

L'APPORT DE L'IMAGERIE PLÉIADES À LA CARTOGRAPHIE DES ENJEUX ET DE LEUR VULNÉRABILITÉ FACE AUX CRUES TORRENTIELLES : LA VILLE D'AREQUIPA, PÉROU

Susanne Ettinger¹, Marie Zeghdoudi¹, Nélida Manrique Llerena¹,
Anne-Françoise Yao-Lafourcade², Jean-Claude Thouret¹

1: PRES Clermont, Université Blaise Pascal, Laboratoire Magmas et Volcans (LMV), CNRS UMR6524 et IRD R163, Clermont-Ferrand, France, s.ettinger@opgc.univ-bpclermont.fr

2: Université Blaise Pascal, Laboratoire de Mathématiques, CNRS UMR 6620, Aubière, France

Résumé

Depuis les années 1980, la qualité croissante d'images satellites destinées à l'observation de la Terre ouvre de nouvelles possibilités en photo-interprétation dans l'analyse des risques naturels : pour la prévision, la surveillance et l'analyse d'endommagement. Suite à une crue torrentielle en février 2013 qui a affecté plus de 280 bâtiments le long du chenal Avenida Venezuela dans la ville d'Arequipa, Pérou et endommagé 23 ponts, une étude utilisant l'imagerie Pléiades a été menée. Des relevés de terrain ont permis de calibrer la cartographie du bâti et des infrastructures critiques à partir de deux images Pléiades : celle d'avant-crue en 2012 et celle d'après-crue en 2013. Les objectifs de cette étude sont : (1) améliorer la cartographie de l'occupation du sol en milieu urbain sur des images Pléiades à résolution submétrique ; (2) tester l'apport de la classification supervisée semi-automatique à l'aide du logiciel Monteverdi ; (3) comparer la qualité des résultats et évaluer le potentiel de l'utilisation de la classification supervisée à partir des images Pléiades et (4) identifier l'impact de la crue torrentielle sur le chenal lui-même. Les résultats confirment une nette amélioration de la précision de la cartographie de vulnérabilité grâce aux images Pléiades à l'échelle d'un bâtiment. La délimitation d'objet est bien meilleure et la combinaison de la classification semi-automatique avec une digitalisation manuelle sous SIG donne des résultats très prometteurs.

Mots-clés : crue torrentielle, exposition, vulnérabilité, risques, photo-interprétation, classification supervisée, Monteverdi

Abstract

Since the 1980s, the increasing quality of satellite images aimed at the observation of the earth, open new possibilities for photo-interpretation in risk assessment of natural hazards in the context of prevention, monitoring and damage analysis. On February 8th 2013, a flash flood inundated adjacent areas to the Avenida Venezuela drainage in the city of Arequipa, Peru, affecting more than 280 buildings, and 23 bridges. At the example of this event, this study uses high spatial resolution (HSR) Pléiades images to improve the mapping of exposure of elements at stake and of their vulnerability to flash flood hazard. Ground control is provided by a field survey realized after the flood event of February 2013. The objectives of this work are fourfold: (1) use HSR Pléiades images to map landuse in a complex urban environment; (2) test the use of supervised classification for semi-automatic object identification on Pléiades imagery using Monteverdi; (3) compare the quality of results and evaluate the potential of computer-assisted mapping techniques and (4) identify flood impact on the channel itself on the 2013 image. Results confirm a clear improvement of vulnerability mapping accuracy at large scale based on the photo-interpretation of Pléiades images. Exposed elements can be better delimited and the combination of semi-automatic classification and manual mapping has proven to be an optimal compromise for an accurate and rapid risk assessment.

Keywords: flash flood, exposure, vulnerability, risk, photo-interpretation, supervised classification, Monteverdi

1. Introduction

Depuis les années 1990, de nombreuses études analysent le risque lié aux aléas naturels (Kerle et Oppenheimer, 2002 ; Hollenstein, 2005 ; Tralli et al., 2005). Par essence, le risque est dépendant de (1) l'aléa naturel et (2) de la vulnérabilité, celle-ci étant fonction des éléments exposés, de leur susceptibilité de subir un endommagement et de leur capacité de résilience (Cardona, 2004 ; Bogardi et Birkmann, 2004 ; Birkmann, 2006). La fréquence et l'intensité de phénomènes naturels extrêmes de nature hydro-géomorphologique, ne cessent d'augmenter en raison de la variabilité climatique et de l'impact anthropique (Ashley and Ashley, 2008; World Bank, 2010; Hong et al., 2012; Calianno et al., 2012 ; MunichRe, 2013).

