

Evaluation quantitative du risque "mouvement de terrain" à l'échelle urbaine = Quantitative assessment of ground-movement-related risks at city's scale

Pierre Thierry, Florence Rivet, Emilie Vanoudheusden

► **To cite this version:**

Pierre Thierry, Florence Rivet, Emilie Vanoudheusden. Evaluation quantitative du risque "mouvement de terrain" à l'échelle urbaine = Quantitative assessment of ground-movement-related risks at city's scale. Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'Ingénieur JNKG2010, Jul 2010, Grenoble, France. 8 p. hal-00524302

HAL Id: hal-00524302

<https://hal-brgm.archives-ouvertes.fr/hal-00524302>

Submitted on 7 Oct 2010

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.

EVALUATION QUANTITATIVE DU RISQUE « MOUVEMENTS DE TERRAIN » A L'ECHELLE URBAINE

QUANTITATIVE ASSESSMENT OF GROUND-MOVEMENT-RELATED RISKS AT CITY'S SCALE

Pierre THIERRY ¹, Florence RIVET ², Emilie VANOUDEUSDEN ¹

1 BRGM, Orléans, France

2 BRGM Provence Alpes Côte-d'Azur

RÉSUMÉ – Le développement méthodologique présenté ici vise à permettre le zonage et la quantification de l'impact financier global des risques liés aux mouvements de terrains (glissements, chutes de blocs, effondrements et coulées boueuses) à l'échelle d'une ville, sur une période de temps donnée. La faisabilité de cette méthode a été établie par une application sur des quartiers de la ville de Marseille (France).

ABSTRACT – The methodological development presented in this paper aims to provide an approach for zoning on a city-wide scale and quantifying the overall financial impact of natural risks associated with ground or mass movements (landslide, rockfall, collapse and mudflow), over a given time span. This method's feasibility was demonstrated through an application to areas of the city of Marseille (France).

1. Introduction

En milieu urbain, la gestion des risques liés aux mouvements de terrain est essentiellement abordée au travers de cartes d'aléas voire, plus généralement, de cartes de susceptibilité à l'occurrence des phénomènes (Thierry et al. 2009). Ces cartes permettent d'élaborer des cartographies réglementaires : plans de prévention des risques (PPR) et réglementation des contraintes posées aux constructions. Cependant, les responsables politiques souhaiteraient disposer d'une vision prospective et globalisée de la dimension financière réelle de cette problématique, afin de pouvoir, d'une part adapter l'effort de réponse au niveau réel des impacts et d'autre part, de hiérarchiser les secteurs en termes de menace afin de déterminer les priorités d'action. Cet objectif passe par une réelle analyse des risques confrontant aléas et vulnérabilité des enjeux.

De telles analyses de risques à l'échelle urbaine sont maintenant régulièrement menées en ce qui concerne le risque sismique (UN/IDNDR 2000) mais restent toutefois rarement abordées pour les autres aléas dont, plus particulièrement, les mouvements de terrain. Hors risque sismique, on peut cependant citer quelques études en milieu urbain, comme celles réalisées sur l'agglomération de Cairn en Australie (Michael-Leiba et al. 2003, glissements de terrain et coulées de boue) ou sur la ville de Cologne (Grünthal et al. 2006, tempêtes et inondations).

C'est dans cette optique, qu'à la demande du Ministère en charge de l'Environnement (MEEDM), une méthodologie d'évaluation et de cartographie du coût des dommages provoqués par les mouvements de terrain à l'échelle d'une

agglomération a été élaborée et testée sur trois arrondissements de Marseille (France). Cette étude de faisabilité méthodologique a été réalisée sous le contrôle d'un comité de pilotage composé de représentants du MEEDM, de la Mairie et des services déconcentrés de l'État en charge de l'aménagement (DDE, DRIRE, DIREN).

