HAL
open science

Seismic vulnerability of the bridges and overpasses along critical roads and mobility disruption within the Metropolitan District of Quito (Ecuador)

Florent Demoraes, Robert d'Ercole, Galo Atiaga, Pascale Metzger

To cite this version:

Florent Demoraes, Robert d'Ercole, Galo Atiaga, Pascale Metzger. Seismic vulnerability of the bridges and overpasses along critical roads and mobility disruption within the Metropolitan District of Quito (Ecuador). Pangea infos, 2005, 43/44, pp.37-52. insu-00956852

HAL Id: insu-00956852

https://insu.hal.science/insu-00956852v1

Submitted on 7 Mar 2014

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

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

Vulnérabilité sismique des ponts et passages surélevés le long des axes enjeux et perturbation de la mobilité dans le District Métropolitain de Quito (Equateur)

Vulnerabilidad sísmica de las principales obras viales y perturbación de la movilidad en el Distrito Metropolitano de Quito (Ecuador)

Seismic vulnerability of the bridges and overpasses along critical roads and mobility disruption within the Metropolitan District of Quito (Ecuador)

Florent Demoraes (1), Robert D'Ercole (2), Galo Atiaga (3), Pascale Metzger (4)

(1) Chercheur associé, EDYTEM – Université de Savoie, 73376 Le Bourget-du-Lac Cedex, France. e-mail : fdemo@univ-savoie.fr
(2) géographe à l'IRD (UR Environnement urbain)
Centre de Recherche d'Île de France, 32 avenue Varagnat, 93143 Bondy Cedex, France. e-mail : dercole@bondy.ird.fr
(3) Diplômé de la Faculté d'Ingénierie Civile de l'Ecole Polytechnique Nationale, Equateur. e-mail : gatiaga@yahoo.com
(4) Chargée de Recherche, IRD, LA REUNION – UR Environnement Urbain, BP 172, 97492 Sainte Clotilde, France.
e-mail : pascale.metzger@la-reunion.ird.fr

Texte reçu le 01 mars 2005

Résumé
L'objectif de l'article est de proposer une réflexion sur les perturbations possibles de la mobilité du District Métropolitain de Quito associées à la perte d'opérationnalité des axes enjeux compte tenu des dégâts subis par les ouvrages d'art routiers aériens en cas de séisme. L'article présente brièvement la méthodologie mise au point pour identifier les voies routières essentielles, celles dont la fermeture serait le plus préjudiciable pour les communications et le fonctionnement du district et sur lesquelles l'attention des gestionnaires doit être prioritaire. En deuxième lieu, une analyse de la probabilité d'endommagement en cas de séisme, ciblée sur les ponts situés le long des axes enjeux et menée en partenariat avec l'Ecole Polytechnique Nationale équatorienne, est présentée. Elle permet de déboucher sur des scenarii mettant en évidence les graves perturbations de la mobilité que pourrait connaître la capitale de l'Equateur en cas de séisme très sévère (PGA = 0.40g).
L'article est issu d'une étude sur les risques en milieu urbain réalisée dans le cadre du programme « Système d'information et risques dans le District Métropolitain de Quito » par l'Institut de Recherche pour le Développement en collaboration avec la municipalité de Quito.

Mots-clefs : Axes urbains enjeux, ouvrages d'art routier, mobilité, aléa sismique, vulnérabilité, risque, scénarios, planification préventive, Quito.

Resumen
El objetivo de este artículo es el de proponer una reflexión sobre las perturbaciones posibles de la movilidad en el Distrito Metropolitano de Quito asociada con la pérdida de operacionalidad de los ejes viales esenciales debida a los daños que podrían experimentar los puentes en caso de sismo. El artículo presenta brevemente la metodología desarrollada para identificar las vías esenciales, aquellas cuyo cierre perjudicaría gravemente las comunicaciones y el funcionamiento del distrito y sobre las cuales la atención de los gestionarios debe ser prioritaria. En segundo lugar se presenta un análisis de la probabilidad de daño en caso de sismo, enfocado en los puentes ubicados a lo largo de los ejes viales esenciales. Este análisis fue llevado a cabo en colaboración con la Escuela Politécnica Nacional del Ecuador. Permite llegar a escenarios que resaltan las graves perturbaciones de la movilidad que podría experimentar la capital del Ecuador en caso de sismo muy severo (PGA = 0.40g).
El artículo es el resultado de un estudio de riesgos en medio urbano llevado a cabo en el marco del programa "Sistema de información y riesgos en el Distrito Metropolitano de Quito" por el Instituto Francés de Investigación para el Desarrollo (IRD) conjuntamente con la Municipalidad de Quito.

Palabras claves : *Vías urbanas esenciales, obras viales, movilidad, peligro sísmico, vulnerabilidad, riesgo, escenarios, planificación preventiva, Quito.*

Abstract
The aim of this paper is to propose a reflection about the possible mobility disruptions within the Metropolitan District of Quito resulting from a loss of road serviceability due to the damage that could be experienced by the elevated road structures in case of an earthquake. This paper briefly presents the developed methodology to pinpoint the urban critical roads, of which the closure is likely to be very detrimental to the interchanges and to the functioning of the whole district, and on which the stakeholders' attention should be prioritised. Secondly, it presents an analysis of the damage probability in case of an earthquake, focused on the elevated road structures, which are located along the urban critical roads. This analysis was carried out in partnership with the National Polytechnic High School of Ecuador. Some scenarios were elaborated and allowed forecasting the mobility disruptions, which are likely to occur within the capital town of Ecuador in case of a very severe earthquake (PGA = 0.40g).
The paper is a result of a study about urban risks carried out within the framework of the "Information System and Risks in the Metropolitan District of Quito" Programme by the Development Research French Institute (IRD) in collaboration with the Municipality of Quito.
Key words: Urban critical roads, elevated road structures, mobility, seismic hazard, vulnerability, risks, scenarios, preventive planning, Quito.

INTRODUCTION

Siège de la capitale de l'Equateur, le District Métropolitain de Quito (DMQ) rassemble un peu plus de 1,8 million d'habitants en 2001 et se situe dans une des zones les plus exposées à l'aléa sismique à l'échelle nationale[1]. Depuis l'arrivée des Espagnols au début du XVIe siècle, 23 séismes d'intensités supérieures à VI ont été ressentis à Quito, dont 8 d'une intensité supérieure à VII[2]. Le dernier tremblement de terre qui a affecté la ville, bien que de façon modérée, date de 1987 (séisme d'une magnitude de 6,9 localisé dans la zone sub-andine orientale). Les dégâts les plus sérieux ont affecté les ensembles architecturaux anciens du centre historique, classé depuis 1978 patrimoine de l'humanité.

Diverses initiatives visant à améliorer la connaissance du risque sismique à Quito ont été impulsées par les pouvoirs publics municipaux en collaboration avec différentes universités et organismes scientifiques internationaux.

Ce fut notamment le cas au début de la décennie 90 avec un projet pilote de scénario sismique qui a permis de progresser fortement en matière de connaissance des structures des sols, d'aléa sismique et de vulnérabilité[3]. Le présent article est issu d'une étude s'inscrivant dans la même logique, réalisée en 2002 en partenariat avec l'Ecole Polytechnique Nationale équatorienne[4]. Celle-ci a été menée dans le cadre du programme « Système d'Information et Risques dans le District Métropolitain de Quito » conduit entre 1999 et 2004 par l'Institut de Recherche pour le Développement en collaboration avec la municipalité de Quito. Les analyses de risques à Quito avaient jusqu'alors été menées sur les aléas ou s'appuyaient sur une étude préalable de ces derniers. Dans le cadre du programme, au contraire, l'accent a d'abord été placé sur les enjeux de fonctionnement de la

INTRODUCTION

The Metropolitan District of Quito (MDQ), location of the capital of Ecuador, has a population of a few more than 1,8 million in 2001 and is situated in one of the most exposed zones to seismic hazard at the national scale[1]. Since the arrival of the Spanish at the beginning of the 16th century, 23 earthquakes with intensities higher than VI have been felt in Quito, among which 8 with intensities higher than VII[2]. The last earthquake, which moderately affected the city, was in 1987 (with a magnitude of 6.9 and was located in the eastern sub-andean zone). More serious damages have affected the old buildings of the historical centre, classified as a World Heritage Site since 1978.

Various initiatives aiming to improve the knowledge of the seismic risk in Quito have been carried out by the public authorities in collaboration with different universities and international scientific institutes.