Dans un contexte d'expansion urbaine, une exposition accrue aux aléas est inévitable et le potentiel à l'endommagement fort (Keiler et al., 2006 ; Uzielli et al., 2008 ; Fuchs, 2009 ; Fuchs et al., 2012). Depuis les années 1980, la qualité croissante d'images satellites destinées à l'observation de la terre ouvre de nouvelles possibilités en photo-interprétation : pour la prévision, la surveillance et l'analyse d'endommagement (Kerle et Oppenheimer, 2002 ; Domenikiotis et al., 2003).

C'est ainsi que l'étude menée à Arequipa, Pérou, par Thouret et al. (2014) a la particularité de combiner plusieurs outils pour produire des cartes de vulnérabilité physique : un travail de terrain conséquent, différents types d'images (SPOT5, Pléiades, Google Earth 2009-2012) et traitement de données sous SIG. Cette étude démontre l'utilité de la photo-interprétation d'images à

résolution spatiale submétrique : elles permettent d'extrapoler des données de terrain sur des zones non-échantillonnées avec une incertitude relativement faible.

Cependant, la digitalisation manuelle sous SIG pour constituer une représentation détaillée de l'occupation du sol est une tâche délicate car, malgré la haute résolution spatiale (HRS), de nombreuses difficultés se posent quant à la délimitation précise des bords de chaque objet du paysage urbain. Suite à ces observations, nous examinons ci-après l'apport de l'imagerie HRS dans l'amélioration de la cartographie manuelle et semi-automatique des éléments exposés face à l'aléa des crues torrentielles du chenal Avenida Venezuela dans la ville d'Arequipa.

2. Contexte et zone d'étude

Dans cette ville des précipitations intenses se produisent lors de la saison humide de novembre à mars, avec un pic lors du mois de février (moyenne mensuelle 29,3mm ; SENAMHI, 2013). Lors de ces précipitations, les bassins versants de petite taille (<1,5km²) et la masse importante de débris non-consolidés déposés sur les flancs du volcan El Misti (5822m), représentent un risque majeur pour la formation d'écoulements hydro-géomorphologiques. Le 8 février 2013, 123mm de précipitations se sont abattus sur la ville en l'espace de seulement trois heures. C'est l'intensité la plus élevée enregistrée depuis les années 1940 à la station météorologique *La Pampilla* située en centre-ville (Cacya, 2013 ; SENAMHI, 2013).

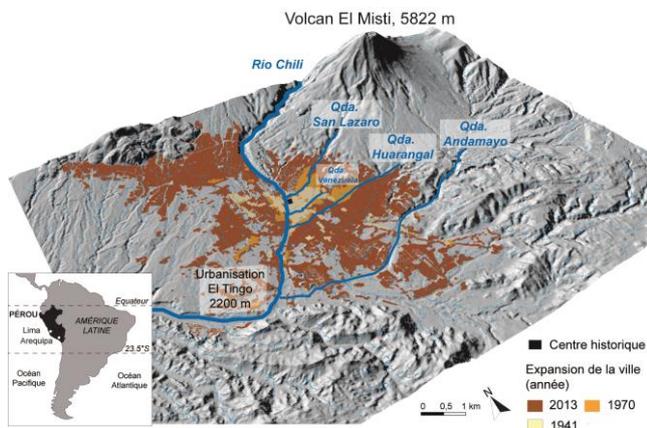


Figure 1 : La ville d'Arequipa, Pérou, située au pied du volcan El Misti. Remarquez la forte expansion urbaine depuis 1941 (jaune clair) à 2013 (marron) et les chenaux (bleu) qui traversent la ville.

En milieu urbain, la propagation des crues torrentielles ainsi que l'extension de l'inondation sont en grande partie dépendantes des propriétés des chenaux qu'ils soient aménagés ou non, des obstacles potentiels tels que des ponts, et des caractéristiques du bâti (Faella et Nigro, 2003a,c ; Fuchs et al., 2007a ; Totschnig et Fuchs, 2013).

La zone étudiée a pour axe le chenal Avenida Venezuela, elle s'étend sur 8,9km² dont 5,5km² avec du bâti, lequel est réparti en 31 quartiers (fig. 2). Le chenal est long de 5,2km depuis la confluence de ses deux affluents jusqu'au Río Chili (fig. 1) à l'Ouest. La largeur

du chenal ne dépasse pas les six mètres sur environ 40% du trajet total.

