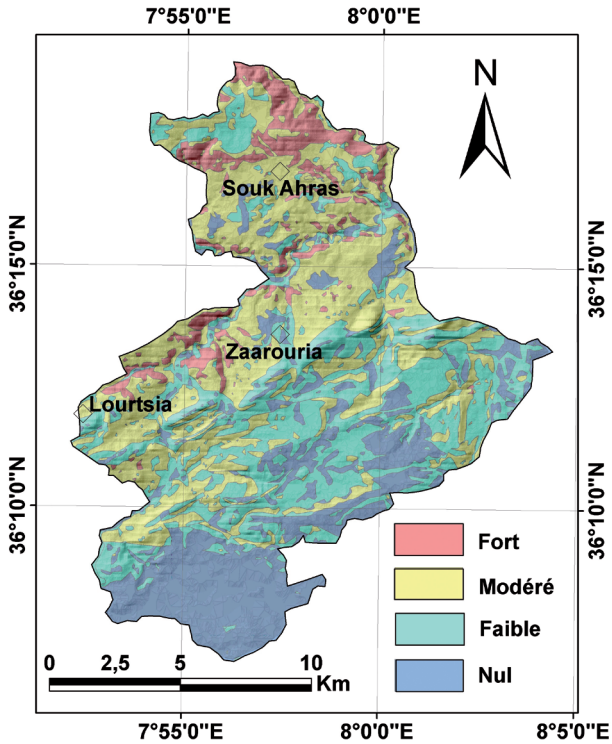


Fig. 3b. — Carte d'inventaire des glissements de terrain dans la zone d'étude.

à l'aide de données réelles de terrain. La superposition de chaque thème séparément sur la carte d'inventaire des glissements de terrain a permis d'affecter des coefficients à chaque classe élémentaire de toutes les couches en fonction de la densité des évènements. Des zones tampons ont été dressées autours des thèmes à caractère linéaire (*polyline*) tel que les failles, les routes et le réseau hydrographique pour permettre leur intégration dans la modélisation avec les autres thèmes à caractère polygonale.

L'information géologique (la lithologie et tampons des failles (A, B)), l'occupation des sols (tampons des routes, bâtis, forets et champs (C)), les données morphologiques (altitude, classes de pente et exposition (D, E, F)), les données environnementales (précipitations, tampons du réseau hydrographique, et les séismes (I, J, K) sont introduits dans l'évaluation de l'aléa. Des indices d'aléa interprétant la relation entre la distribution spatiale du phénomène et les différentes classes élémentaires des facteurs causatifs ont été calculés. Plusieurs essais de pondération (*Wj* = nombre entier compris entre 1 et 4) interprétant l'importance de chaque facteur dans la genèse des ruptures de pentes dans la zone d'étude ont été expérimentés. 25 courbes ROC (*Receiver Operating Characteristic*) ont été testées pour diverses combinaisons de pondération (par l'intégration des 30 % (66 cas) d'évènements omis de la modélisation par un processus aléatoire). La meilleure combinaison a été sélectionnée pour la génération de la carte d'aléa de la zone d'étude.

La valeur de l'aléa glissement de terrain à chaque point des 8234175 pixels (5 x 5 m) constituant la zone est calculée suivant l'équation suivante :

$$\text{Aléa} = \frac{\sum_{j=i}^{9}[Wj.Hji(x)]}{\sum_{j=i}^{9} Wj} \ldots\ldots\ldots\ldots(1)$$

La courbe ROC du modèle retenu montre la plus grande aire sous la courbe AUC = 0,79. Cette valeur est jugée par notre étude comme assez satisfaisante (fig. 3a).

Dans le modèle retenu, un facteur de pondération minimum égal à un (WB, WD et WE = 1) est affecté à la couche « failles », « élévations » et « exposition » à cause de leurs faibles corrélations avec l'occurrence du phénomène. Un facteur de pondération maximum, égal à quatre (WF, WI et WA = 4) a été attribué à l'inclinaison des pentes, précipitations et lithologie, à cause de leur rôle principal (corrélation élevée) dans la genèse ou le déclenchement du phénomène. Toutes les autres couches sont affectées avec une pondération égale à deux (WC, J, K = 2). La carte résultante a été hiérarchisée en quatre classes qualitatives en utilisant la méthode de classification prédéfinie de déviation standard (*Standard Deviation*) ce qui a permis d'obtenir la carte finale d'aléa glissement de terrain de la zone d'étude. Elle se divise entre la classe d'aléa nul 23,38 % (48,192 km^2), faible 31,53 % (64,994 km^2), modéré 36,97 % (76,223 km^2) et fort 8,12 % (16,736 km^2) (fig. 3b).

15.4.2 Cartographie de la vulnérabilité

Pour la détermination de la vulnérabilité des éléments exposés aux glissements de terrain, une typologie des composantes de territoire en infrastructures de transport, constructions et fonctionnalités a été opérée (UNDRO, 1991). Un travail de terrain, des cartes topographiques et des photos satellitaires récentes ont été utilisées pour analyser, digitaliser et indexer ces thèmes. Des valeurs d'indice de perte (Ip = nombre décimal compris entre 0 et 1) sont attribuées aux différents éléments à risque. La carte thématique de vulnérabilité a été élaborée par la modélisation de quatre thèmes traduits par la carte d'urbanisme, la carte du réseau routier, la carte

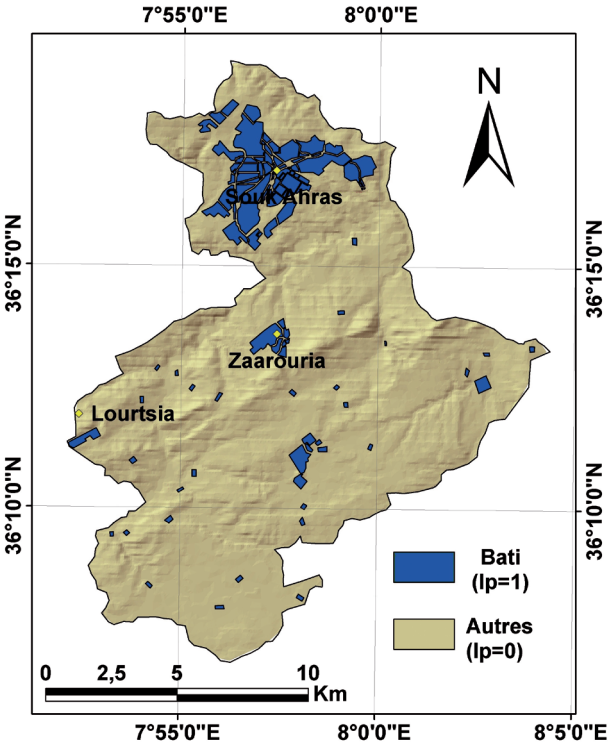


Fig. 4a. — Carte d'urbanisme de la zone d'étude.

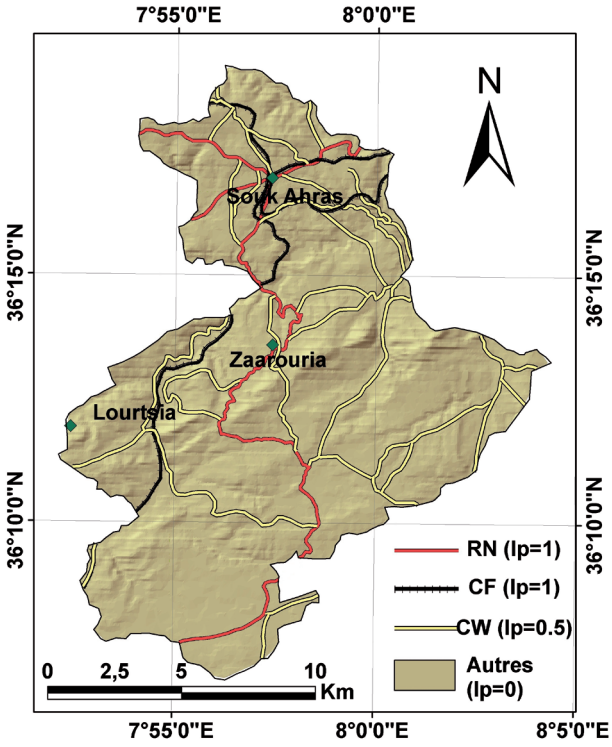


Fig. 4b. — Carte du réseau routier de la zone d'étude.

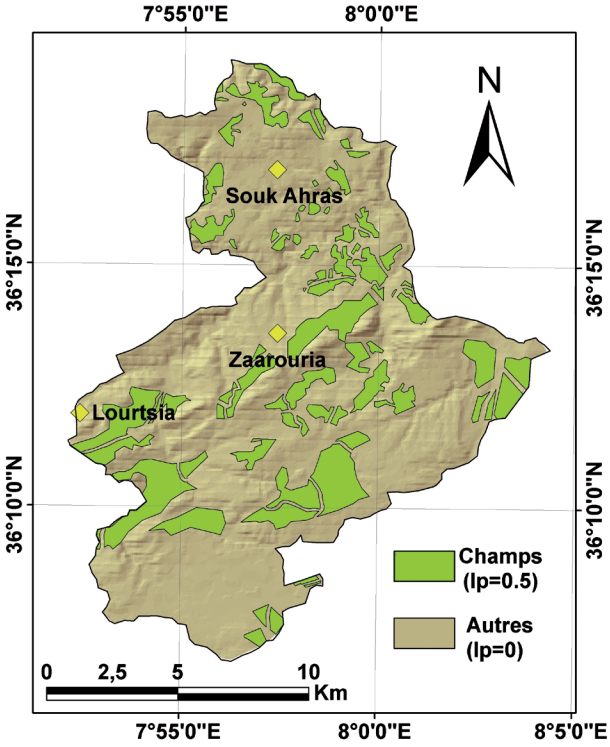


Fig. 4c. — Carte des champs agricoles de la zone d'étude.

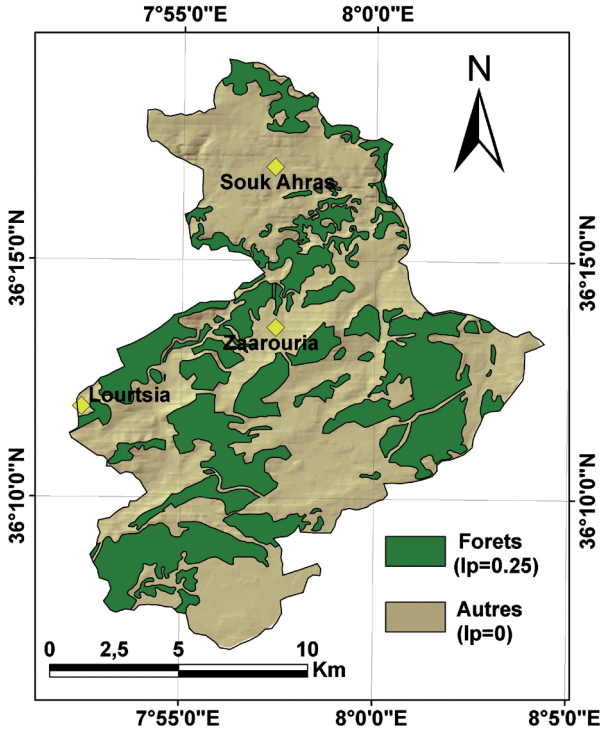


Fig. 4d. — Carte du patrimoine forestier de la zone d'étude.

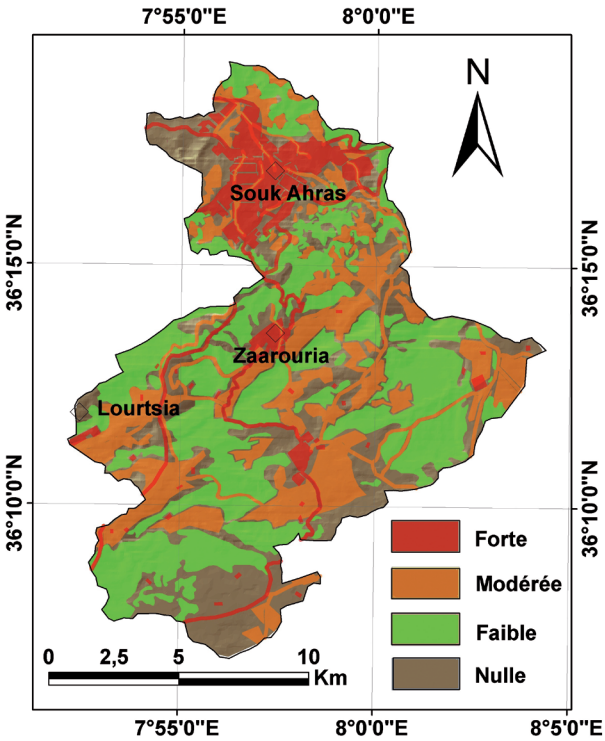


Fig. 4e. — Carte de vulnérabilité de la zone d'étude.

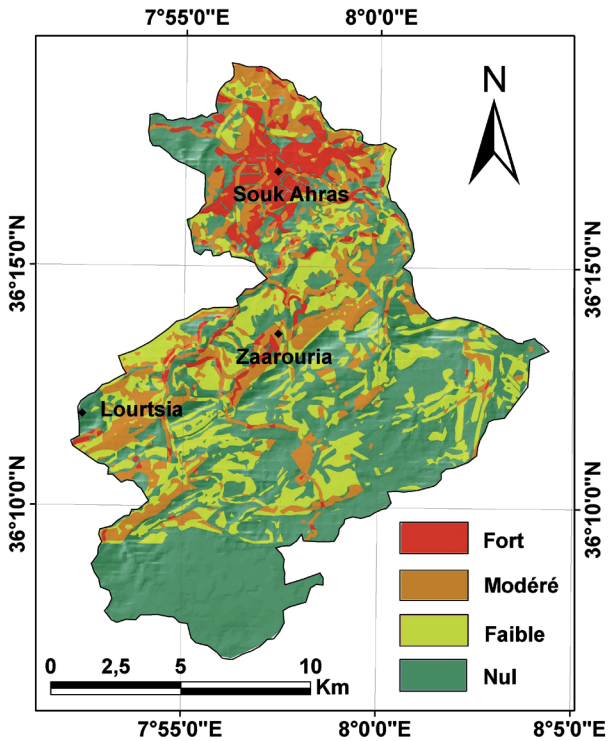


Fig. 5. — Carte de risque aux glissements de terrain de la zone d'étude.

des champs agricoles et la carte du patrimoine forestier ; estimant les préjudices corporels, les dommages structurels, et les désordres fonctionnels relatifs à une éventuelle occurrence d'un glissement.

Le thème urbanisme

L'extension, le type et la qualité du tissu urbain est un critère de vulnérabilité structurelle et corporelle. Plus ce critère est élevé, plus la zone concernée est vulnérable. Dans notre travail on a attribué à ce thème un indice de perte maximal (Ip = 1) (fig. 4a).

Le thème réseau routier et ferré

L'importance d'une route et le nombre de personnes qui l'utilisent est un indicateur de vulnérabilité, structurelle et fonctionnelle. Si un glissement coupe un axe routier et le rend temporairement impraticable, les usagers de cet axe devront malgré eux emprunter un autre trajet. La valeur de l'indice de perte associé quantifie les difficultés engendrées par de tels changements d'itinéraire. On a attribué aux routes nationales (RN) et aux lignes de chemins de fer (CF) un indice de perte maximal (Ip = 1) à cause du caractère irremplaçable de ces axes. Tandis que pour les chemins de wilaya (CW) c'est plutôt une valeur modérée (Ip = 0,5) (à cause des alternatives possibles), pour les usagers de ces routes lors d'une éventuelle coupure de ces axes (fig. 4b).

Le thème champs agricoles et forêts

En plus des thèmes précédents, il parait nécessaire d'interpréter l'occupation de sol en termes de champs agricoles et de patrimoine forestier. Ces thèmes ont un intérêt économique (agriculture) et touristique (randonnée de montagne) pour les citoyens de la région. On a attribué un indice de perte modérée (Ip = 0,5) aux champs (fig. 4c) et faible (Ip = 0,25) aux forêts (fig 4d). Un indice de perte nul a été attribué aux terrains nus.

Pour chaque point de l'espace, la valeur maximale des indices de pertes élémentaires des différents thèmes a été retenue. L'assemblage de ces valeurs a donné une carte des indices globaux de vulnérabilité. Les résultats ont été harmonisés sur une échelle de 0 à 1, puis hiérarchisés avec la méthode de déviation standard en quatre classes cartographiques de vulnérabilité, nulle = 26,41 %, faible = 36,81 % ; modérée = 26,83 % et forte = 9,95 %, (fig. 4e).

15.4.3 Cartographie de risque total

Pour une évaluation graduée la menace des glissements de terrain sur l'homme, ses biens et ses activités, les catégories d'aléa et de vulnérabilité sont traduites en classes de risque à l'aide d'une matrice à double entrée (4 x 4) (table 1), (Ko Ko *et al.* 2004).

Il a été déterminé qu'un risque fort résultait de l'addition d'un aléa ou d'une vulnérabilité fort(e) avec un aléa ou une

Tabl. 1. — Matrice de qualification des classes de risque cartographique.

Aléa / Vulnérabilité	*Fort*	*Modéré*	*Faible*	*Nul*
Forte	Fort	Fort	Modéré	Nul
Modérée	Fort	Modéré	Faible	Nul
Faible	Modéré	Faible	Faible	Nul
Nulle	Nul	Nul	Nul	Nul

vulnérabilité fort(e), voire modéré(e), etc. L'application de ce tableau permet d'obtenir une carte de risque total des territoires de la zone d'étude aux glissements de terrain, (fig. 5). Elle se répartit sur quatre classes hiérarchiques : risque nul = 51,33 %, faible = 23,51 %, modéré = 17,90 % et fort = 7,26 %.

15.5 Résultats et discussion

Notre approche basée sur la géomatique et la modélisation par SIG, a permis l'étude compréhensive d'aléa, de vulnérabilité et de risque glissements de terrain dans les territoires des communes de Souk Ahras et Zaarouria. La comparaison entre les différentes courbes ROC testées a permis de sélectionner le meilleur modèle prédictif de l'aléa glissement de terrain dans notre zone d'étude. L'AUC a permis également de valider le modèle retenu à 79 %. La méthode de déviation standard a été utilisée pour hiérarchiser des cartes d'aléa et de vulnérabilité en quatre classes qualitatives chacune.
La classe d'aléa nul couvre 48,192 km^2 sur les 206,146 km^2 que comporte la zone d'étude. Elle se concentre dans le sud, et est occupée par des formations indurées et des pentes douces. La classe d'aléa faible se repartît sur 64,994 km^2 et se concentre dans le centre de la zone d'étude faiblement arrosé en pluies. L'aléa modéré s'étend sur 76,223 km^2 et se repartît sur les terrains triasiques, au voisinage des reliefs montagneux au centre et au nord de la zone d'étude. La classe d'aléa fort couvre approximativement 16,736 km^2. Dans cette zone les pentes et les précipitations sont importantes. Les formations géologiques sont représentées par des lithologies très sensibles aux glissements.
La classe de vulnérabilité nulle couvre 54,443 km^2 et domine l'extrême sud de la zone d'étude, elle est représentée principalement par des terrains nus. La classe de vulnérabilité faible s'étale équitablement sur presque toute la zone d'étude et couvre 75,882 km^2. Son occupation du sol est représentée par des forêts mal entretenues. Celle modérée est présentée par les champs agricoles et couvre 55,308 km^2, tandis que la classe de vulnérabilité forte renferme le bâti et les principaux axes routiers et ferrés de la région. Elle se concentre dans le chef-lieu de wilaya au nord de la zone d'étude et couvre 20,512 km^2.
La classe de risque nul couvre 105,814 km^2. Elle se concentre sur les zones de plaines et les terrasses alluviales du sud de la zone étudiée où les valeurs d'aléa et de vulnérabilité sont faibles à nulles. La classe de risque faible 48,465 km^2 occupe le centre de la zone d'étude côte à côte avec la classe de risque modéré 36,9 km^2. La classe de risque fort se concentre au nord de la zone d'étude où les valeurs de l'aléa et de la vulnérabilité sont élevées, elle couvre 14,966 km^2. Malheureusement cette classe coïncide avec les principaux enjeux et menace fortement la plus grande localité de la zone d'étude. Le réseau routier assurant l'échange de cette dernière et les localités voisines est fortement menacé.
Les principaux facteurs de prédisposition des terrains de la zone d'étude aux glissements de terrain sont la lithologie et les pentes et, le principal facteur de leur déclenchement sont les précipitations. Les autres facteurs n'ont pas la même importance.
La répartition de ces classes d'aléa, de vulnérabilité et de risque est en parfaite accord avec nos observations de terrain. Ce qui démontre que l'approche suivie par notre recherche peut fournir une estimation assez raisonnable du phénomène dans la zone d'étude. Certain résultats semblent inattendus. Ainsi, les glissements sont plus abondants sur les pentes supérieures à 30°. Cela est expliqué par le rôle tant néotectonique que lithologique du trias diapirique extrusif; qui en s'élevant associe des conditions de pente aiguës avec une lithologie argilo-gypso-gréseuses très sensible aux mouvements de pente. Cette formation jugée par l'étude comme la plus responsable et la plus touchée par le phénomène constitue le plus grand affleurement du point de vue surfacique, avec 24,8 % de la zone d'étude.

Conclusions

La présente recherche démontre les potentialités de la géomatique et des techniques d'analyse par SIG dans l'évaluation du risque glissement de terrain à partir d'une procédure à trois étapes, où le risque est identifié et cartographié en associant l'analyse de l'aléa et de la vulnérabilité.
L'inventaire des glissements de terrain à travers la zone d'étude (1,06 évènement/km^2) a permis d'évaluer qualitativement et quantitativement l'ampleur de ces instabilités : quantitativement par une visu-interprétation de photos satellitaires multi-dates ; et qualitativement grâce à la détermination des signes d'instabilités sur les versants de la zone d'étude. Différentes mesures ont été réalisées, afin de spécifier les facteurs locaux de contrôle de la dynamique de ces instabilités. Toutes ces informations ont été stockées dans une base de données sous Arcgis 9.3.
Le géo-traitement des facteurs causals retenus (interprétant le contexte géologique, les conditions géomorphologiques, le réseau hydrographique, les précipitations, l'occupation de sol, les évènements passés, etc.) a permis de modéliser les effets spatio-temporels des différentes variables impliquées dans la genèse des instabilités. Les traitements en mode raster ont permis de réaliser des cartes de zonage de l'aléa, de vulnérabilité et de risque glissement de terrain.
Le chef-lieu de wilaya (où se concentrent les enjeux) se trouve entouré de terrains fortement sensibles au phénomène. Cette situation nécessite de sensibiliser les aménageurs à la culture de prévention des risques naturels.
Ce genre d'approches contribue à combler le vide technico-jurique qui entoure l'aléa glissement de terrain dans les plans d'occupation du sol.
Cette méthode peut servir de système d'information pour la gestion du risque glissement de terrain dans la zone d'étude. Elle peut être reproduite par d'autres études pour estimer l'aléa, la vulnérabilité et le risque glissements de terrain dans des environnements similaires.

Bibliographie

ANBALAGAN R., « Landslide hazard assessment and zonation mapping in mountainous terrain », *Engineering Geology*, 32, 1992, p. 269-277.

A.N.R.H., *Carte pluviométrique de l'Algérie du Nord au 1/500 000* (deux feuilles + une notice), ministère de l'Équipement, Alger, Éd. I.N.C. 1993, 49 p.

Bourenane H., Bouhadad Y., Guettouche M. S., Braham M., « GIS-based landslide susceptibility zonation using bivariate statistical and expert approaches in the city of Constantine », *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2014, p. 1-19.

CERG, *Introduction à la Notion de Risque. Cours de Laurent Stieltijes, 7 p. de Lausanne*, Département Génie rural, Lausanne, 2000, 138 p.

Conforti M., Aucelli P. P., Robustelli G., Scarciglia F., « Geomorphology and GIS analysis for mapping gully erosion susceptibility in the Turbolo stream catchment (Northern Calabria, Italy) », *Natural hazards*, 56, 3, 2011, p. 881-898.

Dai F. C., Lee C. F., « Landslide characteristics and slope instability modelling using GIS, Lantau Island, Hong Kong », *Geomorphology*, 42, 2002, p. 213-228.

Dai F. C., Lee C. F., Ngai Y. Y., « Landslide risk assessment and management : an overview », *Engineering Geology*, 64, 1, 2004, p. 65-87.

D'ercole R., Metzger P., « Territorial vulnerability: a new approach of risks in urban areas », Paper n° 447 *European journal of geography* Cybergeo, 2009.

Fahdi C., *Apport hydrogéochimique et isotopique dans la caractérisation des mécanismes d'acquisition de la salinité des eaux souterraines du complexe aquifère Morsott-el Aouinet (N.E. Algérien)*, thèse de doctorat, université de Tébessa, Algérie, 2008, 235 p.

Guettouche M. S., « Modeling and risk assessment of landslides using fuzzy logic, Application on the slopes of the Algerian Tell », *Arab J Geosci* 6, 2013, p. 31-63.

Grozavu A., Plescan S., Patriche C. V., Margarint M. C., Rosca B., « Landslide Susceptibility Assessment: GIS Application to a Complex Mountainous Environment », *The Carpathians : Integrating Nature and Society towards Sustainability, Environmental Science and Engineering*, 2013, p. 31-44.

Hadji R., Boumazbeur A. (a), « Climate change and their influence on shrinkage — swelling clays susceptibility in a semi — arid zone : a case study of Souk Ahras municipality », NE-Algeria, *Desalination and Water Treatment Journal*, TDWT, 2013, pp. 1-16.

