

L'INFORMATION GÉOGRAPHIQUE ET LA CARTOGRAPHIE AU SERVICE DES RETOURS D'EXPÉRIENCES SCIENTIFIQUES POST-CATASTROPHES - ANTILLES, SAISON CYCLONIQUE 2017

par Matthieu Péroche, Emilie Lagahé, Thomas Candela, Frédéric Leone,

Laboratoire de Géographie et d'Aménagement de Montpellier, Université Paul-Valéry Montpellier 3, 34199 Montpellier
matthieu.peroche@univ-montp3.fr

Delphine Grancher,

Laboratoire de Géographie Physique UMR8591 - Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne, CNRS,
UPEC, 1, place A. Briand 92195 Meudon France

et Martin Robustelli

Bureau d'étude RisCrise, 235 avenue des Chênes Rouges 30 100 Alès

La production massive d'informations spatialisées suite au passage d'un événement naturel extrême entraîne de nouvelles perspectives dans leur analyse post-catastrophe. Ces données récoltées ou produites aux cours des retour d'expérience scientifiques permettent d'explorer dynamiquement les relations de cause à effet entre l'aléa et les conséquences territoriales dans leurs dimensions à la fois spatio-temporelles et multi-échelles. La cartographie est interrogée comme un outil d'analyse partagé, propice aux actions interdisciplinaires et comme support de l'information utile aux transferts des connaissances, pendant et après le retour d'expérience auprès des populations et des acteurs de la gestion des risques.

Mots clés : *information géographique, transfert de connaissances, retour d'expérience, cartographie, risques naturels*

The massive production of spatialized information following the passage of an extreme natural event brings new perspectives in their post-disaster analysis. Such data collected or produced during scientific retour d'expérience allows us to dynamically explore the cause-and-effect relationships between the hazard and the territorial consequences in both spatio-temporal and multi-scale dimensions. Mapping is questioned as a shared analysis tool conducive to interdisciplinary actions and as a useful knowledge support for their transfer to populations and risk management actors, during and after experience feedback.

Keywords: *geographic information, knowledge transfer, experience feedback, cartography, natural disaster*

Introduction

Le contexte actuel de médiatisation des catastrophes sur fond de changement climatique (Barkemeyer *et al.*, 2017), et le foisonnement massif d'informations disponibles à leur sujet, amènent de profonds changements dans leur étude. Le caractère spatialisé des risques naturels, matérialisé par l'emprise territoriale de la zone d'aléa et par l'extension aux zones d'effets indirects, implique que tout processus d'analyse passe par sa dimension géographique. L'information géographique devient alors un objet d'étude à part entière dans la chaîne d'évaluation et de gestion des risques naturels où la pratique de la cartographie semble être une évidence.

Les catastrophes d'origine naturelle déclenchent un grand nombre d'opérations de mise en sécurité et

de secours en fonction de leur prévisibilité, gravité, emprise spatiale et du contexte territorial. Le besoin en information est important, tant pour les phases de planification (évacuation, prépositionnement, etc.) que pour la phase d'urgence.

Les centres de commandement et les secours disposent et produisent des informations spatialisées pour prendre des décisions, rendre compte aux autorités (points de situation) et permettre la communication de crise. D'un point de vue scientifique, une partie de cette information est particulièrement intéressante à analyser pour comprendre les décisions prises rétrospectivement. Tour à tour marqueur de la crise et donnée de l'analyse, l'information spatiale, dont la précision semble toujours plus grande, devient un objet central des retours d'expériences scientifiques. Elle apporte une dimension spatio-temporelle et

dynamique multi-échelles qui place ces protocoles méthodologiques au centre de recherches-action. Le projet TIREX¹ (Transfert des apprentissages de Retours d'Expériences scientifiques) est un retour d'expérience sur la saison cyclonique 2017 aux Antilles. Il ambitionne de favoriser le transfert des connaissances acquises en renforçant le suivi de la reconstruction territoriale, en s'appuyant principalement sur l'analyse comparative inter et intra territoires du Nord des Antilles (principalement les îles de Saint-Martin et Saint-Barthélemy), et en formalisant des méthodes de retour d'expérience scientifiques continues.

La valorisation des résultats du projet retour d'expérience est un enjeu majeur afin de transmettre efficacement les apprentissages et de développer un porté à connaissance durable pour l'ensemble des populations. Ce projet jette un regard critique sur la conduite globale de la réponse à la crise, et propose la mise en place de réaction-réflexes face aux enseignements positifs et/ou négatifs dans les territoires concernés. Son originalité réside dans son aspect continu depuis l'événement en septembre 2017 et le transfert de connaissances se veut dynamique et interactif avec les publics cibles. Sa plus-value porte sur la spatialisation multi-scalaire et multi-temporelle des impacts et des dynamiques de relèvement post-cyclone (Moatty, 2015).

Cet article propose d'étudier l'usage de l'information géographique au service des retours d'expériences, depuis l'acquisition de données sur le terrain, leur traitement, jusqu'à la valorisation de l'information par la carte, qu'elle soit statique ou dynamique. Il s'intéresse particulièrement aux étapes de co-construction et de transferts des connaissances entre producteurs et utilisateurs avant, pendant et après les retours d'expériences scientifiques. Pour illustrer le propos, nous proposons de discuter de l'architecture et de l'intérêt de l'apport cartographique comme support de valorisation pour la diffusion des connaissances dans le projet TIREX, ainsi que des difficultés rencontrées. Nous traiterons également un exemple de contribution scientifique pour l'amélioration de la représentation des cartes de dommages issues de l'activation de la Charte internationale « Espace et Catastrophes Majeures ».

Les enjeux du transfert des connaissances dans le cadre d'un retour d'expérience

Les interactions entre producteurs et utilisateurs de l'information géographique produite lors d'un retour d'expérience

Depuis les années 90 et l'essor des études scientifiques dans le domaine de la gestion des risques, les retours d'expériences s'intéressent de plus en plus aux aspects organisationnels d'un système en se focalisant sur les réactions humaines. Lagadec (1994) insiste sur le fait de : « *s'interroger, notamment, sur des réactions individuelles et surtout organisationnelles face à une épreuve aiguë, qui a pu déstabiliser le « système » (entreprise ou groupe d'entités impliquées)* ». Wybo et al. (2001) apportent une nuance lorsqu'ils évoquent le retour d'expérience comme une « *opportunité pour collecter l'expérience individuelle de plusieurs acteurs et la réunir sous la forme d'une expérience collective* ». Nous retiendrons comme définition celle de Lagadec (2001) qui corrobore les éléments cités précédemment et définit le retour d'expérience comme le fait de « *revenir de manière collective sur des événements pour en tirer des enseignements ; c'est une opportunité de progrès collectif ; c'est l'exploitation des aspects positifs d'une situation accidentelle* ». Enfin et comme le précise Gilbert (2001) : « *plutôt que de partir de l'idée que le retour d'expérience est une impérieuse et indiscutable nécessité, il est préférable de s'interroger sur les conditions dans lesquelles il peut effectivement être mis en œuvre* ». C'est pourquoi l'apport de cette démarche scientifique est d'offrir un regard distancié vis-à-vis de la crise, contrairement à des approches institutionnelles. Cette démarche réflexive autour des ressources et des compétences dont disposent les acteurs concernés, s'inscrit dans une perspective positive de reconnaissance de l'influence des contextes locaux et des capacités des individus et des communautés à faire face en situation de catastrophe naturelle (Pelling, 2003). Le retour d'expérience effectué dans le cadre du projet TIREX ambitionne de consolider, valoriser et diffuser ses résultats en concordance avec le contexte culturel et géographique des territoires ciblés à savoir : les collectivités territoriales françaises de Saint-Martin et de Saint-Barthélemy et le département français d'Outremer de la Guadeloupe et ses dépendances.

1 TIREX, pour « Transfert des apprentissages de Retours d'Expériences scientifiques pour le renforcement des capacités de réponse et d'adaptation individuelles et collectives dans un contexte de changement climatique (Petites Antilles du Nord - saison cyclonique 2017) » 2018-2022, projet financé par l'ANR dans le cadre de AAP OURAGANS 2017/ CATASTROPHE, RISQUE ET RESILIENCE, <https://anr.fr/Projet-ANR-18-OURA-0002>

La saison cyclonique de septembre 2017 aux Antilles, et notamment l'atterrissage du cyclone Irma sur les îles de Saint-Barthélemy puis de Saint-Martin dans la nuit du 5 au 6 septembre, a été l'occasion d'initier une démarche basée sur l'utilisation de l'information géographique, avec une dimension pré-opérationnelle d'accompagnement des acteurs de la gestion des risques et de la reconstruction, populations comprises. L'équipe du retour d'expérience a mobilisé les réseaux d'acteurs locaux déjà établis sur les îles de Saint-Martin et Saint-Barthélemy. Ces contacts antérieurs ont permis de co-construire et de fiabiliser les échanges autour de l'information géographique. Lors de la récolte de données sur le terrain (phase de post-crise immédiate), les premiers échanges ont lieu entre les utilisateurs (futurs) et les producteurs de l'information géographique. Grâce à cette capitalisation et ce partage d'informations *via* des dialogues en présentiel, l'individu est mis en avant à travers ses réactions, actions et interactions. Il s'agit, dans un premier temps, d'éclairer les logiques d'action et de rendre compte, à travers une étude des interactions (Mucchielli, 2004), des savoirs mobilisés – experts, profanes – en situation de catastrophe, et de leur mode de circulation. L'enquête menée auprès de la population sur les comportements à adopter en cas de cyclone, illustre bien ces propos (Defossez et Gherardi, 2020). En effet, depuis le commencement du projet, en réalisant un suivi auprès de la population interrogée, les missions sur le terrain à intervalles réguliers ont permis de construire un lien de confiance avec certains habitants. Le lien entre les chercheurs et les acteurs locaux s'est également renforcé grâce aux échanges constants en présentiel et à distance. A chaque mission, des temps d'échanges ont été organisés avec les institutions et des groupes de citoyens afin de présenter l'avancée des travaux et de les ajuster. On observe des interactions entre les producteurs et les utilisateurs des données qui engendrent implicitement une adaptation du discours en fonction des temps de la crise et la post-crise (phase d'urgence, reconstruction, relèvement).

Les mois post-missions ont permis de traiter et d'analyser l'information géographique « brute » récoltée, par des méthodes comparatives par exemple, mais aussi grâce à des recherches bibliographiques et des investigations approfondies auprès d'experts (fig. 1). Pendant cette phase, il s'agit aussi de s'interroger sur les productions des acteurs de la gestion de crise et de la reconstruction. A l'issue de ces premiers échanges, l'information géographique

analysée et traitée devient plus réfléchi. Ces imbrications des niveaux de transferts de connaissances entre producteurs et utilisateurs sont essentielles tout au long du retour d'expérience.

Enfin la valorisation finale des résultats s'adresse à l'ensemble des utilisateurs. Celle-ci varie en fonction des publics cibles et évolue pendant le retour d'expérience. Cette dernière interaction producteur/utilisateur, est l'occasion de garder en mémoire l'empreinte territoriale de la catastrophe via de multiples supports de communication et notamment numériques.