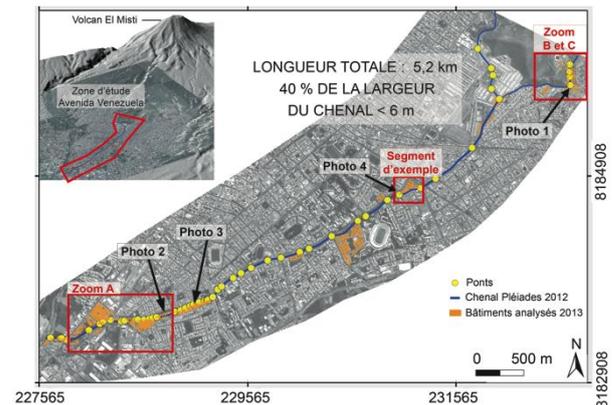


Figure 2 : La zone d'étude le long du chenal Avenida Venezuela traversant la ville d'Arequipa du nord-est au sud-ouest. Les photos apparaissent en figure 3 et les vues détaillées (zoom A-C) dans la figure 4.

3. Objectifs et méthodes

Trois objectifs principaux guident cette étude : (1) Cartographier et analyser l'impact de la crue de février 2013 à partir d'images satellites ; (2) calibrer avec des données de terrain une méthode semi-automatique de cartographie d'éléments exposés ; (3) évaluer la performance de la méthode semi-automatique comparée à la méthode manuelle. Deux images Pléiades à résolution submétrique sont utilisées (tableau 1) : une image Pléiades multi-spectrale datant de mars 2012, avant la crue et une image Pléiades panchromatique de mars 2013, prise après la crue du 8 février.

Paramètres d'images	2012 – 1A	2013 – 1B
Date d'acquisition	17 mars 2012	3 mars 2013
Ré-échantillonnage produit image (m)	0,5	0,5
Nombre de bandes	4	1
Type de données	PA+XS	PA
Niveau de traitement	ORTHO	ORTHO

Tableau 1 : Récapitulatif des caractéristiques d'images Pléiades utilisées pour cette étude.

La méthodologie suit les cinq étapes suivantes : (1) identification des éléments déterminant le paysage urbain et les caractéristiques du chenal ; choix des éléments à considérer pour l'analyse et détermination d'un segment type sur lequel l'étude sera réalisée ; (2) cartographie manuelle sous SIG (ArcGis, QGis) en créant une classe par élément préalablement défini. Dans la continuité du travail de Thouret et al. (2014), pour chaque élément cartographié, des paramètres de vulnérabilité concernant le type structural sont renseignés : exposition et caractéristiques géographiques de sa position dans le milieu urbain (densité de bâtiments, surface, forme). (3) classification

supervisée (semi-automatique) à l'aide du logiciel Monteverdi (Grizonnet et Michel, 2013) en variant le nombre de classes ainsi que le nombre de zones d'entraînement ; (4) post-traitement des résultats de la classification supervisée sous SIG et calcul des surfaces des classes ; (5) cartographie et comparaison des changements sur l'image d'avant crue de 2012 et celle de post-cru de 2013.

Pour l'étape 1 à 3, des observations de terrain, en particulier des photographies obliques, et Google Street View permettent la vérification de la cartographie sur l'image satellite (fig. 3). Afin d'optimiser l'identification d'objets lors de la cartographie manuelle, différentes options de visualisation (ordre des bandes et étirement) ont été employées.



Figure 3 : Photos de terrain : (1) Ouverture de pont obstruée dans le quartier Mariano Bustamante ; (2) Bâtiments endommagés Av. Venezuela-J. Ibañez ; (3) Résidus de l'inondation Marché Palomar ; (4) Erosion de berge gauche en aval du Centre Commercial La Negrita.

4. Cartographie manuelle et vulnérabilité

L'amélioration de la résolution spatiale de 10m (SPOT5 2007) à 0,5m (Pléiades 2013) permet de passer, pour plus de 80% de la zone étudiée, de l'échelle du quartier à l'échelle du bâtiment individuel. Des structures à micro-échelle telles que voiries, murs de contention du chenal, ponts, ont pu être détectées et incluses dans l'analyse de vulnérabilité (fig. 4). C'est ainsi que la base de données comporte à présent plus de 1100 bâtiments, 53 ponts (piétons, routiers et ferroviaires) et 13,6km de murs de contention du chenal.