Hadji R., Boumazbeur A., Baghem M. Chouabi A. (b), « Geologic, topographic and climatic controls in landslide hazard assessment using GIS modeling : A case study of Souk Ahras region, NE Algeria », *Quaternary International* 302, 2013, p. 224-237.

Hansen A., « Landslide hazard analysis », in Brunsden D. and Prior D. B. (ed.), *Slope instability*, Wiley & Sons, New York, 1984, p. 523-602.

Ko Ko C., Flentje P., Chowdhury R., « Landslides qualitative hazard and risk assessment method and its reliability », *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 63, 2, 2004, p. 149-165.

Kundu S., Saha A. K., Sharma D. C., Pant C. C., « Remote Sensing and GIS Based Landslide Susceptibility Assessment using Binary Logistic Regression Model : A Case Study in the Ganeshganga Watershed », *J. Indian Soc Remote Sens* 41, 3; 2013, pp. 697-709.

Loat R., Zimmermann M., *La gestion des risques en Suisse, Risques naturels et aménagement en Europe*. Armand Colin, Paris, p. 108-120.

MATE & METL (ministère de l'Aménagement du territoire et de l'Environnement & ministère de l'Équipement, des Transports et du Logement), *Plans de prévention des risques naturels (PPR)*. Risques de Mouvements de terrain. *Guide méthodologique*, Éd. La Documentation française, Paris, 1999, 124 p.

Office National Des Statistiques (2008), www.ons.dz

Pourghasemi H. R., Pradhan B., Gokceoglu C., « Application of fuzzy logic and analytical hierarchy process (AHP) to landslide susceptibility mapping at Haraz watershed, Iran », *Natural Hazards* 63, 2012, p. 965-996.

Regmi A. D., Devkota K. C., Yoshida K., Pradhan B., Pourghasemi H. R., Kumamoto T., Akgun A., « Application of frequency ratio, statistical index, and weights-ofevidence models and their comparison in landslide susceptibility mapping in Central Nepal Himalaya », *Arab J Geosci* 7, 2, 2014, p. 725-742.

Touazi M., Laborde J.-P., « Cartographie des pluies annuelles en Algérie du Nord », *Publications de l'Association internationale de climatologie*, 13, 2000, p. 191-199.

Trustrum N. A., De Rose R. C., « Soil depth-age relationship of landslides on deforested hillslopes, Taranaki », *New Zealand. Geomorphology*, 1, 1988, p. 143-160.

UNDRO, *Mitigating Natural Disasters. Phenomena, Effects and Options*, United Nations, New York, 1991, 164 p.

Vandine D. F., Moore G., Wise M., Vanbuskirk C., Gerath R., « Technical Terms and Methods », in Wise *et al.* (ed.) *Landslide Risk Case Studies in Forest Development Planning and Operations. B.C.*, Ministry of Forests, Forest Science Program, Abstract of Land Management Handbook 56, 2004, p. 13-26.

Annexes

Tabl. 1. — Listes des thèmes du SIG (noms et type de fichiers utilisés)

	Thèmes	Type de fichiers	Nom des fichiers
	Cartes de base		
5	Carte géologique de Souk Ahras	File Système Raster	Géo1
6	Carte topographique de souk Ahras	File Système Raster	Topo1
	Cartes dérivées de première classe		
1	Modèle numérique de terrain	Grid	MNT
2	Modèle numérique d'altitude	Grid	TIN
3	Carte des courbes de niveau	Grid	Contour
4	Carte de réseau hydrographique	Grid	Réseau hydrographique
5	Carte de direction de flux	Grid	Flow-Dire
6	Carte des pentes	Grid	Carte de pente
7	Carte d'exposition	Grid	Carte d'exposition
8	Carte d'aspect de pente	Grid	Aspect of Pentes
	Cartes thématiques		
1	Carte géologique numérisée	Shape	Carte géologique
2	Carte de climat	Shape	Carte pluvio
3	Carte des facteurs structuraux	Shape	Carte des facteurs
4	Carte de pendage	Shape	Carte de pendage
5	Carte de réseau routier	Shape	Carte de réseau routier
6	Carte d'urbanisme	Shape	Carte d'urbanisme
7	Carte des glissements repérés	Shape	Carte de p. glissement
8	Carte de patrimoine forestier	Shape	Carte des forets
9	Carte des champs agricoles	Shape	Carte des champs
10	Carte d'aléa	Shape	Carte d'aléa
11	Carte de vulnérabilité	Shape	Carte de vulnérabilité
12	Carte de risque	Shape	Carte de risque

Tabl. 2. — Liste des attributs des polygones des formations géologiques

sign	age	lithological facies	Suceptibilit y class
a^1	actual	current terrace of the Wadi Melah	1
Af	actual	River Alluvial deposits, submersible lands, low terraces.	1
Ag	actual	Gravitational formations - scree, blocks, sands, silts.	1
q^3	recent Quaternary	Alluvial deposits of averages terraces: gravel, sands, silt.	1
q^2_{dp}	Middle quaternary	Deluge-coverage formations: gravels, sands, silts.	1
q^2_{dg}	Middle quaternary	Deluge-gravitational formations-scree slope: breccias, gravels, sands, silts.	1
q^1_t q^1_c	Ancient quaternary	travertine Limestone crust.	1
pq	Plio-quaternary	Conglomerates, sandstones, clay.	1
p	Pliocene	Conglomerates, sandstone, clays, marls, limestone Bench.	1
m_3^{2-3}	Upper and middle Miocene	Marl, clay, sandstone	2
m_1^{2-3}	Upper and middle Miocene	Clay, marl, glauconitic sandstone.	2
m^{2-3}	Upper and middle Miocene	Siltstones, clayey marl, sandstone.	2
m^{1-2}	Lower and middle Miocene	Sandstones, marls, conglomerates.	2
m^1_c	Lower continental Miocene	Continental and red sandstone	1
m^1	Lower Miocene	Sandstones, marl, clay.	2
m^1g^2	Lower Miocene and upper Oligocene	Quartz sandstone with reddish patinas, gray clay.	1
g^{1-2}	Lower and middle Oligocene	Greenish clay.	4

Tabl. 3. — Liste des attributs des polygones des formations géologiques (suite)

e^{6-7}	Upper Eocene	Black and brown globigerina bituminous limestone, black marly- limestone.	1
e_{4-5}	Lower and middle Eocene	Alternation of marl and sandstone or conglomerates, yellow phosphatic limestone.	1
e^{1-3}	Paleocene	Marls with rare interbedded limestones.	2
c^{6b}	Maastrichtian	Clayey marl, gray marly limestones.	2
c^{5b}	Upper Campanian	Limestone, calcareous sandstone, marly limestones.	1
C^{5a}	Middle Campanian	Limestone with Inocerams	1
c^{4b-5a}	Lower Campanian And Upper Santonian	Marls and gray clayey marls, with marly limestones past.	2
c^{3b-4a}	Lower Santonian and Coniacian	Marls with rare intercalations of marly limestone	2
c^{3}	Coniacian	Marls, marly limestone	2
c^{2}	Turonian	Limestone with Thin intercalated marl	1
c^{2b}	Lower under-stage Turtonian	White chalky limestone, marly limestones, gray marls.	1
c^{1}	Cenomanian	marl to marly limestone intercalation	2
n^{5}	Aptian	Normal and reef facies	1
t	Trias	Gypsum-clayey sandstone formations with fragments, blocks of various rocks	4
t^{2}	Middle Trias	Dark gray Modiola limestone, Miophoria, marls, dolostone.	1
hr	Carboniferous Permian	Micaceous versicoloured sandstone with calamities, claystone.	1

Tabl. 4. — Légende de la carte lithologique

Légende

- Dépots continentaux:grés,marnes,argiles.
- Marnes, marno-calcaires et calcaires marneux à patine jaune
- Alluvions des hautes terrasses: cogiomerats,sables,limons.
- Alluvions des moyennes terrasses: galets,graviers,sables.
- Alluvions des moyennes terrasses: graviers,sables,limons.
- Alluvions fluviales,des terres submersibles, des basses terrasses.
- Alternance de marnes et de grés ou de conglomérats,calcaire phosphatés jaune.
- Argiles verdâtre
- Argiles,marnes,grés glauconieux
- Bancs de calcaires lacustre ou de conglomérats
- Bancs de calcaires lacustres ou de conglomérats.
- Cailloutis.galets
- Calcaire
- Calcaires bitumineux noirs et bruns à globigerines,marno-calcaires noirs.
- Calcaires gris foncé à modiola,miophoria,marnes,dolomies.
- Calcaires lacustres
- Calcaires à minces intercalation de marnes
- Calcaires à rares intercalarions de dolomies.
- Conglomérats, gravitélites, grés,argiles,marnes. 1-Banc de calcaires
- Conglomérats,gravélites,grés,argiles et marnes.
- Continental
- Couches gréseuses rouges continentals
- Croute calcaire
- Diabases
- Dolomies et brèches dolomitiques grises, cargneules.
- Dolomies grises vacuolaires.
- Facies normal.Faciés récifal
- Formations argilo-gypso-gréseuses à fragments et blocs de roches diverses.
- Galets, cailloutis.
- Grés cicacés versicolores à calamites, argilites.
- Grés quartzeux à patine rousse, argiles grises.
- Grés,marnes,conglomérats
- Gypse pur
- Haute terrasse du Meliégue
- Limons et cailloutis
- Marnes ,marno-calcaires et calcaires marneus
- Marnes argileuses marno-calcaires
- Marnes et marnes argileuses grises et passées de marno-calcaires 1-Bancs repéres santoniens
- Marnes à intercalations de calcaires marneux
- Marnes à rares intercalations de calcaires marneux.
- Marnes à rares intercalations de calcaires.
- Marnes à termes et couches de calcaires à inocérames.
- Marnes,argiles,grés.
- Poudingues grréseux
- Siltstones marnes argileuses,grés
- Sous-étage inférieur.Calcaires blancs crayeux,calcaires marneux,marnes grises.
- Sous-étage supérieur.Marnes argileuses,calcaires marneux gris.
- Terrains sedimentaires:Eboulis
- Villafranchien.conglomérats,grés,argiles.
- calcaires,calcaires gréseux,marno-calcaires.
- formations délivio-gravitationnelles-éboulis de pente:brèches,cailloutis,sables,limons.
- formations déluvio-proluviales de couverture:cailloutis,sables,limons.
- formations gravitationnelles-éboulis:blocs,abatis,sables,limons.
- marnes et marnes argileuses grises et passées de marno-calcaires 1-Bancs repéres santoniens

16 Évaluation de la susceptibilité aux mouvements de terrain par approche probabiliste. Application à la zone méditerranéenne entre Jebha et Oued Laou

Mohamed Mastere[1,2,3], Brigitte Van Vliet-Lanoë[1,2] & Lahcen Ait Brahim[3]

1. Université européenne de Bretagne, France.

2. C.N.R.S., U.M.R. 6538 Domaines océaniques, université de Brest, Institut universitaire européen de la mer — Rue Dumont d'Urville, 29280 Plouzané, France.

3. Université Mohamed V Agdal, Faculté des Sciences de Rabat, département des Sciences de la Terre, Avenue Ibn Batouta BP:1014, Rabat-Agdal, Maroc.

`Mohamed.mastere@univ-brest.fr`

Résumé. — L'évaluation de la susceptibilité aux mouvements de terrain (SMT) par méthodes probabilistes repose sur l'analyse des relations entre la distribution spatiale des MT et leurs facteurs de prédisposition. L'objectif de cette étude est de cartographier automatiquement la SMT en utilisant une approche par combinaison de cartes d'index (modèle heuristique) implémenté sous SIG pour la zone côtière entre Jebha et Oued Laou (Rif — Maroc). La lithologie, la fracturation, le gradient de pente, l'exposition des versants, l'hypsométrie, le réseau de drainage et l'occupation des sols ont été intégrés comme étant les principaux paramètres régissant l'occurrence des MT. Ensuite, chaque carte de paramètre est hiérarchisée en un nombre de classes. Un coefficient a été attribué à chaque classe en fonction de son importance dans la genèse des MT, en plus d'un poids global assigné à chaque paramètre, à l'aide de données statistiques réelles afin de réduire la subjectivité de la méthode.

Mots-clés. — Mouvements de terrain, susceptibilité, littoral méditerranéen, cartographie, modèle heuristique.

Title. — *Mass Movements Susceptibility Assessment Using a Probabilistic Approach. Application to the Mediterranean Area Between Jebha and Oued Laou*

Abstract. — *Mass movements susceptibility (MMS) assessment effected by probabilistic methods is based on the analysis of the relationships between there spatial distribution and their predisposing factors. The main purpose of this study is to map automatically MMS using an index based approach (heuristic model) applied to the coastal area between Jebha and Oued Laou (Rif – Morocco), with datasets developed for application in a geographic information system (GIS). Lithology, fracturing, slope angle, expositions, elevation, network drainage and land use were used as main parameters controlling the occurrence of MM. Next, each parameter map is classified into a number of significant classes based on their relative influence on MM and rating values are assigned to each class depending on their influence on slope instability. The weights were established on real statistical data to reduce the subjectivity of the method.*

Keywords. — *Mass Movements, Susceptibility, Mediterranean Coast, Mapping, Heuristic Model.*

Introduction

Les mouvements de terrain (*Land mass movments*) font partie des risques naturels auxquels le Maroc se trouve confronté, notamment dans les régions Rifaines. Ceux-ci sont d'autant plus importants au niveau des zones faisant partie d'importants couloirs de failles, où la réactivation récente de celles-ci peut largement contribuer au déclenchement des mouvements de terrain. Les conséquences d'un tel type de phénomènes peuvent être multiples : ensevelissement et destruction d'habitations, de ponts et de routes, ainsi que des pertes de vies humaines même si elles sont rares. À titre informatif, cette année environ 50 % du budget total alloué au DPTP (Directions provinciales de travaux publics) au Rif s'est destiné aux travaux de confortement, soutènement et remise en état des routes suite à la survenance d'un grand nombre de mouvements de terrain. De ce fait, l'évaluation de la susceptibilité aux mouvements de terrain est devenue un sujet d'intérêt majeur pour les autorités chargées de l'aménagement des territoires de la protection de l'environnement et la prévention des risques naturels. En conséquence, le Maroc connaît actuellement une demande croissante pour la création de cartes de susceptibilité, définissant les zones susceptibles aux mouvements de terrain dans le présent et dans le futur. L'évaluation de la susceptibilité a pour objectif de définir la probabilité d'occurrence spatiale d'un mouvement de terrain potentiellement dommageable (Varnes, 1984). Les méthodes d'évaluation proposées dans la littérature peuvent généralement être divisées en deux groupes : la cartographie directe où le niveau de la susceptibilité est basé sur l'expérience du scientifique (géomorphologue) (Carrara, 1983) ; et la cartographie indirecte, lors de laquelle des approches empiriques, statistiques (Thiery *et al.*, 2005) ou déterministes sont employées (Moon et Blackstock, 2004). Ces dernières se basent sur l'information obtenue à partir de la relation spatiale entre le phénomène à modéliser (en l'occurrence les mouvements de terrain) et les variables prédictives (gradient de pente, lithologie, etc.). Une autre terminologie peut être employée où on parle des techniques qualitatives (Agnesi *et al.*, 2002) et quantitatives (Agnesi *et al.*, 2003), toutes

les deux basées sur l'utilisation des Systèmes d'Information Géographique (SIG) (Van Westen *et al.*, 2008). Cependant, la possibilité qu'un mouvement de terrain se produise dans une zone particulière sur la base de conditions environnementales locales, revient à répondre à trois questions : I. Quel type de mouvement de terrain est susceptible de se produire ? II. Quels sont les facteurs de prédisposition ? III. Où ces facteurs sont-ils spatialement réunis ? (Thiery *et al.*, 2005 ; Van Westen *et al.*, 2006 ; Thiery, 2007 ; Thiery *et al.*, 2007). Dans le Rif marocain bien que plusieurs efforts aient été menés lors des dernières années pour prévenir les mouvements de terrain, leur nombre ne cesse de s'accroitre et de porter préjudice le plus souvent aux endroits supposés déjà étudiés (à susceptibilité faible à nul) (Fares, 1994 ; Margaa, 1994 ; Mansour, 1998 ; El Khattabi, 2001 ; El Kharim, 2002 ; Sossey Alaoui 2005 ; Mastere 2008…). Ceci vient du fait que : I) les mouvements de terrain ne sont pas pris dans leur contexte géodynamique global avec la dynamique du bassin versant, II) de l'utilisation des méthodes non adaptées basées sur l'opinion de l'expert en la matière ce qui reste très subjectif, et III) la non adéquation entre l'approche utilisée et l'échelle d'analyse (Mastere *et al.*, 2010 ; Mastere, 2011, Mastere *et al.*, 2012).

L'objectif principal de cette étude est de remédier aux lacunes précitées. La démarche originale consiste à élaborer une carte définissant la SMT dans le secteur de Jebha-Oued Laou, par l'utilisation d'une approche par combinaison de cartes d'index pour la première fois, pour éliminer la subjectivité apportée par les méthodes directes.

16.1 Secteur d'étude

16.1.1 Cadre géologique et géomorphologique

Située dans le Rif septentrional, la zone d'étude s'étale sur une superficie globale de 880 km^2 avec une ligne de côte de 76 km. Le secteur d'étude appartient administrativement à la région économique de Tanger-Tétouan et constitue la limite méditerranéenne de la province de Chefchaouen (figure 1A). Le domaine du Rif situé au nord-ouest du Maroc constitue la terminaison occidentale de la chaîne alpine des maghrébides qui affleure le long de la côte méditerranéenne de l'Afrique du Nord depuis la Calabre jusqu'à l'Arc de Gibraltar (Didon *et al.*, 1973, Durand Delga *et al.*, 1960). D'un point de vue géologique, la zone d'intérêt est représentée exclusivement par le domaine interne appelé aussi domaine d'Alboran et le domaine des flyschs. Le domaine interne situé à l'ouest de l'accident majeur de Jebha couvre plus de la moitié du secteur. Il est représenté par les terrains des Sébtides, des Ghomarides avec une faible présence de la dorsale calcaire dans la partie SW de la région d'étude. Le domaine des flyschs présent à l'est de l'accident de Jebha et représenté essentiellement par la nappe de Tisirène. L'hypsométrie du secteur lui imprime un caractère moyennement montagneux (2 100 m) alors qu'on n'est pas situé véritablement dans un contexte de haute montagne (figure 1B). Cependant, nous rencontrons des reliefs très accidentés et des pentes très abruptes notamment au niveau des grands contacts chevauchants entre les nappes de charriage, caractérisés par des vallées fortement encaissées, et des dénivellations remarquablement fortes. Une telle morphologie est le résultat de

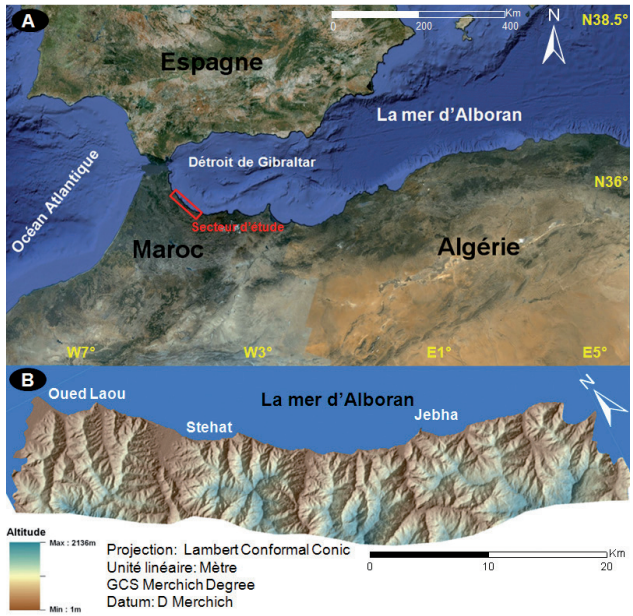


Fig. 1. — A : situation du secteur d'étude (polygone en rouge) dans le pourtour de la méditerranée occidentale ; B : carte hypsométrique du secteur d'étude.

la conjugaison de plusieurs facteurs, à savoir : la lithologie complexe, le système climatique, le régime tectonique actif et la dynamique érosive, donnant naissance à plusieurs mouvements de terrain.

16.1.2 Les mouvements de terrain

Les mouvements de terrain intégrés (glissements, coulées de débris et écroulements) dans la présente étude, ont été extraits d'une cartographie géospatiale récente des mouvements gravitaires de toute la province de Chefchaouen réalisée par Mastere, (2011) (figure 2). Il s'agit d'un inventaire incluant aussi bien les mouvements de terrain purs ou dits naturels, des mouvements induits présentés par les sapements de berges et les sapements de routes, sans oublier des formes d'érosion très prononcés connues sous le nom des « badlands ». Cette cartographie a porté sur la caractérisation des MT récents et fonctionnels à l'aide des images satellitaires très haute résolution. La quasi-totalité des phénomènes a été repérée par interprétation des images satellitaires suivie de missions de terrain. Une classification pragmatique a permis de reconnaître cinq formes d'évolution des versants, qui résultent aussi bien de la combinaison de facteurs naturels qu'anthropiques. Il s'agit des écroulements, des glissements, des coulées de débris, des sapements de berges et de routes, et des badlands.

16.2 Matériel et méthodologie

16.2.1 Matériel

La formation d'un mouvement de terrain dépend de la conjonction de plusieurs paramètres (facteurs). Dans notre cas, ils sont rassemblés en cinq grands groupes (tableau 1) à savoir : la géologie, la sismicité, l'occupation des sols, la géométrie et les conditions hydrologiques. Les facteurs utilisés pour

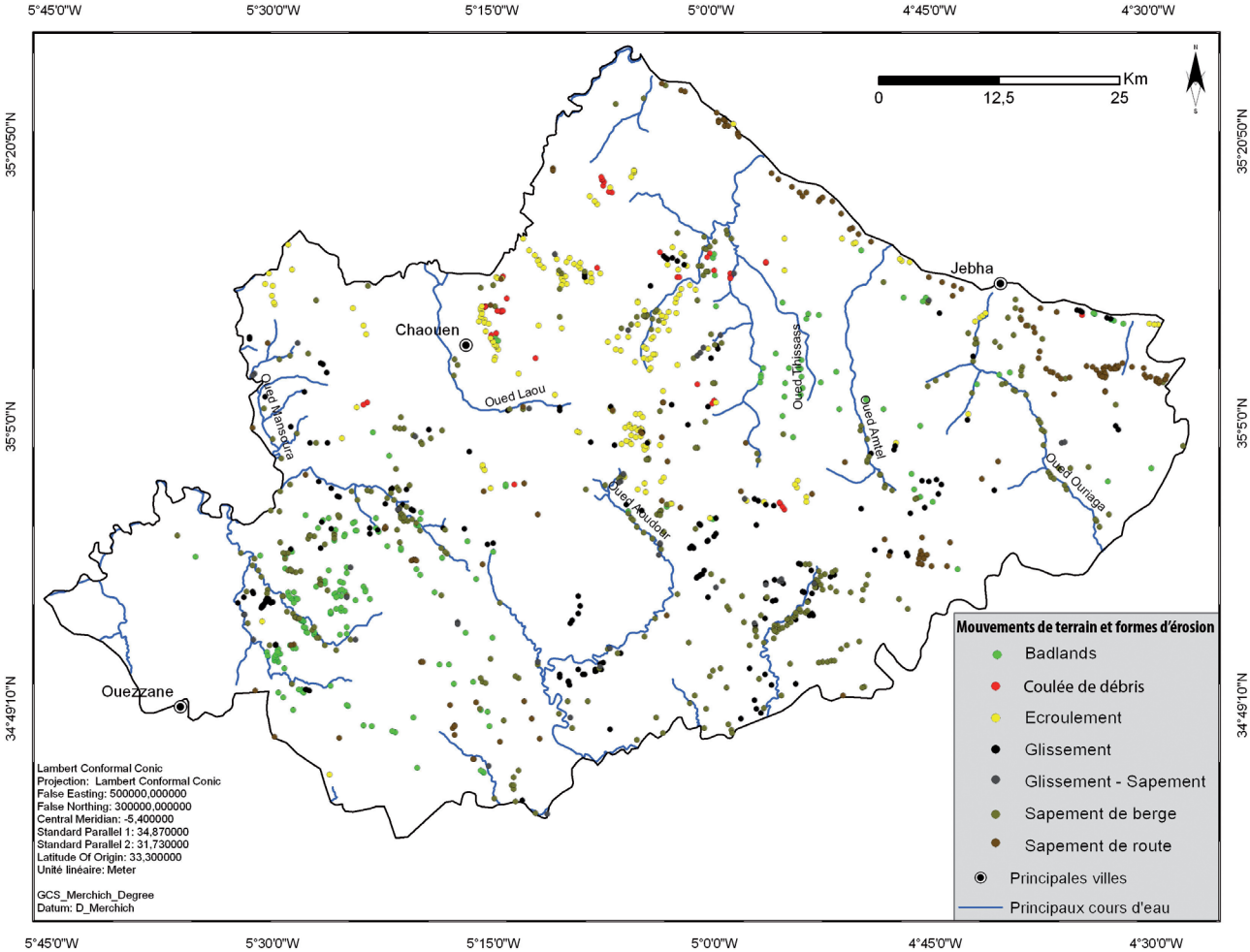


Fig. 2. — Cartes de la distribution géospatiale des formes d'évolution des versants de la province de Chefchaouen (Mastere, 2011).

notre secteur d'étude ont été soigneusement sélectionnés et examinés, en se basant sur leur pertinence, leur disponibilité (ou existence) et leur échelle. Par conséquent, neuf cartes matérialisant les paramètres ont été intégrées: la lithologie, la fracturation (densité), sismicité (isoprofondeurs), gradient de pente, hypsométrie, exposition des versants, réseau hydrographique, précipitations, et occupation des sols.