Les temps de l'acquisition de l'information géographique : le contexte particulier des Antilles françaises

Dans les Outre-mer, les disparités et l'hétérogénéité de l'information géographique sont importantes (IGN, 2017). En Guadeloupe et en Martinique, des Infrastructures de Données Géographiques (IDG) ont été créées il y a plusieurs années, nommées respectivement Karugeo et Géomartinique. Les territoires de Saint-Barthélemy et de Saint-Martin n'y sont pas associés et on ne trouve pas d'équivalent au niveau local. Il n'existe donc pas de guichet unique afin de garantir l'acquisition mutualisée de lots de données, pour les centraliser et répondre ainsi aux besoins des différents acteurs. Déjà particulièrement limitée, l'information géographique est dispersée entre les services en Guadeloupe, à Saint-Martin et à Saint-Barthélemy. Malgré un effort de mise à jour en continu par l'IGN, les contextes territoriaux locaux (relatifs notamment aux règles d'urbanisation) ainsi que l'éloignement de la métropole font que certains référentiels accusent un retard important, voire une absence, et présentent parfois des défauts de précisions spatiales (géométrie, localisation) et attributaires. Aux Antilles, on constate que globalement les composantes topographiques, parcellaires et adresses du Référentiel Grande Échelle de l'IGN sont moins fiables qu'en métropole et nécessitent un travail de vérification et d'harmonisation important. A Saint-Barthélemy et Saint-Martin, du fait d'un régime statutaire particulier², le système d'information fiscal et cadastral revient aux collectivités. Dans les faits, le cadastre n'est pas exploitable à Saint-Martin car la donnée est incomplète notamment pour les quartiers les plus peuplés où l'auto-construction est importante. On constate également que certaines données comme celles de l'INSEE sont agrégées à des îlots IRIS non adaptés à la réalité de terrain. Ces

² Depuis 2007, les îles de Saint-Barthélemy et de Saint-Martin sont devenues par référendum des collectivités d'Outre-mer (COM) régies par l'article 74 de la Constitution. Elles disposent à ce titre de l'autonomie fiscale et de compétences élargies en matière d'urbanisme et de développement économique.

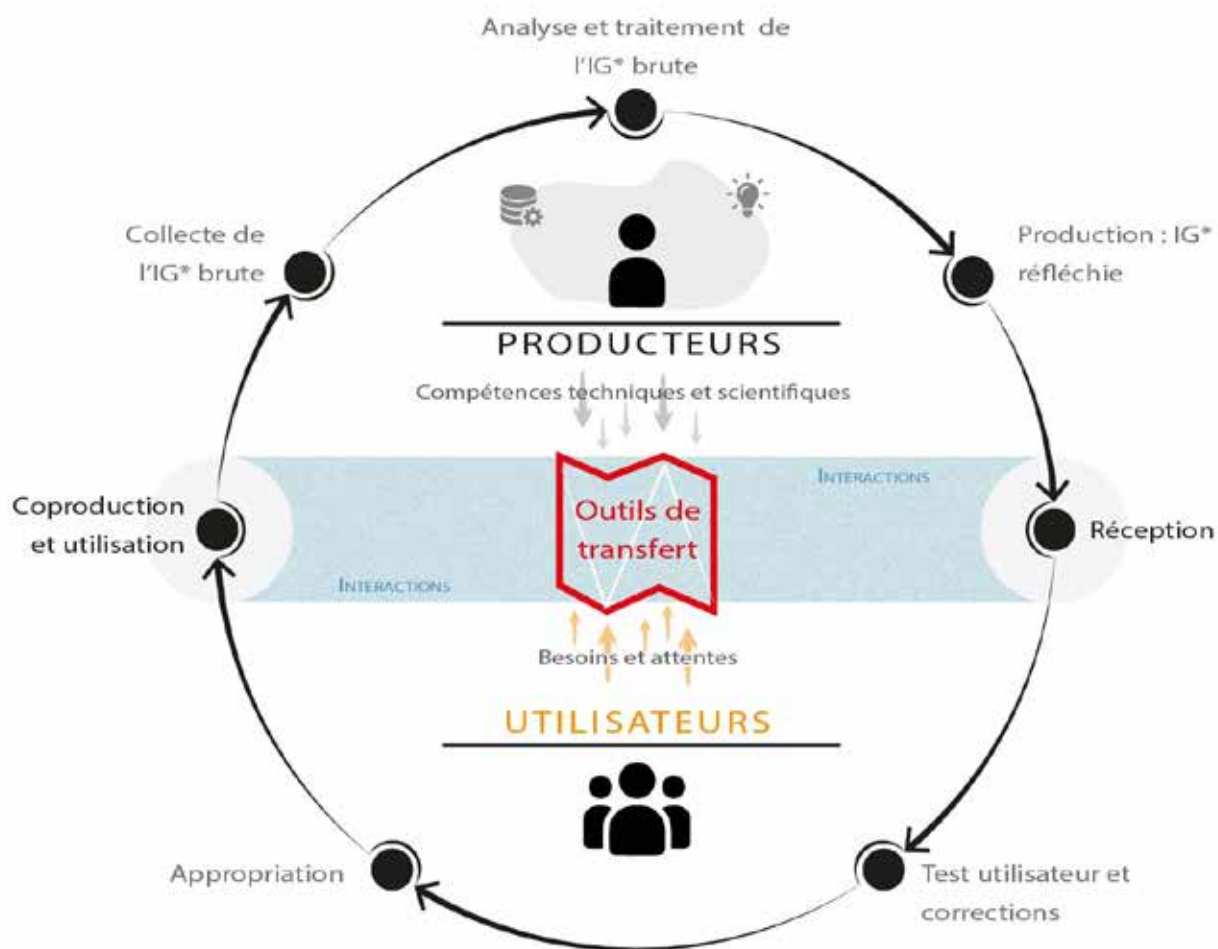


Figure 1 : Cercle théorique de la production de l'information géographique et de son transfert dans le cadre d'un retour d'expérience scientifique

limites ne permettent pas de confronter spatialement et à une échelle infra territoriale les effets de la catastrophe à des indicateurs sociodémographiques. Avant la saison cyclonique 2017, les îles de Saint-Barthélemy et de Saint-Martin ne bénéficiaient pas non plus de modèles numériques de terrain à haute résolution continue terre/mer, données pourtant essentielles à la connaissance des territoires exposés aux aléas qui les menacent (inondation, submersion marine, tsunami). L'absence de cette donnée était déjà mentionnée dans le rapport de phase 2 de la mise à jour du PPRN de Saint-Martin en 2008 (GEOTER, 2008). On note également l'absence de suivi scientifique et institutionnel dans plusieurs domaines ce qui ne permet pas de définir un état initial *ante-Irma*, comme la fréquentation touristique ou le suivi des milieux environnementaux (biodiversité, géomorphologie, etc.).

Après un travail préalable de récolte d'informations dans la presse, les réseaux sociaux et les témoignages, la première mission sur le terrain s'est organisée fin octobre 2017 sur les îles de Saint-Martin et Saint-Barthélemy, un peu moins d'un mois après le passage d'Irma. Durant 10 jours, cette mission collective a réuni 15 chercheurs du consortium pour étudier de multiples effets du cyclone Irma (gestion de crise, impacts, déchets, solidarités, comportements) en couplant des diagnostics de terrain, une première phase d'enquête auprès de 90 personnes, des entretiens auprès d'officiels et des relevés cartographiques. La récolte de données dans le mois qui a suivi le passage d'Irma est une étape importante du retour d'expérience. Les informations peuvent en effet perdre de leur véracité avec le temps (rumeurs, désinformations par les différents vecteurs médiatiques, perte de détails, généralisation de l'information) (Moatty *et al.*, 2019). Des entretiens conduits en métropole, Guadeloupe et Martinique avec de hauts responsables impliqués dans les processus de gestion de crise et de planification de la reconstruction viennent compléter ces actions. Le recueil des témoignages et des réactions « à chaud » auprès des populations locales et des institutionnels en place au moment de la catastrophe est essentiel pour fiabiliser la mémoire de l'événement (Defossez et Gherardi, 2020). Trois autres missions se sont succédé sur le terrain à environ six mois d'intervalle (mai 2018, novembre 2018 et mars 2019) regroupant les différents partenaires pour un suivi régulier de l'évolution de la reconstruction et du relèvement territorial. Plusieurs autres missions se sont déroulées ponctuellement jusqu'en novembre 2020. Ces partenariats scientifiques s'inscrivent dans une continuité de recherches sur les risques et les catastrophes naturelles aux Antilles

(programme ANR CASAVA, projet EXPLOIT) en lien avec le changement climatique (programme FEDER C3AF). L'interconnaissance préalable entre partenaires permet de structurer rapidement des référentiels et de mettre en place un langage commun autour de l'information géographique : deux prérequis gages d'une réponse réactive et efficace face à la crise en cours.

L'accès aux données produites au cours de la catastrophe, notamment les données spatiales, reste une difficulté importante, même à des fins de recherche scientifique. C'est le cas par exemple dans le domaine assurantiel, où les données spatialisées à l'échelle du bien sont confidentielles. Il en va de même pour les domaines des télécommunications et des réseaux vitaux (eau et électricité) ainsi que pour toutes les informations en lien avec la sécurité du territoire (actions de l'armée et des forces de l'ordre). Ce manque de disponibilité de la donnée dans plusieurs secteurs, a amené l'équipe du retour d'expérience du projet TIREX³ à en produire une grande quantité par des méthodes d'acquisition diversifiées (enquêtes, relevés de terrain, images aériennes par avion télépiloté, recherche d'archives, etc.).

Les temps de la production cartographique au cours d'une crise cyclonique

L'aléa cyclonique se distingue par une phase de surveillance et d'anticipation du phénomène sur plusieurs jours. Les données météorologiques de suivi de ces dépressions sont récoltées au moyen de satellites, d'avions et depuis le sol au moyen de radars. Elles sont analysées par les Centres Météorologiques Régionaux Spécialisés (CMRS) et sont intégrées à des modèles de prévision numérique utilisés pour déterminer leurs principales caractéristiques telles que leurs trajectoires théoriques, les champs de vents et les précipitations à venir. Ces paramètres et le franchissement de certains seuils sont déterminants pour accompagner les autorités et services de sécurité civile dans leurs prises de décision à l'approche d'un phénomène. Aux Antilles françaises, et bien que le CMRS de la zone soit le National Hurricane Center (Miami - Etats-Unis), c'est Météo-France qui édite des bulletins et des cartes pour guider les préfetures dans leur choix des niveaux d'alerte à diffuser aux populations. Aujourd'hui, les trajectoires cycloniques sont déterminées avec suffisamment de précision au moins 24 heures avant leur atterrissage. Pour autant, il reste difficile de prévoir les modifications des

³ l'équipe est portée par un groupement scientifique de métropole et des Antilles à forte composante universitaire en Sciences Humaines et Sociales (SHS) et aux approches complémentaires, souvent à finalité opérationnelle. Il associe également deux directions interrégionales de Météo-France et un acteur privé, la Caisse Centrale de Réassurance (CCR).

régimes de vent (renforcement ou diminution) et de pluies ainsi que les phénomènes associés liés à la mer (surcote et houle). Quelques heures avant le passage de l'œil du cyclone sur les îles de Saint-Barthélemy et Saint-Martin, le Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM) a proposé aux autorités des cartes de submersion marine par houle cyclonique afin de guider plus précisément les autorités locales dans les mesures préventives, comme les propositions d'évacuation des populations exposées (Novembre, 2020).

Une fois l'événement passé, la remontée des informations du terrain vers les autorités compétentes est capitale pour calibrer et guider les réponses opérationnelles et institutionnelles. Il s'agit en premier lieu de dénombrer et de localiser les victimes directes pour engager les opérations de recherche et de sauvetage puis, le cas échéant de déclencher le plan NOMBREUSES VICTIMES (NOVI) du dispositif ORSEC. Dans le même temps, des diagnostics ponctuels sont conduits par des équipes spécialisées de la sécurité civile déployées pour évaluer les dommages aux bâtiments stratégiques afin de rétablir au plus vite les réseaux vitaux. En fonction de l'ampleur de la catastrophe, des moyens satellitaires peuvent être mobilisés pour fournir des évaluations de dommage en seulement quelques jours. Parfois, des missions d'acquisition de données environnementales très spécifiques sont menées, comme à la suite du passage d'Irma, où des levés bathymétriques sont réalisés pour permettre aux navires de secours de débarquer en sécurité en cas de non accessibilité des ports. Rapidement des diagnostics systématiques et des mesures physiques du phénomène sont réalisés pour mieux comprendre la catastrophe, comme par exemple la cartographie de la zone submergée (CEREMA, 2017). Autant de données qui, aujourd'hui, servent aux institutions locales à Saint-Martin et Saint-Barthélemy pour le suivi de la reconstruction ou encore à la révision du PPRn (Plan de Prévention des Risques naturels).