Les vues détaillées (zoom A à C ; fig. 4) montrent trois exemples des types de cartes produites en fonction de chacun des paramètres de vulnérabilité renseignés : (A) le type structural de chaque bâti, avec le plus vulnérable en rouge foncé ; (B) la hauteur d'inondation lors de la crue de février 2013 ; et (C) la distance du chenal, paramètre critique lors d'un débordement.

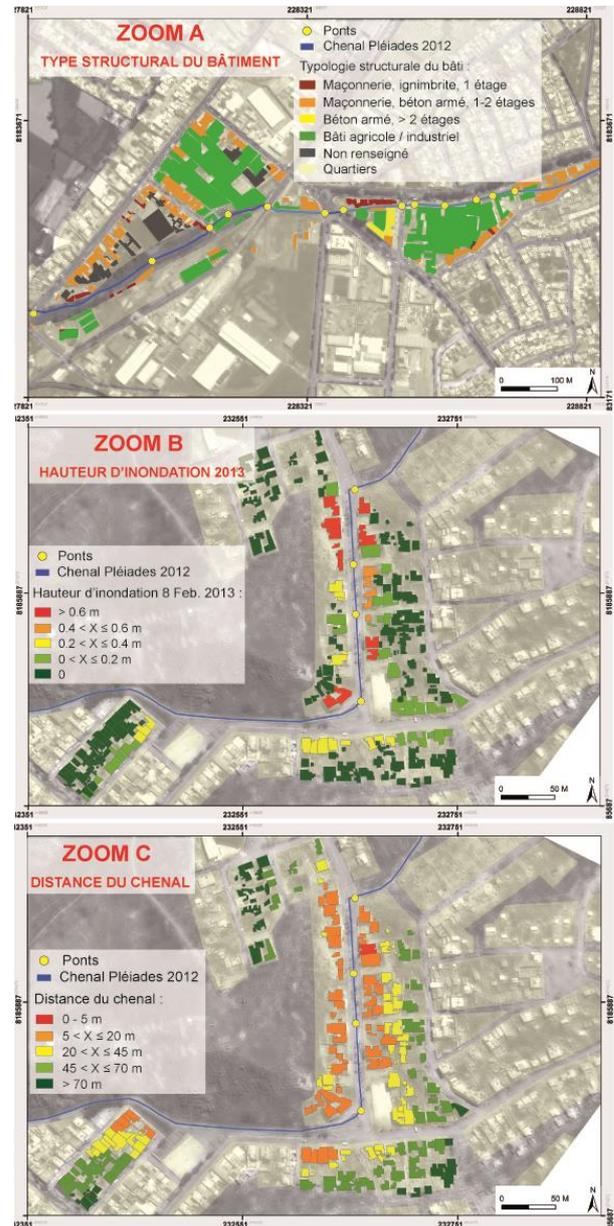


Figure 4 : Cartes de vulnérabilité (A) concernant le type structural du bâti ; (B) visualisant la hauteur d'inondation lors de la crue de février 2013 ; et (C) indiquant la distance du chenal. Pour la localisation des vues détaillées dans la zone d'étude voir figure 2.

5. Impacts de la crue

Plusieurs segments le long du chenal ont été étudiés en détail sur les deux images Pléiades. Trois zones ont été affectées par une érosion considérable. Deux font partie du chenal aménagé et représentent respectivement 816m² (tableau 2, fig. 5) et 1 200m². Une troisième, dans la partie aval, où le chenal alterne entre segments aménagés et naturels, atteint 3 031,2m². La largeur maximale d'érosion des berges mesurée sur l'ensemble du chenal est de 7,5m à proximité du centre commercial La Negrita (fig. 5). Le volume a pu être estimé en combinant des mesures prises sur le terrain avec les images Pléiades, il est d'environ 2 856m³.

Type d'élément	2012	2013
Bancs / terrasses (m ²)	1668,5	2038,0
% de la surface totale du chenal	31,4	38,3
Végétation (m ²)	1996,3	523,9
% de la surface totale du chenal	37,5	9,8

Tableau 2 : Changements géomorphologiques en termes de surfaces des éléments du chenal dans le secteur du centre commercial La Negrita (fig. 6) après l'impact de la crue de février 2013.