16.2.2 Méthodologie : Combinaison de cartes d'index

Le zonage de la susceptibilité dans la région littorale entre Jebha et Oued Laou, a été réalisé en utilisant une approche par combinaison des cartes d'index. Il s'agit d'une méthode heuristique indirecte et qualitative, qui permet d'évaluer la susceptibilité en se basant sur la hiérarchisation des différents paramètres (matérialisés par des cartes) significatifs

Tabl. 1. — Groupes et liste des paramètres sélectionnés dans la présente étude ainsi que les données utilisées

Groupes	Source	Échelle et/ou Résolution	Paramètres
Sismicité	– Archives et catalogues des enregistrements sismiques	—	– Isoprofondeurs des séismes
Occupation des sols	– Images Spot THR – Base de données existantes	2,5 m 1/500 000e	– Occupation des sols
Géologie	– Carte géologique – Ortho images	1/500 000e 2.5, 25, et 30 m	– Unités géotechniques et géomorphologiques – Densité de la fracturation
Géométrie	– Image Radar Aster GDEM	25 m	– Gradient de pente – Hypsométrie – Exposition
Hydrologie	– Image Radar Aster GDEM – Cartes topographiques – Enregistrements des précipitations	25 m 1/100 000e —	– Précipitations – Densité du réseau hydrographique

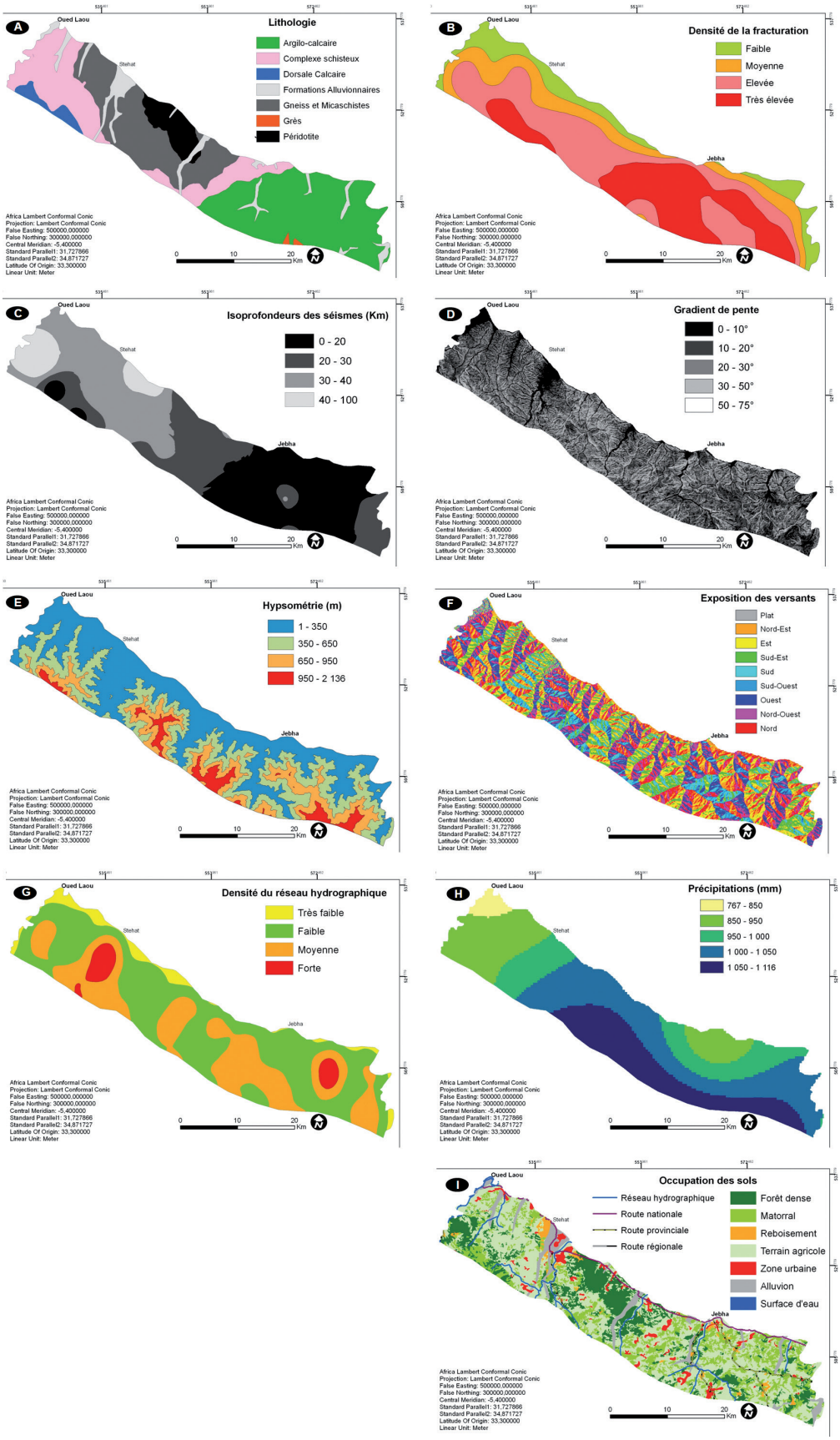


Fig. 3. — Paramètres de prédisposition ; A : unités lithologiques ; B : densité de la fracturation ; C : isoprofondeurs des séismes ; D : gradient de pente ; E : hypsométrie ; F : exposition des versants ; G : densité du réseau hydrographique ; H : précipitations ; I : occupation des sols.

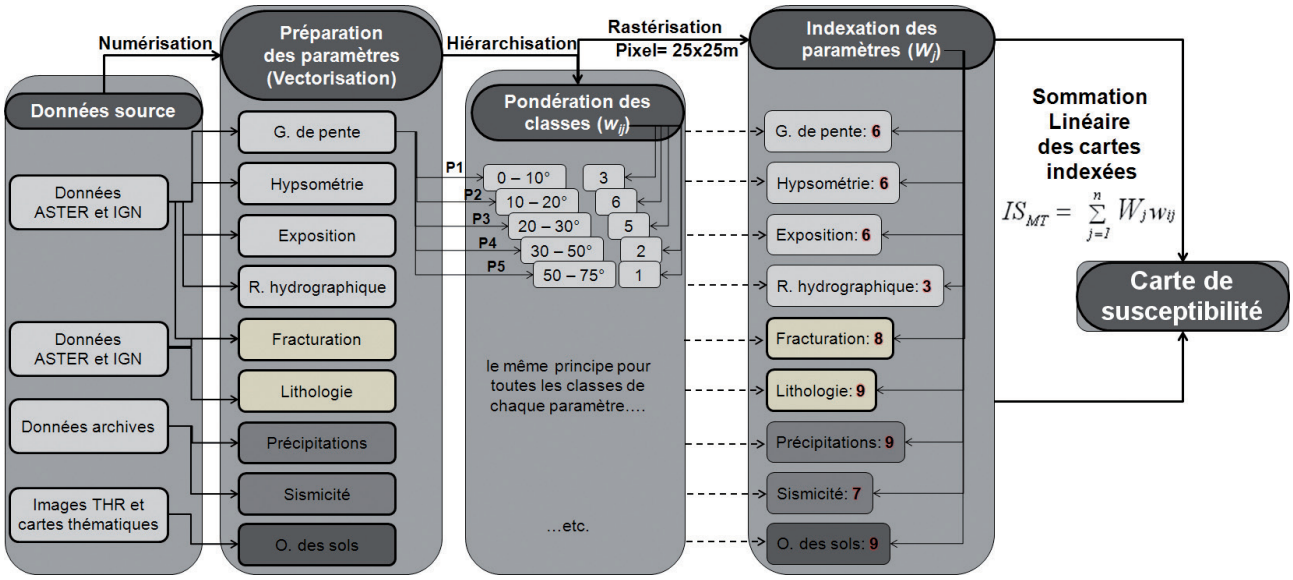


Fig. 4. — Résumé du déroulement des différentes étapes pour la cartographie de la susceptibilité aux mouvements de terrain par combinaison des cartes d'index dans le secteur d'étude.

de terrain, en procédant à l'attribution des poids relatifs à chaque classe (ou subdivision) de ces derniers selon leur importance relative dans la genèse des MT (figure 3). Le nombre de cartes en entrée (paramètres) dépend de l'avis du chercheur effectuant l'analyse qui décide à l'avance quels sont les facteurs importants, et qui doivent donc être cartographiés et numérisés. Quant aux poids relatifs, ils peuvent être attribués en se basant sur les connaissances de l'expert (géologue, géomorphologue…) menant cette analyse (Anbalagan, 1992 ; Nagarajan *et al.*, 2000 ; Saha *et al.*, 2002), et qui peut se faire aider des statistiques basées sur la relation entre phénomènes inventoriés (MT) et les paramètres significatifs précédemment sélectionnés (Dai *et al.*, 2001 ; Lee et Min, 2002 ; Lee *et al.*, 2004 ; Lee et Talib, 2005). Cependant, une fois que les différents poids sont assignés, tous les paramètres sont rassemblés dans une seule et unique carte d'index de susceptibilité aux mouvements de terrain (ISMT), et ce à l'aide de la formule (Équation 1) proposée par Voogd, (1983) et permettant le calcul des sommations linéaires pondérées. La démarche est résumée dans la figure 4.

Équation 1 $$IS_{MT} = \sum_{j=1}^{n} W_j w_{ij}$$

Avec :

- IS_{MT} : Index de la susceptibilité aux mouvements de terrain (*Mass movements susceptibility index*).
- W_j : Valeur de la pondération assignée au paramètre '*j*' (*Weight value of parameter 'j'*)
- w_{ij} : Valeur de la pondération assignée à la classe '*i*' paramètre '*j*' (*Weight value of class 'i' in parameter 'j'*)
- n : Nombre de paramètres (*Number of parameters*)

16.3 Zonation de la susceptibilité

16.3.1 Indexation des paramètres

Pour l'évaluation de la SMT par combinaison de cartes d'index, la première étape a consisté en la détermination des poids relatifs. Ceux-ci, changent en toute logique d'un paramètre à l'autre, étant donné que chaque poids reflète l'importance de chaque paramètre dans le conditionnement des instabilités des versants. Dans cette méthode, il est classiquement admis que l'affectation ne peut s'effectuer que par voie qualitative, et dépend seulement de l'avis du scientifique. Dans notre cas, nous y associons la voie quantitative pour réduire la subjectivité de l'approche. Cette indexation s'est déroulée à deux niveaux :

— **1° pour chaque paramètre** (W_j) avec des valeurs variant de 1 à 9, valeurs qui reflètent l'importance de chaque paramètre intervenant dans le processus de l'instabilité des versants dans le secteur d'étude. Pour ce, nous nous sommes basés en premier lieu sur l'analyse des interrelations des différents paramètres. Pour cette valeur (W_j), nous l'avons fait correspondre dans notre cas, à la valeur maximale affectée à une ou plusieurs classes d'un même paramètre (figure 3) ;

— **2° pour chaque classe** (w_{ij}) avec des valeurs variant de 1 (classe faiblement susceptible) à 9 (classe fortement susceptible), essentiellement basées sur l'étude statistique (évaluation quantitative) effectuée sur des données réelles de terrain, à la base de l'examen de la relation entre la distribution spatiale des phénomènes inventoriés et les différentes classes de tous les facteurs sélectionnés et considérés comme causatifs après les avoir hiérarchisés (figure 3 et 4).

Ainsi, les caractéristiques lithologiques, les précipitations, et l'occupation des sols qui contrôle l'infiltration, sont considérées comme étant les facteurs majeurs influençant l'occurrence des MT dans la zone littorale entre Jebha et Oued Laou, et donc la valeur 9, la plus importante, leur a été assignée comme poids relatif. Ce choix est tout à fait valide, qu'il soit basé — sur les statistiques obtenues, ou —, sur une évaluation purement naturaliste émanant des observations

Tabl. 2. — Pondération des différentes classes et poids relatifs des paramètres pris en compte pour la genèse des mouvements de terrain dans la zone d'étude, SC : superficie de la classe ; FC : Fréquence de la classe ; N de MT : Nombre des mouvements de terrain ; F de MT : Fréquence des mouvements de terrain ; PRC : Poids relatifs de chaque classe w_{ij} ; et PRF : Poids relatif de chaque facteur (W_j = valeur max du PRC du paramètre)

Paramètres sélectionnés	SC	FC	N de MT	F de MT	PRC	PRF
Lithologie						9
Péridotite	58,30	6,60	17	7,72	2	
Complexe schisteux	203,37	23,15	20	2,44	1	
Gneiss et micaschistes	189,19	21,54	25	6,69	8	
Formations alluvionnaires	60,25	6,86	15	11,34	5	
Dorsale calcaire	20,81	2,37	7	37,03	4	
Grés	2,55	0,2	2	9,77	3	
Argilo-calcaire	343,75	39,15	106	10,87	9	
Fracturation: Densité						8
Faible	121,30	12,5	22	11,2	2	
Moyenne	158,61	28,12	45	23,33	6	
Elevée	325,48	37,07	83	43,3	8	
Très élevée	273,30	21,57	42	21,65	7	
Sismicité: Isoprofondeurs (Km)						7
0 - 20	322,74	9,68	95	49,47	7	
20 - 30	237,06	20,93	56	29,16	5	
30 - 40	248,67	12,45	36	18,75	3	
40 - 100	70,33	4,77	5	2,60	2	
Gradient de pente: Degré						6
0 - 10°	167,30	27,55	36	18,85	3	
10 - 20°	364,46	43,29	88	45,62	6	
20 - 30°	271,91	21,73	50	26,34	5	
30 - 50°	369,51	7,31	17	8,92	2	
50 - 75°	5,52	0,1	1	0,25	1	
Hypsométrie: Altitude (m)						6
1 - 350 m	401,10	23,98	121	63,02	6	
350 - 650 m	273,35	33,14	42	21,87	4	
650 - 950 m	150,55	19,31	18	9,37	2	
950 - 1236 m	53,37	12,97	11	5,72	6	
Expositions: Angle avec le N						6
Plat standard (-1)	0,01	2,22	2	0,5	1	
Nord (0-22.5 & 337.5-360)	100,01	12,01	30	15,58	6	
Nord-Est (22.5-67.5)	135,29	12,71	22	11,54	3	
Est (67.5-112.5)	124,89	12,89	18	9,26	2	
Sud-Est (112.5-157.5)	33,72	10,51	17	8,76	2	
Sud (157.5-202.5)	101,08	11,83	24	12,97	4	
Sud-Ouest (202.5-247.5)	121,68	12,83	29	15,08	5	
Ouest (247.5-292.5)	161,62	13,44	28	14,57	5	
Nord-Ouest (292.5-337.5)	098,46	11,78	22	11,71	4	
RH: Densité						3
Très faible	47,23	3,33	5	2,44	1	
Faible	471,73	38,95	72	37,32	2	
Moyenne	317,04	47,6	102	53,41	3	
Forte	42,84	9,51	13	6,82	1	
Précipitations: Hauteur (mm)						9
767 - 850 mm	26,90	2,57	2	1,26	1	
850 - 950 mm	190,44	20,42	38	19,42	7	
950 - 1000 mm	171,82	15,67	39	20,01	7	
1000 - 1050 mm	290,37	47,96	100	52,61	9	
1050 - 1116 mm	199,28	13,38	13	6,67	3	
Occupation des sols						9
Alluvion	65,25	10,73	13	6,53	3	
Zone urbaine	40,2	4,25	4	2,1	2	
Terrain agricole	452,5	45,08	85	44,46	9	
Reboisement	24,36	3,06	6	2,84	2	
Matorral	149,61	11,27	34	17,92	4	
Forêt dense	147,55	24,29	50	26,07	6	

de terrain et de la connaissance du contexte (secteur ou environnement) de l'étude. Le facteur fracturation vient en second lieu d'où l'attribution de la valeur 8 comme poids relatif, puisqu'il est caractérisé par une grand densité dans le secteur d'étude, et qui parallèlement se trouve exacerbé par l'activité sismique, et à qui nous avons attribué le poids 7.
Les facteurs géométriques ou topographiques à savoir, le gradient de pente, l'hypsométrie et l'exposition des versants, sont aussi importants dans le contrôle des MT du secteur d'étude, dans le reste de la province de Chefchaouen et partout dans la chaine Rifaine, mais secondaires, par rapport aux paramètres précités, ce qui fait que la valeur 6 leur a été attribuée. Quant au réseau hydrographique, dont l'effet se fait sentir par l'impact du sapement latéral des torrents, ou celui du drainage et l'évacuation des débris, son impact est beaucoup moins important que les facteurs précédents, vu la faible densité qu'il présente dans le secteur d'étude. Par conséquent, nous lui attribuons une valeur pondérale de 3. Les valeurs des poids relatifs affectées aux différentes classes pour chacun des neuf facteurs ont été assignées de la même façon (tableau 2).

16.3.2 Résultat : Zonage de la susceptibilité et qualité du modèle

Pour obtenir la carte de SMT à échelle régionale (1/100 000e) de la zone littorale entre Jebha et oued Laou, l'importance de chaque facteur a été exprimée par le produit des valeurs pondérales des différentes classes et le poids du paramètre lui-même. Après quoi, il a été possible de générer la carte de SMT par sommation linéaire des cartes indexées à l'aide de l'équation 1. Celle-ci montre des valeurs comprises entre 784 et 1 488 (figure 6A). Toute la chaine de traitement, incluant l'attribution des pondérations des classes, des poids relatifs, et la génération de la carte de la SMT, s'est déroulée sous environnement SIG (ArcGis 10).
Cependant, afin de faciliter la lecture et l'interprétation de notre carte, il a été indispensable de traduire les valeurs d'index de la susceptibilité obtenues (784 et 1488) en termes de niveaux (classes) de susceptibilité. Ceci, n'est pas du tout évident à réaliser, puisqu'aucune démarche automatique n'existe pour l'effectuer (Ayalew *et al.*, 2004 ; Ayalew et Yamagishi, 2005).
Dans la plupart des études antérieures, les cartographes de la susceptibilité se basent sur leurs propres expériences et avis pour passer d'une carte présentée en valeurs continues (*index*) à des classes ou niveaux d'une façon manuelle (Süzen et Doyuran 2004 ; Guzzetti *et al.*, 1999 ; Lee et Min, 2002 ; Dai et Lee, 2002 ; Ohlmacher et Davis, 2003…). Une telle démarche, en plus de sa subjectivité, elle est inutilisable dans le cas d'une distribution multimodale (Süzen et Doyuran, 2004), raison pour laquelle nous avons opté pour l'utilisation d'une méthode basée sur des lois à la fois empiriques et mathématiques. Deux méthodes ont été testées, à savoir la déviation standard et les discontinuités naturelles. Ces deux dernières en comparaison avec d'autres ont été jugées comme étant les plus performantes pour la reclassification des cartes d'index de la susceptibilité dans un environnement montagneux rifain (Mastere, 2011).
La qualité des deux méthodes a été comparée pour en sélectionner la meilleure. Pour ce, la courbe ROC (*Receiver Operating Characteristic*) correspondant à chacune des deux méthodes a été réalisée, en intégrant les mouvements

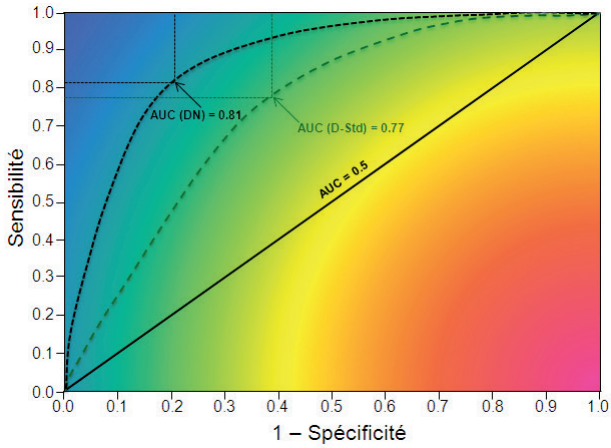


Fig. 5. — Courbe ROC (Receiver Operating Characteristic) par discontinuités naturelles (DN) représentée par la courbe en tirets noirs; et par déviation standard (D-Sdt) représentée par la courbe en tirets verts.

de terrain que nous avons précédemment cartographiés à l'échelle de toute la zone littorale entre Jebha et Oued Laou (figure 5). Il s'agit d'une représentation graphique définissant la relation existante entre la sensibilité et la spécificité d'un test pour toutes les valeurs seuils possibles (Swets, 1988 ; Chung et Fabbri, 1999). L'ordonnée (sensibilité) présente l'occurrence des MT et l'abscisse correspond à la quantité (1 – spécificité) qui représente l'index de la susceptibilité obtenu en 100 subdivisions (figure 5). Au fait, l'aire sous la courbe ROC (AUC : *area under the curve*) définit la qualité d'un système prédictif en caractérisant sa capacité à anticiper (prédire) le plus correctement possible la survenance ou non d'un évènement précis (en occurrence les MT). Pour un modèle performant, signifie : $0{,}5 < \text{AUC} \leq 1$ AUC = 1, étant la courbe ROC du modèle idéal pour une prédiction parfaite, et AUC = 0,5 étant la courbe ROC d'un modèle prédictif complétement aléatoire.
Au vu de ces caractéristiques, c'est la méthode des discontinuités naturelles qui a été retenue pour la reclassification de notre carte d'index de la susceptibilité. Cela s'explique par la valeur de la sensibilité et celle de 1 – spécificité de l'AUC obtenue par les discontinuités naturelles, et qui sont respectivement 0,81 et 0,71 et supérieures à celles obtenues par la déviation standard (sensibilité = 0,77, et 1 – spécificité = 0,61). La carte de susceptibilité obtenue présente trois différentes classes ou niveaux de susceptibilité aux mouvements de terrain (figure 6). Par ordre d'importance, il s'agit de la classe de susceptibilité élevée qui occupe environ 47 % de la superficie globale de la zone d'étude, ensuite la classe à susceptibilité moyenne avec 28 % de la totalité du secteur, et enfin 25 % du secteur d'étude qui est couvert par la classe de susceptibilité faible.

Conclusion

Le présent article est centré sur la modélisation de la susceptibilité aux mouvements de terrain, par l'utilisation d'une approche heuristique analytique hiérarchisée. Il s'agit de la combinaison de cartes d'index. Pour ce faire, neuf paramètres intervenant dans la genèse des MT, ont été intégrés, après

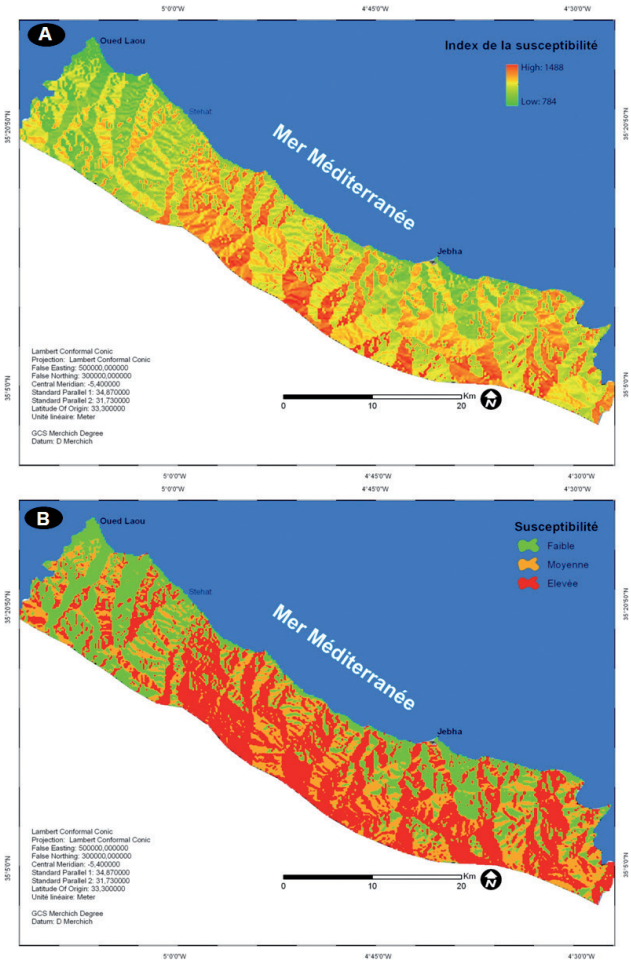


Fig. 6. — A : Carte d'index de la susceptibilité aux mouvements de terrain de la zone littorale entre Jebha et Oued Laou ; B : Carte de susceptibilité aux mouvements de terrain reclassifiée par la méthode des discontinuités naturelles.

leur hiérarchisation et pondération qui s'est déroulée à deux niveaux pour les différentes classes et puis le paramètre dans sa globalité. Les paramètres sélectionnés sont : la lithologie, les précipitations et l'occupation des sols ; en leur affectant le poids maximal (9) puisqu'ils sont les plus pondérant dans le conditionnement des instabilités des versants de la région. La fracturation vient en deuxième niveau (8), suivie de la sismicité (7), les paramètres géométriques (gradient de pentes, hypsométrie, et exposition des versants) (6), et finalement un réseau hydrographique très peu évolué (3). L'importance de chaque classe a été définie objectivement (qualitativement) à l'aide des statistiques établies sur les données réelles de la région. Cette démarche, constitue une initiative exploratoire pour l'analyse spatiale de la SMT par une approche probabiliste dans un environnement d'accès difficile. L'originalité de la démarche adoptée est basée sur la réduction de l'aspect subjectif dans la cartographie de la susceptibilité à petite échelle (1/100 000e) par combinaison de cartes d'index, en introduisant des poids et des pondérations basés sur des calculs réels et objectifs.