This was the case at the beginning of the nineties with a pilot seismic project, which allowed great progress of the knowledge of the soil structures, seismic hazards and vulnerability[3]. This paper is derived from such a study carried out in 2002 in partnership with the National Polytechnic High School of Ecuador[4]. This study is part of the "Information System and Risks of the Metropolitan District" Programme carried out between 1999 and 2004 by the Institut de Recherche pour le Développement in collaboration with the Quito Municipality. Previous risk analyses in Quito were focused on hazards or were based on a preliminary study of the latter. In the mentioned programme, the focus is on the contrary firstly on the strategic urban facilities, then on their vulnerability. The starting hypothesis was that, in order to mitigate risk in an effi-

1 Sur une échelle d'aléa croissante échelonnée de I à IV, Quito se trouve dans la zone IV (Code Equatorien de la Construction, 2000) d'après l'Institut de Géophysique de l'Ecole Polytechnique Nationale équatorienne. / *On a rising hazard scale grading from I to IV, Quito is placed in the zone IV (Ecuador Code of Construction, 2000) after the Geophysics Institute of the National Polytechnic School of Ecuador.*

2 CHATELAIN J.L., et al. 1994.

3 EPN - GeoHazards International – MDMQ – ORSTOM - OYO Corporation, 1995.

4 ATIAGA G., DEMORAES F., 2002.

ville, puis sur leur vulnérabilité. En effet, l'hypothèse a été de considérer que pour prévenir le risque de façon efficace au sein d'un territoire urbain, lieu de concentration de populations, de fonctions urbaines et de richesses, il était indispensable de cibler l'analyse sur les éléments et les espaces essentiels pour son fonctionnement, dans la mesure où leur détérioration ou perte, compte tenu de dysfonctionnements internes ou de leur exposition à un aléa, constituerait un très grave handicap pour la ville. Le risque correspond donc à la possibilité qu'a une société de perdre ses enjeux et il est d'autant plus grand que les enjeux sont vulnérables[5].

cient way within an urban area, a place of high human densities and urban functions concentration, it was unavoidable to target the analysis at the critical facilities and strategic areas for its functioning, because their deterioration or loss, derived from internal failures or their exposure to a hazard, would cause a very acute handicap for the city. The risk is, therefore, the possibility for a society to lose its key socio-economic components (also called urban stakes). And the more vulnerable the related critical facilities, the higher the risk[5].

La mobilité, c'est-à-dire l'ensemble des déplacements effectués par les citadins de façon contrainte (travail, éducation…) ou non (loisirs, visites…) par le biais de moyens de transport individuels ou collectifs généralement interconnectés, est fondamentale pour le fonctionnement d'un territoire urbain. L'interruption des flux de personnes et de marchandises, ainsi que les réductions ou pertes d'accessibilité de certains espaces d'intérêt majeur, peuvent être lourdes de conséquence pour la ville. Ces interruptions peuvent par exemple résulter de l'endommagement ou de la destruction des ouvrages d'art routier suite à un séisme. La rupture d'un pont peut rendre impossible le franchissement d'une rivière, d'un ravin. Elle est également susceptible, dans d'autres cas, de bloquer la circulation sur une voie située en dessous du pont effondré, à cause de l'amoncellement de débris. Ceci est d'autant plus problématique que les axes majeurs de la ville sont concernés.

Mobility, that is to say all movements realised by city-dwellers for different purposes (work, education, hobbies, visits…), using generally interconnected means of individual or collective transport, is fundamental for the functioning of an urban territory.

The disruption of freight transportation and people's mobility, as well as reduction or loss of access to some areas of major interest, may have severe consequences on the city. These interruptions may result for example, from the damage or the destruction of road infrastructures following an earthquake. Collapse of a bridge can hamper the crossing of a river or a ravine. In some cases, it is likely that this will affect the traffic on a road beneath the collapsed bridge, due to the piling up of the debris. This is all the more problematic as most of the critical roads and transportation lifelines of the city are concerned.

Dans ce contexte, l'objectif de l'article est de proposer une réflexion sur les perturbations possibles de la mobilité dans le District Métropolitain de Quito (DMQ), liées à la perte d'opérationnalité de ses principaux axes routiers compte tenu des dégâts subis par les ouvrages d'art en cas de séisme. Dans un premier temps, l'article présente brièvement la méthodologie mise au point pour identifier ces axes enjeux, axes essentiels dont la fermeture serait la plus préjudiciable pour les communications et le fonctionnement du district et sur lesquels l'attention des gestionnaires doit être prioritaire. En deuxième lieu, l'analyse de la probabilité d'endommagement en cas de séisme des ponts situés le long de ces voies, menée en partenariat avec l'Ecole Polytechnique Nationale équatorienne, est présentée. Elle permet d'estimer et de tenter de localiser les plus graves perturbations de la mobilité que pourrait connaître la capitale de l'Equateur en cas de séisme très sévère (PGA = 0.40g).

In this context, this paper aims at analysing the possible disruptions of the mobility in the Metropolitan District of Quito (MDQ), relating to the loss of serviceability of the main roads derived from damages to elevated road structures in case of an earthquake. Firstly, this paper briefly presents the methodology set up to pinpoint the critical roads. The critical roads are the essential roads of which the closure would be the most detrimental to interchanges and the functioning of the district, and roads that should be a priority of stakeholders. Secondly, the analysis of damage probabilities in case of an earthquake to elevated road structures located along these roads, carried out in partnership with the National Polytechnic High School of Ecuador is presented here. This allows estimation and a tentative location of the most acute disruptions of mobility that could affect the capital of Ecuador in case of a severe earthquake (PGA=0.40g).

5 Voir notamment D'ERCOLE R., METZGER P., 2002 et 2004 / *Notably see D'ERCOLE R., METZGER P., 2002 et 2004.*

IDENTIFICATION DES AXES ENJEUX DU DMQ ET REPERAGE DES PONTS SITUES SUR CES AXES

La détermination des axes routiers enjeux est basée sur une analyse qui a d'abord différencié 4 types d'axes selon leur rôle dans le fonctionnement du territoire métropolitain et de ses sous-espaces géographiques. Il s'agit :
- des voies d'accès au DMQ (qui permettent les liaisons entre le district et le reste du pays),
- des axes centre périphérie (spécifiques avant tout par leur rôle dans les déplacements entre la ville de Quito et le reste du district),
- des axes urbains (qui permettent les déplacements à l'intérieur de la ville),
- et des axes de l'espace central (qui vont définir l'accès et la circulation dans l'espace qui enregistre le plus de déplacements).

Des critères à la fois quantitatifs et qualitatifs adaptés à chaque type d'axes ont permis de hiérarchiser l'ensemble du réseau. Il s'agit d'indicateurs qui rendent compte du volume du trafic automobile, de l'importance de l'axe dans le réseau de transports en commun (essentiel à Quito), du poids démographique des espaces périphériques (ce qui renvoie à une estimation des besoins de déplacements), des dépendances fonctionnelles (entre les zones résidentielles et les espaces centraux), des liens qu'entretient le district vis-à-vis des autres pôles urbains, ou encore du rôle de la voie routière dans la desserte des espaces compte tenu notamment de l'existence ou de l'absence d'alternatives et de leur qualité (circulation plus ou moins aisée). Le résultat de cette hiérarchisation a permis d'identifier un ensemble d'axes routiers enjeux à l'échelle de l'agglomération (voir carte 1).

Sur les 90 ouvrages d'art routiers que compte l'agglomération, 55 se situent le long de ces axes enjeux (carte 1). Il s'agit d'infrastructures présentant une section aérienne (ponts, viaducs, passages surélevés, partie aérienne des échangeurs). Deux cas de figures se présentent : soit l'axe enjeu passe par l'ouvrage, soit l'ouvrage enjambe l'axe enjeu.

IDENTIFICATION OF CRITICAL ROADS AND ELEVATED INFRASTRUCTURES ALONG THEM WITHIN THE MDQ

Determination of critical roads is based on analysis, which firstly differentiated four types of roads according to their role in the functioning of the metropolitan area and its geographical sub-areas. They are:
- *Access roads to MDQ (which allow connections between the district and the rest of the country),*
- *Commuting roads (playing an important role in travels between the city of Quito and the rest of the district),*
- *Urban roads (which allow movements inside of the city),*
- *And roads of the central area loaded with the highest traffic volumes (which make possible the access to this area and underpin traffic in it).*

Quantitative and qualitative criteria adapted to each type of roads have allowed a gradation of the sections within the whole network. These criteria are indicators which give an account of the volume of the car traffic, the importance of the road in the public transport networks (essential in Quito), the demographic weight of outskirts (which serves to estimate the travel demand), functional dependences (between residential zones and central areas), interchanges between the district and other urban centres, or also the role of the roads in the service of zones taking into account the existence or the absence of alternatives and their quality (more or less easy traffic). The result of this classification has allowed the identification of all critical transportation infrastructures and lifelines at agglomeration scale (see map 1).