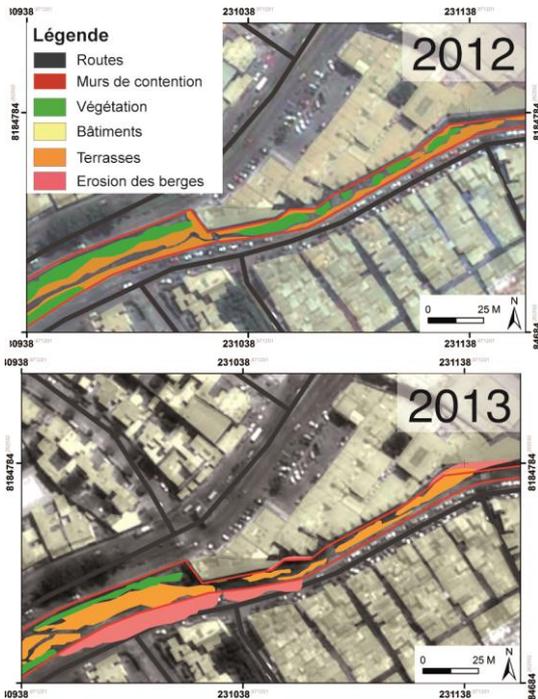


Figure 5 : Erosion latérale de la berge gauche, proche du centre commercial La Negrita. Pour situer le segment type dans la zone d'étude globale, voir figure 2.

6. Classification supervisée sur Pléiades

La carte des éléments exposés produite par la classification manuelle d'objets sur l'image Pléiades à l'aide des logiciels QGis et ArcGis a été comparée avec celles issues de classifications supervisées semi-automatiques réalisées avec le logiciel Monteverdi (Grizonnet et Michel, 2013).

Cinq classes principales ont été retenues pour la classification semi-automatique : surfaces aménagées telles que (1) bâtiments, (2) voiries, (3) autres terrains tels que parking, terrain de sport, cours intérieures ; (4) végétation et (5) autres surfaces. Pour la classification à 8 classes, trois sous-catégories de la classe « végétation » ont été créées : arbre, friche, pelouse ainsi que deux sous-catégories de « autres surfaces » : surface humide et débris non-consolidés.

Pour certaines classes, la classification supervisée à 8 classes améliore, notamment pour la végétation et la voirie, l'exactitude de la cartographie (fig. 6).

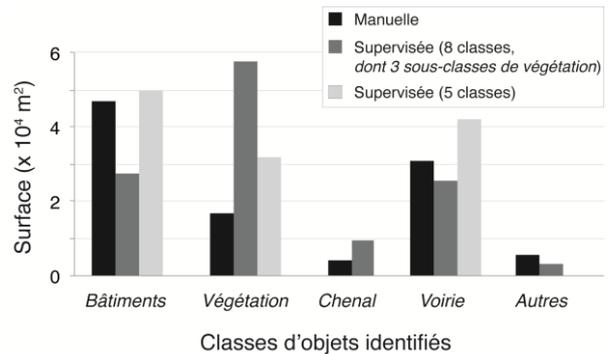


Figure 6 : Comparatif des surfaces identifiées par classe d'objets selon la technique employée (manuelle, supervisée 8 classes ou 5 classes) à l'exemple du segment type (localisation voir fig. 2).

En ce qui concerne la végétation :

L'utilisation d'une image HRS multi-spectrale pour la cartographie de la végétation s'avère indispensable (fig. 7 et 8) : différents types de végétation deviennent ainsi identifiables (arbre, friche, pelouse) grâce à leur réponse spectrale caractéristique. C'est d'ailleurs sur cette classe que le rendement de la classification supervisée à 8 classes a été le meilleur. Dans la cartographie manuelle (fig. 7A), la surface des différents types de végétation est généralement sous-estimée à cause des difficultés techniques de reconnaissance des bords d'objets. La distinction des types lors de la digitalisation sous SIG reste délicate et ceci malgré la haute résolution de l'image. Quant à la classification supervisée à 5 classes (fig. 7B), la surface du type « arbre » est surestimée car les zones sombres ou les terrains humides faussent le résultat.

Concernant les murs de contention du chenal :

Augmenter le nombre de zones d'entraînement par classe avec une variété élevée de classes (plus de 5) introduit une interprétation parfois erronée du résultat (fig. 7). Par exemple, les murs de contention ne sont pas reconnus correctement car leur réponse spectrale, issue du matériau utilisé pour leur construction, est trop similaire à celle d'autres éléments du chenal (débris non-consolidés) ou du milieu urbain (voirie, parking, etc.).

Concernant le bâti :

La complexité des constructions à Arequipa, en particulier dans les quartiers densément construits où des bâtiments s'emboîtent, sont mitoyens sur plusieurs côtés, dont les toits se chevauchent, etc., pose un défi lors du choix des zones d'entraînement. En fonction du nombre de classes, la surface habitée peut se trouver considérablement sous-estimée (fig. 7C). Elle a tendance à diminuer au profit de la classe « autres terrains » (parking, terrains de sport, etc. ; fig. 7B et C). Dans ce cas précis, le résultat obtenu avec 5 classes (B) est préférable à celui obtenu avec 8 classes (C).