La carte de susceptibilité a été réalisée par sommation linéaire des cartes (paramètres) indexées, et nous avons obtenu des index compris entre 784, le niveau de susceptibilité le plus bas de la zone littorale entre Jebha et Oued Laou, et 1 488, celui le plus élevé du secteur. Ensuite, il a été indispensable de traduire les index de susceptibilité en termes de niveaux descriptifs spatialement distincts. Pour ce, nous avons testé deux méthodes, la déviation standard et les discontinuités naturelles. C'est cette dernière qui a été retenue, car la plus adaptée après comparaison des courbes ROC des deux approches, et aussi par confrontation des résultats avec les données de terrains.

Cette carte comprend trois classes de susceptibilité, faible, moyenne et élevée. Elle a cependant été utilisée en association avec les mouvements de terrain inventoriés (glissements, écroulements, coulées de débris) pour la construction d'une courbe ROC (*Receiver Operating Characteristic*). Cette courbe nous a permis par la valeur de l'AUC (*area under the curve*) d'examiner la qualité de notre modèle et sa capacité prédictive à anticiper (prédire) les aires susceptibles ou pas aux instabilités de versants. La valeur de l'AUC de l'ordre de 0,81 pour la sensibilité et 0,71 pour la sensibilité, témoigne de la grande performance de notre modèle.

Mis à part, le grand temps nécessaire pour le traitement des données et leur intégration dans le modèle, la combinaison des cartes d'index s'est avérée une méthode généralement aisée à mettre en place pour l'évaluation de la susceptibilité aux mouvements de terrain. Toutefois, si de nouvelles données (paramètres) sont disponibles, il est facile de les indexer et les intégrer dans le modèle pour perfectionner les résultats. Il serait aussi intéressant de vérifier la reproductibilité de la démarche proposée sur des sites à caractéristiques environnementales comparables. Cela pourrait constituer une piste pour la mise en place d'un programme avec une interface simple qui permettra la zonation automatique de la susceptibilité sur des sites ayant plus ou moins les mêmes caractéristiques. En outre, il serait utile de procéder régulièrement à la réévaluation de la susceptibilité dans notre secteur par l'utilisation de nouvelles méthodes, actuellement en gestation, ce qui est tout à fait envisageable au vu la base géologique et phénoménologique numérique créée dans le cadre de ce travail. Cela réduira considérablement le temps d'analyse, et permettra de sélectionner les meilleures méthodes avec des résultats de plus en plus proches de la réalité.

En dernier lieu, il est à noter que, la carte de susceptibilité et les cartes des différents paramètres de prédisposition réalisées dans le cadre de travail constituent un bon moyen de communication (sensibilisation du public) sur les zones susceptibles ou « sensibles » aux MT. Elle constitue un puissant outil d'aide à la décision pour présenter, comparer et discuter des scénarios d'aménagement du territoire, d'aménagement urbains et de projets de constructions d'ouvrages et les nouveaux tracés de routes et autoroutes. Une telle démarche permettra d'atténuer les impacts socio-économiques habituellement constatés, lors de déclenchement des MT dans la zone d'étude.

Remerciements

Ce travail a été réalisé dans le cadre de l'action intégrée N° AI-192-08, entre l'Institut universitaire européen de la Mer (Brest, France), et l'université de Chouaïb Doukkali (El Jadida, Maroc), en collaboration avec l'université Mohammed V Agdal (Rabat, Maroc). Il a été financé conjointement

par une allocation de recherche EGIDE (partenariat Huber Curien Volubilis 17174P) du ministère français des Affaires étrangères, et une allocation de recherche du gouvernement marocain gérée par le C.N.R.S.T.

Bibliographie

Agnesi V., Di Maggio C., Fiorito S., Rotigliano E., « Analytical approach for landslide hazard assessment in El Salvador (C.A.) », *Proceedings of the Symposium on Geomorphology : from expert opinion to modelling*. CERG Éditions, Strasbourg, France, 2002.

Agnesi V., Conoscenti C., Di Maggio C., Iudicello C., Rotigliano E., « Landslide hazard analysis in the Giardo River Basin (Middle-Western Sicily) », *Proceedings of the Workshop on Geomorphological sensitivity and system response*, Università di Camerino-Università di Modena, Camerino, Italy, 2003, p. 3-11.

Anbalagan R., « Landslide hazard evaluation and zonation mapping in mountainous terrain », *Engineering Geology* 32, 1992, p. 269-277.

Ayalew L., & Yamagishi H., « The application of GIS-based logistic regression for landslide susceptibility mapping in the Kakuda-Yahiko Mountains, Central Japan », *Geomorphology*, 65 (1-2), 2005, p. 15-31.

Ayalew L., Yamagishi H., Ugawa N., « Landslide susceptibility mapping using GIS based weigthed linear combination, the case in Tsugawa area of Agano River, Niigata Prefecture, Japan », *Landslides*, 1 (1), 2004, p. 73-81.

Carrara A., « Multivariate Models For Landslide Hazard Evaluation », *Mathematical Geology*, 15, 1983, p. 403-426.

Chung C.-J.-F., Fabbri A.-G., « Probabilistic prediction models for landslide hazard mapping », *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 65 (12), 1999, p. 1389-1399.

Dai F.-C., Lee C.-F., « Landslide characteristics and slope instability modelling using GIS, Lantau Island, Hong Kong », *Geomorphology*, 2002, 42, p. 213-228.

Dai F-.C., Lee C.-F., Xu Z.-W., « Assessment of landslide susceptibility on the natural terrain of Lantau Island, Hong Kong », *Environmental Geology*, 2001, 40 (3), p. 381-391.

Didon J., Durand-Delga M., Kornprobst J., « Homologies géologiques entre les deux rives du détroit de Gibraltar (Cordillères bétiques occidentales, Espagne) », *Bull. Soc. Géol. Fr.*, (7) XV, 2, 1973, p. 77-105.

Durand-Delga M., « Essai sur la structure des domaines émergés autour de la Méditerranée occidentale », *Geol. Rundsch.*, Stuttgart, n° 53, 1963, p. 534-535.

El Kharim Y., *Étude des mouvements de versants dans la région de Tétouan (Rif occidental) : Inventaire, analyse et cartographie*, thèse de doctorat es-sciences, université Abdelmalek Essaadi, Tétouan, Maroc, 2002, 250 p.

El Khattabi J., *Démarche méthodologique pluridisciplinaire intégrant une approche transversale pour l'étude des instabilités de versants : application aux versants du Rif Central (Maroc)*, thèse de doctorat, université d'Artois, 2001, 258 p.

Fares A., *Essai méthodologique de la cartographie des risques naturels liés aux mouvements de terrain. Application à l'aménagement de la ville de Taounate (Rif, Maroc)*, thèse de doctorat, université de Franche-Comté, 1994, 177 p.

Lee S., Min K., « Landslide susceptibility analysis and verification using a Bayesian probability model », *Environmental Geology*, 2002, 43 (120), 131 p.

Lee S., Talib J.-A., « Probabilistic landslide susceptibility and factor effect analysis », *Environmental Geology*, 2005, 47 (7), p. 982-990.

Lee S., Ryu J.-H., Won J.-S. et Park H.-J., « Determination and application of the weights for landslide susceptibility mapping using an artificial neural network », *Engineering Geology*, 71 (3-4), 2004, p. 289-302.

Mansour M., *Geodynamic processes and cartography of ground mouvements in the area of Chefchaouen (District of Bouhalla-Amtrass). Application to the stabilization of main road Nb : 39. Western Rif, Morocco*, thèse nouveau doctorat, université de Paris 7, 1998, 192 p.

Margaa Kh., *Essai de cartographie des risques naturels : application à l'aménagement de la région d'Al Hoceima (Rif Nord-Maroc)*, thèse de doctorat, université de Franche-Comté, 1994, 196 p.

Mastere M., *Intégration des données multi-sources dans un SIG pour la cartographie de l'aléa aux mouvements de terrain au niveau de l'accident de Jebha (province de Chefchaouen). Impact sur l'aménagement et l'urbanisme*, mémoire de Master II. Faculté des Sciences de Rabat/ Institut universitaire européen de la Mer, 2008, 131 p.

Mastere M., *L'aléa mouvements de terrain dans la province de Chefchaouen (Rif central, Maroc) : Analyse spatiale, modélisation probabiliste multi-échelle*, thèse de doctorat, université de Bretagne Occidentale, 2011, 296 p.

Mastere M., Ait Brahim L., Van Vliet Lanoe B., Elfahchouch N., Guelzim E., Jirari H., et Abdelouafi A., « Utilization of Digital Photogrammetry in spatiotemporal knowledge of Landslides », *Actes of GeoCanada 2010 — Working with the Earth*, Alberta, Canada, 2010.

Mastere M., Thiery Y., Ait Brahim L., Van Vliet Lanoe B., « Landslide Susceptibility Mapping Using Weights of Evidence Approach and Gis Analysis », *Actes de la 23e Réunion des Sciences de la Terre* (RST) Bordeaux, France, 456, 2010, p. 199-200.

Mastere M., Van Vliet Lanoë B., Mansour M., Aït Brahim L., « Spatiotemporal analysis of landslides using digital photogrammetry and DEM », *Revue Télédétection*, 2011, vol. 10, n° 05 (2-3), p. 147-156.

Mastere M., Van Vliet Lanoë B., Thiery Y., *Mass movements susceptibility assessment in the coastal area*

between Jebha and Stehat using a probabilistic approach, Colloque international Géorisques 2012, Risques naturels sur les littoraux El Jadida, Maroc.

Millies-Lacroix C.A., « Les glissements de terrains. Présentation d'une carte prévisionnelle des mouvements de masse dans le Rif (Maroc septentrional) », *Mines et Géologie*, n° 27, 1968, p. 45-55.

Moon V., Blackstock H., « A methodology for assessing landslide hazard using deterministic stability models », *Natural Hazards* 32, 2004, p. 111-134.

Nagarajan R., Roy A., Vinod Kumar R., Mukherjee A., Khire M.-V., « Landslide hazard susceptibility mapping based on terrain and climatic factors for tropical monsoon regions », *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* 58, 2000, p. 275-287.

Ohlmacher G.-C., Davis J.-C., « Using multiple logistic regression and GIS technology to predict landslide hazard in northeast Kansas, USA », *Engineering Geology*, 69 (3-4), 2003, p. 331-343.

Saha A.-K., Gupta R.-P., Arora K.-M. 2002, « GIS-based landslide hazard zonation in the Bhagirathi (Ganga) Valley, Himalayas », *International Journal of Remote Sensing*, 23, p. 357-369.

Sossey Alaoui F., *Traitement et intégration des données satellitaires optiques et radar dans un SIG en vue de l'obtention de carte de l'aléa lié aux instabilités de terrain dans la péninsule de Tanger (Rif septentrional, Maroc)*, Thèse de doctorat, université Mohamed V, Faculté des Sciences, Rabat, 2005, 175 p.

Süzen M.-L. & Doyuran V., « A comparison of the GIS based landslide susceptibility assessment methods : multivariate versus bivariate », *Environmental Geology*, 45 (5), 2004, p. 665-679.

Süzen M.-L. & Doyuran V., « Data driven bivariate landslide susceptibility assessment using geographical information systems : a method and application to Asarsuyu catchment, Turkey », *Engineering Geology*, 71 (3-4), 2004, p. 303-332.

Swets J., « Measuring the accuracy of diagnostic systems », *Science* 240, 1988, p. 1285-1293.

Thiery Y., *Landslide susceptibility in the Barcelonnette basin (French South Alps) : morphodynamic cartography, spatial analysis and probabilistic modelling*, PhD Thesis, Caen/Basse-Normandie university, French, 2007, 445 p.

Thiery Y., Malet J.-P., Sterlacchini S., Puissant A., Maquaire O., « Analyse spatiale de la susceptibilité des versants aux mouvements de terrain, comparaison de deux approches spatialisées par SIG », *Revue Internationale de Géomatique/European Journal of GIS and Spatial Analysis* 15, 2005, p. 227-245.

Thiery Y., Malet J.-P., Sterlacchini S., Puissant A., Maquaire O., « Landslide susceptibility assessment by bivariate methods at large scales : Application to a complex mountainous environment », *Geomorphology* 92, 2007, p. 38-59.

Van Westen C.-J., Castellanos Abella E.A., Sekhar, L.K., « Spatial data for landslide susceptibility, hazards and vulnerability assessment : an overview », *Engineering geology*, 102, 2008 (3-4), p. 112-131.

Van Westen C.-J., Van Asch T.-W.-J., Soeters R., « Landslide Hazard And Risk Zonation : Why is it still so difficult ? », *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 65, 2006, p. 167-184.

Varnes D.-J., *Landslide Hazard Zonation, a review of principles and practice*, IAEG Commission on Landslides, UNESCO, Paris, 1984, 63 p.

Voogd H., *Multi-criteria evaluation for urban and regional planning*, Pion, London, 1983, 367 p.

17 Les risques d'inondation dans la région du Xinjiang (Chine) : le cas du bassin versant du Karakash

Maihepireti Wulamu
Professeur à l'Université Normale du Xinjiang à Urumqi (Chine) et chercheuse associée de l'U.M.R. ESPACE 7300 — C.N.R.S., Université d'Aix-Marseille, France
mahpirat02@hotmail.com

Résumé. — Le bassin versant du Karakash est situé au sud du Xinjiang, dans une zone aride. Les inondations qui se produisent l'été, presque tous les ans, détruisent les récoltes, principales sources de revenus pour la population, et entravent le développement socio-économique. La prévention des inondations doit donc y être intégrée à la gestion globale de l'eau. Notre travail a pour objectif de démontrer l'applicabilité de la méthode hydrogéomorphologique, mise au point en France méditerranéenne, dans le bassin versant du Karakash. La cartographie hydrogéomorphologique fournit des informations suffisantes pour permettre aux aménageurs de réaliser une planification spatiale susceptible de prévenir et de réduire les risques d'inondation.
Mots-clés. — Zones inondables, risques d'inondation, méthode hydrogéomorphologique, bassin versant du Karakash, Xinjiang, Chine.

Title. — *Flood Risks in the Xinjiang Region (China) : the Case of the Karakash Watershed*
Abstract. — *The Karakash river watershed is situated in an arid zone, in the southern part of Xinjiang. In this watershed, flood occur during summer, almost each year, and destroy crops that are the main income of the population. Flooding cause damages that hinder socio-economical development. Flood prevention must be integrated at the global water gestion. Our work demonstrates the applicability of hydrogeomorphological method in the Karakash watershed. Hydrogeomorphological mapping provides informations that are able to permit a spatial planning to prevent and reduce flood risks.*
Key-words. — *Flood Prone Areas, Flood Risks, Hydrogeomorphological Method, Karakash River Watershed, Xinjiang, China.*

Introduction

Les inondations, phénomènes naturels, sont classées au premier rang des catastrophes naturelles dans le monde. En Chine, ce sont certainement les plus redoutées, les plus fréquentes et les plus coûteuses. La moitié environ de la population et 60 % des richesses sont concentrées dans les zones à risques d'inondation (Dong Huali *et al.*, 2003). Les recherches sur cette problématique se sont focalisées sur les bassins versants du Changjiang et du Huanghe, très densément peuplés, qui subissent les inondations les plus graves et les plus dévastatrices. En revanche, dans la région Autonome Ouïghour du Xinjiang, la plus grande province du pays avec 1 660 000 km^2 (16 % du territoire chinois, fig. 1), au nord-ouest de la Chine, les inondations ont été peu étudiées. Dans cet espace aride, très faiblement peuplé, pauvre avec des moyens financiers et humains très limités, l'étude des inondations y apparaît moins spectaculaire que dans d'autres régions. Elle revêt pourtant une importance particulière en raison du dénuement de la population exclusivement concentrée près des cours d'eau. Les inondations se produisent l'été, durant la période des récoltes, ressource essentielle des habitants. Entre 1949 et 1993, il y a eu 391 grandes inondations qui ont détruit 3 160 000 hectares de terres cultivées et un important cheptel. Près de 3 millions de personnes ont été sinistrées et 1 183 sont décédées. Les dommages matériels immédiats ont atteint un montant de 237 500 000 dollars (Ye Menquan *et al.*, 1994). Durant l'été 1996, des inondations catastrophiques, à cause de la fonte des neiges et des glaces conjuguées à des pluies torrentielles, ont touché presque tout le Xinjiang. Les récents aménagements hydrauliques ont réduit le risque depuis le début du XXIe siècle, pourtant durant l'été 2005, les dommages causés par les inondations ont été considérables (Zhang Lei, 2005).

Fig. 1. — Division administrative de la République populaire de Chine et de la Région autonome du Xinjiang. Source : M. Wulamu (2010), inspirée de T. Pairault (1996).

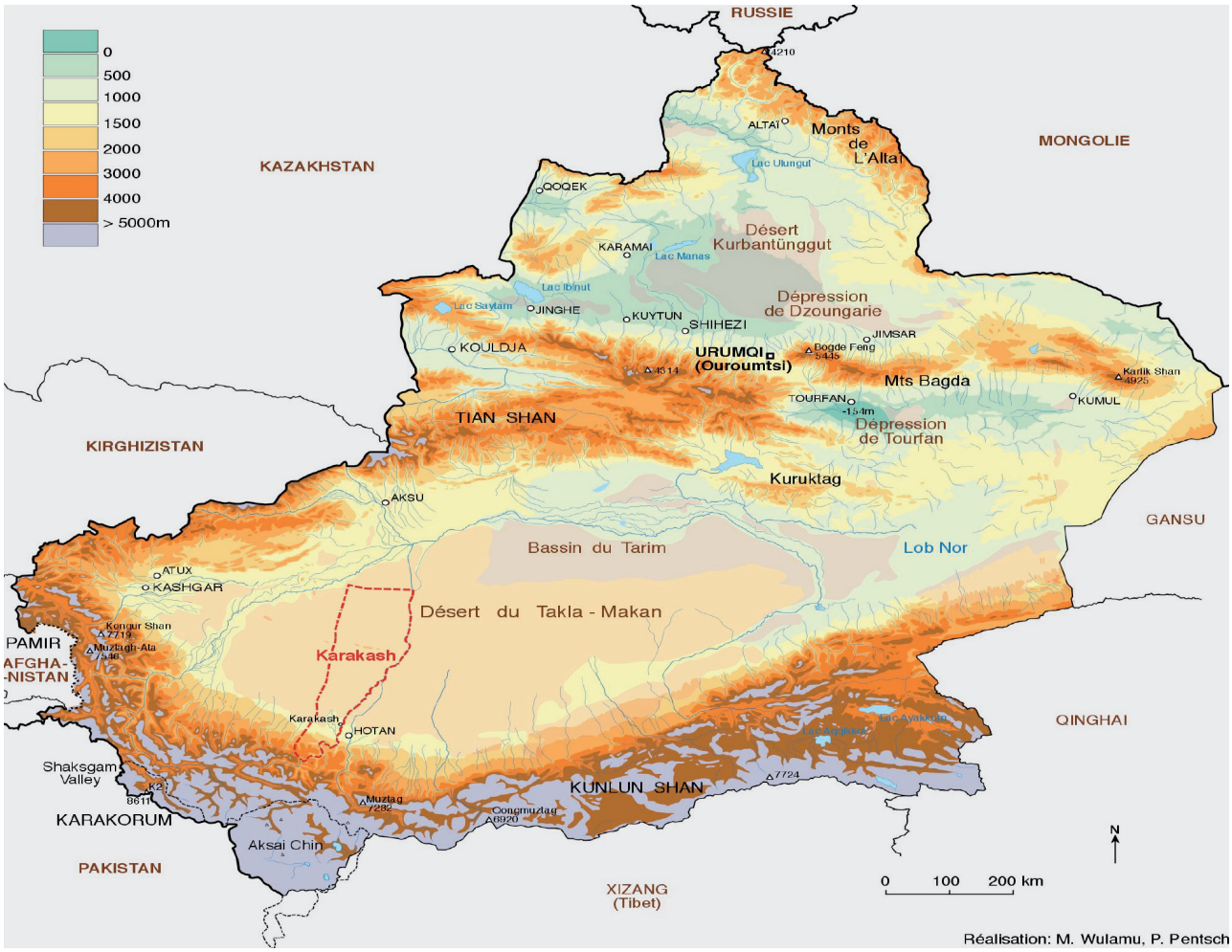


Fig. 2. — Province du Xinjiang et localisation du bassin versant du Karakash. Source : M. Wulamu (2010), fond d'après un atlas du monde publié à Moscou en 1967.

L'objectif de notre recherche a été d'appréhender les risques d'inondation dans le bassin versant du Karakash situé dans le district du même nom, au sud du Xinjiang et au nord du Tibet (plateau de Qinghai-Xizang), sur le piémont nord du Karakorum et du Kunlun, au sud du désert du Takla-Makan (fig. 2).

17.1 La méthode hydrogéomorphologique

La méthode hydrogéomorphologique est une méthode naturaliste et qualitative dont la finalité est l'élaboration d'un diagnostic du risque d'inondation (Masson *et al.*, 1996 ; Ballais *et al.,* 2011).

Le fondement de la méthode réside dans la distinction fréquente, à l'intérieur de la plaine alluviale fonctionnelle, de trois lits pour un cours d'eau : 1- le lit mineur (*low flow bed* ou *low flow channel*), qui est occupé de façon pérenne, sauf exception dans les régions arides ; 2- le lit majeur (*high water bed*), où se déversent les crues les plus importantes ; et 3- le lit moyen (*intermediate flow channel*), intermédiaire entre le lit mineur et le lit majeur, façonné par les crues les plus fréquentes (fig. 3). Un lit majeur exceptionnel (*exceptional high water bed*) est aussi parfois observé (Delorme-Laurent, 2007 ; Ballais *et al.*, 2011 ; Delorme-Laurent *et al.*, 2013).

La cartographie hydrogéomorphologique est le résultat de l'analyse hydrogéomorphologique.

Elle débouche sur la limite des zones inondables, dont la validité a été prouvée dans l'ensemble du Midi méditerranéen français (Chave, 2002 ; Esposito *et al.,* 2009 ; Esposito, 2012).

17.2 Le bassin versant du Karakash

Le bassin versant du Karakash (fig. 4), allongé du sud au nord, a une superficie de l'ordre de 26 600 km^2 et il englobe les piémonts nord du Kunlun et du Karakorum et le sud du Takla-Makan. Le Karakash qui se situe dans la montagne du Karakorum, prend sa source principale vers le sommet de l'Union (6 682 m), sur le versant nord, où se localise la plus grande partie des glaciers et la plus forte accumulation de neige (Coque *et al.,* 1991 ; Gentelle, 1992). La majorité des affluents vient des Kunlun. Long de 808 km, le Karakash a un débit moyen annuel de 2,15 x 109 m^3 (68,2 m^3/sec), (Mamtimin *et al.*, 2005).

Dans la partie amont du bassin versant, la plus vaste (19 983 km^2), le cours d'eau est encaissé sur 589 km. Il reçoit ici de nombreux affluents. Ce secteur s'étend vers l'aval jusqu'au delà

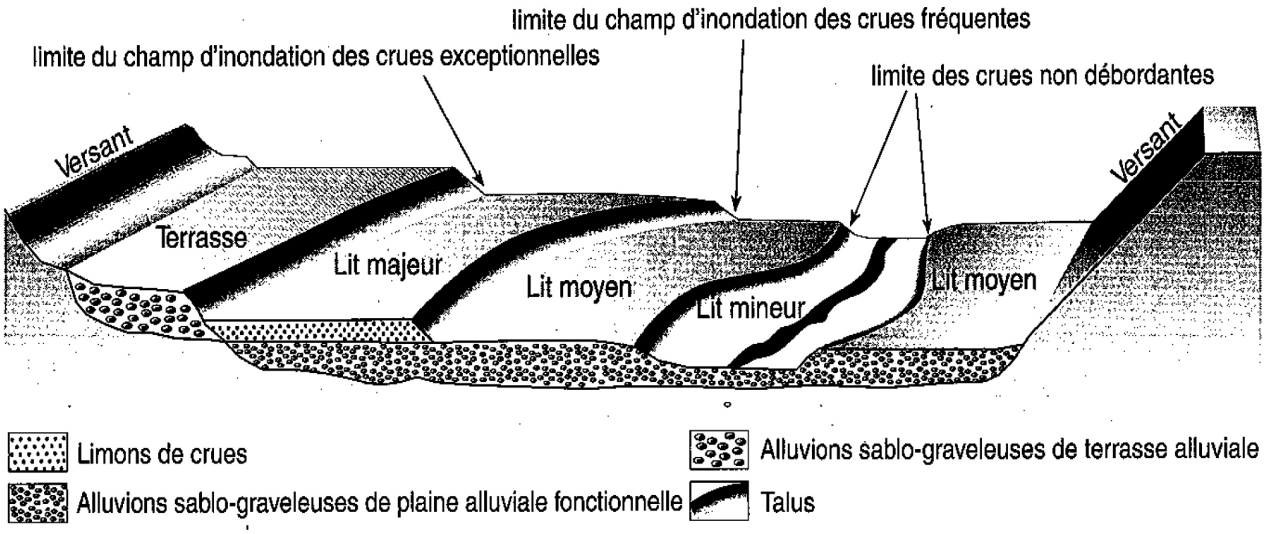


Fig. 3. — Relations topographiques entre les différents lits d'un cours d'eau. Source : J.-L. Ballais *et al.* (2009).