L'objectif fixé vise à proposer une méthode permettant d'évaluer le coût des dommages provoqués, à l'échelle d'une ville, par le cumul des phénomènes instables sur une période de référence de 100 ans. Les phénomènes à prendre en compte sont les glissements, les chutes de blocs et écroulements rocheux, les affaissements et effondrements, les coulées boueuses. Cinq catégories d'enjeux sont considérées : la population, les bâtiments, la voirie, les espaces naturels et le mobilier urbain (ici, les véhicules). La méthode développée a été appliquée à 3 arrondissements de la ville de Marseille. Une attention particulière a été portée pour quantifier le niveau d'incertitude. Les résultats sont détaillés dans un rapport public (Thierry et al. 2008).

2. Principes méthodologiques

Les dix grandes étapes de la méthode sont présentées dans la Figure 1. Ces étapes sont détaillées dans les chapitres suivants.

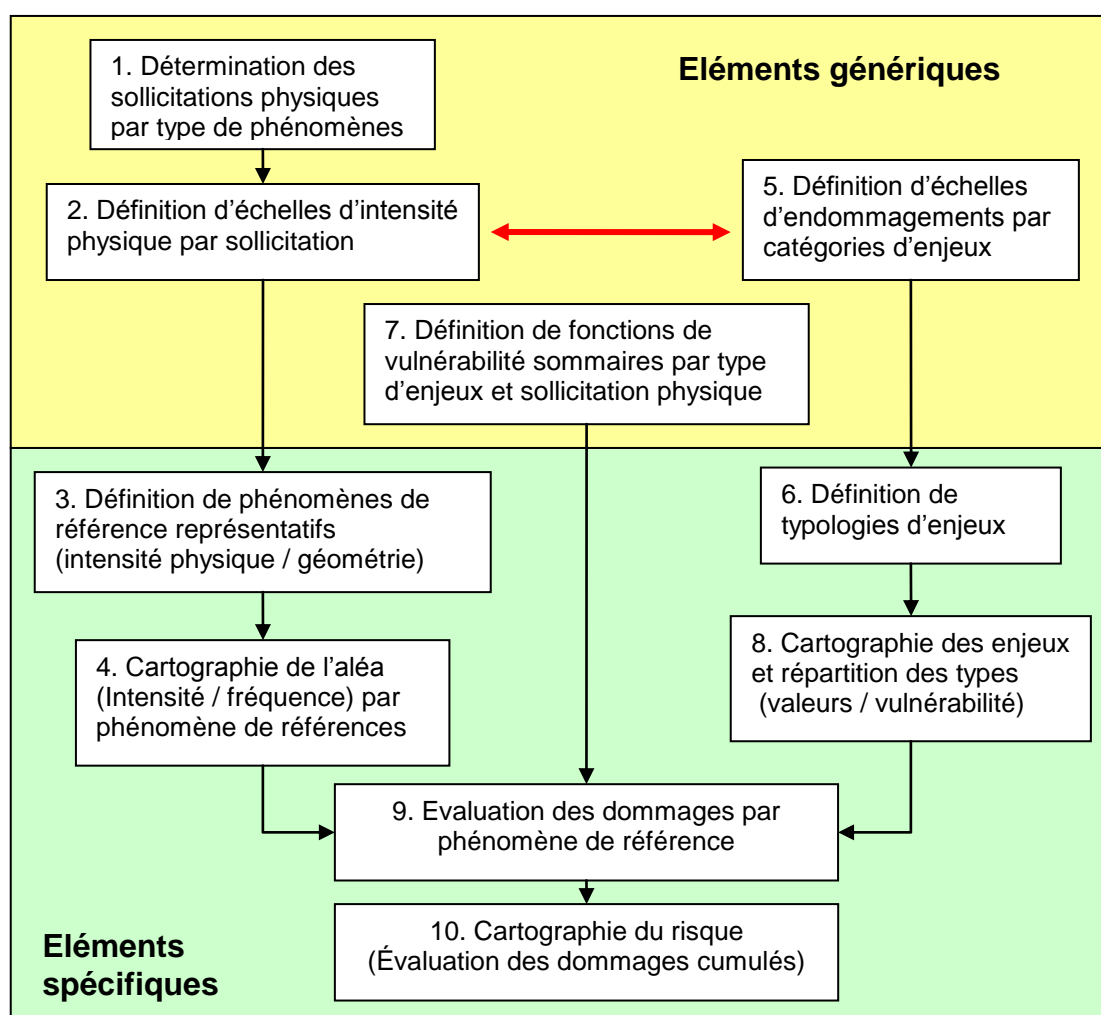


Figure 1 : Schéma du déroulement global de la méthode

La mise en place de la méthode a montré la nécessité d'établir différentes listes ou échelles, à caractère générique, c'est-à-dire ne dépendant pas des spécificités de la zone d'étude. Ces éléments génériques qui concernent tant les phénomènes que les enjeux peuvent donc être repris sur d'éventuels autres sites d'études.

3. Présentation du secteur d'étude

Au sein de la ville de Marseille, une zone spécifique a été sélectionnée, compte-tenu du nombre élevé de mouvements de terrain recensés, de leur diversité, et de la variabilité des types urbains présents. Cette zone s'étend sur les 10, 11 et 12^{èmes} arrondissements. Elle compte près de 165 000 habitants sur une surface d'environ 33 km². L'urbanisme y est très varié : grands ensembles, habitat urbain ancien, pavillons récents...On y recense 71 000 bâtiments, 436 km cumulés de réseau routier ainsi que des surfaces naturelles protégées.

Comme l'urbanisme, la géologie du secteur est variée. Du plus ancien au plus récent, on rencontre :

Les formations du Trias : affleurant au nord de la zone, il s'agit de calcaires dolomités ou compacts avec des niveaux de marnes plus ou moins fréquents selon les niveaux de stratification. Les formations du Keuper, plus meubles, sont formées d'argiles et marnes bariolées. Au contact des accidents importants, se localisent des lentilles de gypse, fortement plissées, ayant fait l'objet d'exploitations anciennes.