Dans le même temps, au cours d'une crise, des bénévoles nationaux et/ou internationaux utilisent leurs compétences en informatique et en Système d'Information Géographique (SIG) pour fournir aux ONG et organismes de secours des éléments géolocalisés permettant d'évaluer les zones concernées, d'estimer les dommages, et dénombrer les impliqués (Musquet, 2018). Juste après le passage d'Irma, des démarches de cartographie participative ont été mises en place sur les îles françaises mais aussi ailleurs dans la Caraïbe. Des cartographes volontaires de la communauté H.O.T. (Humanitarian OpenStreetMap Team) se sont mobilisés à distance pour mettre à jour les bases de données cartographiques pré-cycloniques de la partie française de l'île de Saint-Martin et

de l'île de Saint-Barthélemy, notamment celles des constructions et des routes. Avant d'être publiées et exploitables, une phase de validation a été nécessaire pour homogénéiser et vérifier les données des multiples opérateurs. Elles ont été validées le 8 septembre 2017 pour Saint-Barthélemy et seulement le 16 octobre 2017 pour Saint-Martin, le délai étant dû à la fiabilité et à la validité des données antérieures au cyclone. Sur Saint-Martin cette démarche n'a pas pu être optimale pour les secours et la planification des interventions d'urgence. Des volontaires de l'association VISOV (Volontaires Internationaux en Soutien Opérationnel Virtuel) se sont aussi mobilisés dès le 5 septembre 2017 afin de géolocaliser les informations qui circulaient sur les réseaux sociaux concernant le passage d'Irma. Grâce à une convention avec le Centre Opérationnel de Gestion Interministérielle des Crises (COGIC) ces informations décrivant par exemple les quartiers sans électricité, les photos et les vidéos des dégâts ont été remontées au niveau national par les bénévoles. Dans les jours qui ont suivi le cyclone, une cartographie des personnes déclarées disparues par leurs proches hors de l'île a été réalisée puis de l'information concernant leur statut était actualisée (retrouvé, blessé etc.) régulièrement.

Plusieurs semaines/mois après la catastrophe, quand vient le temps des retours d'expérience "à froid", les données produites en période d'urgence sont autant de référentiels pour comprendre la crise et analyser le relèvement territorial. Elles sont complétées et analysées par des experts lors des retours d'expériences scientifiques. A titre d'exemples dans le cadre du projet TIREX, des relevés de terrain sur les littoraux ont permis l'évaluation des capacités de récupération des systèmes côtiers à différentes échelles spatiales : de la cellule sédimentaire à une comparaison inter-îles (Rey *et al.*, 2019 a ; Pillet *et al.*, 2019 ; Duvat *et al.*, 2019) (fig. 2a). En complément, des diagnostics de dommages aux bâtis ont été réalisés pour reconstituer et mieux comprendre les processus d'endommagement d'un cyclone. Ils ont été confrontés à des cartographies issues de simulations numériques des effets locaux des vents à très haute résolution spatiale (30 m) afin de reconstituer plus précisément l'endommagement au bâti (fig. 2b) (Cécé *et al.*, 2020). La représentation cartographique des dommages elle-même a fait l'objet de recherches pour une optimisation des variables visuelles et ainsi offrir une vision synoptique innovante d'une situation post-catastrophe (fig 2c) (Candela *et al.*). Aujourd'hui encore, le suivi de la reconstruction se poursuit au moyen de télédétection en comptabilisant les surfaces de toitures bâchées par quartier. Il est complété ponctuellement sur le terrain par des relevés bâtiment par bâtiment pour fiabiliser les résultats. L'analyse du relèvement territorial est également enrichie, d'une part, par une étude de la reprise économique et, d'autre

part, une étude du relèvement des liens fonctionnels entre les infrastructures critiques. La première étude a été réalisée en faisant du porte à porte chez les commerçants à l'occasion de chaque mission du projet, ou encore en collectant des données issues du tourisme (reprise de l'activité maritime et aérienne, données de fréquentation de la plateforme de location Airbnb, etc.). La seconde étude a été menée en comparant les pertes de liens fonctionnels entre les infrastructures critiques *ante* et *post Irma* au moyen d'une matrice origine/destination pondérée par l'importance des interactions entre les services (fig. 2d) (Arnould, 2019). Cette méthode a l'avantage de fournir un aspect quantitatif et une vue d'ensemble à l'échelle de l'île. Des travaux ont également été conduits pour comprendre la chaîne d'organisation spatiale du stockage, du traitement et de la valorisation des débris post-cycloniques en milieu insulaire suite aux destructions (Vinet *et al.*, 2020).

Cette diversité de données est cartographiée au moyen de plusieurs outils de SIG tels que *Arcgis Desktop* ou *Qgis*. Les analyses spatiales et les méthodes de traitement sont plus ou moins complexes voire novatrices. Le choix dépend à la fois de la nature des données, des échelles spatiales de représentation, de la présence d'indications temporelles, des besoins d'analyse et du public cible. L'information géographique est traitée différemment en fonction de sa nature et du message à transmettre.

Au-delà de l'effort de conservation de la mémoire de la catastrophe et de la compréhension des phénomènes, les retours d'expériences scientifiques sont conduits pour fournir des données comparables avec les prochains événements majeurs et dans une perspective de reproductibilité des méthodes. A plus court terme, à la lumière des enseignements observés et dans une démarche de transfert des connaissances, ces retours d'expériences doivent permettre d'améliorer certains produits ou opérations relatifs au domaine de la gestion des risques.

Contributions pour une meilleure appropriation et diffusion de la cartographie rapide d'évaluation des dommages au bâti

Des données satellitaires au service de la gestion des crises sous exploitées après Irma

Au lendemain du passage du cyclone Irma, l'absence de moyens de communication avec les territoires de

Saint-Barthélemy et de Saint-Martin laisse craindre le pire aux autorités régionales et nationales (Moatty *et al.*, 2019). Les premiers vols de reconnaissance rapide font état de lourds dommages aux infrastructures. Il faudra attendre quelques jours pour obtenir une évaluation quasi systématique des dommages au bâti réalisée à partir d'images satellitaires. Ces premières évaluations sont issues de l'activation de la Charte internationale «Espace et Catastrophes Majeures». Ces services interviennent en situation d'urgence et sont utiles aux gestionnaires de crise et aux opérations de terrain (Stevens, 2008). Leur objectif est de fournir en très peu de temps une information géographique dérivée des données satellitaires brutes. Pour le service Copernicus Emergency Management Service (EMS), mobilisé à la suite du passage du cyclone Irma, les délais d'acquisition ont été réduits grâce à l'agilité des satellites Sentinel et Pléiades (Yésou *et al.*, 2015 a). Ces délais se comptent seulement en quelques heures *a contrario* des cycles "normaux" d'observation de la terre par les satellites d'observation de la terre qui s'estiment en semaine et en mois (Girard et Girard, 2010). Parmi les informations produites, figure une estimation des dégâts causés par une catastrophe, notamment l'évaluation des dommages aux bâtiments, réseaux et infrastructures critiques. L'analyse est essentiellement réalisée par photo-interprétation grâce aux imageries optiques haute résolution (50 cm pour les satellites Pléiades 1A et 1B) et à travers deux approches. La première, mono-temporelle, est effectuée en l'absence d'images de référence. La comparaison des dommages s'effectue avec le bâtiment et son voisinage en analysant de manière générale la réflectance et la modification de la structure des objets (André *et al.*, 2001). La seconde approche, multi-temporelle, est basée sur la comparaison des images satellitaires acquises pendant ou juste après un événement catastrophique avec, si c'est possible, un état de référence obtenu grâce aux images archivées (Yésou *et al.*, 2015-b). Ces cartographies sont déclinées à plusieurs échelles : fines (1 : 5 000), intermédiaires (1 : 25 000) et larges (1 : 100 000) en fonction des besoins des utilisateurs. Des produits numériques livrés au format de données SIG sont également fournis via des serveurs de bases de données.

Les cartes produites sur Saint-Martin et Saint-Barthélemy pour l'analyse des dommages ont été publiées entre la période du 09/09/2017 et du 21/09/2017 (fig. 2). D'après les entretiens menés auprès d'acteurs locaux et régionaux de la gestion de crise par les membres de l'équipe TIREX, il semble que ces cartes n'aient pas été exploitées en situation d'urgence. A notre connaissance, les données concernant l'estimation des dommages n'ont pas eu

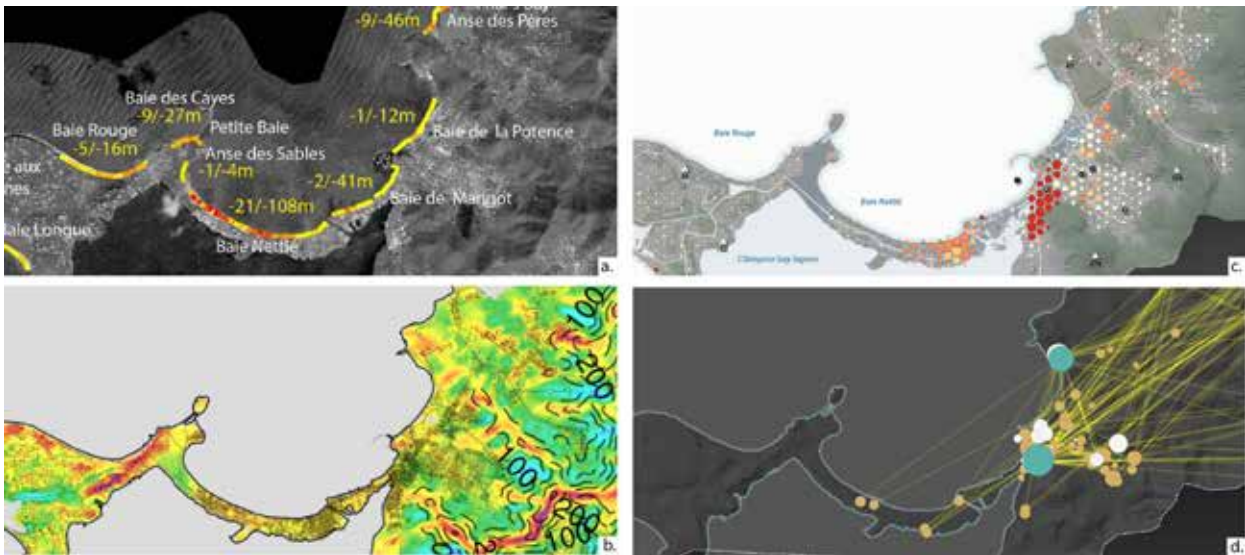


Figure 2 : Extraits de cartes illustrant la diversité des représentations cartographiques au sein du projet TIREX