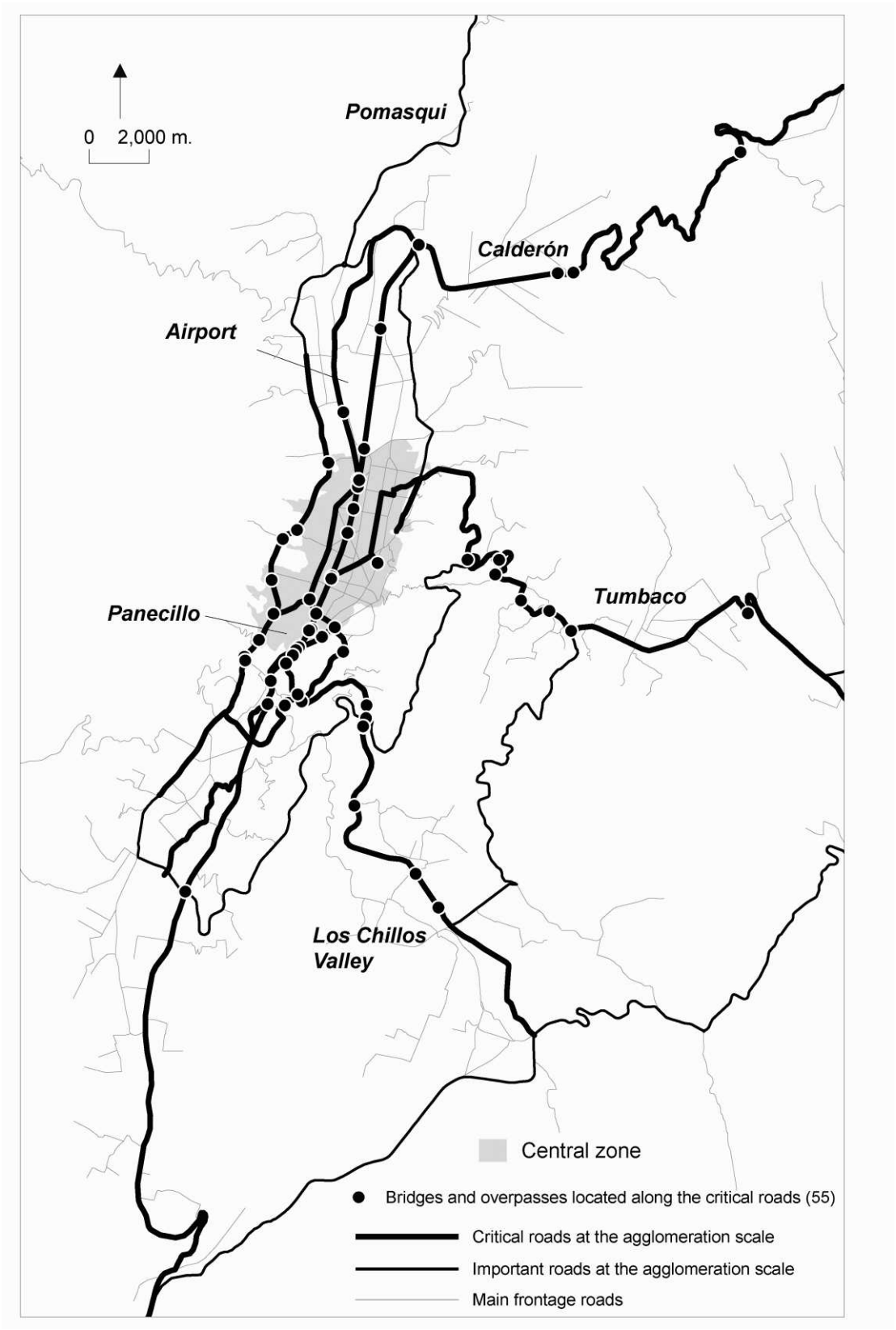
Of the 90 elevated road infrastructures in the urban agglomeration, 55 are located along these critical roads (map 1). They are infrastructures that have an elevated section (bridges, viaducts, fly over, overpasses in motorway intersections/interchanges). Two cases can be identified: either the critical road relies on the engineering structure or the latter spans the critical road.

EVALUATION DE LA PROBABILITE D'ENDOMMAGEMENT DES OUVRAGES D'ART ROUTIERS SITUES LE LONG DES AXES ENJEUX

L'étude est ciblée uniquement sur les ouvrages d'art routiers situés le long des axes enjeux dans la mesure où la destruction de ces ouvrages est *a priori* la plus préjudiciable aux communications et au fonctionnement urbain. Ces infrastructures ont été inspectées au cours d'un travail de mesures sur le terrain.

ASSESSMENT OF THE PROBABILITY OF DAMAGING ROAD INFRASTRUCTURES LOCATED ALONG CRITICAL ROADS

The study is only focused on elevated road infrastructures located along critical roads to the extent that the destruction of these structures is a priori *the most detrimental to communications and urban functioning. These infrastructures were checked during a field survey.*



Carte 1 – Ponts et passages surélevés situés le long des axes enjeux.
Map 1 – Bridges and overpasses located along the critical roads.

La méthodologie utilisée correspond à une adaptation de la méthode HAZUS®99 mise au point aux Etats-Unis[6] par la *Federal Emergency Management Agency* (FEMA)[7] en partenariat avec le *National Institute of Building Sciences* (NIBS). Méthode intégrée d'évaluation pluridisciplinaire du risque sismique, elle permet notamment d'estimer la susceptibilité d'endommagement des ponts face à un séisme. D'autres méthodes d'évaluation du risque sismique existent. Parmi les plus connues, notons la méthode développée par le BRGM à Nice dans le cadre du programme GEMITIS[8] et appliquée par la suite à Ensenada (Mexique)[9] et la méthode du programme RADIUS[10] appliquée dans différentes villes (Addis-Abeba, Tijuana, Tashkent…) dans le cadre de la Décennie Internationale de Prévention des Catastrophes Naturelles.

The used methodology is adapted from the HAZUS®99 method developed in the United States[6] by Federal Emergency Management Agency (FEMA)[7] in partnership with the National Institute of Building Sciences (NIBS). It is an integrated multidisciplinary method for seismic risk assessment which notably allows estimation of damage susceptibility of bridges by an earthquake. There are other methods for seismic risk assessment. Among the most known, the method developed by the BRGM in Nice as part of GEMITIS[8] programme and subsequently applied in Ensenada (Mexico)[9] and the method of the RADIUS[10] programme applied in different cities (Addis-Ababa, Tijuana, Tashkent...) as part of International Decade for Natural Disaster Reduction.

Le choix de recourir à la méthode HAZUS tient au fait qu'elle semblait être la plus facilement applicable à Quito dans la mesure où les normes de construction des ouvrages routiers en Equateur sont largement inspirées de celles des Etats-Unis. Cette méthode se base sur des caractéristiques structurales propres aux ouvrages, sur le type de terrain sous-jacent et sur l'accélération maximale attendue au sol (PGA[11]). Elle permet de distinguer cinq niveaux de dégâts : nuls, légers, modérés, graves, complets.

We chose the HAZUS Method because it is the easiest method to use in Quito insofar as road construction standards in Ecuador are largely taken from the United States. This method is based on structural characteristics inherent to each road infrastructures, on the type of underlying ground and on the expected Peak Ground Acceleration (PGA[11]). It allowed distinction of five damage levels: no damage, slight, moderate, extensive, complete.

Afin d'appliquer la méthode HAZUS®99, il a fallu déterminer, pour chacun des ouvrages, les paramètres suivants :

- sismo-résistance de l'ouvrage (déterminée à partir de l'année de construction)[12],
- nombre de segments qui composent le tablier,
- longueur et largeur des segments du tablier,
- matériel de construction,
- angle de désaxe (*skew angle*)[13],
- type de sols sous-jacents.