Figure 7 : Comparaison des cartographies d'un même paysage urbain avec deux techniques différentes : (A) classification manuelle sous SIG à 5 classes ; (B) et (C) classifications supervisées semi-automatique réalisées sous Monteverti et post-traitées sous SIG : à 5 classes (B) et à 8 classes (C).

Pour améliorer la classification sur le chenal lui-même, nous avons appliqué un masque sur les zones urbaines de façon à isoler le chenal. Les sources potentielles d'erreur ont ainsi été réduites. La classification supervisée semi-automatique, réalisée sur cette portion du chenal, s'est nettement améliorée : distinction des surfaces végétalisées, du débris sec et humide (fig. 8). L'impact de la crue se traduit par une diminution de plus de 80% de la surface végétalisée dans le chenal. Occupant en 2012 environ 48%, elle n'apparaît en 2013 que le long des bords et ne représente que 10% de la surface totale du chenal. En 2013, les deux entités de

sédiments ont été identifiées avec une nette augmentation de l'étendue du débris humide (fig. 8B).

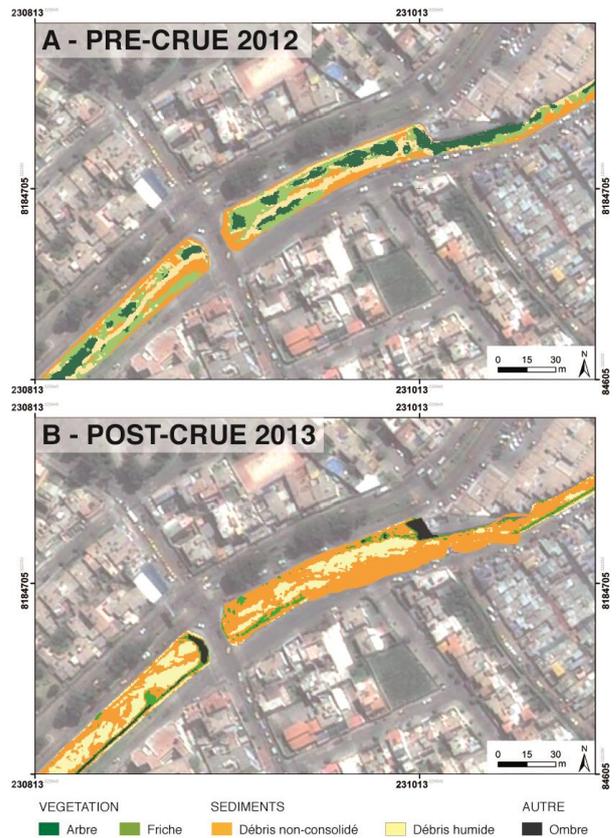


Figure 8 : Classifications supervisées sur la zone du chenal réalisées sous Monteverti et post-traitées sous SIG sur l'image avant crue (A) et après crue (B).

7. Conclusion et perspective

La photo-interprétation à base d'images satellites à haute résolution spatiale est une voie scientifique parfaitement adéquate pour proposer une cartographie multi-échelles spatio-temporelles de tout milieu urbain exposé à un aléa naturel.

Nous avons démontré qu'un travail approfondi de l'analyse de la réponse spectrale des éléments constitutifs de chacune des classes répertoriées s'impose. Les difficultés dans la reconnaissance des objets et de leur bonne identification à Arequipa sont principalement dues aux (i) typologies très variées du bâti, (ii) chevauchements des constructions et une densité élevée des bâtiments qui rendent difficile une distinction nette des limites de chaque élément. (iii) La présence d'ombres sur l'image réduit la certitude d'identification du type d'élément ainsi que de ses limites spatiales. Pour améliorer le rendu de la classification supervisée dans un environnement urbain complexe, il est nécessaire de développer une chaîne de traitement algorithmique spécifique. Celle-ci doit prendre en compte à la fois les zones d'ombres variables sur les images qui servent de support, ainsi que les caractéristiques spectrales et texturales complexes des éléments étudiés, en particulier du bâti. Le principal atout de l'analyse d'images à l'aide du logiciel Monteverti est la rapidité du traitement de