Les formations du Jurassique et du Crétacé apparaissent sur la zone d'étude sous la forme de formations indurées à dominante calcaires ou marno-calcaires. Elles forment le relief du Massif des Calanques (compris dans la zone d'étude). Les calcaires sont ou ont été exploités pour l'extraction des pierres de construction.

Les formations affleurantes de l'Oligocène sont très hétérogènes, composées d'argile, de gypse et de poudingues. Certains niveaux ont été exploités pour la fabrication de briques et de tuiles. Les dépôts lacustres, travertins et tufs à plantes, sont très fortement cimentés et forment des plateaux qui couronnent les buttes.

Les formations du Quaternaire : ponctuellement des zones d'éboulis affleurent sur la zone. L'Huveaune qui traverse la zone d'étude d'est en ouest a engendré le dépôt d'alluvions récentes et anciennes, composées de cailloutis, sables, limons, graviers et galets. Des dépôts anthropiques apparaissent également sur la zone.

4. Cartographie de l'aléa

Pour permettre d'évaluer et de quantifier les impacts, il est nécessaire de prendre en compte les dimensions et la nature des agressions physiques.

4.1. Etape 1 - détermination des sollicitations physiques

L'intensité d'un phénomène correspond au pouvoir destructeur intrinsèque de celui-ci, exprimé indépendamment de la nature des éléments exposés. Pour analyser ce pouvoir destructeur, il convient de décomposer le phénomène entre les différentes sollicitations physiques (ou types d'agression) qu'il est susceptible de provoquer. Des approches de ce type ont déjà été proposées dans différentes études (Léone 1996, OFAT et al. 1997, GSC et al. 2002).

Pour simplifier le problème, les différentes sollicitations possibles ont été regroupées suivant 6 types généraux (Tableau 1 - Colonne 1). Ces 6 types permettent de quantifier les différents impacts physiques pour l'ensemble des phénomènes « mouvements de terrain ». Chacune de ces sollicitations peut être exprimée suivant une ou plusieurs grandeurs physiques, appelées « effets physiques » (Tableau 1 - Colonne 2). Le Tableau 2 présente la décomposition retenue pour chacun des phénomènes étudiés.