To apply the HAZUS®99 Method, we had to determine for each of the structures the following parameters:

- *Earthquake resistance design (obtained from the year of construction)[12],*
- *Number of spans which form the deck,*
- *Length and width of the deck,*
- *Building material,*
- *Skew angle[13],*
- *Type of underlying soils.*

En ce qui concerne les sols, la typologie élaborée dans le cadre du scénario sismique de 1994 fait ressortir 18 catégories qui ont été regroupées[14] en 4 types standards (S1, S2, S3, S4) décrits dans le Code équatorien de

In terms of soils, the established typology, as part of the seismic scenario of 1994, has determined 18 categories which have been grouped[14] into 4 standard types (S1, S2, S3, S4) described in the Ecuador Construction

6 *Direct Physical Damage to Transportation Systems*, http://www.fema.gov/hazus/download.htm (chapitre 7 / *chapter 7*).

7 Voir / *see* ATC, 1991.

8 LUTOFF C., 2000.

9 CHÁVEZ VELASCO G., 2004.

10 Risk Assessment tools for Diagnosis of Urban areas against Seismic disasters.

11 Peak Ground Acceleration.

12 D'après des experts en ingénierie civile de l'Ecole Polytechnique Nationale de l'Equateur, à Quito seules les infrastructures construites après 1996 ont été conçues en respectant les normes de para-sismicité établies en Californie dès 1975 et appliquées à l'ensemble des Etats-Unis à partir de 1990 / *According to civil engineering experts of the National Polytechnic High School of Ecuador, only infrastructures built after 1996 respect para-sismicity standards established in California since 1975 and applied in the whole of United States since 1990.*

13 Le *skew angle* correspond à l'angle entre l'axe du pilier et une droite perpendiculaire à l'axe du tablier / Skew angle *corresponds to the angle between a pilar axis and a vertical line to the deck axis.*

14 ALARCÓN F. VALVERDE J. FERNÁNDEZ J. YÉPEZ F., 2001.

construction (2000)[15] et pour lesquels il est possible de déterminer les valeurs de l'accélération spectrale prévisible.

De manière schématique, les sols S1 correspondent à des terrains consolidés, les sols S3 à des roches meubles ou strates profondes. Les sols S2 comportent des caractéristiques intermédiaires entre les sols S1 et S3. Le type S4 matérialise des sols hautement compressibles et pour lesquels les conditions géologiques et topographiques sont défavorables.

L'application de la méthodologie HAZUS®99 et son adaptation à la ville de Quito ne sont pas développées ici mais sont consultables à l'adresse suivante : http://edytem.univ-savoie.fr/membres/demoraes/pub-equateur-pdf/informe2.pdf (document en espagnol).

La méthodologie présente un certain nombre de limites qu'il convient de préciser :
- les sols et amplifications vibratoires associées ne sont pas considérés dans le détail (notamment au niveau des remblais).
- La structure des sols n'est pas connue avec précision dans les zones suburbaines. Ces derniers ont été inclus dans la catégorie S2 sur le conseil de professionnels[16] qui ont réalisé une caractérisation davantage qualitative.
- La méthode ne permet pas d'apprécier les dégâts susceptibles d'être occasionnés aux ponts par les déplacements de terrain associés aux failles.

Pour tenir compte de ces limites, le comportement des 55 ouvrages situés sur les axes enjeux a été calculé pour 4 types de séismes caractérisés par leur accélération maximale au sol (PGA) exprimée en fraction de la gravité :
- séisme léger (PGA = 0,05g)
- séisme modéré (PGA = 0,10g)
- séisme sévère (PGA = 0,25g)
- séisme très sévère (PGA = 0,40g)[17]

PRINCIPALES CONCLUSIONS DE L'EVALUATION DES DEGATS POTENTIELS

D'après la méthodologie utilisée, en cas de séisme léger ou modéré, les 55 ouvrages ne présenteraient probablement pas de dégât. En cas de séisme sévère (PGA = 0,25g), 64% des ouvrages présenteraient des niveaux d'endommagement légers voire modérés, et un seul pont

Code (2000)[15] and for which it was possible to determine values of the predictable peak ground acceleration.

In a simplistic way, S1 soils correspond to consolidated ground; S3 soils are unconsolidated rocks or deep strata. S2 soils have intermediate characteristics between S1 and S3 soils. S4 type represents highly compressible soils and of which topographical and geological conditions are unfavourable.

The application of the HAZUS®99 methodology and its adaptation to the city of Quito are not developed here but are available for on-line consultation at: http://edytem.univ-savoie.fr/membres/ demoraes/ pub-equateur-pdf/informe2.pdf (document in Spanish).

The methodology has a number of limitations that must be mentioned:
- *Soils and related ground motions are not considered in detail (notably for the backfills).*
- *The soil structure is not precisely known in suburban areas. It is included in S2 category following the advice of professionals[16] who carried out a qualitative characterisation rather.*
- *The method does not allow the valuation of damage which is likely to affect bridges by ground displacements due to faults.*

To take these limits into account, the behaviour of 55 elevated structures located along the critical roads is calculated for 4 types of earthquakes characterised by their maximal peak ground acceleration (PGA) expressed in gravity fractions:
- *Slight earthquake (PGA= 0.05g)*
- *Moderate earthquake (PGA=0.010g)*
- *Severe earthquake (PGA= 0.25g)*
- *Very severe earthquake (PGA= 0.40 g)* [17]

MAIN CONCLUSIONS OF POTENTIAL DAMAGE ASSESSMENTS

Following the used methodology, in case of a slight or moderate earthquake, the 55 structures possibly will not present any damage. In case of a severe earthquake (PGA = 0.25g), 64% of the structures would present slight even moderate levels of damage, and only one

15 Colegio de Ingenieros Civiles de Pichincha, 2000.

16 Différents enseignants-chercheurs de l'EPN se sont prononcés dont Jorge Valverde, directeur de la Faculté d'Ingénierie Civile / *According to some searchers-lecturers of the National Polytechnic High School of Ecuador, including Jorge Valverde, the Director of the Civil Engineering Faculty.*

17 Un PGA maximal de 0,40g a été retenu pour caractériser le séisme le plus sévère pouvant être ressenti à Quito compte tenu des indications mentionnées dans le code de construction équatorien / *Taking into account the data mentioned in the Ecuador Code of Construction, 0.40g is the maximum PGA selected to characterise the most severe earthquake that could be felt in Quito.*

pourrait connaître des dommages graves ou complets. Les plus fortes probabilités d'endommagement sont associées à un séisme très sévère (PGA=0,40g). Dans ce cas, 56% des ouvrages connaîtraient des dégâts graves ou complets.