données. Une fois l'analyse calibrée sur une zone type de taille limitée, la méthode peut s'appliquer à des zones étendues. Tout élément qui ne peut pas être correctement identifié lors d'une classification supervisée semi-automatique sous Monteverdi, peut l'être par cartographie manuelle grâce à la résolution submétrique des images Pléiades. L'utilisation des deux images (multi-spectrale pour 2012 et panchromatique pour 2013) permet de cartographier l'exposition des enjeux, leur vulnérabilité et de quantifier l'impact de la crue. Cependant, la réalisation d'une classification supervisée sous Monteverdi est plus pertinente sur l'image multi-spectrale : notamment dans des zones complexes (chenal étroit, chevauchement des toits de maisons, etc.), l'information colorimétrique aide énormément à identifier les objets cibles. L'image panchromatique peut s'avérer d'une plus grande utilité lors d'une future analyse texturale qui aurait comme objectif de mieux cerner les contours, par exemple ceux des arbres, des murs de contentions, des ponts.

La méthode appliquée a été testée sur plusieurs segments le long du chenal Avenida Venezuela et donne sur l'ensemble des résultats très satisfaisants concernant la cartographie des entités constituant le chenal. Pour la délimitation des zones de bâti et des routes, des améliorations sont nécessaires afin de diminuer les sources potentielles de confusion dans un environnement urbain complexe tel qu'est la ville d'Arequipa. Ceci pose encore des limites en termes de transportabilité de la méthode sur d'autres terrains. La solution passera par une analyse détaillée des différents spectres de chaque classe d'objets. La possibilité de réaliser ce travail sur l'image et donc à distance, est un atout considérable car il permet d'intervenir rapidement avant, pendant ou après l'occurrence d'un aléa naturel. Ceci ouvre de nombreuses possibilités d'analyse et de production de données essentielles à différents stades de la gestion du risque : la prévention, l'analyse de l'endommagement, l'organisation du premier secours, la planification des interventions de réaménagement. Cette étude montre qu'une interprétation comparative de plusieurs « classifications tests » et un post-traitement sous SIG des données est indispensable pour augmenter la qualité des résultats. Les résultats issus de ce travail sont extrêmement prometteurs et permettent d'envisager le développement d'une méthode généralisée de cartographie de la vulnérabilité basée sur la photo-interprétation.

Remerciements

Les images Pléiades (©CNES (2012/2013), distribution Airbus DS / Spot Image) ont été fournies dans le cadre du programme ORFEO. Les auteurs remercient la municipalité d'Arequipa, la Défense Civile d'Arequipa, PREDES et l'Institut Géologique, Minier et Métallurgique du Pérou (INGEMMET) du support logistique et des données concernant l'événement de crue de février 2013. Ce travail a bénéficié d'un soutien financier du labex ClerVolc et porte le numéro de contribution 102.

Références

- Ashley S.T., et Ashley W.S., 2008. Flood fatalities in the United States. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*. 47(3) : 806-818.
- Birkmann J., 2006. Measuring vulnerability to promote disaster-resilient societies : Conceptual frameworks and definitions, In : Birkmann J. (ed.), *Measuring Vulnerability to Natural Hazards – Towards Disaster Resilient Societies*, United Nations University, New York, United States of America, pp. 9-54.
- Bogardi J., et Birkmann J., 2004. Vulnerability Assessment : The First Step Towards Sustainable Risk Reduction, In : Malzahn D., et Plapp T. (eds.), *Disaster and Society – From Hazards Assessment to Risk Reduction*, Logos Verlag Berlin, Berlin, Germany, pp. 75-82.
- Cacya L., Meza P., Carlotto V., Mamani L., 2013. Aluvión del 8 de Febrero del 2013 en la ciudad de Arequipa. *International Forum of geological disasters, Arequipa, Peru, 14-16 October 2013, GRM, OVI Ingemmet*, Abstract volume, pp. 195-203.
- Calianno M., Ruin I., Gourley J.J., 2012. Supplementing flash flood reports with impact classifications. *Journal of Hydrology* 477(1) : 1-16.
- Cardona O.D., 2004. The need for rethinking the concepts of vulnerability and risk from a holistic perspective: a necessary review and criticism for effective risk management. In: Bankoff G., Frerks G., Hilhorst D. (eds.), *Mapping Vulnerability: Disasters, Development and People*. Earthscan Publishers, London, United Kingdom, pp. 37-51.
- Domenikiotis C., Loukas A., Dalezios N.R., 2003. The use of NOAA/AVHRR satellite data for monitoring and assessment of forest fires and floods. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 3(1/2) : 115-128.
- Ettinger S., Manrique Llerena N., Talibart C., Mounaud L., Yao-Lafourcade A.-F., Thouret J.-C., 2014. Using HSR imagery to downscale vulnerability assessment of buildings and local infrastructure facing hazards from floods and hyperconcentrated flows. *Geophysical Research Abstracts*, vol. 16, EGU2014-13978, EGU General Assembly Vienna, Austria, 2014.
- Faella C., Nigro E., 2003a. Dynamic impact of the debris flows on the constructions during the hydrogeological disaster in Campania 1998 : description and analysis of the damages. In : Picarelli L. (ed.), *Proceedings of international conference on fast slope movements-prediction and prevention for risk mitigation (FSM2003)*, Napoli, Italy, 11-13 May, 2003, Patron, Bologna, Italy.
- Faella C., Nigro E., 2003c. A hypothesis of technical code on the structural design and repairing in urban areas with high debris flow risk. In : Picarelli L. (ed.), *Proceedings of international conference on fast slope movements-prediction and prevention for risk mitigation (FSM2003)*, Napoli, Italy, 11-13 May, 2003, Patron, Bologna, Italy.