Tableau 1 : Sollicitations et effets physiques associés

Sollicitation	Paramètres cinématiques et géométriques (effets physiques)
Déplacement vertical	Vitesse du mouvement (V) Amplitude du mouvement / distance de déplacement (A) Importance du champ de déformation (Cd)
Déplacement horizontal	Vitesse du mouvement (V) Amplitude du mouvement / distance de déplacement (A) Importance du champ de déformation (Cd)
Poussées latérale et frontale	Hauteur des matériaux en poussée (Hp)
Impact	Energie cinétique (Ec)
Accumulation	Hauteur des matériaux accumulés (Ha)
Ablation / affouillement	Profondeur de l'ablation (Pa)

Tableau 2 : Relations phénomène - sollicitations - effets physiques

Phénomène	Sollicitation (Effets physiques)
Glissement	Déplacement horizontal (V, A, Cd)
	Déplacement vertical (V, A, Cd)
	Poussée latérale et frontale (Hp)
	Accumulation / enfouissement (Ha)
Coulées de boue	Ablation (Pa) ¹
	Accumulation / enfouissement (Ha) ²
	Impact (Ec)
	Poussée latérale et frontale (Hp)
Chute de blocs / écoulement rocheux	Déplacement vertical (V, A, Cd) ¹
	Impact (Ec)
	Accumulation (Ha) ²
Affaissement / Effondrement	Déplacement vertical (V, A, Cd)

Cette sollicitation existe ¹ dans la zone de départ du phénomène - ² dans la zone de réception

4.2. Etape 2 - échelles d'intensité

Une échelle d'intensité physique comprenant 4 niveaux (faible, moyen, fort, très fort) est établie pour chaque effet physique. Chacun des niveaux correspond à un intervalle de valeurs numériques établi à partir de données disponibles dans la littérature (Léone 1996, OFAT et al. 1997, GSC et al. 2002) et adaptées d'après notre expérience. Le Tableau 3 présente les échelles d'intensité physique des sollicitations « accumulation » et « impact ». Pour les sollicitations décrites au moyen de plusieurs paramètres (déplacement horizontal et vertical), les échelles d'intensité sont synthétiques, c'est-à-dire qu'elles tiennent compte simultanément de l'ensemble des effets physiques les décrivant.

L'extension latérale des phénomènes et la profondeur de la surface de rupture, paramètres importants lors de la confrontation aux enjeux, font aussi l'objet d'échelles d'intensité.

Tableau 3 : Valeurs numériques des classes d'intensité des sollicitations
Accumulation et Impact

Sollicitation / Effet physique		Accumulation / Hauteur accumulée	Impact / Energie cinétique
Intensité	Faible	< 5 cm	< 0,1 kJ
	Moyenne	5 à 50 cm	0,1 à 1 kJ
	Forte	0,5 à 2 m	1 à 50 kJ
	Très forte	> 2 m	> 50 kJ

4.3. Etape 3 – définition des phénomènes de référence

La réalisation d'une carte d'aléa demande d'apprécier la période de retour (fréquence) pour une intensité donnée. Pour approcher ces 2 composantes, il est intéressant de déterminer *des phénomènes de référence*, définis par des caractéristiques moyennes et représentatifs des différentes situations susceptibles de se produire. Ces phénomènes sont spécifiques à chaque site étudié et déterminés à partir de la connaissance du terrain et de l'exploitation des archives.

Chaque phénomène est décrit en termes de dimensions et de caractéristiques moyennes qui permettent, d'une part, de définir une surface moyenne impactée et, d'autre part, de déterminer l'intensité physique correspondant à chacune des différentes sollicitations ; ceci au moyen des échelles d'intensité génériques.

Sur la zone d'étude test, nous avons retenu 10 phénomènes représentatifs. A titre d'exemple, nous avons identifié un « affaissement de grande ampleur » : amplitude verticale 3 m, extension longitudinale 50 m, extension latérale 50 m, vitesse de déplacement 2 cm/an, et champ de déformation fort. Ces caractéristiques permettent de déterminer une intensité physique de niveau « fort » pour la sollicitation « mouvement vertical » provoquée par ce type de phénomène.