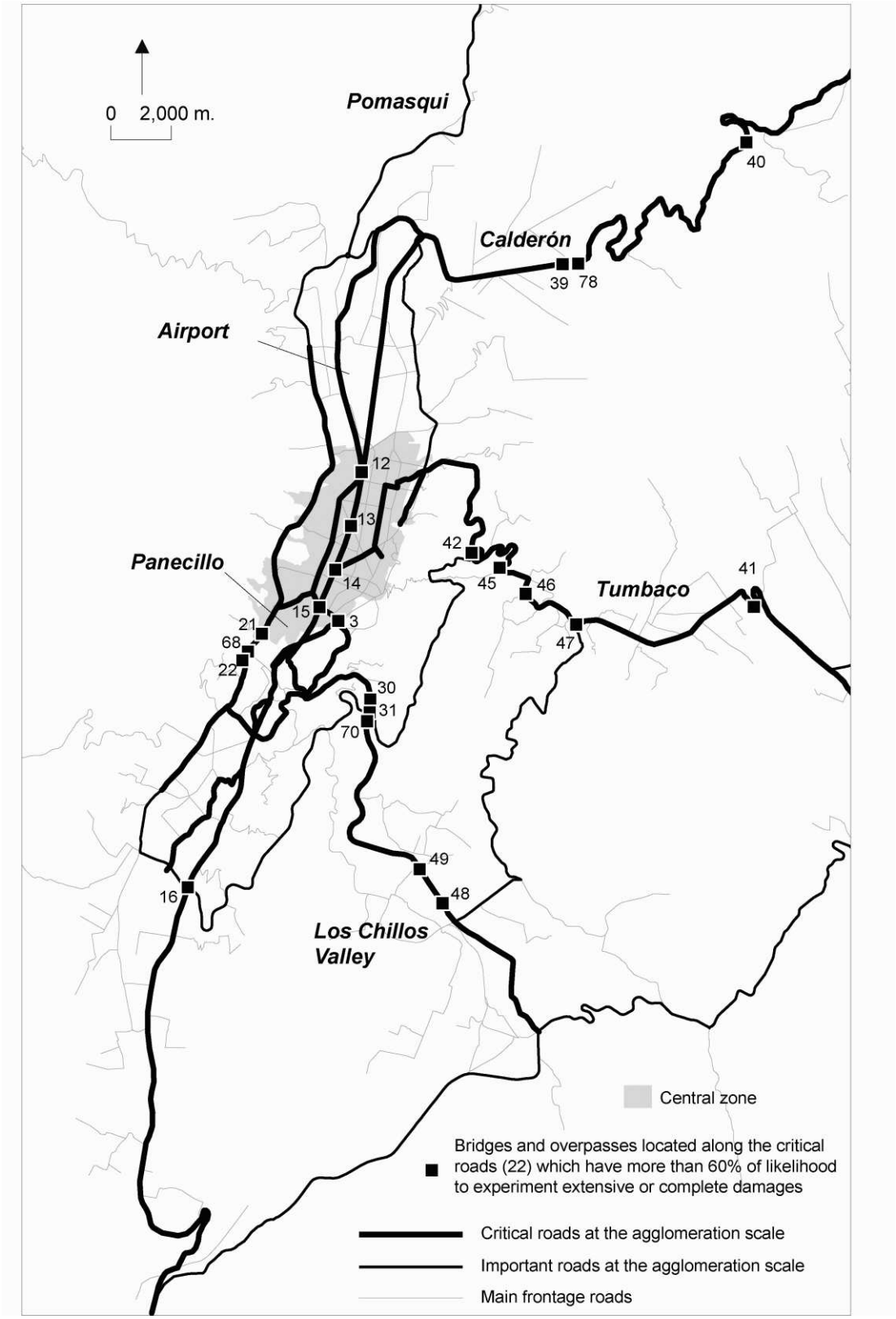
Le tableau 1 et la carte 2 présentent les 22 ouvrages situés le long des axes enjeux qui ont plus de 60% de probabilité (seuil limite retenu) d'être gravement ou complètement endommagés en cas de séisme très sévère (PGA = 0,40g). C'est donc sur cet ensemble d'ouvrages particulièrement vulnérables que l'attention des pouvoirs publics devrait porter en priorité (renforcement des structures, définition d'itinéraires bis…).

bridge would experience extensive or complete damage. The highest damage probabilities are associated with a very severe earthquake (PGA = 0.40g). In this case, 56% of structures will be affected by extensive or complete damages.

Table 1 and map 2 present the 22 structures located along the critical roads which have a higher than 60% probability (selected threshold) of being extensively or completely damaged in case of a very severe earthquake (PGA = 0.40g). Therefore, this set of vulnerable structures should have prior attention from the public authorities (reinforcement of structures, definition of alternate routes…).

Tableau 1 – Ponts et passages surélevés situés le long des axes enjeux ayant plus de 60% de probabilité d'être gravement ou complètement endommagés en cas de séisme très sévère (PGA = 0,40g)
Table 1 – Bridges and overpasses located along strategic roads with a probability of more than 60% of being extensively or completely damaged by a very severe earthquake (PGA= 0.40g) .

Clef ***Key***	**Localisation (nom de rues)** ***Location (street names)***	**Probabilité d'endommagement grave ou complet en cas de séisme très sévère** ***Probability of an extensive or complete damage in case of a very severe earthquake***
68	Puente peatonal San Roque	85,2%
48	Autopista Rumiñahui (Rio San Pedro) - Los Chillos	79,4%
41	Interoceánica (Rio Chiche)	78,6%
16	Maldonado y Nueva Oriental (Plywood)	77,8%
15	10 de Agosto y Patria (Puente El Guambra)	76,3%
70	Justo antes del peaje de la Autopista Rumiñahui	76,3%
21	Occidental (El Tejar)	75,7%
12	Inicio de La Prensa y America (La Y)	74,7%
45	Interoceánica (Rio Machangara)	73,8%
42	Interoceánica y Nueva Oriental (Cumbaya)	72,6%
3	Patria y 12 de Octubre	71,6%
40	Panamericana Norte (Rio Guayllabamba)	71,6%
47	Interoceánica (Rio San Pedro) antes del Club El Nacional	71,6%
49	Autopista Rumiñahui - Entrada a Conocoto	71,6%
22	Occidental y 24 de Mayo (San Roque)	69,9%
78	Panamericana Norte junto a la tenencia política	67,2%
46	Circunvalación Cumbaya (Entrada San Juan Bautista)	63,4%
30	Autopista Rumiñahui (antes del intercambiador con Nueva Oriental)	62,1%
31	Autopista Rumiñahui y Nueva Oriental	62,1%
39	Panamericana Norte al llegar a Calderón (junto al cementerio)	62,1%
13	10 de Agosto y República (Recta)	60,4%
14	10 de Agosto y Eloy Alfaro	60,2%



Carte 2 – Ponts et passages surélevés situés le long des axes enjeux ayant plus de 60% de probabilité d'être gravement ou complètement endommagés en cas de séisme très sévère (PGA = 0,40g).
Map 2 – Bridges and overpasses located along critical roads with a probability of more than 60% to be extensively or completely damaged in case of a very severe earthquake (PGA = 0.40g).

PERTURBATIONS POSSIBLES DE LA MOBILITE ASSOCIEES A LA FERMETURE D'AXES ENJEUX SUITE A L'ENDOMMAGEMENT OU LA DESTRUCTION DES OUVRAGES LES PLUS VULNERABLES

Le cas le plus pessimiste a été retenu en guise d'illustration des effets les plus graves que pourrait expérimenter le district de Quito. L'analyse est donc ciblée sur les perturbations possibles de la mobilité (voir carte 3) liées aux dommages subis par les ponts les plus vulnérables face à un séisme très sévère (PGA = 0,40g) situés le long des axes enjeux. Ceci dit, notons que la probabilité d'occurrence d'un séisme très sévère est relativement faible puisqu'elle correspond à une période de retour de 475 ans[18].

Ce scénario ne prétend aucunement fournir avec certitude et précision l'ensemble des perturbations que pourrait connaître l'agglomération de Quito. Ce n'est qu'une vision générale, nécessairement incomplète, et la méthode utilisée ainsi que son adaptation au contexte équatorien comportent des limites (voir supra). Les scénarios développés ici n'ont d'autres objectifs que de fournir aux gestionnaires urbains une base de réflexion sur les risques encourus compte tenu des problèmes de communication possibles liés à la perte d'opérationnalité des axes enjeux, dans l'optique d'orienter les mesures de prévention des risques et de préparation aux situations de crises.

L'échelle retenue est volontairement celle de l'agglomération, l'analyse portant sur des macro-perturbations, telles que les ruptures d'accessibilité ou encore les risques d'isolement encourus par certains secteurs. D'autre part, elle correspond à l'échelle d'identification des axes enjeux.

Rappelons également que bien d'autres perturbations de la mobilité, dont les causes sont autres que l'effondrement d'ouvrages d'art, peuvent être engendrées par un séisme. Elles peuvent être dues à des chutes de matériaux provenant des constructions situées le long des voies, des chutes d'arbres, de pylônes sur la chaussée, de l'effondrement des passages piétons aériens ou encore de la destruction d'une route due à la réactivation d'une faille… Les répercussions de ces phénomènes, relevant d'une analyse complémentaire, ne sont pas considérées ici.

Les problèmes d'accès au district et à la ville

Le secteur d'étude couvrant le District Métropolitain de Quito, les ouvrages en dehors de cette zone n'ont pas été pris en compte. Cependant, il n'est pas exclu que l'endommagement subi par une infrastructure, localisée dans un canton limitrophe, puisse avoir des répercussions

POTENTIAL MOBILITY DISRUPTIONS FOLLOWING CLOSURE OF CRITICAL ROADS DUE TO DAMAGING OR DESTRUCTION OF THE MOST VULNERABLE BRIDGES AND OVERPASSES

The most pessimistic case has been retained by way of illustrating the worst effects that could be experienced by the district of Quito. Therefore, the analysis targeted possible disruptions of transportation (See Map 3), resulting from damages suffered by the most vulnerable bridges and overpasses located along critical roads, in case of a very severe earthquake (PGA = 0.40g). This said, we should note that the probability of occurrence of a very severe earthquake is relatively low as it corresponds to a return period of 475 years[18].