- Fuchs S., Heiss K., Hübl J., 2007a. Towards an empirical vulnerability function for use in debris flow risk assessment. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 7(5) : 495-506.
- Fuchs S., 2009. Susceptibility versus resilience to mountain hazards in Austria – paradigms of vulnerability revisited. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 9(2) : 337-352.
- Fuchs S., Ornetsmüller C., Totschnig R., 2012. Spatial scan statistics in vulnerability assessment – an application to mountain hazards. *Natural Hazards* 64(3) : 2129-2151.
- Grizonnet M., Michel J., 2013. Monteverdi 2.0 – Remote sensing software for Pleiades images analysis. In : Lasaponara R., Masini N., Biscione M. (eds.) *Towards Horizon 2020 : Earth Observation and Social Perspectives*, 33th EARSeL Symposium, 3-6 June 2013, Matera, Italy, Symposium Proceedings, 10p.
- Hollenstein K., 2005. Reconsidering the risk assessment concept: Standardizing the impact description as a building block for vulnerability assessment. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 5(3) : 301-307.
- Hong Y., Adhikari P., Gourley J.J., 2012. Flash flood. In : Bobrowsky P. (ed.), *Encyclopedia of Natural Hazards*. Springer, Dordrecht, Netherlands, p. 324.
- Keiler M., Zischg A., Fuchs S., 2006. Methoden zur GIS-basierten Erhebung des Schadenpotenzials für naturgefahreninduzierte Risiken. In : Strobl J., Roth C. (eds.), *GIS und Sicherheitsmanagement*. Wichmann, Heidelberg, Germany, pp. 118-128.
- Kerle N., Oppenheimer C., 2002. Satellite Remote Sensing as a Tool in Lahar Disaster Management. *Disasters* 26(2) : 140-160.
- MunichRe, 2013. TOPICS–GEO. Natural catastrophes 2012, Analyses, assessments, positions. 2012 issue, 66 p.
- SENAMHI, 2013. Periodo de lluvias 2013 en la región Arequipa y su relación con el Cambio Climático. Oral Presentation, Regional Forum of Disaster, Reconstruction and Development in a climate change context, Arequipa, Peru, 2013.
- Thouret J.-C., Ettinger S., Guitton M., Martelli K., Santoni O., Magill C., Revilla V., Charca J.A., 2014. Assessing physical vulnerability and risk in large cities exposed to debris flows and flash floods: the Arequipa (Peru) case study. *Natural Hazards*, DOI 10.1007/s11069-014-1172-x, 47p.
- Totschnig R., Fuchs S., 2013. Mountain torrents : Quantifying vulnerability and assessing uncertainties. *Engineering Geology* 155(4) : 31-44.
- Tralli D.M., Blom R.G., Zlotnicki V., Donnellan A., Evans D.L., 2005. Satellite remote sensing of earthquake, volcano, flood, landslide and coastal inundation hazards. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing* 59(4) : 185-198.
- Uzielli M., Nadim F., Lacasse S., Kaynia A.M., 2008. A conceptual framework for quantitative estimation of physical vulnerability to landslides. *Engineering Geology* 102(3/4) : 251-256.
- World Bank ; United Nations, 2010. *Natural Hazards, UnNatural Disasters : The Economics of Effective Prevention*. World Bank. Washington, United States of America, <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/2512>, License: CC BY 3.0 IGO.