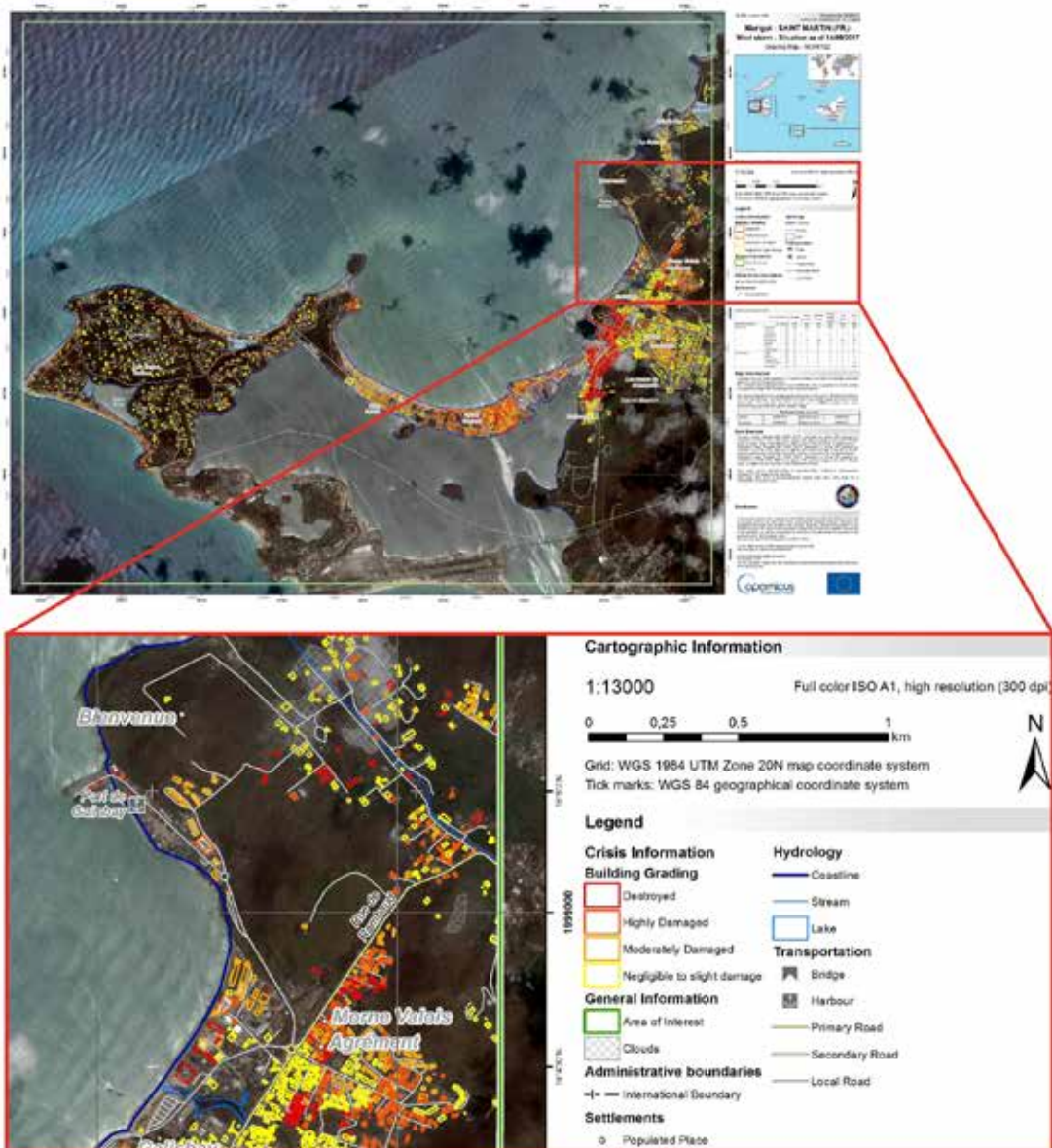


Figure 3 : Cartographie des dommages au bâti de la partie française à l'ouest de l'île de Saint-Martin (Copernicus, 14 septembre 2017)

d'application opérationnelle. Lors de nos entretiens, la principale raison identifiée de ce manque de mobilisation des cartographies post-catastrophe était la méconnaissance des produits eux-mêmes ainsi que leur usage au niveau local. Nous avons également noté que la petite taille des territoires favorise la connaissance locale a priori des secteurs les plus exposés et vulnérables. Le recours aux évaluations des dommages bâtiment par bâtiment à partir des données satellitaires présentait peu d'intérêt pour les autorités dans cette configuration territoriale puisque des évaluations remontaient directement du terrain via les services de sécurité civile selon des protocoles et des grilles de diagnostics déjà éprouvés. Ces informations de terrain ont permis notamment de partager le territoire de Saint-Martin en six secteurs de taille homogène afin que les forces de l'ordre et les ONG présentes répartissent les moyens de surveillance, de distribution de vivres et assurent la coordination de la récolte des déchets. Les données issues de l'imagerie satellitaire seront surtout mobilisées par le Gouvernement français dans sa communication de crise plusieurs mois après la catastrophe pour annoncer les premiers bilans de la reconstruction.

L'incertitude liée aux méthodes d'acquisition : récolter de l'information pour comparer et qualifier la fiabilité des données

Les informations communiquées par des services de cartographie rapides doivent permettre d'orienter la réponse de crise. Leur fiabilité est primordiale. Pourtant l'analyse par photo-interprétation d'imagerie satellitaire est particulièrement sensible à la nature de l'endommagement des structures ainsi qu'à la structure du tissu urbain (André *et al.*, 2001). En fonction de l'aléa, les formes de destruction sur le bâti sont multiples et ne se limitent pas forcément à l'endommagement des toitures, seule partie visible depuis les images satellitaires. Ainsi à titre d'exemple, les bâtiments d'un territoire cyclonique présentent à la fois les dommages liés au vent, principalement sur les toits, mais également sur les façades par l'action destructrice de la houle cyclonique (Rey *et al.*, 2019 b). Ces sources d'incertitude ne peuvent être mesurées que par des retours d'utilisateurs, des diagnostics sur le terrain et un protocole scientifique rigoureux (Ogawa et Yamazaki, 2000). Quelques semaines après le passage de l'ouragan Irma à Saint-Martin en 2017, plusieurs relevés de dommages sont réalisés in situ dans le cadre du projet TIREX. Ils ont pour objectif principal de confronter les données de terrain aux valeurs d'endommagement annoncées par les produits Copernicus EMS. Cette confrontation est réalisable et pertinente grâce à la

proximité des périodes d'acquisition entre les deux sources des diagnostics (moins de 30 jours) et parce que les grilles d'évaluations sont comparables. Au total, ce sont 568 bâtiments (soit 4 % du total) qui ont été évalués sur 3 secteurs du littoral de Saint-Martin. Ils ont été choisis pour permettre une analyse des dommages sur plusieurs configurations urbaines : une trame dense et hétérogène au quartier de Grand-Case, une trame individualisée et une hétérogénéité des formes du bâti au quartier de Baie-Nettlé, une trame individualisée et des bâtiments homogènes à Baie-Orientale. Bâtiment par bâtiment, à l'échelle des trois secteurs (<https://arcg.is/eKq4C>), ces relevés ont montré des écarts d'endommagement importants, notamment sur le quartier de Grand-Case (destruction par la mer et tissu urbain dense) (fig. 4). Ces écarts sont moins visibles sur le secteur de Baie-Orientale. Globalement, les évaluations Copernicus sont bonnes pour les classes de dommages élevés, la destruction totale ou quasi totale du bâtiment étant bien visible sur les images Pléiade. *A contrario*, certains bâtiments catalogués dans la classe de dommages faibles étaient en réalité complètement détruits

Malgré les imprécisions mises en évidence par la confrontation aux dommages réellement identifiés au cours des relevés de terrain, cette première évaluation des dommages au moyen des données satellitaires présente un intérêt majeur dès les premiers instants d'une catastrophe (Yésou *et al.*, 2015a, Battiston *et al.*, 2019). Lorsqu'elles sont employées par les acteurs de terrain, ces données sont utiles aux opérations de secours pour disposer d'une vue d'ensemble de la situation au moins à l'échelle des quartiers pour dimensionner, déployer et guider les moyens humains et matériels. Cette échelle de lecture de l'information spatiale est importante puisqu'elle oriente les choix des cartographes dans la représentation des données de manière à optimiser les capacités de la carte et à répondre aux besoins des utilisateurs comme : localiser les secteurs prioritaires, quantifier un nombre d'enjeux endommagés ou encore évaluer des intensités de dommage.

Analyser et confronter des cartes produites pour améliorer les représentations

Les cartes d'endommagement issues des services de cartographie rapide sont diffusées principalement sous forme statique et avec des modes de représentation très variés. A titre d'exemple, à la suite du séisme d'Haïti en 2010, plus de 2 000 cartes ont été produites sans aucun consensus sur les pratiques cartographiques à l'échelle internationale (Kerle, 2010; Shankar *et al.*, 2010 ; Kerle, 2013 ; Kerle et Hoffman, 2013). Les représentations sémiologiques d'un corpus

de 134 cartes des dommages post-cyclones à l'échelle mondiale ont été analysées (Candela *et al.*). Les résultats de cette recherche démontrent que le choix des échelles cartographiques a une incidence sur les modes de représentation des dommages. De manière générale, la représentation des dommages des cartes aux petites échelles est très hétérogène. Les utilisateurs sont confrontés à des techniques variées comme le carroyage, des points au bâti, des blocs urbains ou encore des cartes de densité sans qu'aucun consensus ne soit établi. Une même donnée est représentée par des méthodes d'agrégation quantitative et/ou qualitative différentes en fonction des producteurs. *A contrario*, les cartes produites aux grandes échelles affichent les dommages principalement par des techniques de point au bâti, *i.e.* une implantation ponctuelle individualisée pour chaque bâtiment. Dans les deux cas, la majeure partie des productions analysées ne respecte pas les règles élémentaires de la sémiologie graphique et sont même qualifiées de "catastrophe cartographique" par Voigt *et al.* (2011), le risque principal étant d'introduire des approximations, voire des erreurs dans l'interprétation quantitative et/ou qualitative des données cartographiées. Afin de mettre en exergue certaines d'entre elles et dans le cadre d'une thèse en cours⁴ une expérience utilisateur a été menée sur un groupe homogène de 21 participants (Master Géographie parcours GRCN, Université Paul-Valéry, Montpellier 3) et appliquée à 13 cartes différentes. Le choix s'est porté sur des cartes de dommages aux infrastructures d'un même secteur de Port-au-Prince et sa région (Haïti) suite au séisme de janvier 2010. Ces cartes ont été réalisées par différents producteurs, selon des représentations et des échelles différentes, mais dont les données sources sont identiques (Commission Européenne en collaboration avec le SERTIT et la Charte Espace, 2010). Deux tâches principales ont été demandées aux étudiants. D'une part, ils devaient répondre pour chaque carte à des questions simples portant sur la localisation des secteurs les plus touchés et en estimer le niveau et les quantités de dommages. Ces tâches, réalisées par l'intermédiaire d'un questionnaire, s'accompagnaient d'une vectorisation sous SIG des zones les plus touchées pour chaque type de représentation des données (interpolation, blocs urbains, carroyage, point). Les réponses des participants ont fait l'objet de traitements statistiques simples sous la forme de cartes par carroyage (fig. 5). Ces cartes illustrent la distribution des observations en affichant le pourcentage de citations par maille. D'autre part, les étudiants étaient également

interrogés sur la facilité de lecture de chaque carte et sur leur niveau de certitude dans l'interprétation.

En se focalisant sur les résultats des cartes échantillonnées aux petites échelles (fig. 5, a), l'analyse des pourcentages de citations de vectorisation (fig. 5, b) révèle que les cartes par interpolation, blocs urbains et carroyage font l'objet d'un ciblage plus précis des dommages que la technique de point au bâti. Pour cette dernière technique, plus de 75% des participants ont identifié sans distinction l'ensemble de la ville de Port-au-Prince. La précision de la représentation empêche une délimitation précise de la zone la plus touchée et donc une bonne localisation des dommages. Même si cette précision est améliorée par les méthodes d'agrégation de la donnée, on constate néanmoins des divergences importantes dans l'interprétation des trois autres méthodes. Seuls deux secteurs matérialisés par des cadres rouges (fig.5) sont cités à plus de 75 % par les étudiants quelle que soit la méthode d'agrégation. Par ailleurs, les cartes de blocs urbains et de carroyage pour lesquelles des données de dommages sont visibles sur l'ensemble de l'emprise de la carte ont contribué à une interprétation erronée de la consigne. Au moins 25 à 50 % des étudiants ont indiqué des zones plus étendues concernant la localisation des dommages les plus forts.