This scenario does not in any way claim to provide with certainty and precision all difficulties that could be experienced by the district of Quito. It is only a general view, necessarily incomplete, and the used method as well as its adaptation to the Ecuador context has limits (see supra). The only objective of the scenario developed here is to provide urban managers with a starting point on incurred risks taking into account possible communication problems related to the loss of the serviceability of the critical transportation facilities and lifelines, with the intention to establish mitigation measures and to prepare for crisis situations.

The retained scale is deliberately that of the agglomeration one, insofar as the analysis concerns macro-disruptions, such as accessibility rupture or also risks of isolation in some districts. On the other hand, it corresponds to the scale used to pinpoint the critical roads.

We should also remember that many other disruptions of transportation, of which causes differ from collapse of the structures, might well be generated by an earthquake.

They can result from material falling from buildings located along the roads, trees or pylons falling on the road surface, collapse of footbridges or also destruction of a road due to a fault reactivation… Repercussions of these phenomena, belonging to a complementary analysis, are not considered here.

Problems of access to the district and the city

As the study sector is restricted to the Metropolitan District of Quito, structures outside this area have not been taken into account. However, it is not excluded that damage suffered by an infrastructure, which is located in a bordering canton, could have significant

18 YEPEZ F., 2001.

significatives notamment en ce qui concerne l'accessibilité du district. Par exemple, l'échangeur (Z) situé à l'intersection de la Panaméricaine Sud et de la Voie de Contournement Métropolitaine, à l'extérieur du district, au sud, n'a pas fait l'objet de mesures (Carte 1). Or, il est possible qu'il puisse être sérieusement endommagé par un séisme très sévère, du fait de son ancienneté (décennie 1970). Ceci dit, en tant qu'échangeur, il est doté de diverses bretelles et présente donc plusieurs alternatives de franchissement même si la section suspendue était amenée à s'écrouler. Ce cas de figure contribuerait malgré tout à ralentir le trafic de façon significative.

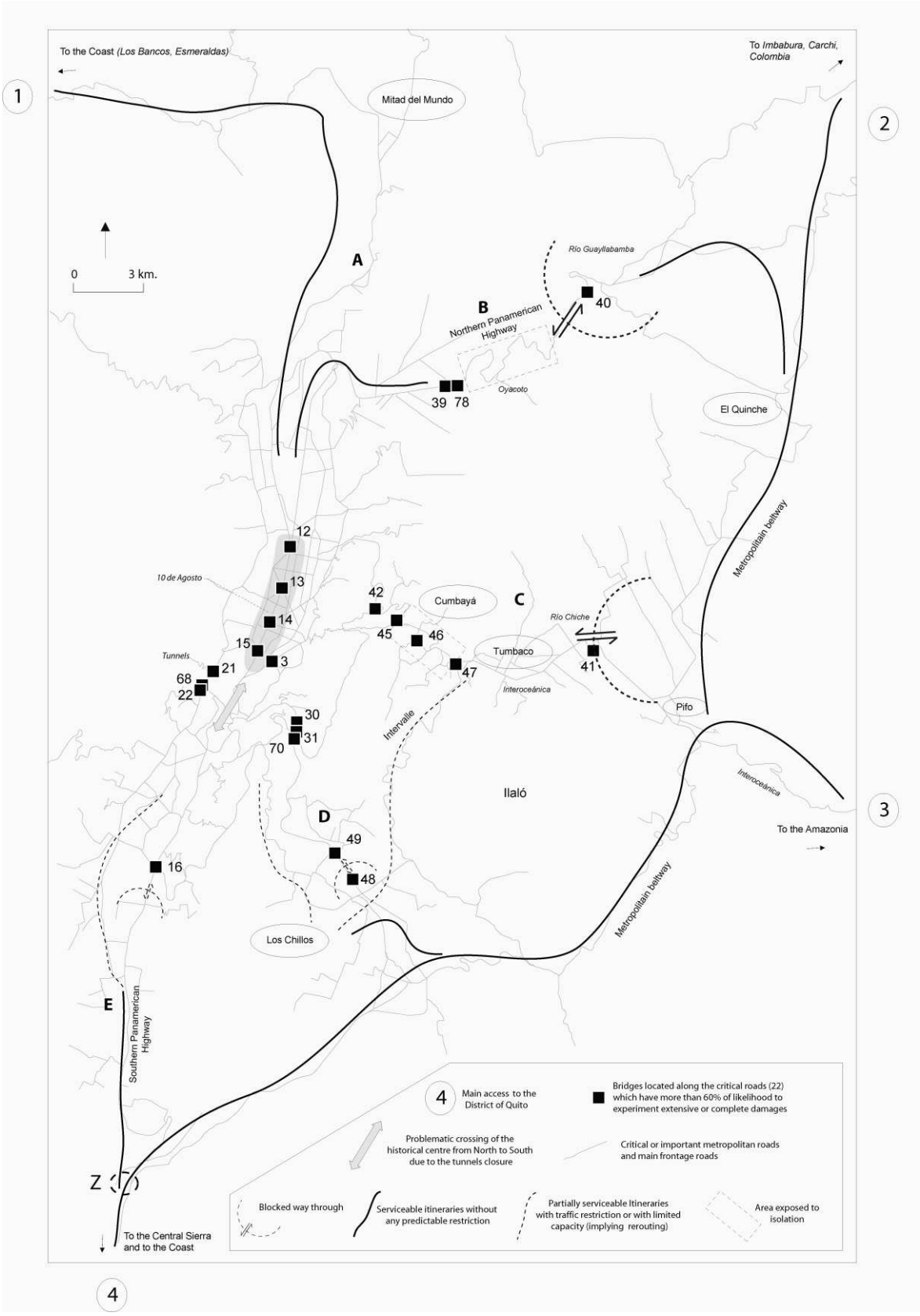
Le DMQ possède 4 accès principaux (1, 2, 3, 4). En cas de séisme très sévère, les itinéraires resteraient fonctionnels sans grande restriction apparente tout au moins sur les premiers kilomètres de la périphérie (avec un doute pour l'accès sud au niveau de l'échangeur Z). En revanche, sur les 5 axes (A, B, C, D, E) qui relient la ville aux banlieues, 4 courent le risque d'être partiellement ou complètement fermés. Le seul axe qui demeurerait totalement opérationnel serait l'accès nord par *Los Bancos* et *La Mitad del Mundo* (A), dépourvu de ponts. En temps normal ce dernier n'est pas de très grande importance pour la capitale mais pourrait servir en période de crise pour le ravitaillement en produits côtiers (riz, huile, denrées maraîchères, fruits de mer, avoine...). Il pourrait également servir pour l'évacuation de la ville ou pour le transfert d'activités (organismes de décision, écoles, entreprises …), pouvant s'implanter provisoirement dans le secteur de la *Mitad del Mundo*, peu dense et proche de la ville.

La destruction du pont franchissant la rivière Guayllabamba sur la Panaméricaine Nord (40) causerait la rupture de l'accès nord-oriental. La première alternative de déviation envisageable, par *El Quinche*, *Pifo* et *Tumbaco*, serait également hors service à cause de l'effondrement du pont de la rivière *Chiche* (41). Les communications entre Quito et les aires géographiques septentrionales (*Imbabura*, *Carchi*, Colombie) et orientales (Amazonie) ne seraient possibles qu'en contournant le mont *Ilaló* par l'est. Cela permettrait de déboucher sur la vallée de *Los Chillos*, exutoire, somme toute, limité dans la mesure où l'autoroute *Rumiñahui* (D), axe centre-périphérie de première importance transité chaque jour par plus de 30 000 véhicules, serait fermée par la destruction des ouvrages-clefs 31 et 48. Seule l'ancienne route à *Conocoto*, raide, sinueuse et à capacité réduite, permettrait encore le lien entre *Los Chillos* et Quito. Toutefois, cet axe serait très vite saturé à cause de la surcharge considérable de trafic engendrée par la fermeture de l'autoroute *Rumiñahui* et par le report des flux provenant du nord-est et de l'Amazonie.

repercussions notably in terms of accessibility of the district. For example, the interchange (Z) located at the junction of the South Pan-American motorway and the Metropolitan Beltway, outside the district, in the south, has not been a subject of measures (Map 1). However, it is possible that it could be considerably affected by a very severe earthquake because it is an old structure (1970s). But, as an interchange, it has many slip roads and presents, therefore, many crossing alternatives, should the aerial section collapse. Nevertheless, this would significantly slow down the traffic.