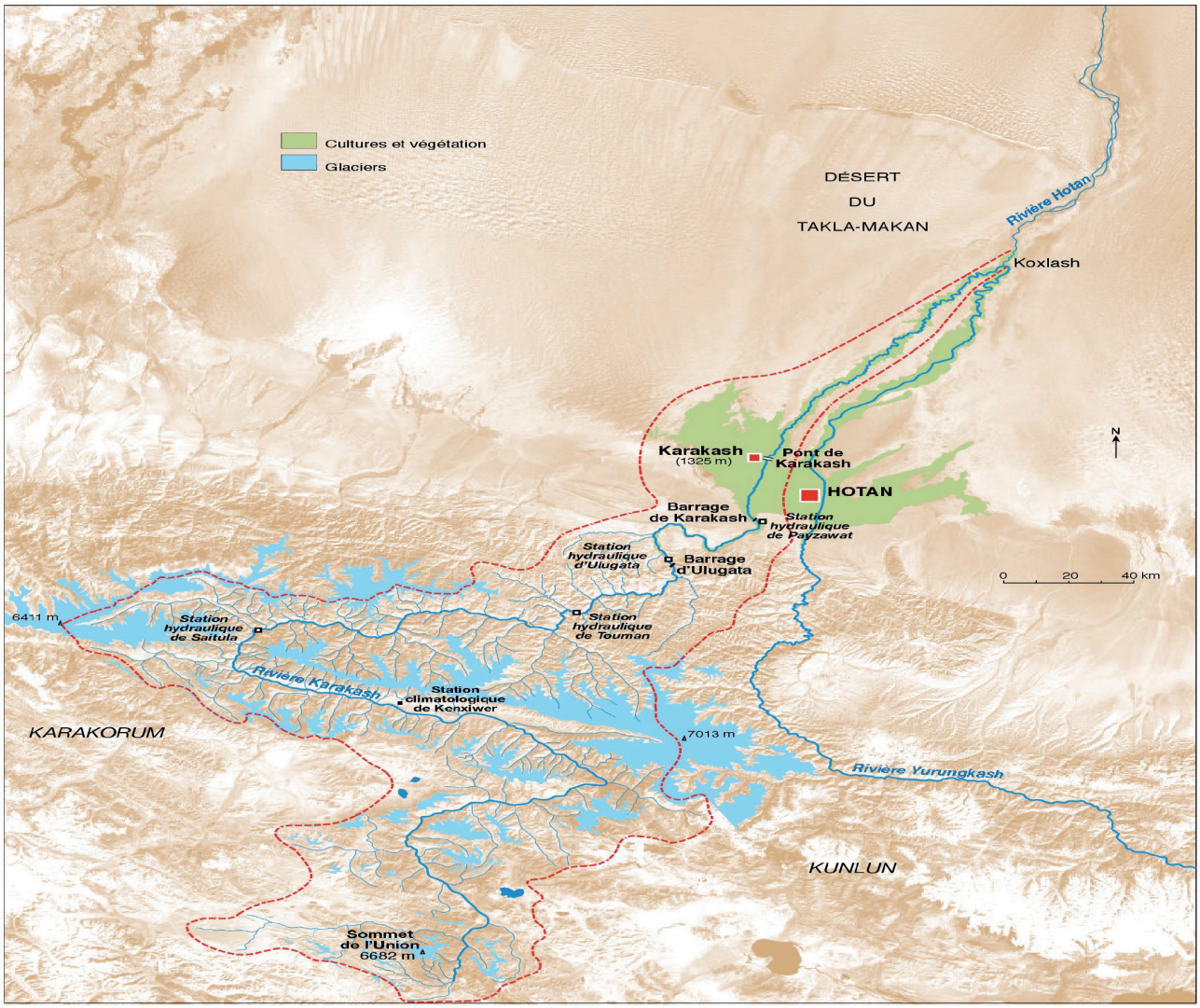


Fig. 4. — Bassin versant du Karakash. Source : M. Wulamu (2010), fond d'après le rapport du Bureau d'hydrologie de Hotan (2001).

du barrage d'Ulugata, à environ 2 000 m d'altitude (fig. 4). Il est inhabité et, de plus, il est interdit d'accès.
La partie moyenne s'étend du barrage d'Ulugata jusqu'au pont du Karakash (91 km). C'est un piémont de collines et de plaines (fig. 4). La pente moyenne du lit mineur s'abaisse à 6 ‰.
Le nombre et la longueur des affluents, simples torrents-oueds, se réduisent.
La partie aval s'étend du pont du Karakash jusqu'à Koxlash, à 1 200 m d'altitude. Sur cette section, longue de 128 km, la pente diminue encore (1,5 ‰ — Bureau d'hydrologie de Hotan, 2001). Comme de nombreux cours d'eau allogènes (le Nil par exemple et, près du terrain d'étude, le Yurungkash et le Keriya), le Karakash est alors totalement dépourvu d'affluents.
En période de forte crue, il conflue avec le Yurungkash et prend le nom de Hotan (fig. 4).
L'ensemble du bassin versant connaît un climat continental désertique. Dans la partie amont, la température moyenne ne dépasse pas 10 °C en été et descend entre -10 °C et - 21 °C en janvier ; alors que, sur le piémont, l'été a une température moyenne de l'ordre de 25 °C (22,5 °C à Ulugata) et les températures moyennes de l'hiver sont à peine négatives (- 5 °C en janvier à Ulugata). Sur les plus hauts sommets, les précipitations annuelles moyennes peuvent atteindre 400 à 500 mm, mais elles diminuent rapidement avec l'altitude et ne dépassent pas 150 mm vers 4 000 m. La neige représente plus de 90 % du total des précipitations et ne fond pas au-dessus de 5 500 m. En dessous de 2 000 m, les précipitations diminuent encore : 79 mm par an à Ulugata et 36 mm à Hotan, avec un maximum sur la fin du printemps et l'été (83 % des précipitations à Ulugata), qui coïncide avec la fonte des neiges. L'évaporation augmente globalement avec la diminution de l'altitude, mais de manière irrégulière (1 885 mm par an à Ulugata, 1 594 mm à Hotan, 1 314 mm à Karakash) en fonction de facteurs locaux. On notera l'absence de données sur la partie aval, la plus chaude et la plus sèche (Bureau d'hydrologie de Hotan, 2001).

17.3 L'applicabilité de la méthode hydrogéomorphologique au Xinjiang

En Chine, la méthode hydrogéomorhologique n'est pas pratiquée. Les deux disciplines, hydrologie et géomorphologie sont nettement séparées. Dans l'ouvrage de *Géomorphologie* de Yang Jingchun (2005), un chapitre donne quelques indications sur le lit mineur, le lit majeur et la terrasse alluviale, mais il ne différencie pas le lit moyen du lit majeur exceptionnel. Cela signifie-t-il que cette méthode, mise au point dans le domaine climatique méditerranéen, n'est pas applicable dans des domaines climatiques extra-méditerranéens ?
Le domaine méditerranéen n'est pas le seul à avoir un régime de précipitations contrasté qui assure des débits d'amplitude extrême. L'alimentation allogène des cours d'eau du Takla Makan est cause d'une amplitude des débits et des régimes sans rapport avec le milieu aride qu'ils traversent. Le Karakash comme le Yurungkash et le Keriya, qui descendent du Karakorum et des Kunlun et vont généralement se perdre à l'aval dans les sables, ont un régime nivoglaciaire, qui assure des débits très forts en été, lors de la fonte des neiges et des glaciers.
Alors que Bravard et Petit (1997) pensent que « les notions traditionnelles de lit mineur et de lit majeur ne sont pas adaptées aux vallées des milieux arides ». En fait, lit mineur, lit moyen et lit majeur fonctionnent fréquemment dans les vallées des milieux arides (Delorme-Laurent, 2007). La méthode hydrogéomorphologique revêt un intérêt tout particulier dans le Xinjiang pour une première approche du risque d'inondation, car elle repose sur l'observation du terrain et sa cartographie. Elle est relativement rapide par rapport à d'autres méthodes pour une région où les données chiffrées font cruellement défaut et où toute modélisation quantitative est actuellement impossible. Elle est aussi peu coûteuse, ce qui, dans une région pauvre qui dispose de moyens très faibles, est appréciable.

17.4 Les outils de la cartographie hydrogéomorphologique et leur adaptation au cas du Karakash

17.4.1 L'indispensable image satellitaire de Google Earth et ses limites

Les images satellitaires de Google Earth ont constitué l'outil de base indispensable en raison de l'absence de photographies aériennes et de cartes topographiques aux échelles pertinentes (1/10 000 à 1/25 000). Nous avons pu disposer seulement de trois cartes topographiques : celle de la préfecture de Hotan (carte administrative) à l'échelle du 1/4 230 000, celle du bassin versant de la rivière de Hotan au 1/2 000 000 et la carte topographique de Hotan au 1/750 000. Ces échelles sont évidemment totalement incompatibles avec un travail de terrain pour délimiter des zones inondables. Il semblerait que des cartes topographiques à échelle beaucoup plus grande existent, mais ni les services hydrologiques, ni les établissements universitaires d'Urumqi et de Hotan n'en disposent. Avant l'observation du terrain, nous avons donc dû sélectionner 109 images satellitaires couvrant l'ensemble du bassin du Karakash, de l'amont à l'aval. Seules ces images pouvaient permettre d'appréhender la topographie du secteur d'étude. Nous avons fait une première analyse de ces images, analyse difficile et qui n'a pas pu réduire considérablement les incertitudes sur certaines formes et sur leurs limites, en raison de l'absence de stéréoscopie qui permet une véritable délimitation préalable des unités topographiques (Masson *et al.*, 1996). En particulier, les talus transversaux sont à peu près invisibles sous la végétation des oasis et c'est aussi parfois le cas des talus longitudinaux. De plus, certaines images n'étaient pas claires en raison de la présence de nuages, ou étaient de mauvaise qualité, et n'ont pas pu être utilisées.
Lors de la réalisation du travail cartographique, nous n'avons pas utilisé dix images qui couvraient la partie en amont du barrage d'Ulugata, car ce secteur est interdit d'accès et il n'était donc pas possible de vérifier les formes sur le terrain. Finalement, nous avons pu réaliser 56 cartes des zones inondables à une échelle qui varie du 1/10 000 au 1/25 000, du pont d'Ulugata jusqu'au village de Kawak où l'écoulement superficiel disparaît en basses eaux.

17.4.2 Les observations de terrain

Les cartes ont été vérifiées et complétées lors des diverses périodes de travaux sur le terrain par des relevés de terrain,

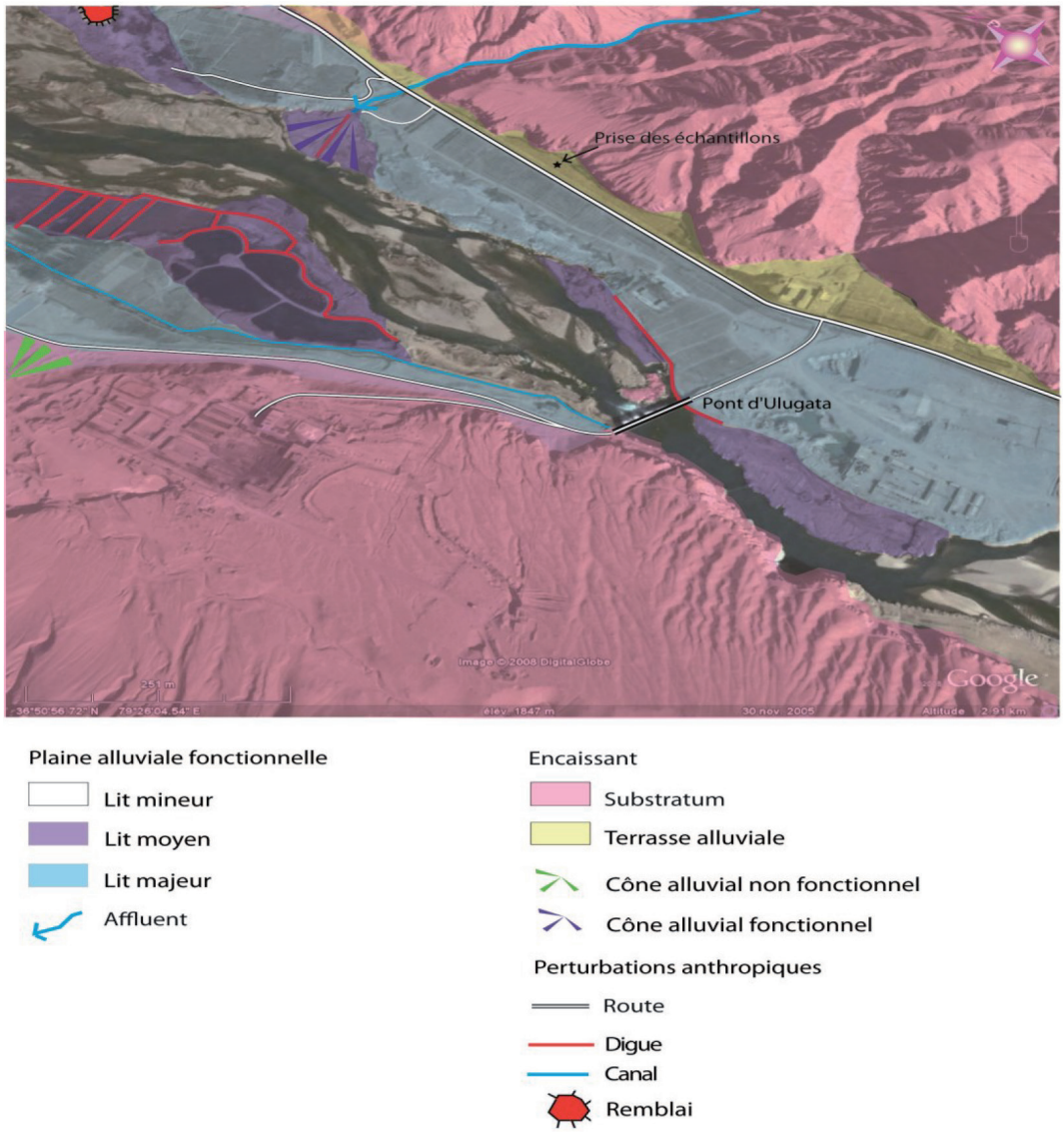


Fig. 5. — Carte hydrogéomorphologique de la vallée du Karakash au pont d'Ulugata. Source : Wulamu (2010), sur image Google Earth.

des enquêtes orales auprès de la population locale et en utilisant le rapport du bureau d'hydrologie de Hotan chaque fois que cela a été possible (Wulamu, 2010). Outre des observations ponctuelles de l'une d'entre nous (Wulamu) en 2005, 2006 et 2007, une mission commune de trois semaines a été réalisée en septembre 2008, au cours de laquelle les coordonnées géographiques et les altitudes ont été mesurées avec un GPS Garmin Map 60 CS. Par rapport aux conditions offertes par le travail de terrain en France (Delorme-Laurent, 2007), plusieurs difficultés supplémentaires sont apparues. Certes, comme dans le Midi méditerranéen français, la présence de cultures à fort recouvrement et les ombres portées des nombreuses haies ont obligé à de longues vérifications, mais la principale difficulté a été l'utilisation des images satellitaires pour le repérage sur le terrain, qui a constitué une perte de temps considérable. Cependant l'observation de la végétation est parfois plus facile et plus utile qu'en domaine méditerranéen puisqu'à de rares exceptions près, cette végétation est absente de l'encaissant et, en dehors des zones irriguées, se limite à une steppe très claire.

17.4.3 Les prélèvements et les analyses sédimentologiques

Le but des analyses sédimentologiques est de caractériser les dynamiques de mise en place des dépôts afin de préciser s'il s'agit bien d'apports alluviaux et non d'apports éoliens ou de versant. Du fait de la variation des processus de transports d'amont en aval, chaque unité morphologique est constituée de dépôts différents qui permettent de la caractériser. Nous avons utilisé cette méthode classique pour déterminer puis caractériser les unités de la plaine alluviale fonctionnelle. Les analyses granulométriques des échantillons ont été réalisées par l'une d'entre nous (Wulamu), au CEREGE à Aix-en-Provence, selon le protocole de ce laboratoire : premièrement, un tamisage humide a été effectué pour séparer les trois fractions que sont les plus fines (< 0,05 mm), les sables (entre 0,05 et 2 mm) et le ballast (> 2 mm), ensuite un tamisage à sec a été effectué sur les sables et sur le ballast, quand cela s'est révélé nécessaire, afin de déterminer leur granulométrie (Wulamu, 2010).

Photo. 1. — Le pont d'Ulugata. Le lit mineur où affleure la roche en place et la rive droite endiguée [cliché : Wulamu, 2008].

Photo. 2. — Le lit majeur irrigué à 1,5 km en aval du pont d'Ulugata [cliché : Ballais, 2008].

17.5 La cartographie des zones inondables par la méthode hydrogéomorphologique

Le linéaire de la rivière cartographiée représente environ 150 km. En combinant la topographie et l'occupation humaine, donc en termes de risques, nous avons découpé en trois zones : montagne-colline (16 cartes échelonnées entre 1 850 m et 1 480 m), piémont-oasis (30 cartes aux environs de 1 300 m) et le désert (10 cartes aux environs de 1 250 m) (fig. 6). Pour chacune de ces parties de la vallée, nous présenterons ici un exemple de carte qui permet d'appréhender sa dynamique et de délimiter les zones inondables et de délimiter les zones inondables.

17.5.1 Cartographie de la zone montagne-colline

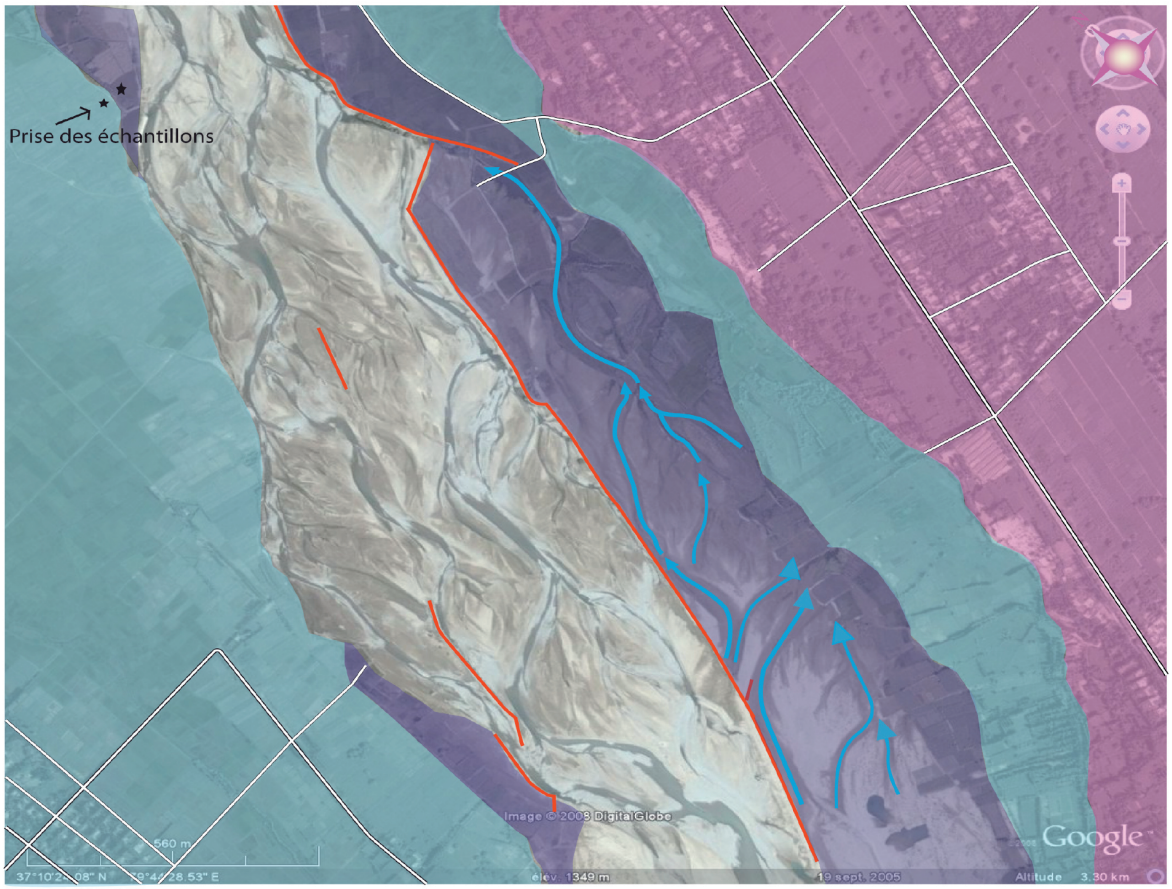
Le secteur représenté (fig. 5) se situe tout en amont du terrain d'étude. L'étagement des trois lits est particulièrement net. Le lit mineur ondule en tressage constitué de galets, de graviers et de blocs arrondis relevant vers l'aval. Les chenaux d'écoulement sont séparés par des affleurements du substratum sur lesquels poussent des tamaris et des herbacées. Vers l'aval, on observe le passage progressif du lit mineur rocheux au lit mineur entièrement modelé dans les alluvions. Le lit moyen présent sur les deux rives est discontinu et étroit, mais étonnamment plat, comme plus à l'aval (Ballais *et al.,* 2011, p. 25). Constitué de galets et de graviers dans une matrice sableuse abondante, il domine le lit mineur par un talus haut d'environ 3 m. Sa couverture végétale est également constituée d'herbacées et de tamaris (photo 1). La confluence de petits torrents est souvent marquée par un cône alluvial fonctionnel (Coque *et al.*, 1991). On observe parfois des chenaux.

Le lit majeur, avec sa topographie horizontale, domine le lit mineur et/ou le lit moyen par un talus subvertical irrégulier haut de plusieurs mètres. Il est bien développé et se compose principalement de sables accumulés sur une épaisseur de plus de 1 m. Des cultures irriguées (photo 2) et des plantations de peupliers (*Populus euphratica)* le colonisent. L'encaissant est constitué presqu'exclusivement par le substratum rocheux en rive gauche, alors qu'une étroite terrasse sableuse se maintient en rive droite, 8 à 10 m au-dessus du lit majeur. Vers l'aval, des cônes alluviaux apparaissent, organisés de une à trois générations. À la différence des formations meubles quaternaires couvertes par une steppe buissonnante très claire, le substratum rocheux est totalement dépourvu de végétation, mais porte des placages de dépôts éoliens fossiles. Dans cette zone, les trois lits sont bien développés et la plaine alluviale fonctionnelle dépasse 1 km de large. La rive droite est plus élevée que la rive gauche, cette rive est très peu occupée par les hommes, les seuls enjeux sont une route et surtout un très gros remblai accumulé en plein lit moyen. En revanche, la rive gauche est habitée et le lit majeur est ici irrigué, cultivé et pâturé. Les graviers du lit moyen sont exploités. En conséquence, le risque inondation est plus grave en rive gauche qu'en rive droite.

Pour cette zone, l'enquête orale montre qu'avant la construction du barrage d'Ulugata, les inondations étaient fréquentes, voire annuelles et les dégâts importants. Depuis la construction du barrage, les inondations sont moins fréquentes et les dégâts sont limités (cf. ci-dessus).

17.5.2 Cartographie de la zone piémont-oasis

Dans sa partie amont, jusqu'à Langru (fig. 6), cette zone présente encore parfois des caractéristiques montagnardes avec le développement de glacis et, surtout, de grands cônes (voir photo 1) issus des torrents affluents, cônes alluviaux non fonctionnels posés sur la terrasse alluviale principale (Ballais *et al.*, 2011, p. 51) ou cônes alluviaux fonctionnels au moment des rares orages qui se raccordent au lit moyen (Wulamu, 2010, p. 34). Le lit majeur est alors réduit ou absent, tandis que le lit moyen s'observe fréquemment. Cela constitue une situation rare, qui n'avait jamais été observée auparavant, car c'est en général le lit moyen qui disparaît (cf. ci-dessous) et pas le lit majeur. Toutefois, dans le cas le plus fréquent, une terrasse alluviale modelée par des paléochenaux encadre un lit majeur bien développé, alors que le lit moyen est absent ou réduit, et ce lit majeur, totalement cultivé, peut être rejeté d'un seul côté du lit mineur (Ballais *et al.*, 2011, p. 134). En somme, le lit majeur est bien développé quand la dynamique longitudinale est prédominante (Ballais *et al.*, 2009). Grâce au grand système d'irrigation mis en place au débouché des Kunlun, de grands canaux irriguent le cône fossile et certaines terrasses alluviales. Vers l'aval,



Plaine alluviale fonctionnelle
- Lit mineur
- Lit moyen
- Lit majeur
- Chenaux

Encaissant
- Substratum

Perturbations anthropiques
- Digue
- Route

Fig. 6. — Carte hydrogéomorphologique de la vallée du Karakash dans les districts de Karakash et Hotan. Source : Wulamu (2010), sur image Google Earth.

les affluents disparaissent et le réseau hydrographique se réduit à une branche unique (fig. 4).

Plus à l'aval (fig. 6), les caractéristiques de la plaine alluviale présentent des similitudes, mais aussi des différences avec la zone de montagne-colline. Le lit mineur est large, constitué encore de galets et de graviers, avec aussi maintenant du sable, et il évolue progressivement du tressage à l'anastomose avec des îles permanentes.