Ces analyses cartographiques corroborent les réponses obtenues aux questionnaires concernant l'évaluation des niveaux dommages et leur quantité. Ces dernières révèlent des erreurs importantes d'interprétation de la donnée cartographiée elle-même. Pourtant préparés à l'exercice, habitués à la lecture de cartes et eux-mêmes formés à la cartographie, plus de 50 % des étudiants donnent des éléments de réponse à des questions d'ordre quantitatif ou qualitatif sans disposer en réalité de l'information. En effet, 64 % des répondants ont fourni une information quantitative à la représentation par interpolation. 88 % ont également fourni une information qualitative à la représentation par blocs urbains. Ces confusions semblent avoir eu peu d'incidence sur le niveau de certitude des étudiants. 85 % d'entre eux estiment qu'ils sont "sûrs" à "tout à fait sûrs" des réponses qu'ils ont fournies à la représentation des blocs urbains (fig. 5, a). Ils considèrent ces techniques plus efficaces, lisibles et accordent une plus grande confiance à leur interprétation. Ils sont pourtant induits en erreur par la représentation des données au moyen d'une variable de couleur (jaune, orange, rouge) sur des

4 Candela, T. Optimisation cartographique pour la gestion des risques et des crises majeurs : le cas de la cartographie rapide des dommages post-catastrophes. Thèse de doctorat, ED60, Université Paul-Valéry - Montpellier 3, UR LAGAM (2017- soutenance prévue 2021)

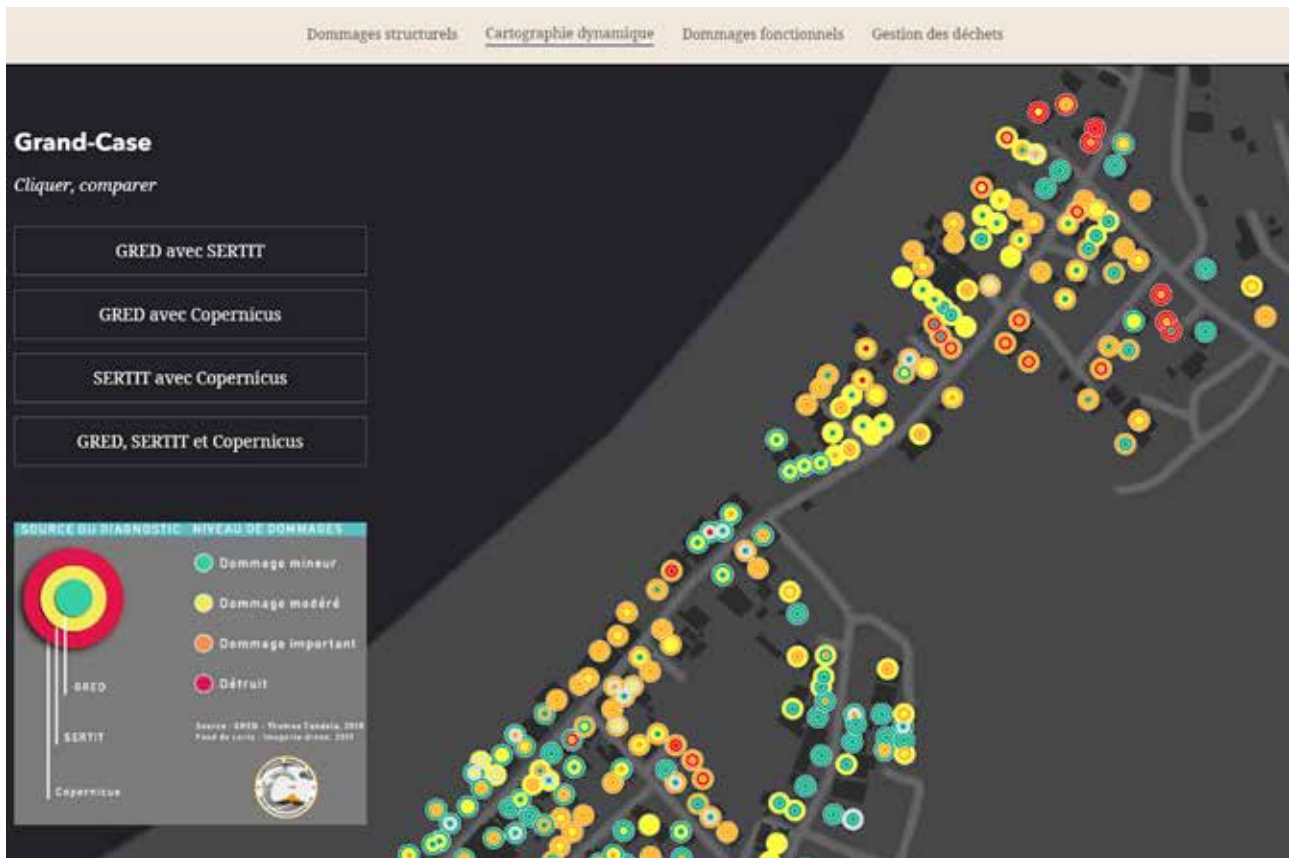


Figure 4 : Capture d'écran de la StoryMap "Les infrastructures à l'épreuve d'Irma", exemple de la carte dynamique de présentation des dommages au bâti sur le quartier de Grand-Case (source : <https://arcg.is/eKq4C>)

aplats surfaciques. Ces variables sont habituellement employées pour la représentation des dommages (faible, moyen, fort) et non des quantités relatives. Les résultats préliminaires de cette étude témoignent des conséquences importantes dans le choix des méthodes d'agrégation des données et des choix sémiologiques graphiques (Bertin, 1967) sur l'interprétation finale des dommages alors même que cette tâche est essentielle pour les gestionnaires en situation de crise.

A l'issue de ce travail, nous avons proposé un prototype sémiologique intégrant les règles de sémiologie graphique (Bertin, 1967) et répondant aux besoins des utilisateurs à savoir : afficher des informations quantitatives : *i.e.* le nombre de bâtiments endommagés (variable taille) et qualitatives : *i.e.* les niveaux de dommages (variable couleur). Ce choix de visualisation a pour principal objectif d'optimiser la lecture thématique aux échelles synoptiques en agrégeant les informations habituellement données à l'échelle du bâti. Il se base sur un carroyage régulier permettant des traitements statistiques spatiaux et une analyse multi-échelles. Cette dernière consiste à définir les dimensions et les positions de chaque niveau de mailles afin d'assurer leurs emboîtements statistiques relatifs aux niveaux de dommages et à la quantité de bâtiments concernés. Ce processus est important puisqu'il rend cartographiquement comparables les résultats de l'agrégation des différents niveaux de carroyage. On parle alors de maillage dyadique, c'est-à-dire que la taille de la maille est agrandie successivement d'un facteur deux. Plus la maille est grande, plus la situation qui en résulte dépend de la distance à une masse importante d'informations qui est fortement lissée par les traitements statistiques. La variation de taille des mailles doit donc prendre en compte l'emboîtement des niveaux. Dans notre exemple, chaque niveau est trois fois plus large que celui qui le précède, et donc naturellement trois fois plus fin que le suivant (fig. 6).

La méthode d'agrégation des dommages sur un système de mailles régulier a pour principal avantage de simplifier des processus spatiaux (Pumain et Saint-Julien, 2010) et de rendre plus rapide l'identification visuelle des informations aux petites échelles, chose impossible lorsque ces informations sont représentées à l'échelle du bâti. L'association de cette technique à celle du semis régulier de points, utilisant les variables visuelles de taille et de couleur, permet à cette cartographie de livrer tout son potentiel, lorsqu'il est intégré à de la cartographie dynamique.

Exemples d'usages du geoweb pour la valorisation des retours d'expériences scientifiques

Développer des outils dédiés au partage des connaissances : le choix de la cartographie dynamique

Les besoins en données géographiques au cours d'une catastrophe s'inscrivent simultanément à plusieurs échelles spatiales et temporelles en fonction des étapes de la crise, des acteurs et des missions à accomplir. Ces besoins amènent à réfléchir la carte non plus comme un outil statique, contraint à des formes de visualisation figées dans l'espace et le temps, mais comme une interface dynamique capable de visualiser une ou plusieurs informations géographiques. Les outils du "géoweb" (Mericskay, 2016) offrent justement de nouvelles perspectives (Scharl, 2007). Nous avons créé une cartographie web, dynamique et interactive destinée à présenter ce que pourrait être une future plateforme de partage et de visualisation de données post-catastrophe. Elle offre aux utilisateurs la possibilité de modifier eux même l'échelle de la carte en naviguant entre les différents niveaux de zoom standardisés du référentiel Web Mercator (EPSG : 3857) comme sur les plateformes Google Maps et OpenStreetMap. Elle est réalisée sur la base de la technologie Leaflet, librairie JavaScript open source, qui permet l'interface avec les données réalisées sous SIG. Cette cartographie est disponible à l'adresse suivante: <https://worldismap.com/dommages-irma/>. A l'ouverture de la carte (fig. 7), une série d'informations contextuelles sur l'aléa s'affichent (phase #1). Les seuils de zooms suivants illustrent l'impact du cyclone à l'échelle régionale et replacent la catastrophe en termes de coûts des dommages depuis 1990 (phase #2). A un certain niveau, l'utilisateur est appelé à zoomer sur l'île de Saint-Martin (phase #3). Dès lors, on entre dans la quatrième phase (phase #4) du visionnage. Celle-ci intègre une analyse multiscalaire des dommages à partir des données Copernicus EMSN-049 (2018). Le prototype sémiologique agrège les informations du niveau 12 (1 : 136 495^e) au niveau 15 (1 : 17 062^e) grâce au processus d'emboîtement des mailles. A partir du niveau 16 (1 : 8 531^e), les dommages sont affichés à l'échelle du bâti par une implantation ponctuelle. A ces seuils de zoom, l'utilisateur peut explorer la carte. Il interagit avec les différents éléments cliquables pour obtenir des informations sur les niveaux d'endommagement ou encore sur les secteurs d'étude du projet retour d'expérience. Tout au long de son expérience cartographique, l'utilisateur déploie deux sens : la vision, principale vecteur d'acquisition de l'information, mais également l'ouïe. La carte contient des inte-

Pourcentage de citations des zones définies comme les plus touchées par les participants : Petites échelles

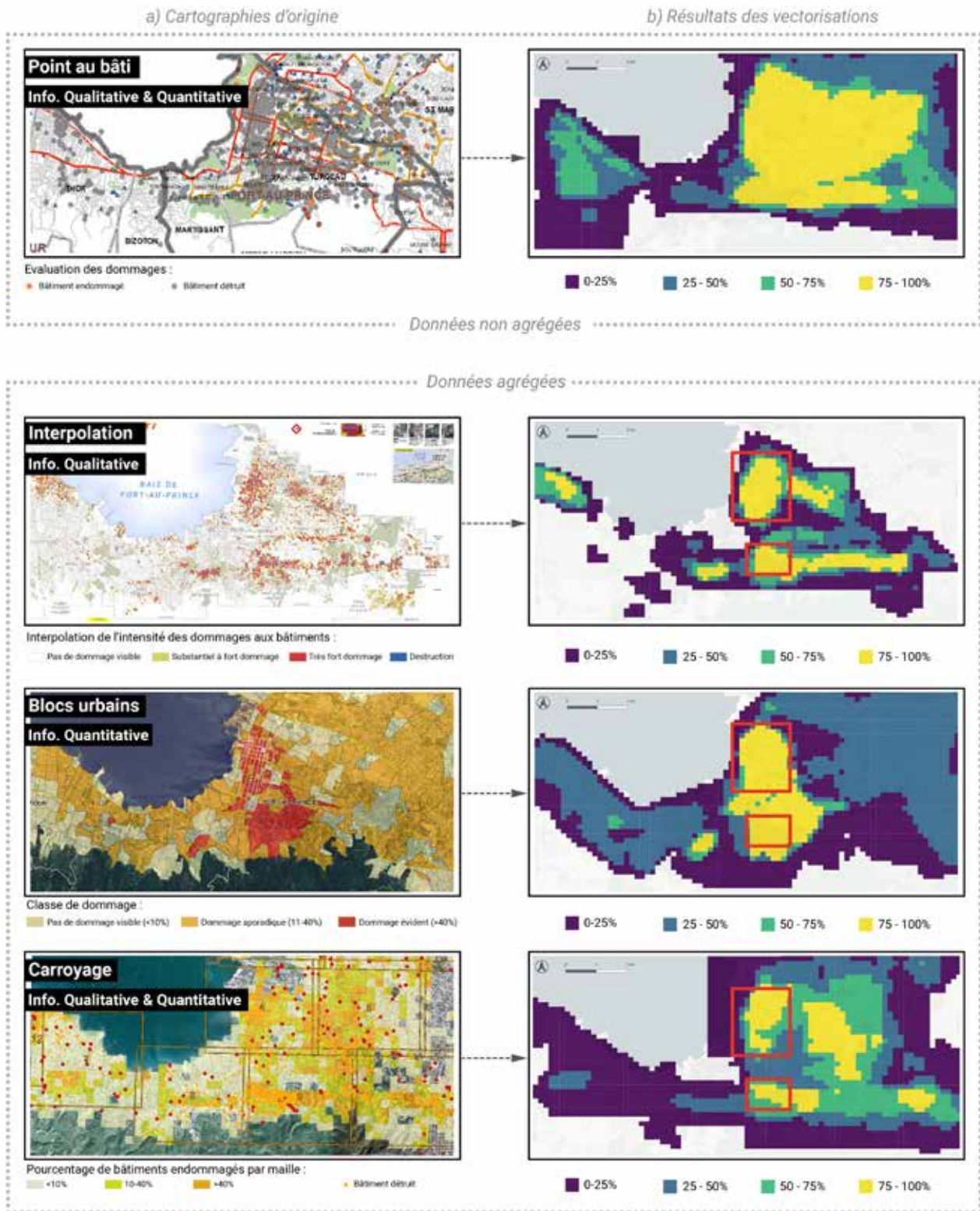


Figure 5 : 1) Pourcentages de citations des zones les plus touchées pour les techniques d'interpolation (A), de blocs urbains (B), de carroyage (C) et de points à des échelles cartographiques larges et 2) Convergence et divergence des interprétations