MDQ has 4 main access routes (1, 2, 3, 4). In case of a very severe earthquake, itineraries would remain serviceable without big apparent restriction at least on the first kilometres of the outskirts (with a doubt for the south access at the interchange Z). On the other hand, on the 5 roads (A, B, C, D, E) that link the city with its suburbs, 4 of them have the risk of being partially or completely closed. The only road that would remain totally operative is the north access by Los Bancos *and* La Mitad del Mundo *(A), which has no bridges. In normal times, the latter is not of real importance for the city but it could be useful in a crisis period for the supply of coastal products (rice, oil, sea food, market foodstuffs, oats…). It could also serve for evacuation of the city or to activities transfer (decision bodies, schools, enterprises…), that could be provisionally implanted in the district of* Mitad del Mundo*, less dense and close to the city.*

The destruction of the bridge crossing the Guayllabamba River on the North Pan-American motorway would cause the rupture of the North-East access. The first possible traffic diversion, by El Quinche, Pifo *and* Tumbaco*, would be out of service as well due to the collapse of the bridge of the* Chiche *River (41). Communications between Quito and the northern (*Imbabura, Carchi*, Colombia) and eastern (Amazonia) geographical areas will be possible only by by-passing Mont* Ilaló *from the East. This would allow to reach the* Los Chillos *valley, outlet all in all limited insofar as the* Rumiñahui *Motorway (D), central-periphery road of importance loaded everyday by over 30,000 vehicles, would be closed by the destruction of the critical structures 31 and 48. Only the old road to* Conocoto*, steep, sinuous and with a reduced capacity, would still provide a link between* Los Chillos *and Quito. However, this road would be saturated quickly due to the significant overload of traffic generated by the closure of the* Rumiñahui *Motorway and by the rerouting of the flow coming from the north-east and the Amazonia.*



Carte 3 – Scénario des perturbations possibles de la mobilité provoquées par la fermeture des axes enjeux compte tenu de l'effondrement des ponts en cas de séisme très sévère (PGA = 0,40g) dans le district de Quito.
Map 3 – Scenario of possible disruptions of mobility resulting from the closure of the critical roads resulting from the collapse of bridges and overpasses in case of a very severe earthquake (PGA = 0.40g) in the Quito district.

Les connexions entre Quito et les provinces du nord-est et de l'est pourraient donc être très réduites. Il est fortement probable que le ravitaillement de Quito en produits alimentaires provenant de ces provinces du nord-est (pomme de terre, aliment de base) et d'Amazonie (lait, fruits), soit partiellement bloqué. Sans doute, observerait-on également une profonde perturbation de la commercialisation très lucrative des fleurs, majoritairement cultivées dans les secteurs orientaux du DMQ et dans le canton voisin de *Cayambe* au nord, et exportées par voie aérienne depuis l'aéroport *Mariscal Sucre* situé en plein cœur de Quito. Les aéroports de remplacement possibles seraient ceux de *Latacunga* au sud et d'*Ibarra* au nord. La question reste de savoir s'ils seraient accessibles.

Connections between Quito and the provinces of the north-east and east could, therefore, be greatly reduced. It is highly probable that the supply of food products to Quito from these provinces of the north-east (potatoes, basic food) and Amazonia (milk, fruits), would partially be blocked. No doubt, one would also see a deep disruption of the very lucrative commercialisation of flowers, grown mostly in the eastern outskirts of the MDQ and the close canton of Cayambe *in the north, and exported by airway from the* Mariscal Sucre *airport located in the heart of Quito. The possible replacement airports would be* Latacunga *in the south or* Ibarra *in the north. The remaining question is would they be accessible.*

La destruction du pont 16, ouvrage-clef situé sur la Panaméricaine Sud, aux portes de la ville, affecterait l'axe de plus grande importance en temps normal pour le ravitaillement de la ville (70% de la variété des produits de consommation courante, tels que les aliments et vêtements, arrive par cette voie) et pour le transport inter-provincial de personnes (plus de 40 000 personnes y transitent chaque jour en bus). Nonobstant, il existe une alternative routière qui permettrait d'éviter cette intersection névralgique détruite. Cette dernière passe par le secteur de *Guamaní* dans le prolongement sud de l'Avenue *Mariscal Sucre*, mais étant en terre battue, elle se transforme en véritable bourbier lors des fréquents orages.

The destruction of the bridge 16, a critical structure on the South Pan-American motorway, at the gateway of the city, would affect the most important road in normal times for the city supplies (70% of the variety of current consumption products, such as food and clothes, arrive this way) and for the inter-province transportation of people (over 40,000 people cross this road by bus everyday). Notwithstanding, there is an alternative road, which would allow avoidance of this destroyed critical intersection. It passes by the Guamaní *area at the southern end of the* Mariscal Sucre *Avenue, but as it is on a trodden ground, it becomes a real mire during frequent storms.*

Les problèmes de communication à l'intérieur des vallées orientales

Communication problems inside the eastern valleys

En ce qui concerne les mouvements centre-périphérie, de multiples problèmes seraient à prévoir, outre les difficultés de connexion entre *Los Chillos* et Quito. La rupture de certains ouvrages majeurs pourrait être à l'origine d'une réduction d'accessibilité. Ce serait sans doute le cas de la paroisse d'*Oyacoto*, heureusement peu peuplée, le long de la Panaméricaine Nord. Pour cette dernière, la sortie vers le nord-est serait totalement impossible avec la rupture du pont 40 franchissant le *río Guayllabamba* et la sortie vers Quito serait fortement restreinte avec l'effondrement de deux passages surélevés (39 et 78).

In terms of communication between the centre and the periphery, multiple problems would be predictable, in addition to connection difficulties between Los Chillos *and Quito. The rupture of some major road structures would be a source of the reduction in accessibility. No doubt, this would be the case for the zone of* Oyacoto, *fortunately sparsely populated, along the North Pan-American motorway. For the latter, the exit would be impossible with the collapse of bridge 40 crossing* río Guayllabamba *and the exit to Quito would be highly limited with the collapse of both overpasses 39 and 78.*

La paroisse de *Tumbaco*, avec une population de 39 000 personnes, connaîtrait également une diminution notoire d'accessibilité avec la fermeture des ponts 41 à l'est et 47 à l'ouest, tous deux enjambant des cours d'eau fortement incisés. Les habitants n'auraient d'autre possibilité que de rejoindre la *Vallée de Los Chillos*, plus au sud, en empruntant la route *Intervalle*, sinueuse et à capacité modérée. Environ 1 300 véhicules y transitent chaque jour en temps normal. On peut donc pressentir de forts ralentissements voire de sérieux embouteillages sur cet itinéraire.

The zone of Tumbaco, *with a population of 39,000, would also experience a notable reduction in accessibility with the closure of bridges 41 in the east and 47 in the west, both crossing highly incised streams. Inhabitants would be left with one possibility, which is to join the* Los Chillos Valley, *further south, by taking the* Intervalle *road, sinuous and with a moderate capacity. About 1,300 vehicles use this road everyday in normal times. One can, therefore, expect to see much slowing down or even serious jams of traffic on this route.*

Il n'en serait pas de même avec la paroisse de *Cumbayá* qui risquerait pour sa part un isolement total. La zone est située entre deux grandes rivières dont le cours est profondément incisé (*ríos Machángara* et *San Pedro*). Or les deux ponts permettant leur franchissement (45 et 47) seraient vraisemblablement détruits. Cette situation serait d'autant plus préoccupante que *Cumbayá* rassemble d'après le dernier recensement de 2001, quelque 21 000 habitants. Qui plus est, elle est traversée par la route *Interoceánica*, support des mouvements pendulaires entre Quito et la vallée de *Tumbaco-Quinche*. Les quelque 20 000 voyageurs effectuant quotidiennement le trajet en transport en commun[19] ne pourraient plus accéder à Quito[20].

It would not be the same case for the Cumbayá *zone, which would risk total isolation. The area is located between two big deeply incised rivers (*ríos Machángara *and* San Pedro*). Both bridges (45 and 47) that cross them would likely be destroyed.*

This situation would be of more concern insofar as the Cumbayá *zone has, according to the census of 2001, some 21,000 inhabitants. In addition, it is crossed by the* Interoceánica *road, which supports pendular trips between Quito and the* Tumbaco-Quinche *valley. Some 20,000 commuters, who daily use this road on public transport[19], would no longer be able to access Quito[20].*

Enfin, les flux longues distances, de personnes ou de marchandises, en provenance des provinces du Sud ou du Nord, n'ayant pas comme destination Quito, pourraient être maintenus sans véritable restriction apparente en utilisant la Voie de Contournement Métropolitaine.