Le nombre de ces îles se réduit, mais elles restent constituées de deux ensembles distincts dont le plus élevé se rattache au lit moyen par ses caractéristiques topographiques, sédimentologiques et sa végétation herbacée exploitée en pâturages pour les chèvres et les moutons. Il est parfois divisé en casiers par des digues de gros galets entre lesquelles un dépôt fin s'est accumulé soit par limonage, soit par apport par les agriculteurs, et est cultivé en coton. Les galets disparaîssent progressivement au profit des sables à l'aval du pont du Karakash.

Le lit mineur est parfois dominé par le lit moyen par un talus subvertical d'un à deux mètres sur la rive gauche, tandis que sur la rive droite son extension est limitée par une digue continue qui s'appuie sur le talus naturel. Cependant le style en tresses libres sans séparation nette avec le lit moyen-majeur existe également et le lit moyen comporte de nombreux chenaux de crue. Des échantillons ont été prélevés dans le lit moyen et dans le lit majeur sur la rive gauche (coordonnées GPS : N 37° 11' 19", E 79° 44' 34", altitude 1 331 m) . L'analyse de l'échantillon du lit moyen montre la présence d'un dépôt de matériaux limono-argileux (82,9 %) et sableux (16,7 %). Le sédiment est bien trié (So = 0,93). C'est un dépôt d'atterrissement fluviatile, avec une énergie d'écoulement très faible. Progressivement, vers l'aval, le lit moyen ressemble de plus en plus au lit majeur : il est devenu très plat, constitué d'une formation fine, couvert d'une strate à peu près continue de graminées avec quelques arbres quand il n'est pas cultivé en rizières. Son altitude

relative par rapport au lit mineur ne dépasse plus un à deux mètres. Cette évolution doit être reliée à la mise en service du barrage d'Ulugata, en 2000. En effet, depuis, le débit instantané est limité à 890 m^3/s, alors qu'il atteignait précédemment jusqu'à 1 390 m^3/s (Wulamu, 2010, p. 270). D'après les observations de terrain et l'enquête orale, ce débit de 890 m^3/s est suffisant pour inonder le lit moyen, mais insuffisant pour inonder le lit majeur (Wulamu, 2010, p. 294). En conséquence, la dynamique du cours d'eau tend à se réajuster sur ces nouvelles valeurs du débit, le lit majeur n'évolue plus mais le lit moyen devient, en moins de dix ans, un lit majeur, avec ses caractéristiques topographiques et sédimentologiques.

17.5.3 Cartographie de la zone désertique et problème des diffluences

Dans la zone désertique (fig. 7), le lit mineur étroit est à sec et n'a que quelques flaques. Il présente des dilatations et des étranglements avec des chenaux multiples peu profonds à sables thixotropiques et aux berges en pente douce, séparés par des bancs sableux modelés par des *ripple-marks* ou des rides éoliennes, style intermédiaire entre le tressage et l'anabranche. Il est formé de sables limoneux. Le lit moyen a disparu, confondu avec le lit majeur qui lui-même tend à se confondre avec le cône fossile. Le lit majeur domine le lit mineur par un talus vertical haut de 1,5 m. Très vaste, il est couvert par une prairie de graminées avec des tamaris (*Tamarix ramosissima*) et des roseaux, mais il peut être tronçonné par des accumulations dunaires (fig. 7). Il présente un réseau complexe de larges chenaux et paléochenaux très entaillés, humides, à berges verticales, suspendus de plusieurs décimètres au-dessus du lit mineur, de sorte qu'en termes de risques, on peut les placer dans le lit moyen. Les chenaux, au tracé méandriforme déjà remarqué par Coque *et al.* (1991), peuvent s'écarter très loin du lit mineur, au point de former des diffluences. Parfois très profonds, ils peuvent rester en eau toute l'année, constituant des cônes (fig. 7).

Le substratum n'apparaît plus en rive gauche, mais le cône fossile subsiste en rive droite où il domine le lit majeur d'un talus de un à deux mètres seulement. Il porte la même couverture végétale que ce lit majeur, mais avec une densité de peupliers beaucoup plus forte. Les paléochenaux, plus discontinus, moins encaissés, l'entaillent et disparaissent parfois sous les dunes, qui le recouvrent et constituent ainsi un encaissant mobile très particulier, avec de beaux barkanoïdes orientés NO-SE et des rebdous à tamaris hauts de plusieurs mètres. Des coupes permettent de bien observer le passage des dépôts des paléochenaux, modelés en rides de courant, aux stratifications obliques des dunes, à des altitudes égales ou à peine supérieures à celle du lit majeur. Un échantillon a été prélevé dans le talus (coordonnées GPS : N 37° 42' 10", E 80° 10' 59") qui sépare un chenal du lit majeur à l'altitude de 1 251 m (photo 6). Les résultats de l'analyse granulométrique sont les suivants : 57 % de sables (dont 94,9 % de sables fins) et 43 % de limons et argiles. Comme pour tous les dépôts précédents, l'asymétrie reste négative, caractéristique des lits majeurs (Delorme-Laurent, 2007, p. 173 et suivantes). Rien, dans cette analyse, ne permet d'affirmer une contribution significative des sables éoliens à ces dépôts, en accord avec l'absence de « *source bordering dunes* » et malgré le blocage immédiat par la végétation du lit majeur. Néanmoins, dans le détail de la cartographie, des problèmes spécifiques se posent, dont il faut tenir compte. Il s'agit de certains apports éoliens, postérieurs à une grande inondation, et qui peuvent masquer la limite entre le lit majeur et l'encaissant, ce qui peut introduire une incertitude et des difficultés de cartographie de vastes zones d'épandage. C'est dans cette zone que l'adaptation de la méthode hydrogéomorphologique est la plus nécessaire, mais les principes de cette méthode n'y sont pas remis en cause. Contrairement à d'autres cours d'eau désertiques, le Karakash ne présente pas d'anabranche comme la Cooper Creek australienne (Nanson et Knighton, 1996), ni d'épandage-*maader* comme, par exemple, l'oued Melah (Chott Rharsa, Tunisie) : la distinction entre lit mineur et lit majeur reste toujours nette et on n'observe pas de chenaux libres à fort déplacement latéral. Il ne s'agit donc pas non plus d'un vrai « bouchon dunaire » comme sur l'oued Makhrerouga dans le sud tunisien, par exemple, puisque les grandes crues vont rejoindre non seulement le Yurungkash mais aussi le Tarim (Coque *et al.,* 1991).

Dans cette zone désertique, et à la différence partielle des deux zones d'amont, les inondations sont toujours bienvenues pour la mise en culture car, encore plus qu'au sud, l'irrigation est absolument nécessaire. Il s'agit d'ailleurs d'une zone pionnière avec des villages très récents situés hors de la zone inondable et qui souffrent plus du manque d'eau que des inondations.

Conclusion

Dans les deux parties amont, le cours d'eau est pérenne et l'on retrouve donc les trois lits habituels des cours d'eau à régime contrasté, même si le climat est désertique. En revanche, le lit moyen disparaît à l'aval, où le cours d'eau devient saisonnièrement intermittent et où le niveau de base est variable du fait de l'évolution des dunes.

Des trois zones, la montagne-colline, le piémont-oasis et le désert, c'est dans la zone du piémont-oasis que le risque d'inondation est le plus élevé car, malgré l'endiguement, c'est la partie où le débit de crue de la rivière, encore important, cause le plus de dégâts dans un territoire densément peuplé, fortement aménagé et mis en valeur.

Dans le bassin versant du Karakash, les aménagements hydrauliques ont commencé en 1950 et les travaux les plus importants ont été terminés en 2000. L'enquête orale auprès des populations riveraines a montré que depuis 2000, c'est-à-dire depuis la mise en service du barrage hydroélectrique d'Ulugata, le lit majeur n'a pas été inondé. La régulation du débit du cours d'eau a permis d'écrêter les crues, en limitant leur débit à 890 m^3/s (Wulamu, 2010, p. 270), et donc d'éviter des dégâts importants. Cet aménagement, s'il ne supprime pas l'aléa, modifie le fonctionnement de la plaine alluviale et diminue la vulnérabilité des populations et de leurs activités. Faute de statistiques aussi précises que pour le Keriya, plus à l'est (Gentelle, 1992), il n'est pas possible de mettre en évidence le rôle d'une éventuelle diminution de la propagation des crues dans le Takla-Makan. Mais cette protection est limitée, alors que les aménagements ont pour conséquence le développement socio-économique. L'augmentation importante de la population et la multiplication des activités entraînent un accroissement de la vulnérabilité, surtout que les hommes ont tendance à s'installer de plus en plus près de la rivière.

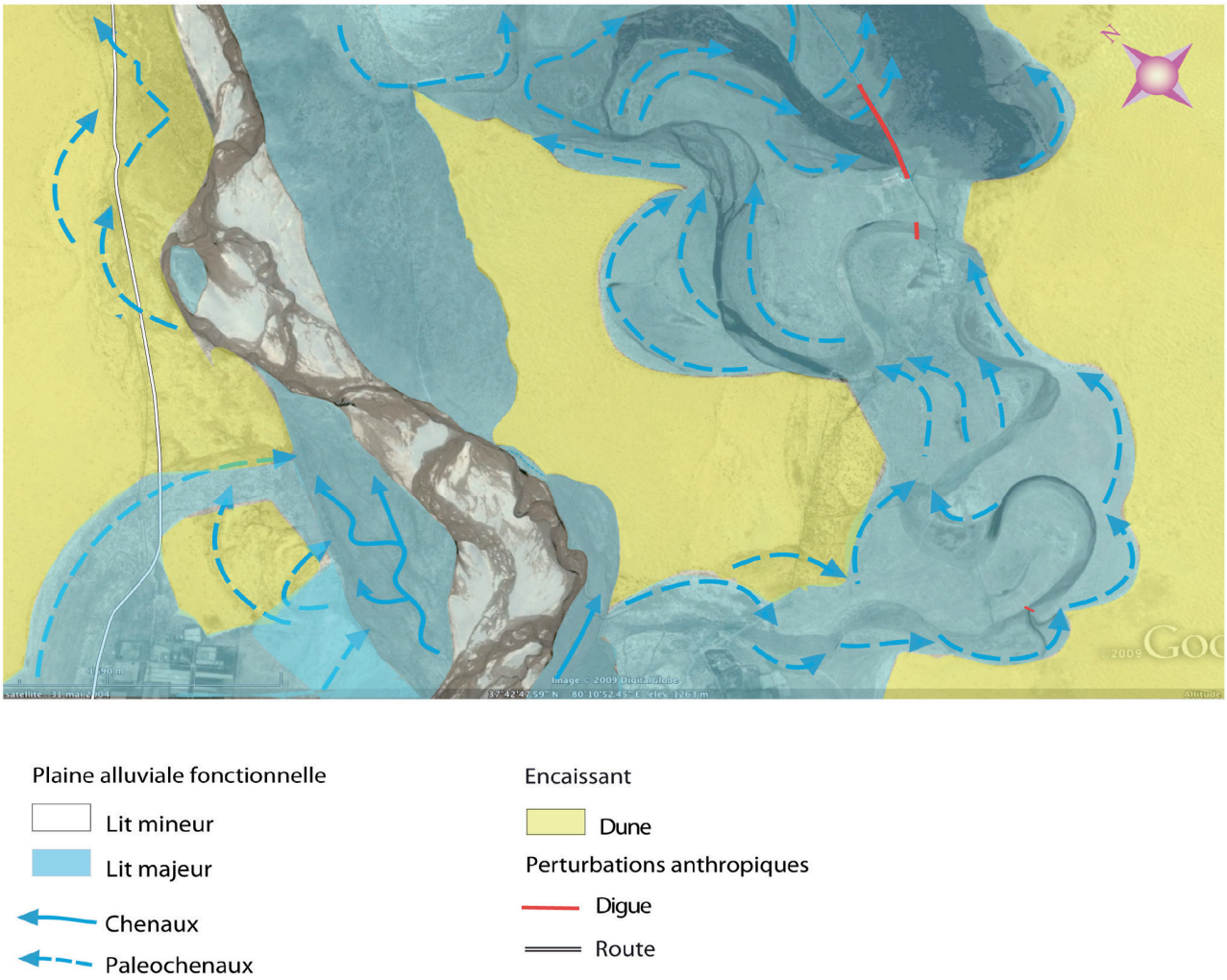


Fig. 7. — Carte hydrogéomorphologique de la vallée du Karakash à l'aval de Kawak. Source : Wulamu (2010), sur image Google Earth.

Ces aménagements sont récents et la culture du risque reste présente pour la population locale. Durant les mois d'avril, mai et juin, avant la période des crues et pendant les crues, chaque famille participe à la lutte contre les inondations pour protéger les terres cultivées. C'est une obligation collective. La population ramasse des galets, des branchages, du sable et divers matériaux de récupération pour bâtir ou consolider les digues. Pour la fabrication des gabions, l'État fournit les filets de fer. Tout est fait par la population paysanne, manuellement et gratuitement durant trois mois, presque tous les ans, car remblais et digues sont fréquemment emportés par les inondations. La population a le sentiment d'efforts inutiles, car ces travaux doivent être refaits tous les ans, en raison de leur fragilité faute de moyens techniques et financiers suffisants.

Face à l'aggravation récente de la vulnérabilité aucun plan de prévision, de prévention et de gestion des risques n'a encore été établi.

La cartographie hydrogéomorphologique, enrichie par des enquêtes auprès des populations, fournit des informations sur la dynamique de la rivière qui permettent de délimiter les zones inondables. Elle constitue en cela un outil d'aide à la décision, car elle apporte des éléments pour déterminer la vulnérabilité au risque et pour apprécier ce risque en fonction de l'aléa. Mais elle doit être complétée par la cartographie des activités humaines, la superposition des deux cartographies débouchant sur l'appréhension de la vulnérabilité, à partir de laquelle les choix de gestion du risque peuvent être faits. L'enjeu est alors de parvenir à une gestion équilibrée entre développement et préservation des ressources naturelles, ce qui est particulièrement délicat dans un territoire aride où les équilibres sont particulièrement fragiles et les ressources déjà surexploitées. Dans cette perspective, les fonctions écologiques des plaines alluviales doivent être prises en compte, alors qu'elles sont souvent oubliées au bénéfice de leurs fonctions économiques.

Les informations disponibles sont suffisantes pour réaliser une planification spatiale en vue de réduire et/ou de prévenir le risque d'inondation dans la partie piémont-oasis de la vallée du Karakash, la plus peuplée et la mieux mise en valeur, donc la plus vulnérable. La méthode pourrait être transposée aux autres bassins versants du Xinjiang (Wulamu, 2010).

Bibliographie

Abdukadir K., *Rapport sur les inondations du Xinjiang*. Rapport du Service régional d'hydrologie, non publié, en chinois, 2003, 8 p.

Avouac J.P., Peltzer G., « Active tectonics in Southern Xinjiang, China: analysis of terrace riser and normal fault scarp degradation along the Hotan-Qira fault system », *Journal of Geophysical Research*, vol. 98, nº B12, 1993, p. 21773-21807.

Ballais J.L., Chave S., Delorme-Laurent V., Esposito C., « Hydrogéomorphologie et inondabilité », *Géographie physique et Quaternaire*, vol. 61, nº 1, 2009, p. 75-84.

Ballais J.L., Chave S., Dupont N., Masson É., Penven M.J., « La méthode hydrogéomorphologique de détermination des zones inondables », *Physio-Géo*, collection « Ouvrages », 2011, 165 p., en ligne.

Bravard J.P. & Petit F., *Les cours d'eau : dynamique du système fluvial.* Éd. Armand Colin, Paris, 1997, 222 p.

Bureau d'hydrologie du hotan, *L'analyse de la ressource en eau et hydrologie de la rivière de Karakash.* Rapport du Service régional d'hydrologie, non publié, 2001, 130 p.

Chave S., « Pertinence de la cartographie hydrogéomorphologique dans l'approche des inondations rares à exceptionnelles : exemple de sept bassins fluviaux dans les Corbières et le Minervois », *Géomorphologie : Relief, Processus, Environnement*, nº 4, 2002, p. 297-306.

Coque R., Gentelle P. & Coque-Delhuille B., « Observations géomorphologiques préliminaires et désertification dans le piémont nord de la chaîne des Kunlun (région de Hétian et Yutian) et dans la marge sud du désert du Taklamakan (Chine) », *Revue de Géomorphologie Dynamique*, nº 1, 1991, p. 1-27.

Delorme-Laurent V., *Contribution à la méthode hydrogéomorphologique de détermination des zones inondables*, thèse de l'université de Provence, 2007, 417 + 394 p.

Delorme-Laurent V., Chave S., Esposito C., Ballais J.L., « Quatre lits pour un cours d'eau ? L'émergence du lit moyen et du lit majeur exceptionnel », Actes du colloque *Au fil de l'eau* (Clermont Ferrand, 2009), 2013, p. 243-266.

Dong H., Dong G., Ding G., « Appréciation des risques d'inondation par le SIG », *Le peuple de la rivière de Changjiang (Yangtsé)*, Wu Han, vol. 34, nº 6, 2003, p. 49-51, en chinois.

Esposito C., *Crue du 15 juin 2010 dans le Var. Comparaison des limites de zones inondables connues avec les limites des zones inondées*. CÉTÉ Méditerranée, Rapport, Aix-en-Provence, 2012, 129 p.

Esposito C., Chave S., Ballais J.L., Delorme-Laurent V., « Hydrological mapping and recent floods in France », *Actes de la Ninth international conference on the Mediterranean coastal environment* (Sochi, Russie), 2009, p. 1053-1064.

Gentelle P., « Une géographie du mouvement : le désert du Taklamakan et ses environs comme modèle », *Annales de Géographie*, vol. 101, nº 567, 1992, p. 553-594.

Mamtimin P., Abliz A., Alim Y. & Imin I., « Analyse des relations hydriques entre débits et précipitations au Karakash », *Géographie des zones arides,* Xinjiang, Urumqi, nº 1,2005, p. 57-62, en ouïgour.

Masson M., Garry G. & Ballais J.L., *Cartographie des zones inondables. Approche hydrogéomorphologique.* Éditions Villes et Territoires, Paris, 1996, 100 p.

Nanson G.C. & Knighton A.D., « Anabranching rivers : their cause, character and classification », *Earth Surface Processes and Landforms*, nº 21, 1996, p. 217-239.

Pairault T., « Les régions chinoises : industrialisation inégale et développements divergents », *Revue Tiers-Monde,* vol. 37, nº 147, 1996, p. 548-568.

Wulamu M., *Les risques d'inondation dans la région du Xinjiang (Chine) : cas du Karakash-Darya,* thèse de l'Université de Provence, 2010, 345 p.

Yang Jingchun, Li Youli, *Géomorphologie,* publié à Pékin, 2005, 21 p., en chinois.

Ye M.Q., Li J.F. & Chen Y.N., *Recherche sur les catastrophes naturelles dans le Xinjiang,* publié à Pékin, 1994, 300 p., en chinois.

Zhang Lei, « L'inondation », *Le quotidien du Xinjiang*, 17 août 2005, en chinois.

18 Modélisation de la dispersion atmosphérique par une approche combinée par automate cellulaire et réseau de neurones

Pierre Lauret[1], Frédéric Heymes[1], Laurent Aprin[1], Anne Johannet[1] & Gilles Dusserre[1]

1. *Insitut des Sciences des Risques,*
2. *Laboratoire de Génie de l'Environnement industriel — École des Mines d'Alès, 6 avenue de Clavières, 30100 Alès.*

`pierre.lauret@mines-ales.fr`

Résumé. — Les modèles existants de simulation de la dispersion atmosphérique ne permettent pas de prévisions rapides et précises de l'évolution d'une substance dans un environnement industriel complexe. Ces critères sont néanmoins primordiaux pour la prise en compte des dangers sur un territoire lors de la gestion de crise. Une méthode basée sur la combinaison des automates cellulaires avec des règles de transition de type réseau de neurones afin de modéliser la dispersion atmosphérique de méthane en 2 dimensions est détaillée. Une base d'apprentissage de simulations numériques CFD est utilisée. Le nombre de Courant CFL est conservé et induit des conditions sur le maillage et lors de l'utilisation de l'automate cellulaire. Les équations de Navier-Stokes sont discrétisées afin de récupérer des variables d'entrée adaptées pour le réseau de neurones. L'apprentissage du réseau de neurones est effectué en termes d'échantillonnage de la base d'exemple, d'architecture et d'initialisation du réseau. Des simulations non-apprises sont comparées à la modélisation CA-ANN. Le modèle est évalué en termes de précision, de stabilité et de rapidité de calcul.

Mots-clés. — Dispersion atmosphérique, réseau de neurones artificiels, automates cellulaires, sites industriels, mécanique des fluides numériques.

Title. — *Atmospheric Dispersion Modeling using Cellular Automata with a Neural Network Transition Rule.*

Abstract. — *Existing atmospheric dispersion models does not allow fast and accurate predictions of a substance evolution in a complex industrial environment. A method based on cellular automata with a neural network transition rule to model the atmospheric dispersion of methane in two dimensions is detailed. A CFD simulations database is created. The Courant number (CFL) is maintained and induced conditions on the mesh when using the cellular automaton. The Navier-Stokes equations are discretized to create input variables suitable for the neural network. The learning process is done through sampling of the example database, architecture and network initialization. Non-learned simulations are compared with the CA-ANN modeling. The model is evaluated in terms of accuracy, stability and speed of calculation.*

Keywords. — *Atmospheric Dispersion, Artificial Neural Network, Cellular Automata, Industrial Facilities, Fluid Dynamics.*

18.1 Introduction

18.1.1 Dispersion atmosphérique sur un site industriel

Des accidents majeurs

Les accidents industriels impliquant une dispersion atmosphérique de produits inflammables ou toxiques peuvent avoir des conséquences extrêmement importantes. La catastrophe qui a eu lieu à Bhopal en Inde, est un exemple de l'impact de la dispersion d'un gaz toxique à partir d'un stockage industriel. L'usine d'engrais d'Union Carbide a dispersé 40 tonnes d'isocyanate de méthyle ou MIC en 90 minutes suite à une opération de nettoyage, à partir du site jusque dans la ville de Bhopal. Sharan et Gopalakrishnan (1997) insistent sur l'impact de la topographie et des conditions atmosphériques particulières sur l'évolution du nuage. La présence d'un lac (et donc de la brise associée) dans le champ proche de l'usine a influencé directement la trajectoire du nuage vers l'aire urbaine.

Dans le cas d'émissions de gaz inflammable, la durée de dispersion est généralement plus faible car le nuage est susceptible de s'enflammer ou exploser dès qu'une source d'ignition est rencontrée. Par conséquence, le comportement du nuage immédiatement après le début du rejet est une information majeure pour évaluer les possibles conséquences dans le champ proche. Brambilla (2009) confirme la nécessité de considérer les environnements complexes pour la modélisation de tels scénarios. L'accident de train de Viareggio (Italie) illustre ce besoin. Il s'agit d'une fuite de Gaz de Pétrole Liquéfié (GPL) sur un wagon suite au déraillement d'un train en zone urbaine. Le nuage s'est dispersé de manière très spécifique à cause de la configuration des rues à proximité de l'accident.

L'étude de l'environnement proche d'une source apparait donc comme déterminant dans la prévision de la dispersion du nuage.

Un environnement spécifique

Un site industriel est composé de différentes zones à l'encombrement varié et de formes différentes. On distingue notamment les zones dites administratives qui sont généralement composées de bâtiments cubiques/parallélépipédiques fermés alors que les bâtiments procédés sont encombrés mais non imperméables. Les zones de stockage de matières constituent un troisième point remarquable de par les formes rencontrées ainsi que par le danger représenté par la présence

de grande quantité de matières dangereuses. On s'intéresse ici particulièrement à ces dernières zones et à la dispersion atmosphérique de substances autour de ce type d'obstacles. Effectivement, selon les zones impactées, l'environnement géographique peut induire soit une probabilité importante d'effet domino, soit un impact important sur les enjeux se situant sur le territoire.

18.1.2 Modèles existants

Il existe une grande variété de modèles de dispersion atmosphérique. Selon l'objectif à atteindre, ceux-ci sont plus ou moins adaptés à la situation à modéliser. Les modèles les plus classiques et les plus employés sont des modèles semi-empiriques (gaussien, intégral). La littérature est abondante dans leur description et n'est pas rappelée dans ce document.

Modèles de mécanique numérique des fluides

Les modèles de la mécanique numérique des fluides (Computational Fluid Dynamics ou CFD) résolvent les équations de Navier-Stokes. Étant donné que ces équations sont non-linéaires, une solution analytique n'est pas envisageable. Des bilans de matière et de vitesses sont établis à travers un maillage. Des conditions aux limites du domaine et une initialisation permettent de caractériser le scenario. Des équations de fermeture sont nécessaires pour la résolution de la turbulence lorsque celle-ci n'est pas résolue directement. Le modèle le plus connu est fourni par Launder et Spalding (1974). L'énergie cinétique turbulente k et son taux de dissipation ε sont introduits afin de fermer le système. Ce genre de modèle donne des résultats très précis sur la turbulence. Plus les mailles sont fines et plus la simulation est précise. En parallèle, le temps de calcul augmente rapidement avec les dimensions de la zone d'étude et la présence d'obstacles. De plus, le choix d'un modèle de turbulence nécessite une expertise. Des essais sont dans de nombreux cas nécessaires pour calibrer les coefficients utilisés. On note également l'existence de modèles plus complets encore à l'état de recherche tels que les modèles de simulations des grandes échelles (Large Eddy Simulation ou LES) ou de simulation numérique directe (Direct Numerical Simulation ou DNS). Pour résumer, la modélisation d'un écoulement et la dispersion dans un environnement complexe est une tâche difficile qui demande une expertise spécifique, une puissance informatique et un temps de calcul important. Ceci est rarement compatible avec les besoins opérationnels.