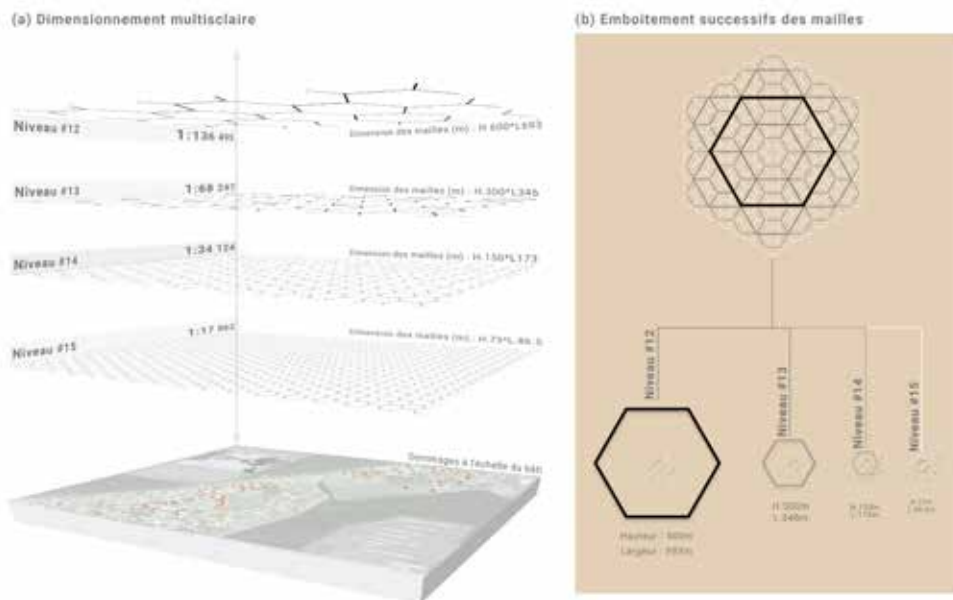


Figure 6 : Schéma de principe du dimensionnement multiscale (a) et de l'emboîtement successifs des mailles (b)

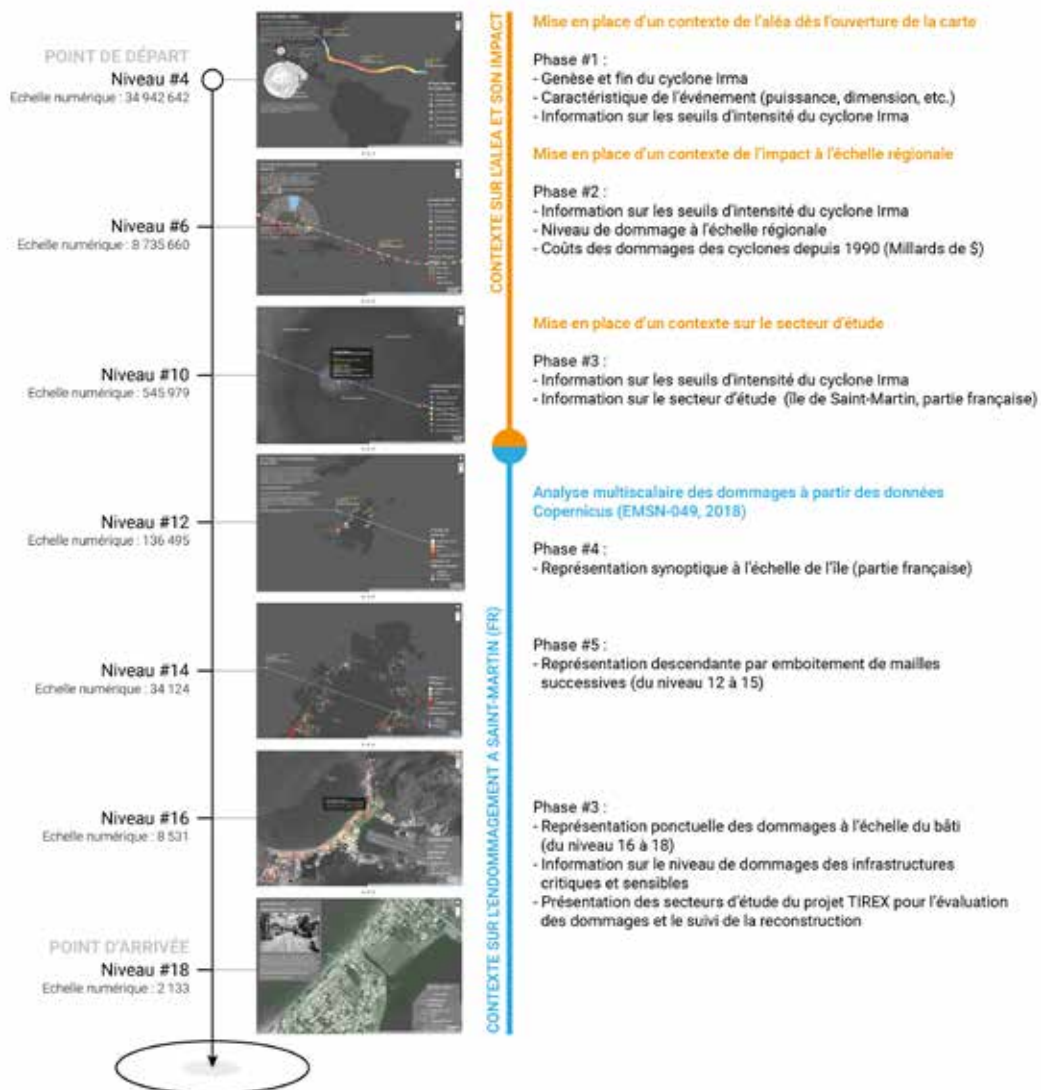


Figure 7: Description des niveaux d'affichage multi échelles des conséquences du cyclone Irma à Saint-Martin

rations sonores, déclenchées à partir de certaines actions ou du seuil de zoom, qui peuvent être annulées à tout moment. Les données sonores se décomposent en deux types : le premier correspond à l'ambiance sonore (dès l'ouverture de la carte jusqu'à la descente d'échelle sur l'île de Saint-Martin) et le second à une typologie sonore. L'ambiance sonore se définit par des sons (vents, pluies, vagues) qui s'adaptent aux données, elle reste spatialement et temporellement cohérente avec les niveaux de zoom. En dehors des sons ambiants, l'utilisateur est également amené à interagir avec les éléments géoréférencés comme les dommages au bâti ou encore les POI. Ces derniers sont conçus comme des éléments cliquables dont l'information visuelle est accompagnée d'une information sonore. Ils forment une banque de sons dont la typologie caractérise d'une part l'intensité des dommages et d'autre part les différentes infrastructures critiques du territoire de Saint-Martin (partie française).

Cette plateforme web cartographique apporte des informations complémentaires depuis une mise en contexte régionale de la catastrophe jusqu'à des niveaux de dommage à l'échelle du bâti. Dès lors, il est possible d'imaginer une plateforme similaire avec un axe plus opérationnel. Les données sur le suivi des événements cycloniques peuvent être intégrées au moyen de flux web et de chaînes de traitement automatisées. En cours de développement, ces dernières permettent d'agrèger les dommages à des échelles de visualisation intermédiaires pour améliorer les choix opérationnels en situation de crise. Ces résultats ont été présentés aux principaux organismes chargés de la photo-interprétation, notamment le SERTIT à l'échelle nationale. Cette carte est désormais accessible sur le site internet du projet TIREX, et s'insère dans une démarche plus vaste de valorisation et de conservation de la mémoire du risque par la cartographie web dynamique.

Valoriser et diffuser des résultats au moyen d'applications web optimisées : le choix des StoryMaps ESRI

Au-delà des publications scientifiques, de la rédaction d'un guide des principaux résultats et de l'organisation d'ateliers de restitution localement, un site internet dédié au projet a été réalisé pour contribuer plus largement au transfert des connaissances (<https://tirex.univ-montp3.fr/>). Sa conception repose sur des pages statiques qui offrent un accès contextualisé et synthétique aux livrables du projet ainsi qu'aux ressources documentaires. Malgré l'intégration d'éléments graphiques interactifs réalisés au moyen de la bibliothèque JavaScript

AmChart 4, de photographies commentées et de cartes interactives, le contenu et l'architecture classique du site sont davantage destinés à un public averti. Le double objectif de valoriser l'information spatiale du projet et de diffuser les résultats au plus grand nombre nous a conduit à utiliser une application internet de narration géographique à forte composante multimédia. Il en existe plusieurs, payantes ou en *open source*, plus ou moins sophistiquées (Caquard et Dimitrovas, 2017). Nous avons retenu la plus complète d'entre elles, la plus polyvalente et celle dont la prise en main est relativement intuitive. Il s'agit de la solution proposée par la société ESRI, nommée les *StoryMaps*. Elle s'intègre à la plateforme en ligne Arcgis Online qui permet de stocker, administrer et partager les données entre utilisateurs d'une même organisation. Arcgis Online propose aussi des outils d'analyse spatiale mais dont les capacités sont plus limitées que celles des SIG bureautiques. Bien que payante, cette solution est accessible aux membres des établissements d'enseignement et de recherche qui disposent de la licence de site "Education".