Finally, the long-distance flows of people or goods, from southern and northern provinces, of which the destination is not Quito, could be maintained without a real apparent restriction by using the Metropolitan Beltway.

Les difficultés de circulation intra urbaine

L'axe probablement le plus affecté, c'est-à-dire celui qui comptabiliserait le plus de dégâts majeurs dans les ouvrages qui le jalonnent, serait l'Avenue *10 de Agosto*, artère pénétrante stratégique par laquelle circulent quotidiennement plus de 65 000 véhicules dans les tronçons les plus chargés (frange grisée sur la carte 3). Cette avenue correspond de surcroît, à l'axe du trolleybus, mode de transport essentiel utilisé par plus de 210 000 passagers chaque jour, soit 17 % du total des usagers du transport en commun.

Difficulties of intra-urban traffic

The road most likely to be affected, due to the high number of major damage among bridges and overpasses, would be the Avenue 10 de Agosto*, the urban backbone avenue on which circulate daily over 65,000 vehicles in the heavy loaded sections (grey fringe on map 3). This avenue corresponds moreover, to the axis of trolleybus, an essential mode of transport used everyday by over 210,000 passengers, making up 17% of the total of public transport users.*

D'une manière générale, les connexions urbaines nord/sud, dont on connaît l'importance compte tenu de la configuration longitudinale de la ville, en particulier pour l'accès des citadins à l'espace central, poserait également problème à cause de la fermeture de l'Avenue *Mariscal Sucre*, voie la plus empruntée de la ville[21], suite à la chute de deux ponts dans le secteur des tunnels. Cette fermeture impliquerait le report des flux sur l'Avenue *Pichincha* (via *La Marín*), seul autre itinéraire possible permettant de traverser le centre historique. Néanmoins, cet itinéraire est déjà en temps habituel complètement saturé, en particulier pendant les heures de pointe.

Generally, north/south urban connections, of which the importance is known with regard to the longitudinal configuration of the city, in particular for the access to the central area by the city-dwellers, would also be a problem because of the closure of the Avenue Mariscal Sucre*, the most traffic loaded road of the city[21], following the collapse of two bridges near the tunnels. This closure would involve the rerouting of the flow to Avenue* Pichincha *(via* La Marín*), the only other possible road that allows crossing of the historical centre. Nevertheless, this road is already completely saturated in normal times, in particular during the rush hours.*

C'est dans la partie Nord de la ville, qui s'étale depuis le centre historique jusqu'à l'aéroport, que se trouve l'essentiel des équipements routiers. La concentration d'ouvrages routiers semble aller de pair avec la concentration de fonctions urbaines. Or, si beaucoup d'infra-

Most of the traffic facilities are located in the north part of the city, which extends from the historical centre to the airport. This concentration seems to be in parallel with the concentration of the urban functions. Yet, if many traffic facilities inside central areas are dete-

19 Les trajets en transport en commun représentent entre 70 et 80% du total des déplacements quotidiens motorisés dans le district.

20 On observe les mêmes volumes dans le sens inverse, de Quito vers la vallée. / One notices the same volumes in the opposite direction, i.e. from Quito to the valley.

21 70 000 véhicules par jour / *70,000 vehicles per day.*

structures permettant de distribuer les flux à l'intérieur des espaces centraux sont détériorées, c'est l'accessibilité entière de ces centres qui risque d'être remise en question.

riorated, it is the whole accessibility of these central areas that would be in question.

CONCLUSION

Les scénarios présentés sont inévitablement sujets à caution. Ils permettent malgré tout de pressentir les graves perturbations de la mobilité dans le DMQ en cas de séisme très sévère, compte tenu de la perte d'opérationnalité des axes enjeux attribuable à l'effondrement des ponts les plus vulnérables. Dans une perspective d'optimisation de la planification urbaine préventive et d'aide à la décision pour affronter les crises, ce genre d'études est très utile pour les pouvoirs publics dans la mesure où il constitue un outil de réflexion et d'orientation ciblée sur un nombre relativement restreint d'infrastructures à renforcer en premier lieu. D'autre part, cette méthode focalisée sur les enjeux permet de ne pas procéder à une analyse de vulnérabilité de l'ensemble des ouvrages de la ville, difficilement réalisable compte tenu des moyens et du temps nécessaires. Une perspective d'amélioration de cette étude serait d'intégrer les autres incidences des séismes telles que les dégâts associés aux failles ou à la chute de matériaux sur la chaussée, ce qui permettrait de déboucher sur des scénarios encore plus plausibles.

CONCLUSION

The scenarios presented are inevitably subject to caution. They allow nevertheless to imagine the problematic disruptions of transportation in MDQ in case of a very severe earthquake, taking into account the loss of the serviceability of critical roads caused by the collapse of the most vulnerable bridges and overpasses. This kind of study targeted at a relatively limited number of infrastructures is very useful for the public authorities because it allows the optimisation of preventive urban planning and decision making to face crises.

Moreover, this method focused on critical elements to be reinforced in the first place does not require analysis of vulnerability of all structures of the city, which is difficult to carry out because of necessary means and time. Improving this study would be achieved through the integration of other seismic effects such as damage associated with faults or to the material fall on the road surface, which would provide ever more plausible scenarios.

Références bibliographiques

ALARCÓN F., VALVERDE J., FERNÁNDEZ J., YÉPEZ F. (2001) – Modelación de la respuesta dinámica de los perfiles representativos de suelo de la zonificación de Quito". – XIV Jornadas Nacionales de Ingeniería Estructural, Cuenca, Juin, 12 p.

ATC (1991) – Seismic Vulnerability and Impact of Disruption of Lifelines in the Conterminous United States. – Applied Technology Council - 25, Federal Emergency Management Agency (FEMA), Redwood City, CA, 439 p.

ATIAGA G., DEMORAES F. (2002) – Vulnerabilidad estructural de los puentes del Distrito Metropolitano de Quito frente al peligro sísmico, Aplicación y adaptación de la metodología HAZUS®99 al contexto ecuatoriano, Presentación de la metodología, resultados y mapas. – Rapport d'expertise, IRD/MDMQ, 150 p.

Colegio de Ingenieros Civiles de Pichincha (2000) – Código Ecuatoriano de la Construcción, novena edición. – *Revista SIGMA*, Edición especial, 25 p.

CHATELAIN J.L. *et al.* (1994) – Les scénarios sismiques comme outils d'aide à la décision pour la réduction des risques : projet pilote à Quito, Equateur. – in *Revue de Géographie Alpine*, n° 4, p. 131-150.

CHAVEZ VELAZCO G. (2004) – Adaptation à une ville moyenne d'une méthodologie d'évaluation de la vulnérabilité au risque sismique. Le cas de la ville d'Ensenada (Basse Californie Mexique). – 200 p + annexes.

D'ERCOLE R., METZGER P. (2002) – Los lugares esenciales del Distrito Metropolitano de Quito. –Colección Quito Metropolitano, MDMQ-IRD, Quito, Equateur, 226 p.

D'ERCOLE R., METZGER P. (2004) – Vulnerabilidades del Distrito Metropolitano de Quito. – Colección Quito Metropolitano, MDMQ-IRD, Quito, Equateur, 512 p.

DEMORAES F. (2004) – Mobilité, enjeux et risques dans le District Métropolitain de Quito,. –Thèse de Doctorat de Géographie, préparée au Laboratoire EDYTEM (Université de Savoie) en partenariat avec l'UR 029 « Environnement Urbain » (IRD) et la Mairie de Quito, juillet 2004 - Chambéry, 587 p.

Escuela Politécnica Nacional - GeoHazards International – MDMQ – ORSTOM – OYO Corporation (1995) – Proyecto para manejo del riesgo sísmico de Quito. – Síntesis, 45 p.

LUTOFF C. (2000) – Le système urbain niçois face à un séisme. Analyse des enjeux et des dysfonctionnements potentiels. – Thèse de Doctorat en Géographie, Université de Savoie, 361 p.

YEPEZ F. (2001) – Últimos avances en la evaluación del riesgo sísmico de Quito y futuros proyectos de mitigación. – Memorias del seminario "Gestión de riesgos y prevención de desastres", FLACSO, COOPI, p. 16-28.

Site Internet consulté

http://www.fema.gov/hazus/download.htm (chapitre 7), Direct Physical Damage to Transportation Systems.