18.1.3 Modèles alternatifs

Des recherches ont été menées afin de construire des modèles permettant de réduire certaines des limitations mises en lumière précédemment.

SLAM

Le travail de Vendel *et al.* (2011) sur le suivi des émissions de polluants et de réponse aux situations d'urgence sur un site industriel, la raffinerie de Feyzin à Lyon (France) est un exemple de modèle alternatif. Vendel souligne que 99 % du temps de calcul d'un code CFD est dédié au calcul du champ de vent. Le pourcent restant est relatif au modèle de dispersion. Afin de réduire le temps de calcul de ces 99 %, et avant utilisation opérationnelle, il suggère d'utiliser des simulations CFD précises et détaillées afin de créer une base de données de champ de vent. Durant la phase opérationnelle, la base de données permet une interpolation correspondant aux conditions météorologiques enregistrée sur le site. Ensuite, un modèle de dispersion lagrangien est utilisé pour le calcul de l'évolution de la concentration en polluant. En utilisant cette méthode, le temps de calcul est divisé par 40. Néanmoins, l'inconvénient majeur de ce modèle est l'adaptation à un site unique dû à la nécessité de disposer d'une base de données de champ de vent préexistante sur le site.

Utilisant les réseaux de neurones

Les réseaux de neurones sont déjà utilisés en modélisation de la dispersion atmosphérique. Podnar (2002) les utilise pour la modélisation du transport et de la dispersion de traceurs en terrain complexe. Une base d'apprentissage de données provenant de différents capteurs distribués spatialement pour prévoir la concentration de traceurs à travers un environnement complexe est créée. Dans ce cas là, la variable de sortie est la concentration à un point spécifique. Ce travail se concentre sur les pollutions chroniques.

Cao (2007) donne un exemple de l'utilisation des réseaux de neurones pour modéliser l'évolution d'un nuage d'aérosols à partir de sources transitoires. La base d'apprentissage a été créée spécialement pour l'étude. Celle-ci se concentre sur la dispersion relative à partir du centre du nuage. Le modèle créé donne des résultats meilleurs que les modèles gaussiens sur ce type de dispersion. Malgré de bons résultats, il apparait difficile d'appliquer ce modèle à une situation réelle, notamment à cause de la difficulté de collecter les données d'entrée du réseau de neurones. Cao (2007) s'est également intéressé à l'amélioration de la performance des modèles gaussiens. Dans cet objectif, les réseaux de neurones sont utilisés pour la détermination des coefficients de dispersion des modèles gaussiens. Différents paramètres (vitesse moyenne du vent, rayonnements reçus par le nuage (solaire et tellurique), température, humidité et pressions) influençant la détermination de ces coefficients ont été utilisés comme entrées du réseau de neurones. Encore une fois, les conclusions sont positives avec une meilleure prévision de la dispersion atmosphérique qu'en utilisant les coefficients classiques. Dans ce cas, les réseaux de neurones ne sont pas utilisés comme une boite noire mais plutôt comme une boîte grise depuis laquelle la physique peut être en partie extraite. Pelliccioni et Tirabassi (2006) ont également utilisé les réseaux de neurones pour améliorer les résultats des modèles gaussiens dans la perspective de création d'un modèle intégré pour la simulation des situations complexes. Pour cela, ils ont inclus les résultats d'un modèle gaussien en tant qu'une des entrées d'un réseau de neurones. De cette façon, le réseau de neurones agit comme un filtre pour mieux s'accorder à la réalité par l'utilisation de variables complémentaires concernant la turbulence atmosphérique et la distance du récepteur par rapport à la source.

Utilisant les automates cellulaires

Marin (2000) se base sur les travaux de Guariso et Maniezzo (1992), et identifie les différents phénomènes impliqués dans la dispersion atmosphérique chronique de polluants afin de déterminer les règles de transition pour son automate cellulaire. Les paramètres sont calibrés en utilisant des mesures de trois complexes pétrochimiques. Les résultats montrent une représentation qualitative correcte du comportement du rejet. Les résultats quantitatifs dépendent fortement de l'étalonnage des paramètres.

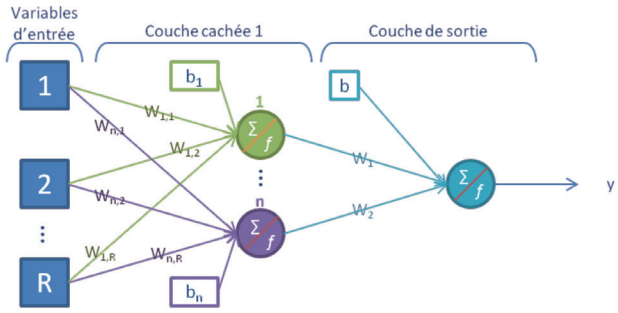


Fig. 1. — Schéma d'un ANN.

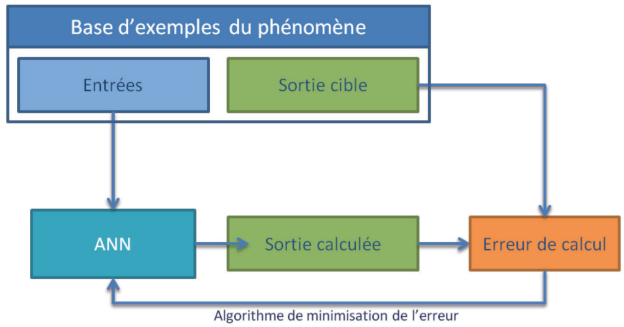


Fig. 2. — Principe de l'apprentissage d'un ANN.

Sarkar et Abbasi (2006) adoptent une méthode basée sur la simplification de l'équation d'advection-diffusion (ADE) sur un maillage d'automates cellulaires. Il développe un modèle pour évaluer les conséquences d'une perte de confinement sur un site industriel, en tenant compte de la configuration spécifique à ce genre de complexe (stockage, bâtiments, type de zone). La dispersion atmosphérique est modélisée comme un phénomène évoluant de manière autonome. Comme les modèles issus de la CFD, le domaine est maillé. Chaque cellule est influencée par les caractéristiques de son voisinage, notamment la taille, la nature et la position des éléments qui se trouvent à proximité du lieu de l'accident. Les règles de transition se fondent sur la simplification de l'ADE. Aucune convergence n'est requise ce qui rend ce modèle potentiellement plus rapide que les modèles CFD. Mais malheureusement, aucune comparaison n'a été faite par rapport à des essais réels ou des simulations numériques afin de confronter modèles et données expérimentales.

18.2 Outils issus de l'intelligence artificielle

18.2.1 Les réseaux de neurones artificiels

Le développement des réseaux de neurones artificiels (Artificial Neural Networks ou ANN) provient de l'idée initiale d'imiter la structure et le comportement du cerveau humain (Minsky, 1969). Un ANN est composé de plusieurs entités mathématiques appelées neurones. Ceux-ci sont reliés entre eux pour former un réseau. Les ANN sont de puissants outils de modélisation par apprentissage statistique de phénomènes non-linéaires. Ils sont généralement utilisés lorsque le phénomène à modéliser n'est pas complètement connu. Les deux propriétés essentielles sont l'approximation universelle (Hornik, Stinchcombe, & White, 1989) et la parcimonie (Barron, 1993). Grâce à ces propriétés, les ANN sont capables de généraliser efficacement le comportement du phénomène sur des cas non rencontrés. Les ANN peuvent être utilisés en classification, par exemple pour reconnaître un texte (Dreyfus, 2004). Ils peuvent également permettre la prévision de phénomènes physiques, générant des modèles performants (Siou *et al.*, 2011 & Toukourou *et al.*, 2010). Une base de données du phénomène à simuler est nécessaire pour effectuer l'apprentissage de l'ANN. Celui-ci fonctionne alors comme une boîte noire : la physique ne peut pas être extraite des résultats.

Un neurone est une fonction bornée, paramétrée et non-linéaire. Les variables sont assignées aux entrées du neurone. La sortie du neurone est le résultat de la combinaison non-linéaire des entrées, pondérés par les paramètres et en utilisant une fonction de transfert de type sigmoïde. Un réseau de neurones est la mise en commun de plusieurs neurones organisés en couches :

La calibration des paramètres est faite en utilisant l'application d'un algorithme utilisant la base d'apprentissage et conçu pour diminuer l'erreur du modèle :

L'algorithme de Levenberg-Marquardt a été appliqué (Hagan & Menhaj, 1994) et la fonction appliquée par le réseau de neurones est testée continuellement sur un ensemble disjoint appelé l'ensemble de validation. Le dernier ensemble est utilisé pour éviter le sur-apprentissage en utilisant un arrêt précoce (Sjoberg, 1995). Les performances du modèle peuvent être mesurées sur un autre ensemble, non utilisée pendant l'apprentissage ou l'arrêt et qui est nommé ensemble de test.

18.2.2 Les automates cellulaires

Les automates cellulaires (Cellular Automata ou CA) sont des outils utilisés pour la modélisation de phénomènes physiques selon une discrétisation spatiale et temporelle. Initialement, Von Neumann était intéressé par la recherche dans la formalisation logique du mécanisme d'autoreproduction identifié dans de nombreux procédés biologiques. Il adopta une approche discrète pour le temps, l'espace et d'autres variables dynamiques. Il créa alors une machine théorique auto reproductive. Il s'agissait d'un automate cellulaire en deux dimensions capable de prendre 29 états différents. Depuis, les automates cellulaires ont été utilisés dans la simulation de phénomènes physiques variés. Vick (2007) s'est intéressé à la modélisation de phénomènes multi physique par automates cellulaires. Il insiste sur l'augmentation de la précision avec la diminution des pas de temps et sur la nécessité de bien déterminer les paramètres de l'automate cellulaire. Avolio *et al.* (2006) modélise l'écoulement pyroclastique d'une éruption volcanique en utilisant les automates cellulaires à la place d'un système d'équations différentielles et montre une bonne adéquation avec les observations de l'éruption du Pinatubo, aux Philippines. L'impact des interactions locales sur l'évolution d'un phénomène est une caractéristique importante qui promeut l'utilisation des automates cellulaires. À partir de cette observation, Wolfram (1983) a conçu des règles locales systématiques pour étudier les différentes influences des voisins directs. Les conclusions de son travail sont qu'à partir de simples règles locales, il est possible d'observer des phénomènes très complexes tels que l'évolution biologique des systèmes ou la structure de croissance des organismes. Il a démontré que les automates cellulaires peuvent émuler le comportement spécifique d'un

phénomène biologique ou physique observée en réalité. Itami (1994) a formalisé les automates cellulaires, définissant Q comme l'état global du système :

$$Q = (S, N, T)$$

S représente les états discrets possibles pour l'automate cellulaire et N le voisinage de cellules fournissant des valeurs d'entrée pour les règles de transition.
La règle de transition T définit comment l'état d'une cellule est modifié d'un pas de temps à un autre. Un grand nombre de techniques mathématiques quantitatives peut être utilisé : réseaux de neurones artificiels, algorithme génétique, chaine de Markov, simulations de Monte Carlo, logique floue, etc. Comme dans les simulations numériques classiques, le système est défini sur un domaine. Les dimensions et la forme des cellules sont déterminées en fonction de la cinétique du phénomène à modéliser et la précision requise pour l'application.

18.2.3 Combinaison des automates cellulaires et des réseaux de neurones

Dans le cadre de la planification de l'utilisation du territoire et de la croissance urbaine, plusieurs modèles utilisent les réseaux de neurones artificiels comme règle de transition des automates cellulaires (Li & Yeh, 2002, Almeida, Gleriani, & Castejon, 2008).
Dans le présent travail, l'objectif est d'évaluer la pertinence du couplage CA et ANN pour prédire les concentrations de plusieurs cas d'étude. La capacité de ces outils mathématiques à prendre en charge une grande quantité de données et d'en extraire le comportement spécifique est utilisé pour la modélisation dynamique de la dispersion atmosphérique (Lauret, 2013). Ce modèle est spécialement conçu pour la gestion des situations d'urgence et leur anticipation. Il doit être précis et rapide pour la prévision de concentration en champ proche et en milieux complexes.

18.3 Matériel et Méthode

Les automates cellulaires à règle de transition de type réseaux de neurones artificiels (CA-ANN) sont mis en place en respectant les étapes suivantes :

- Création de la base de données ;
- Détermination des variables d'entrées du modèle ;
- Apprentissage du réseau de neurones ;
  - Échantillonnage de la base de données ;
  - Formatage des données ;
  - Optimisation (Architecture, initialisation) ;
- Utilisation du modèle CA-ANN ;

18.3.1 Création de la base de données

La première étape de la création d'un CA-ANN est de disposer de données représentatives du phénomène à modéliser. Il est possible d'utiliser des données issues d'expériences à échelle réelle, des simulations physiques réalisées à échelle réduite en soufflerie ou des modélisations CFD. Les données de terrain sont difficiles à obtenir et l'utilisation des similitudes pour les simulations physiques à échelle réduite pourraient

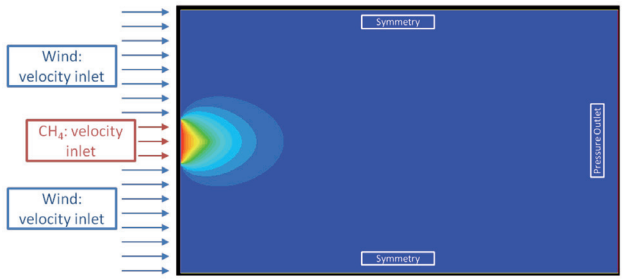


Fig. 3. — Représentation schématique du cas CFD simulé.

ajouter de l'incertitude expérimentale. Comme le premier objectif de ce travail est de valider la méthodologie développée, une base de données de simulations CFD est créée. ANSYS Fluent 14 est le logiciel de CFD utilisé pour modéliser en deux dimensions la dispersion d'un rejet de méthane sur un domaine de 20 mètres de large et 30 mètres de long. Le modèle CFD utilise la résolution des équations de Navier-Stokes par la décomposition des moyennes de Reynolds (modèle RANS) avec l'ajout des équations de fermeture sur l'énergie cinétique turbulente k et ε son taux de dissipation. La précision d'un tel modèle et le développement de tous les paramètres utilisés ne sont pas abordées ici. L'objectif de cette étude est d'établir une méthode cohérente et reproductible. Le maillage est composé d'environ 240 000 nœuds. Des conditions de symétrie sont appliquées sur les deux côtés du domaine. Le méthane est introduit dans le domaine en utilisant une condition aux limites de type vitesse d'entrée. La vitesse du vent est définie de la même manière.
La figure ci-dessus représente le schéma général utilisé :
Puisque le but de la base de données est d'être représentatif d'un phénomène, la distribution de concentration est enregistrée à pas de temps réguliers. La modélisation représente l'injection de méthane durant une courte période puis le suivi de la dispersion de ce nuage. La gamme des différentes variables est présentée dans le tableau 1 :

Tabl. 1. — Gamme des variables intervenant dans le cas CFD

Variable	Intervalle	Unité
Vitesse à l'entrée et au rejet	2-20	m.s-1
Fraction massique de méthane	0-100	%

Pour chaque configuration, la concentration et les composantes de la vitesse sont calculés au centre de chaque cellule du maillage.

18.3.2 Détermination des variables d'entrées du modèle

L'émulation des équations gouvernant le processus de dispersion atmosphérique utilisée en CFD est la base du présent travail. Pour ce faire, l'équation d'advection diffusion est utilisée pour définir les entrées du réseau de neurones :
Avec U_i, la vitesse du vent dans la direction i,

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \frac{\partial u_i c}{\partial x_i} = D\frac{\partial^2 c}{\partial x_i^2} + S_c$$

C, la concentration en méthane,
D, le coefficient de diffusion,
S_c, source d'émission.

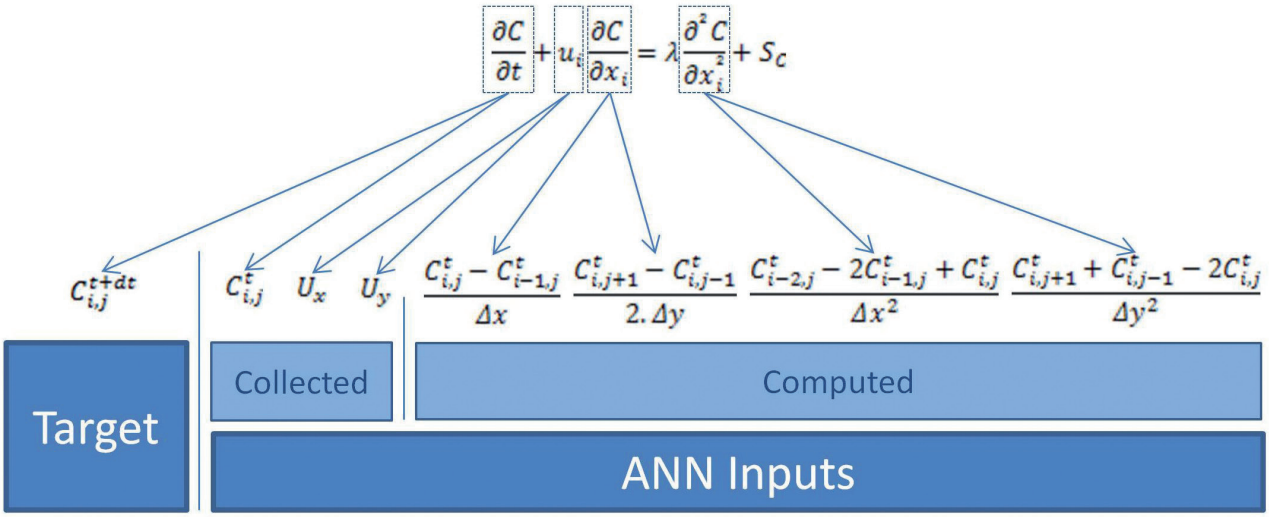


Fig. 4. — Principe de sélection et mise en forme des données d'entrée du réseau de neurones artificiels.

Chaque variable est discrétisée et les entrées sont définies comme il est expliqué dans la figure ci-dessus :
Des schémas décentrés amonts sont utilisés pour discrétiser les dérivées dans la direction de l'écoulement, afin d'éviter des erreurs au niveau des limites de domaine. Des schémas centrés sont utilisés pour la direction orthogonale. Certaines entrées sont calculées (dérivée première et seconde discrétisée) et d'autres sont directement collectées (vitesse du vent et la concentration initiale).Ces entrées sont définies localement. Aussi, il est primordial de les identifier sur un maillage et selon un pas de temps adéquat. Pour obtenir la convergence, une des conditions nécessaire mais non suffisante dans les modèles CFD est le respect du nombre de Courant Friedrich Lewy (CFL). Il exprime le seuil au dessus duquel une instabilité de calcul est observée, augmentant rapidement à chaque pas de temps. Cette instabilité apparait lorsque les dimensions des cellules sont inférieures à la distance parcourue par le phénomène le plus rapide au cours d'un pas de temps. Cela se traduit par :

$$CFL = (u \cdot \Delta t)/\Delta x \leq CFL_max$$

Un nombre maximal CFL égal à 1 est sélectionné. La vitesse du vent la plus élevée étant égale à 20 m.s^{-1}, le pas de temps doit être 20 fois inférieur à la longueur de maille. La maille requise pour notre application est fixée à 0,2 mètre. Le pas de temps doit donc être inférieur ou égal à 0,01 s.
Les automates cellulaires sont des maillages structurés. Aussi, afin de fournir des données utilisables par le CA, une interpolation des données du maillage CFD est effectuée. Une triangulation de Delaunay suivi d'une interpolation cubique est appliquée sur les mailles des nœuds. Une fois les données formatées pour le CA, il est possible de créer l'ensemble d'apprentissage.

18.3.3 Apprentissage du réseau de neurones

Formatage des données
Les données sont stockées dans un tableau d'exemples. Afin d'éviter qu'une variable d'entrée n'influe plus que les autres, les données sont centrées et réduites : entre 0 et 0,9 pour la concentration pour éviter les concentrations négatives en sortie et entre -0,9 et 0,9 pour le reste des variables d'entrées.

Architecture
La structure du réseau de neurones utilisée dans cette étude est la structure classique du perceptron à 2 couches. Les variables d'entrée ainsi qu'un biais initialisé aléatoirement sont reliés à la couche cachée. Celle-ci comporte entre 1 et 10 neurones dans notre cas. Chaque neurone effectue la somme pondérée des variables d'entrée et des paramètres de la 1ère couche. La fonction tangente sigmoïde est utilisée comme fonction de transition. La couche de sortie est une couche de neurones avec une fonction de transition linéaire positive afin d'éviter des concentrations négatives en sortie. L'initialisation est faite aléatoirement avec des vecteurs compris entre -1 et 1.

Algorithme d'apprentissage
L'algorithme d'apprentissage utilisé dans ce travail est celui de Levenberg-Marquardt. Pour éviter le surapprentissage, la méthode de l'arrêt précoce est mise en place. La base d'exemple est divisée en trois ensembles : ensemble d'apprentissage, d'arrêt et de test. L'ensemble d'apprentissage représente 80 % de la base totale. L'algorithme cherche à minimiser l'erreur sur cet ensemble. Pour garder une capacité de généralisation forte, l'erreur est également calculée en permanence sur l'ensemble de validation. Si celle-ci commence à augmenter, cela veut dire que le réseau de neurones se spécialise. Pour éviter ce surapprentissage, l'algorithme est stoppé. La performance de l'apprentissage est évaluée en calculant l'erreur sur l'ensemble de test afin d'identifier la capacité de généralisation du réseau de neurones.

18.3.4 Optimisation de l'apprentissage

Les données sélectionnées lors de l'échantillonnage sont prêtes à être utilisées pour l'apprentissage du réseau de neurones. Cette phase d'apprentissage doit être optimisée en balayant plusieurs configurations, notamment en termes d'architecture et d'initialisation des paramètres initiaux.
Afin de sélectionner le meilleur apprentissage pour notre application, on utilise le score de validation croisée. Plus le score de validation croisée est faible et plus l'apprentissage est bon. La méthode de calcul de ce critère est décrite ci-après :
Le tableau est rempli au fur et à mesures des différentes configurations testées. Les paramètres associés à la configuration

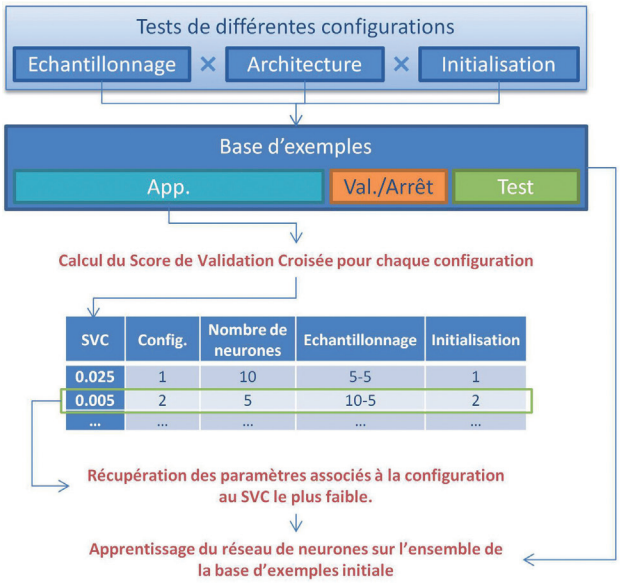


Fig. 5. — Principe de sélection du meilleur apprentissage.

donnant le meilleur SVC sont récupérés afin d'effectuer l'apprentissage final sur l'ensemble de la base d'exemples.

Échantillonnage de la base de données
La base de données nécessite un échantillonnage afin de ne pas surcharger inutilement l'apprentissage. Pour être représentative, celle-ci doit contenir l'ensemble des valeurs de la vitesse et de concentration. Plusieurs possibilités existent pour effectuer l'échantillonnage. Dans ce présent travail, la méthode détaillée ci-après est utilisée :

- On fixe un nombre d'intervalles de concentration en se basant sur la concentration la plus importante.
- On extrait pour chaque exemple un certain nombre de valeurs par intervalle sélectionnées aléatoirement.
- Chaque échantillonnage peut donc être caractérisé par un couple nombre d'intervalles/nombre de points par intervalle.
- Plusieurs nombre d'intervalles sont testés ainsi que plusieurs nombre de points par intervalle afin de mesurer l'impact de l'échantillonnage sur l'apprentissage et donc sur la pertinence du modèle final.

Architecture
L'architecture classique d'un perceptron multicouche est conservée ici en gardant une seule couche cachée. Plusieurs fonctions d'activation sont testées pour la couche cachée et celle de sortie. D'autre part, le nombre optimal de neurones dans la couche cachée est recherché en effectuant plusieurs initialisations pour chaque nombre de neurones testés. On fait varier le nombre de neurones entre 1 et 10.

Initialisation
L'initialisation des paramètres d'entrée du réseau de neurones a un impact sur le résultat de l'apprentissage. Aussi, pour l'échantillonnage et l'architecture validée, il est important d'effectuer plusieurs initialisations afin d'effectuer le meilleur apprentissage. 50 initialisations différentes sont ainsi testées.