L'information géographique récoltée, produite et analysée en trois années de programme de recherche est conséquente. Elle alimente l'ensemble des thématiques de l'évaluation et de la gestion du risque cyclonique à des échelles spatio-temporelles variées et selon des représentations cartographiques diversifiées. Pour les mettre en valeur, huit *StoryMaps* ont été réalisées. Elles sont rassemblées en une neuvième *StoryMap* accessible directement depuis le lien suivant : <https://arcg.is/1KXmn1>. Chacune d'elle dispose d'une charte graphique unique et livre une version esthétique et originale des contenus scientifiques. Le parti pris de donner une identité propre à chaque *StoryMap* est facilité par la diversité des modèles d'applications proposés par Esri. La moitié des *StoryMaps* est conçue avec les modèles d'application *StoryMaps Journal*. Cette application est organisée en sections munies de volets latéraux dans lesquels peuvent s'insérer du texte et des supports multimédias. Les quatre autres sont réalisées avec des modèles plus récents nommés *Arcgis StoryMaps*. Leur interface graphique se rapproche des sites internet en une page déroulante tout en offrant la possibilité d'intégrer un menu d'onglets de navigation facilitant la lecture du récit (fig. 8, a.). La conception est plus intuitive et facilitée par des fonctionnalités optimisées notamment pour l'intégration d'autres applications cartographiques spécifiques comme les *DashBoards*. Les *DashBoards* offrent une vision synthétique des données tout en donnant aux utilisateurs la possibilité d'interagir avec la carte par des requêtes spatiales et/ou attributaires que le concepteur aura prédéfini. Il est aussi possible d'y intégrer des graphiques dont

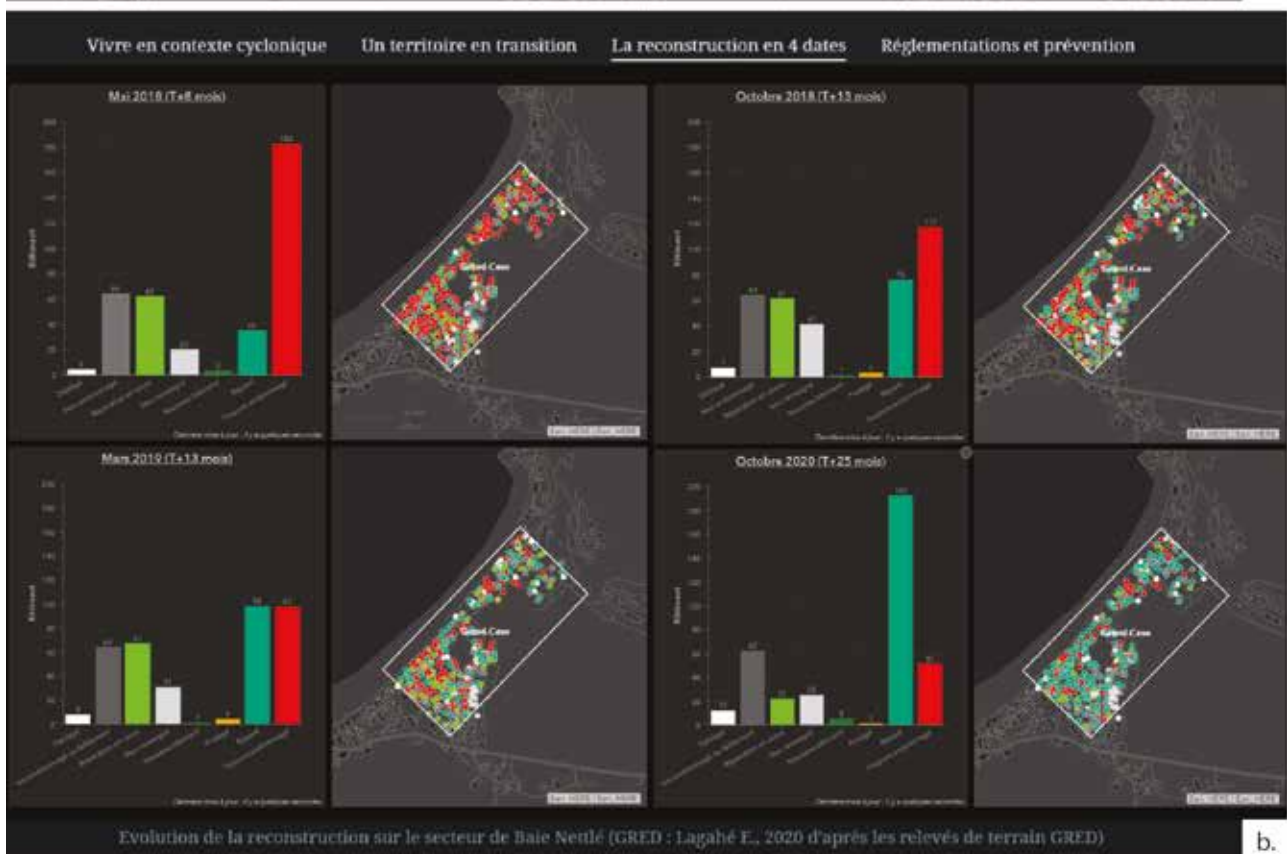
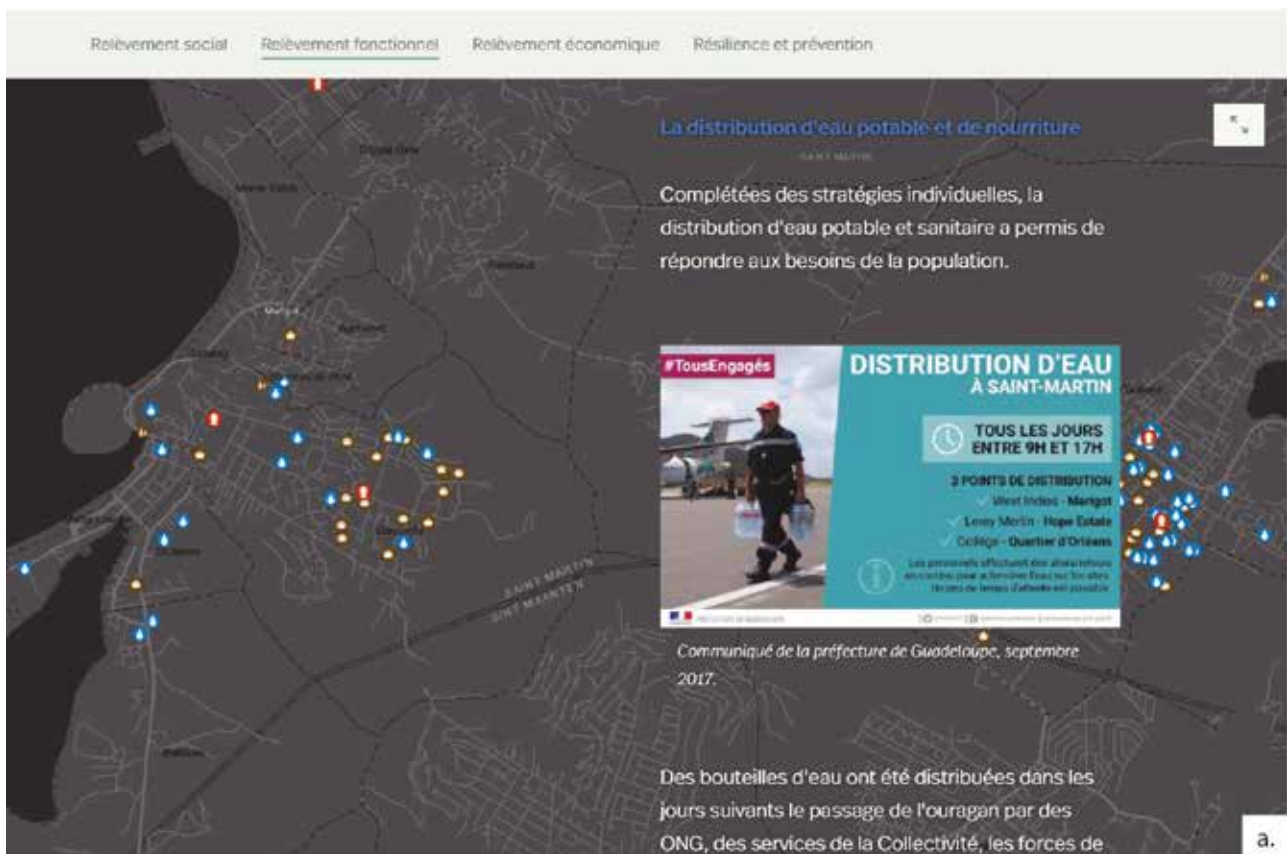


Figure 8 : Captures d'écran (a) d'un Dashboard dans la StoryMap "L'après Irma : le temps des reconstructions" (source : <https://arcg.is/1XaXWW>) (b) d'une web map intégrée à la narration de la StoryMap "Irma : les défis de l'après" (source : <https://arcg.is/5yW9S>)

les données sont associées à l'emprise des cartes (fig. 8, b.). L'usage des *StoryMaps* a permis de se détacher de la technique pour mieux se concentrer sur le contenu scientifique et la transformation des données en information (Kerski, 2015). En plus du site internet du projet, elles optimisent la valorisation et la diffusion des données au plus grand nombre au moyen de supports qui offrent des niveaux de lecture différents. Le résultat obtenu est très complet avec une interface ergonomique qui convient particulièrement bien aux projets de recherche (Antaniou *et al.*, 2021). Le contenu dynamique et interactif rend ces plateformes attractives auprès d'un public plus jeune, et qui peut être mobilisé dans le cadre de l'enseignement scolaire par exemple (Berendsen *et al.*, 2018 ; Egiedor et Foster, 2019).

Un avantage important du choix des *StoryMaps* ESRI est que le contenu s'adapte à l'affichage sur différents supports mobiles (smartphones, tablettes) selon le principe de conception de sites web réactifs. Les interactions entre cartes et médias en sont facilitées et procurent à l'utilisateur une expérience optimisée d'un récit fluide quel que soit le navigateur web utilisé. De plus, les applications d'ArcGis Online sont régulièrement mises à jour. Elles disposent de fonctionnalités toujours plus innovantes même si ces mises à jour fréquentes peuvent aussi causer des problèmes techniques lors de la réalisation d'un récit, ou nécessiter l'actualisation de certaines applications déjà utilisées. Au-delà des aspects techniques et organisationnels, la difficulté principale de l'usage des supports numériques, dont les *StoryMaps*, sera la mise à jour régulière des données après l'arrêt du programme de recherche. En effet, la conduite d'un retour d'expérience scientifique continu sur plusieurs années voit sa réussite par la création d'un réseau solide et la multiplication des échanges avec les acteurs de la gestion de crise, et de la reconstruction (institutionnels, acteurs locaux, associations, journalistes, etc.). Le maintien des relations de confiance nécessite un engagement fort des équipes dans la durée. Ces liens avec les partenaires peuvent s'étioler avec le temps et compliquer l'accès aux données nécessaire à d'éventuelles mises à jour. Ces difficultés sont d'autant plus accrues sur des territoires morcelés et où le *turn-over* des fonctionnaires est important.

Il aurait aussi été intéressant d'accroître la participation des citoyens dans la co-construction de bases de données au-delà du travail de récolte des informations mené sur le terrain. Il serait possible de proposer un espace dédié et ouvert aux commentaires des utilisateurs, afin de favoriser les échanges avec la population. Outre la difficulté de réalisation, ce type

d'interaction en ligne implique un suivi régulier de la plateforme avec une présence quasi quotidienne ou au moins hebdomadaire pour recueillir rapidement les remarques et obtenir une plus-value efficace. Il en va de même pour l'intégration des données des réseaux sociaux qui nécessitent une réactivité quasi en temps réel. Cela pose également la question des droits de diffusion, droits d'auteurs et de confidentialité des données. Au regard du fonctionnement par financement ponctuel des projets de recherche, il semble préférable d'axer le principe de transfert de connaissances sur le moyen voire le long terme à l'échelle du territoire. Il semble que les institutions locales seraient les plus à même de s'approprier au préalable les contenus scientifiques puis de les transmettre vers les populations. La capitalisation des données géoréférencées, leur analyse et leur partage autour d'une plateforme web commune pourrait être une solution alternative à proposer aux institutions locales responsables.

Conclusion

Le retour d'expérience scientifique mené suite à la saison cyclonique 2017 répond d'une part à une demande scientifique visant à mieux comprendre les mécanismes et les facteurs de production d'une catastrophe sur des territoires insulaires ultrapériphériques marqués par de fortes disparités socio-économiques, et d'autre part à une demande sociétale et institutionnelle afin de tirer des leçons d'une telle catastrophe et anticiper l'adaptation aux effets de futurs épisodes climatiques extrêmes comparables à ceux de la saison cyclonique 2017 aux Petites Antilles. Cette étude offre un cadre scientifique dans lequel l'information géographique circule depuis sa collecte sur le terrain jusqu'à sa valorisation au moyen de différents supports d'acquisition et de diffusion. La mise en œuvre de collaborations interdisciplinaires a été essentielle pour la conduite d'un retour d'expérience intégré. Elle repose notamment sur une reconnaissance mutuelle et à long terme des travaux et actions des partenaires. Contrairement au retour d'expérience institutionnel, l'approche scientifique permet de conserver un regard distancié par rapport à la crise et contribue à construire petit à petit des référentiels communs et des méthodes standardisées propices à un suivi à long terme des territoires.

Au-delà des échanges avec les institutions locales et régionales aux Antilles, la réalisation d'une représentation multi échelles des dommages a fait l'objet d'un travail de concertation régulier avec le Centre National d'Etudes Spatiales (CNES) et s'appuie

également sur le retour des services d'exploitation des données satellitaires et cartographiques du Service Régional de Traitement d'Image et de Télédétection (SERTIT) et du Système d'Information à Référence Spatiale (SIRS). A l'échelle des données, la confrontation des diagnostics de terrain avec leur évaluation satellitaire permet de mesurer les différences et d'améliorer leur protocole d'analyse. A l'échelle de la représentation, il s'agit d'intégrer de nouvelles réflexions sur des processus optimisés, à la fois pour la diffusion web et pour la compréhension des données par un plus large éventail d'acteurs. Ces actions de concertation se sont concrétisées par la réalisation d'un atelier expérimental, visant à tester le prototype de représentation proposé sur un panel d'utilisateurs variés. Des tests utilisateurs se poursuivent, notamment en partenariat avec le Laboratoire d'Informatique, de Robotique et de Microélectronique de Montpellier (LIRMM), pour évaluer les capacités sensorielles de cette représentation grâce aux technologies d'Eye-tracking.

Au travers d'une plateforme internet et de l'intégration d'outils de cartographie dynamique, la diffusion de l'information géographique est d'abord conçue de façon à mémoriser l'empreinte territoriale d'une catastrophe d'origine naturelle à un instant T, puis de manière à suivre son évolution dans le

temps. Pour cela, des outils de transfert des savoirs et d'éducation novateurs sont mobilisés. Ils font appel à des outils numériques en ligne et interactifs où l'information géographique est au centre des échanges (site Internet, *Story Maps*, cartographie dynamique). Des approches participatives, des mises en situation et des guides de bonnes pratiques font également partie intégrante de cet ensemble de dispositifs de transfert. Ces transferts d'apprentissage devraient déclencher des réflexes face aux enseignements positifs et/ou négatifs dans les territoires concernés, et ainsi contribuer au renforcement des capacités de réponses et d'adaptation individuelles, collectives et institutionnelles face aux cyclones et à leur cortège d'aléas locaux dans un contexte de changement climatique.

Remerciements

Cette recherche a été financée par l'AAP OURAGANS 2017/CATASTROPHE, RISQUE ET RÉSILIENCE, projet TIREX, pour « *Transfert des apprentissages de Retours d'EXpériences scientifiques pour le renforcement des capacités de réponse et d'adaptation individuelles et collectives dans un contexte de changement climatique (Petites Antilles du Nord - saison cyclonique 2017)* ». 2018-2022 : <https://anr.fr/Projet-ANR-18-OURA-0002>

Bibliographie

André G., Chiroiu L., Guillaude R., et Galaup M., (2001). « Évaluation et cartographie de dommages par imagerie satellitaire SPOT-5: simulation sur la ville de Bhuj, séisme de Gujarat, Inde (26 janvier 2001) ». Dans *SPOT-5-Towards new application seminar, Novembre 2001*, Toulouse, France.

Antoniou V., Nomikou P., Panousis D., & Zafeirakopoulou E., (2021). « Nisyros Volcanic Island: A Geosite through a Tailored GIS Story ». *Geosciences*, 11(3), 132p.

Arnould A., (2019). Reconstitution spatiale et temporelle des chaînes d'impacts territoriaux. Mémoire de Master 2 GCRN, Université Paul-Valéry Montpellier 3.

Barkemeyer R., Figge F., Hoepner A., et al. (2017). « Media coverage of climate change: An international comparison ». *Environment and Planning C: Politics and Space* ». 35(6), p. 1029-1054.

Battiston S., Clandillon S., Faivre R., et al. (2019). « L'utilisation des services cartographiques numériques d'urgence par satellite à des fins de sécurité intérieure ». *Annales des Mines - Responsabilité et environnement*, 94(2), p. 66-73. <https://doi.org/10.3917/re1.094.0066>

Berendsen, M. E., Hamerlinck, J. D., et Webster, G. R., (2018). « Digital story mapping to advance educational atlas design and enable student engagement ». *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 7(3), 125.

Bertin, J., (1967). *Sémiologie graphique, les diagrammes, les réseaux, les cartes*. Paris, Mouton et Gauthier-Villars, 431p.

Caquard S., et Dimitrovass S., (2017). « *Story Maps & Co*. Un état de l'art de la cartographie des récits sur Interne ». *Mappemonde. Revue trimestrielle sur l'image géographique et les formes du territoire*, 121p.

Candela T., Leone F., Peroche M., Robustelli M., accepté. « Cartographier un territoire cycloné, le cas de Saint-Martin – Saison cyclonique 2017, Petites Antilles Françaises ». *Mappemonde*.

Cécé R., Bernard D., Krien Y., et al., (2020). « A 30-m scale modeling of extreme gusts during Hurricane Irma (2017) landfall on very small mountainous islands in the Lesser Antilles ». *Natural Hazards and Earth System Sciences*, <https://doi.org/10.5194/nhess-2020-241>

CEREMA, (2017). « *Carte d'aléa submersion marine actualisée par l'événement IRMA du 6 septembre 2017* », 1p., https://www.gouvernement.fr/sites/default/files/contenu/piece-jointe/2018/01/carte_alea_reactualisee_irma.pdf

Defossez S., Gherardi M., (2020). « Face au cyclone Irma ! Le rôle des populations dans la gestion de la crise à Saint-Martin (Petites Antilles, îles du Nord) ». *Echogéo*, numéro spécial *Territoires « cyclonés »* 51 | 2020, en ligne le 15 avril 2020

Duvat V., Pillet V., Volto N., et al. (2019). « High human influence on beach response to tropical cyclones in small islands: Saint-Martin Island, Lesser Antilles ». *Geomorphology*, 325, p. 70-91.

Egiebor, E. E., et Foster, E. J., (2019). « Students' perceptions of their engagement using GIS-story maps ». *Journal of Geography*, 118(2), 51-65.

GEOTER, (2008). Mise à jour du plan de prévention des risques naturels de la Collectivité Territoriale de Saint-Martin. Note méthodologique, 96p.

Gilbert C., (2001). « Retours d'expérience : le poids des contraintes ». *Annales des Mines*, p. 9-24.

IGN, (2017). « Outre-mer: cap sur des référentiels harmonisés ». *IGN Magazine*, n°88, 32p.

- Kerle N., et Hoffman, R. R., (2013). « Collaborative damage mapping for emergency response : The role of Cognitive Systems Engineering ». *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 13(1), p. 97-113. <https://doi.org/10.5194/nhess-13-97-2013>
- Kerle N., (2010). « Satellite-based damage mapping following the 2006 Indonesia earthquake How accurate was it? ». *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 12(6), p. 466-476. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2010.07.004>
- Kerle N., (2013). « Remote Sensing Based Post-Disaster Damage Mapping with Collaborative Methods ». Dans S. Zlatanova, et al. (Éds.), *Intelligent Systems for Crisis Management* (p. 121-133). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-33218-0_9
- Kerski J. J., (2015). « Geo□awareness, geo□enablement, geotechnologies, citizen science, and storytelling: Geography on the world stage ». *Geography Compass*, 9(1), 14-26.
- Lagadec P., (1994). *Apprendre à gérer les crises, Société vulnérable – Acteurs responsables*. Editions d'organisation, Paris.
- Lagadec P., (2001). « Les exercices de crise: pour des ruptures créatrices ». *La lettre des cindyniques*, 34p.
- Mericskay B., (2016). « La cartographie à l'heure du Géoweb : Retour sur les nouveaux modes de représentation spatiale des données numériques ». *Cartes & géomatique*, Comité français de cartographie, 2016, *La sémiologie dans tous les sens – Temps, Art & Cartographie*, 229-230, p. 37-50.
- Moatty A., Grancher D., Virmoux C., et Cavero J., (2019). « Bilan humain de l'ouragan Irma à Saint-Martin: la rumeur post-catastrophe comme révélateur des disparités socio-territoriales ». *Géocarrefour*, 93(93/2).
- Moatty A., (2015). *Pour une Géographie des Reconstructions post-catastrophe : Risques, Sociétés et Territoires*. Thèse de doctorat, Géographie, Montpellier, Université Paul Valéry Montpellier 3, 491 p.
- Mucchielli A., (2004). *Le constructivisme dans les études sur la communication*. Montpellier, Edition de l'Université de Montpellier 3, 314 p.
- Musquet G., (2008). « Hackers Against Natural Disasters: accustoming people to risk ». *Field Actions Science Reports* [Online], Special Issue 18 | 2018, Online since 15 December 2018, connection on 23 April 2019. URL : <http://journals.openedition.org/factsreports/4844>
- November V., Lecacheux S., et Winter T., (2020). « Le couple anticipation/ décision aux prises avec l'exceptionnel, l'imprévu et l'incertitude ». *EchoGéo*, 51, DOI : <https://doi.org/10.4000/echogeo.18949>
- Ogawa N., & Yamazaki F., (2000). « Photo-interpretation of building damage due to earthquakes using aerial photographs ». *Proceedings of the 12th world conference on earthquake engineering* (No. 1906).
- Pelling M., (2003). *The vulnerability of cities: natural disasters and social resilience*. Earthscan, 212p.
- Pillet V., Duvat V. K., Krien Y., et al., (2019). « Assessing the impacts of shoreline hardening on beach response to hurricanes: Saint-Barthélemy, Lesser Antilles ». *Ocean & coastal management*, 174, p. 71-91.
- Pumain D. et Saint-Julien T., (2010). *Analyse spatiale ; les interactions*. Paris, Armand Collin, 224p.

PPRN, (2019). *Révision du Plan de Prévention des Risques Naturels prévisibles, révision de l'aléa cyclonique*. Note de présentation, Collectivité d'Outre-mer de Saint-Martin, 102p.

Rey T., Candela T., Péroche M., Leone F., (2019 a). « Changements côtiers et inondations suite au passage d'un ouragan extrême (Irma, 2017) aux Petites Antilles ». *EchoGéo Hors série Territoires cyclonés*

Rey T., Leone F., Candela T., *et al.*, (2019 b). « Coastal Processes and Influence on Damage to Urban Structures during Hurricane Irma (St-Martin & St-Barthélemy, French West Indies) ». *Journal of Marine Science and Engineering*. 7, 215p. doi:10.3390/jmse7070215

Scharl A., (2007). « Towards the geospatial web : Media platforms for managing geotagged knowledge repositories ». In *The geospatial web* p. 3-14. Springer.

Shankar R., Bjorgo E., et Dell'Oro L., (2010). « Accuracy Assessment of Post-Earthquake Building Damage Classification Haiti ». *Natural Hazards and Earth System Sciences Discussions* p. 11-13.

Vinet F., Péroche M., Palany P., *et al.*, (2020). « Collecte et gestion des débris post-cycloniques à Saint-Martin (Antilles françaises) après le passage du cyclone Irma (sept. 2017) ». *Cybergeo: European Journal of Geography*, 937, <http://journals.openedition.org/cybergeo/34154>; DOI: <https://doi.org/10.4000/cybergeo.34154>.

Voigt S., Schneiderhan T., Twele A., *et al.* (2011). « Rapid damage assessment and situation mapping : Learning from the 2010 Haiti earthquake ». *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 77(9), p. 923-931.

Wybo J.L., Colardelle C., Poulossier M.P., Cauchois D., (2001). « Retour d'expérience et gestion des risques, Récents progrès en génie des procédés ». *Cahiers de la sécurité industrielle*, vol 15, n° 85, p. 115-128.

Yésou H., Escudier A., Battiston S., *et al.* (2015 a). « Exploitation de l'imagerie Pleiades en cartographie réactive suite à des catastrophes naturelles ayant affecté le territoire français en 2013 ». *Revue Française de Photogrammétrie et de Télédétection*, 209, 39p.

Yésou H., Chastanet P., Maxant J., *et al.* (2015 b). « Contribution de l'imagerie Pléiades à la cartographie rapide des dégâts suite à des catastrophes majeures : retours d'expériences après deux ans d'actions de cartographie rapide localisées en Asie, en Afrique, en Europe et aux Caraïbes ». *Revue Française de Photogrammétrie et de Télédétection*, 209, 81p.