18.3.5 Utilisation du modèle CA-ANN

Dans un premier temps, les conditions aux limites doivent être définies. Le domaine est orienté selon la direction du vent. L'hypothèse de concentration nulle à la limite gauche du domaine est fixée. Pour traduire cette hypothèse dans le modèle, une valeur de concentration constante de 0 est donnée pour cette limite. Le calcul de la dérivée première et seconde donne :

$$C_{i=0} = C_{i=-1} = 0$$

$$\left|\frac{\partial C}{\partial x}\right|_1 = \frac{C_1 - C_0}{\Delta x} = \frac{C_1}{\Delta x}$$

$$\left|\frac{\partial^2 C}{\partial x^2}\right|_1 = \frac{C_{-1} - 2.C_0 + C_1}{\Delta x^2} = \frac{C_1}{\Delta x^2}$$

$$\left|\frac{\partial^2 C}{\partial x^2}\right|_2 = \frac{C_0 - 2.C_1 + C_2}{\Delta x^2} = \frac{-2.C_1 + C_2}{\Delta x^2}$$

D'autre part, l'ensemble du domaine doit être initialisé avec des valeurs de concentrations. Dans une démarche d'évaluation du modèle développé, cette initialisation est faite avec un cas CFD non-appris. La vitesse du vent est considéré comme stationnaire et est récupérée à partir du cas cité précédemment. Pour chaque pas de temps et pour chaque cellule, les variables d'entrée du réseau de neurones doivent être collectées ou calculées. La règle de transition est alors appliquée. On récupère alors une matrice de concentrations au temps t + dt. Le processus itératif peut alors se poursuivre. Une fois que les conditions aux limites et l'initialisation ont été mis en place, le processus itératif commence :

- Afficher et sauvegarder les données calculées ;
- Mise en forme des données : calcul de la dérivée discrète du premier et second ordre de la concentration, création des tableaux d'entrée ;
- Calcul de la concentration de sortie pour chaque cellule en utilisant la règle de transition par réseau de neurones ;
- Récupération des concentrations et comparaison avec les valeurs obtenues en CFD, traitement statistique ;

18.4 Résultats

Les résultats de ce travail sont envisagés selon 2 approches : les résultats de l'apprentissage du réseau de neurones et les résultats de la modélisation par CA-ANN comparés aux simulations CFD.

18.4.1 Apprentissage

On évalue le Score de Validation Croisée (SVC) de différents apprentissages. La méthode prévoit d'évaluer la pertinence de l'échantillonnage, de l'architecture et de l'initialisation des paramètres.

Échantillonnage
On s'intéresse à la manière dont l'échantillonnage influence le score de validation croisée. Afin de pouvoir comparer

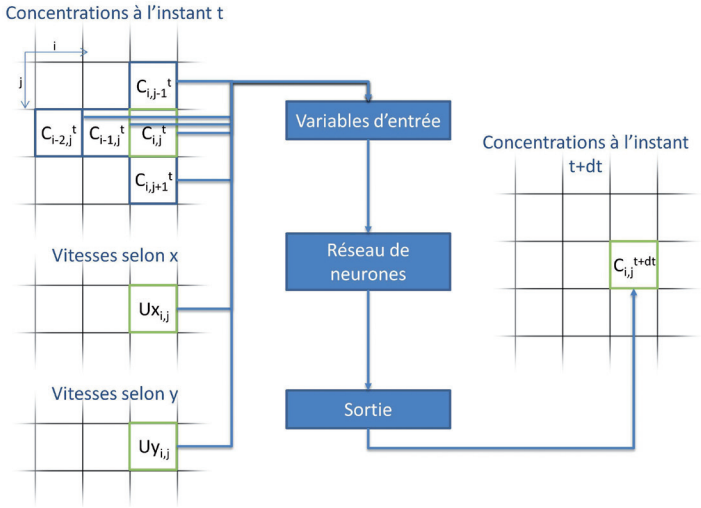


Fig. 6. — Calcul du changement de valeur d'une cellule pour un pas de temps.

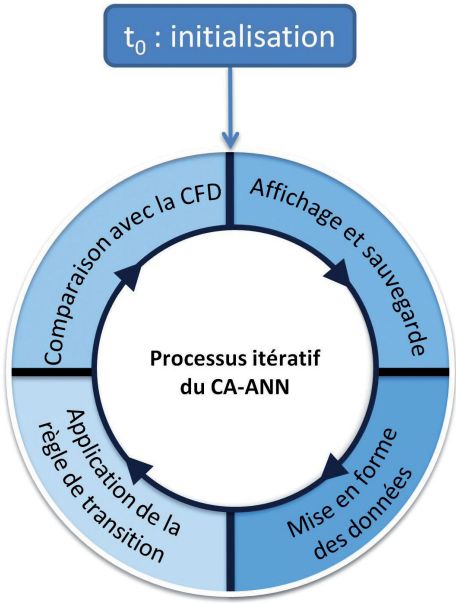


Fig. 7. — Fonctionnement de l'automate cellulaire.

ces données, 10 apprentissages sont effectués sur chaque échantillonnage afin d'avoir une moyenne comparable du score de validation croisée.
On observe une augmentation du SVC avec le nombre d'intervalles ainsi qu'avec le nombre de points par intervalles. Par conséquent, on a également une augmentation du SVC avec le nombre de points. Ces résultats tendent à montrer que l'échantillonnage ne nécessite pas d'être conséquent pour amener de bons résultats de l'apprentissage. Néanmoins, afin que le modèle soit évalué correctement, il est nécessaire de comparer également la performance de l'apprentissage selon différents échantillonnages en utilisant les résultats des critères de performance entre le modèle CA-ANN et les simulations CFD sur des cas non-appris.

Pour le même couple nombre d'intervalle, nombre de points par intervalle, des différences peuvent exister dans la performance. Celles-ci sont d'autant visibles que le nombre de points par intervalles est faible, la composante aléatoire de la sélection des points ayant plus d'influence.

Architecture du RN

Le nombre de neurones dans la couche cachée peut influer sur la performance de l'apprentissage. Aussi, les scores de validation croisée sont évalués pour 4 initialisations. On effectue la moyenne de ces 4 apprentissages. Les résultats sont reportés dans le tableau 3 en page suivante :

Le nombre de neurones cachés influent effectivement sur la performance de l'apprentissage.

Initialisation des paramètres

L'évaluation de l'influence de l'initialisation des paramètres sur la performance de l'apprentissage du réseau de neurones est évaluée en utilisant la configuration optimale vue précédemment. L'échantillonnage est donc fixé : 5-10. 10 neurones

Tabl. 2. — Récapitulatif des différents échantillonnages testés

			Score de validation croisée			
Nombre d'intervalles	Nombre de points	Nombre de neurones cachés	moyenne	écart type	min.	max.
5	5	10	0,0299	0,0141	0,0197	0,0585
5	10	10	0,0258	0,0015	0,0236	0,0286
10	5	10	0,0274	0,0009	0,0262	0,0286
10	10	10	0,0370	0,0013	0,0355	0,0402
10	15	10	0,0444	0,0012	0,0432	0,0463
15	10	10	0,0447	0,0016	0,0422	0,0469
10	20	10	0,0515	0,0014	0,0495	0,0540
15	15	10	0,0547	0,0014	0,0522	0,0578
15	20	10	0,0627	0,0011	0,0611	0,0641

Tabl. 3. — Récapitulatif des valeurs du SVC pour des nombres de neurones dans la couche cachée différents

Nombre d'intervalles	Nombre de points	Nombre de neurones cachés	Score de validation croisée moyen
5	5	2	0,06000441
5	5	4	0,00470839
5	5	6	0,00227555
5	5	8	0,00147713
5	5	10	0,00105915

seront utilisés dans la couche cachée. Pour les 10 apprentissages, une moyenne de SVC de 0,0258 est obtenue, avec un ecart type de 0,0015 et un minimum de 0,0236.
Le score de validation croisée est donc fonction de l'initialisation pour chaque initialisation.

18.4.2 Apprentissage final

L'apprentissage est effectué en utilisant la meilleure initialisation du couple 5-10. L'erreur quadratique moyenne sur l'ensemble de tests (EQMT) vaut 7.79 10^{-8}. Il convient alors d'évaluer cet apprentissage de la règle de transition de l'automate cellulaire sur des cas tests.

18.4.3 Test du modèle sur des cas non-appris

Afin de comparer les résultats entre les simulations CFD et la modélisation CA-ANN, on utilise les critères d'évaluation de la performance des modèles de dispersion atmosphérique détaillée par Chang et Hanna (2004) : Le coefficient de détermination R^2, le facteur 2 (FAC2), l'erreur quadratique moyenne normalisée (NMSE), le biais fractionnel (FB), la variance géométrique moyenne (MG) et la variance géométrique moyenne (VG). Afin de pouvoir comparer les cas, les valeurs des critères sont isolées lorsqu'il reste 80 % de la masse du nuage dans le domaine. De manière à comparer les valeurs d'intérêt, les concentrations inférieures à 1/30 de la valeur de la concentration maximale du cas ne sont pas prises en compte. Le tableau 4 rend compte de ces comparaisons.

La simulation possédant le score de coefficient de détermination le plus faible a une vitesse faible et une fraction massique initiale faible. On trace la distribution spatiale de concentrations représentant la réalité CFD et les iso-contours de la modélisation CA-ANN de cette simulation (fig. 8).
Il existe un décalage dans les zones de concentrations maximales, dans l'axe de l'écoulement, le modèle CA-ANN semble être en retard sur la réalité CFD. D'autre part une diffusion plus faible est observée dans la largeur. En ce qui concerne les valeurs maximales de concentrations, des divergences importantes apparaissent également : 0,0020 $kmol.m^{-3}$ pour la réalité CFD et 0,0035 $kmol.m^{-3}$ pour le modèle CA-ANN, restant dans un intervalle de facteur deux. En traçant la dispersion des points entre modèle et simulation, une tendance à la surestimation des concentrations fortes est identifiée. Par contre les concentrations faibles sont sous-estimées, ce qui peut expliquer la déformation appliquée au nuage par le CA-ANN. Cette dispersion peut être tracée en appairant les points en espace ou alors en réalisant un tri des valeurs les plus élevées aux plus faibles comme illustré sur la figure 9.
Dans les deux cas, une tendance à la surestimation des concentrations fortes et une sous-estimation des concentrations faibles est visualisée. Le cas des valeurs faibles est particulier. Des concentrations nulles sont observées dans le CA-ANN alors que la réalité CFD en possède beaucoup moins.

Tabl. 4. — Récapitulatif des critères de performance pour les différents cas tests

Cas test					Critères d'évaluation de la performance					
Vitesse	Fraction massique	Intervalles	Nombre de points	Pas de temps	R2	FAC2	FB	NMSE	MG	VG
10.2	0.89	5	10	85	0,9533	0,8216	-0,0798	0,0002	65535,0	65535,0
18.8	0.89	5	10	46	0,9451	0,7744	-0,0947	0,0003	65535,0	65535,0
10.2	0.5	5	10	85	0,9438	0,8479	-0,0625	0,0002	65535,0	65535,0
18.8	0.5	5	10	46	0,9269	0,7711	-0,0890	0,0003	65535,0	65535,0
3.2	0.89	5	10	273	0,9202	0,9402	0,0202	0,0003	0,9	1,1
10.2	0.26	5	10	85	0,8862	0,8968	-0,0228	0,0002	1,1	1,4
18.8	0.26	5	10	46	0,8742	0,7866	-0,0742	0,0002	65535,0	65535,0
3.2	0.5	5	10	273	0,8234	0,8948	0,0514	0,0003	0,8	1,2
3.2	0.26	5	10	273	0,3516	0,7332	0,0914	0,0004	0,7	1,4

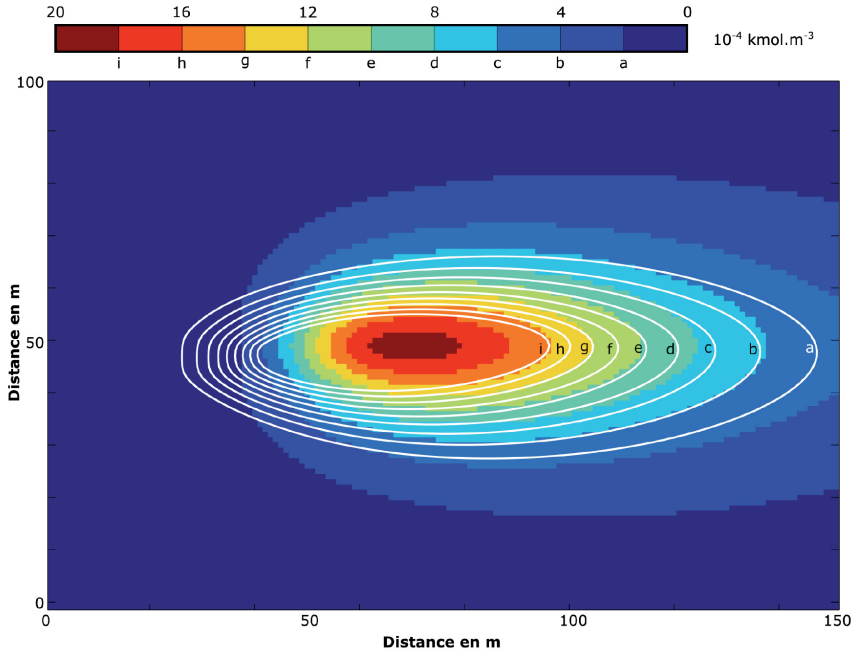


Fig. 8. — Comparaison des isosurfaces de concentrations CFD et isocontours de concentrations CA-ANN pour le cas considéré.

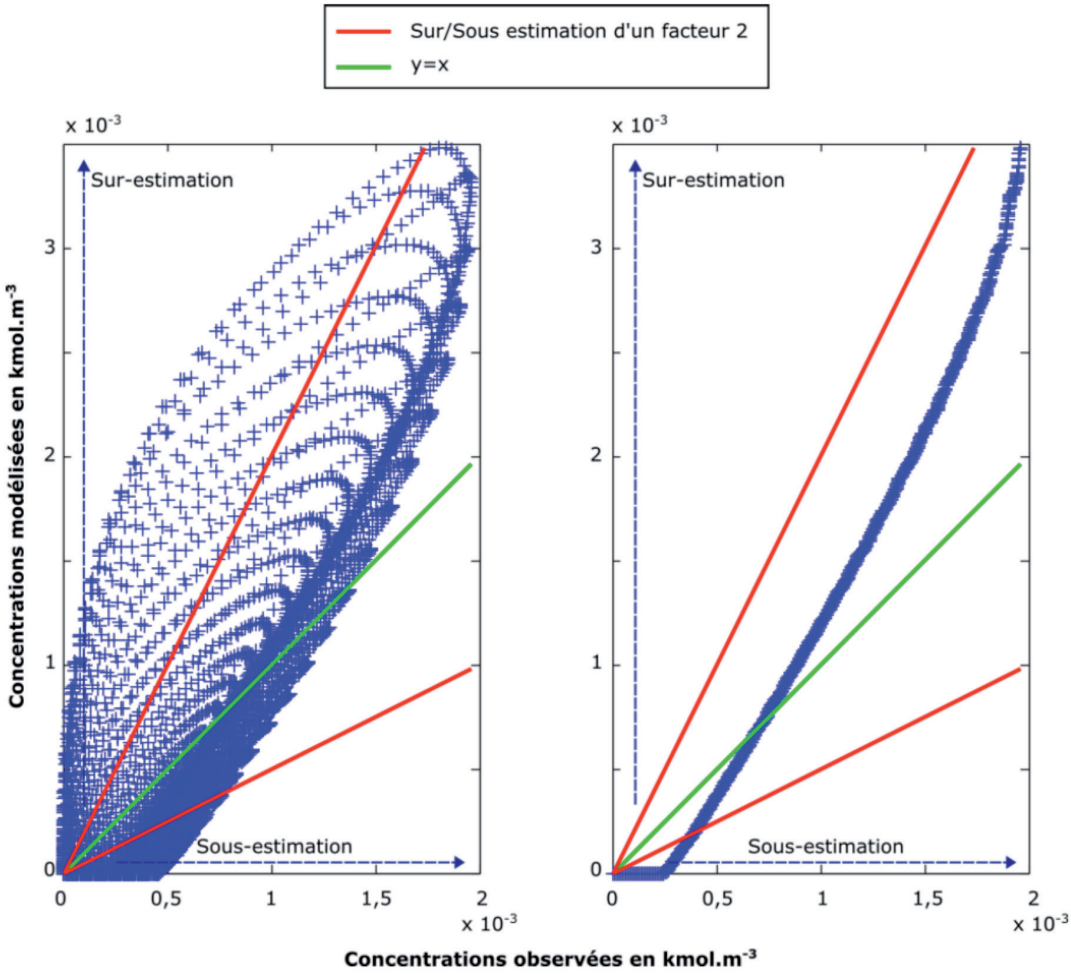


Fig. 9. — Dispersion des points observés (abscisses) et modélisés (ordonnées). Les points sont appairés en espace dans la figure de gauche (diagramme de dispersion). Dans la figure de droite, un tri des valeurs de concentration est effectué au préalable (diagramme quantile-quantile).

18.5 Discussion

18.5.1 Apprentissage

Le score de validation croisée permet d'identifier le couple échantillonnage-initialisation le plus performant. Un échantillonnage comprenant relativement peu d'intervalles et de nombre de points par intervalle (et donc de nombre de points total) permet un apprentissage adapté. Il est nécessaire d'effectuer suffisamment d'initialisations aléatoire afin d'obtenir le meilleur SVC. Si l'augmentation du nombre de neurones dans la couche cachée permet d'améliorer la performance de l'apprentissage, il n'apparait pas pertinent d'augmenter ce nombre au-delà de 10 neurones dans la mesure où la performance attendue du modèle est atteinte.

18.5.2 Utilisation

L'utilisation de l'apprentissage combinant les paramètres adaptés (meilleur échantillonnage, initialisation et nombre de neurones dans la couche cachée) sur les cas tests non-appris montrent de bon résultats généraux. On note que 8 cas sur 9 ont un coefficient de détermination supérieur à 0,8 à l'issu de la simulation. Le facteur 2 est supérieur à 0,75 dans la majorité des cas. On note qu'un cas semble poser problème, pour une faible concentration initiale et une faible vitesse de vent. L'erreur s'amplifie inévitablement. Cela est dû aux erreurs mineures de la règle de transition neuronale qui s'accumulent au cours des pas de temps. De plus amples investigations doivent être menée afin d'améliorer la performance sur ce cas.

18.6 Perspectives

La règle de transition neuronale ne permet pas un contrôle direct de la quantité de matière. Les futurs travaux sont dirigés vers la prise en compte et la correction de la différence de masse obtenue et la masse totale du système. Le modèle développé utilise actuellement le champ de vitesse comme entrée. Afin de calculer ce champ global, un modèle de détermination de la déformation de l'écoulement autour d'obstacles devra être implémenté. L'objectif final est de fournir un modèle complet permettant de prévoir l'expansion du nuage sur un site industriel. Les obstacles considérés dans cette optique sont les cylindres verticaux en raison de stockages de matières dangereuses dans des zones où la vulnérabilité est élevée. Une approche par réseau de neurones est envisagée. Une fois cette tâche atteinte, il sera possible de combiner les deux modèles afin de bénéficier d'un outil global. Enfin, un travail d'optimisation informatique est à entreprendre.

Conclusion

Les modèles de prévision de la dispersion atmosphérique existants présentent le défaut d'être extrêmement précis mais lent ou rapide mais pas suffisamment performant dans le cadre d'une dispersion dans le champ proche, sur un site industriel. Une nouvelle méthode est proposée, utilisant les automates cellulaires avec une règle de transition par réseau de neurones. La base d'exemples nécessaire à l'apprentissage est issue de simulations numériques CFD. Elle permet un apprentissage du réseau de neurones avec une Erreur Quadratique Moyenne inférieure à 1.10-7 . La comparaison entre des simulations CFD de dispersion ne faisant pas partie de la base d'apprentissage du CA-ANN et des modélisations issus du CA-ANN fournissent des coefficients de détermination supérieurs à 0,8 pour la majorité des cas. Le facteur 2 est lui supérieur à 70 % pour la totalité des essais réalisés. Une correction de la différence de matière obtenue et la masse totale du système est à exploiter.

Bibliographie

Almeida C.M., Gleriani J.M. & Castejon E.F., « Using neural networks and cellular automata for modeling intra-urban land use dynamics », *International Journal of Geographical Information Science*, 22 (9), 2008, p. 943-963.

Avolio M.V., Crisci G.M., Di Gregorio S., Rongo R., Spataro W. & D'Ambrosio D., « Pyroclastic flows modelling using cellular automata », *Computers & Geosciences*, 32 (7), 2008, p. 897-911.

Barron A. R., « Universal approximation bounds for superpositions of a sigmoidal function », *IEEE Transactions on Information Theory*, 39 (3), 1993, p. 930-945.

Brambilla S., Totaro R. & Manca D., « Simulation of the LPG release, dispersion, and explosion in the Viareggio railway accident », *Chemical Engineering Transactions*, 19, 2009, p. 195-200.

Cao X., « Modelling the Concentration Distribution of Non-Buoyant Aerosols Released from Transient Point Sources into the Atmosphere », *Queen's University, Ontario, Canada*, 2007, 184 p.

Chang, J. C. & Hanna S. R., « Air quality model performance evaluation », *Meteorology and Atmospheric Physics*, 87 (1-3), 2004, p. 167-196.

Dreyfus G., « Neural Networks, Methodology and Applications », *Springer*, 2004, 509 p.

Guariso G. & Maniezzo V., « Air quality simulation through cellular automata », *Environmental Software*, 7, 1992, p. 131-141.

Hagan M. T. & Menhaj M. B., « Training Feedforward Networks with the Marquardt Algorithm », *IEEE Transactions on Neural Networks*, 5 (6), 1994, p. 989-993.

Hornik K., Stinchcombe M. & White H., « Multilayer Feedforward Networks are Universal Approximators », *Neural Networks*, 2, 1989, p. 359-366.

Itami M., « Simulating spatial dynamics : cellular automata theory », *Landscape and Urban Planning*, 30 (94), 1994, p. 27-47.

Launder B. E. & Spalding D. B., « The Numerical Computation of Turbulent Flows », *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 3 (2), 1974, p. 269-289.

Lauret P., Heymes F., Aprin L., Johannet A., Dusserre G., Munier L., Lapebie E., « Near Field Atmospheric Dispersion Modelling on an Industrial Site Using Neural Networks », *Chemical Engineering Transactions*, 31, 2013, p. 151-156.

Li X., & Yeh A. G.-O., « Neural-network-based cellular automata for simulating multiple land use changes using GIS », *International Journal of Geographical Information Science*, 16(4), 2002, p. 323-343.

Marin M., « Cellular automata simulation of dispersion of pollutants », *Computational Materials Science*, 18, 2000, p. 132-140.

Minsky M. & Papert S., « Perceptrons », *MIT Press*, Cambridge MA, 1969.

Pelliccioni A. & Tirabassi T., « Air dispersion model and neural network: A new perspective for integrated models in the simulation of complex situations », *Environmental Modelling & Software*, 21 (4), 2006, p. 539-546.

Podnar D., Koračin D. & Panorska A., « Application of artificial neural networks to modeling the transport and dispersion of tracers in complex terrain », *Atmospheric Environment*, 36 (3), 2002, p. 561-570.

Sarkar C. & Abbasi S. A., « Cellular automata-based forecasting of the impact of accidental fire and toxic dispersion in process industries », *Journal of hazardous materials*, 137 (1), 2006, p. 8-30.

Sharan M. & Gopalakrishnan S. G., « Bhopal gas accident : a numerical simulation of the gas dispersion event », *Environmental Modelling & Software*, 12 (2-3), 1997, p. 135-214.

Siou L. K. A., Johannet A., Borrell V. & Pistre S., « Complexity selection of a neural network model for karst flood forecasting : The case of the Lez Basin (southern France) », *Journal of Hydrology*, 403 (3-4), 2011, p. 367-380.

Sjöberg J., Zhang Q., Ljung L., Benveniste A., Deylon B., Glorennec P. Y., « Nonlinear Black-Box Modeling in System Identification : a Unified Overview », *Automatica*, 31 (12), 1995, p. 1691-1724.

Toukourou M., Johannet A., Dreyfus G. & Ayral P.-A., « Rainfall-runoff modeling of flash floods in the absence of rainfall forecasts : the case of “Cévenol flash floods” », *Applied Intelligence*, 35 (2), 2010, p. 178-189.

Vendel F., « Modélisation de la dispersion atmosphérique en présence d‘obstacles complexes : application à l’étude de sites industriels », *École centrale de Lyon*, 2011, 367 p.

Vick B., « Multi-physics Modeling Using Cellular Automata », *Complex Systems*, 17, 2007, p. 65-78.

Wolfram S., « Statistical mechanics of cellular automata », *Reviews of Modern Physics*, 55 (3), 1983, p. 601-644.

Collection « Géorisques »

Titres déjà parus dans la même collection

— *Plans communaux de sauvegarde et outils de gestion de crise*, F. Leone & F. Vinet, 2015.

— *Atlas des risques naturels et des vulnérabilités territoriales de Mayotte*, F. Leone (dir.), 2014.

— *Prévenir les risques naturels : de la modélisation à l'information*, F. Leone & F. Vinet, 2013.

— *Le littoral : caractérisation et gestion d'un espace à risques*, F. Leone & F. Vinet, 2012.

— *Quelles archives aujourd'hui pour mieux gérer les risques demain ? Approches géographiques et historiques*, N. Meschinet de Richemond, 2010.

— *La mise en carte des risques naturels — Diversité des approches*, F. Leone & F. Vinet, 2008.

— *La vulnérabilité des sociétés et des territoires face aux menaces naturelles — Analyses géographiques*, F. Leone & F. Vinet, 2006.

Presses universitaires de la Méditerranée
(Université Paul-Valéry Montpellier 3)
pulm@univ-montp3.fr
www.pulm.fr

Dépôt légal : 4e trimestre 2017