4.3. Etape 4 – cartographie de l'aléa par phénomène de référence

En premier lieu, il s'agit de réaliser une cartographie « classique » de susceptibilité des terrains aux phénomènes retenus.

Il s'agit, ensuite, d'estimer, pour chaque phénomène de référence et pour chaque contexte géologique identifiés, le nombre d'évènements attendus sur la période de référence. Cette estimation est fondée sur une extrapolation à partir des informations disponibles dans les archives de la ville, d'observations de terrain et d'enquêtes auprès des riverains. On dispose donc, à ce stade, de la caractérisation d'un phénomène en termes d'intensité et de dimensions, ainsi que du nombre d'évènement attendus pour la période de référence. Pour exprimer l'aléa, sans pouvoir préciser la localisation exacte des phénomènes attendus, on multiplie, pour chaque zone, le nombre d'évènements attendus par la surface impactée. Le rapport avec la surface totale de la zone donne alors le niveau d'aléa correspondant. Il est clair, cependant, qu'une telle approche rend délicate l'identification des phénomènes exceptionnels de très faible récurrence.

5. Analyse et cartographie des enjeux

Quatre catégories d'enjeux ont été prises en compte : la population, le patrimoine bâti et foncier, la voirie et le mobilier urbain (véhicules).

5.1. Etape 5 - échelles d'endommagement

Pour permettre d'évaluer les dommages de manière cohérente par rapport aux différentes sollicitations physiques, une échelle d'endommagement en 5 niveaux est définie, pour chacune des grandes catégories d'enjeux. Ces échelles sont traduites en termes d'impacts sur les valeurs humaines, fonctionnelles et économiques.

5.2. Etape 6 – définition de typologies

Pour chacune des grandes catégories d'enjeux, on définit un certain nombre de « type », présentant des caractéristiques moyennes homogènes en termes, à la fois, de vulnérabilité et de valeurs. La typologie générale proposée dans l'étude reste susceptible d'adaptations dans des contextes particuliers. A titre d'exemple, pour la voirie, nous avons retenu 2 types différents : routes de viabilité médiocre (1 voie à deux voies étroites) et routes de bonne à très bonne viabilité (2 voies larges à 4 voies). Dans ce cas, la principale différence réside uniquement dans la valeur (économique ou fonctionnelle).

5.3. Etape 7 - fonctions de vulnérabilité

La vulnérabilité traduit la sensibilité ou la fragilité d'un enjeu vis-à-vis d'un phénomène. Pour chacun des types d'enjeux définis, on précise les caractéristiques physiques afin d'en déterminer la vulnérabilité. Les niveaux d'endommagement correspondant aux 4 valeurs d'intensité ont été établis de manière empirique pour chacune des sollicitations en s'appuyant sur les données issues de la littérature (Husbergern et Carré 1987, Léone 1996, LESSLOS committee 1997, UNIGE 2003, Zihri 2004, Kaynia et al. 2008).

Soulignons, que cette question de l'analyse de la vulnérabilité a été traitée de manière très sommaire dans notre étude. La problématique de l'évaluation de la vulnérabilité des enjeux vis-à-vis des mouvements de terrain constitue un point très important qui mérite de faire l'objet d'études et de recherches plus poussées.

5.4. Etape 8 - cartographie des enjeux et analyse de la valeur

A partir des données disponibles (données de recensement, SIG des services techniques de la ville, photographies aériennes, contrôles de terrain...), une *carte de recensement* est établie pour chaque catégorie d'enjeux.

Pour permettre les comparaisons entre secteurs géographiques, la valeur des éléments exposés est exprimée en termes de valeur économique. De cette manière, un cumul pour tous les phénomènes et tous les types d'enjeux est réalisable.

On détermine ainsi, dans le cas précis de notre zone d'étude, le prix au m² à la vente du bâtiment, la valeur du mètre linéaire de voirie... La question se pose donc de la valeur de la vie humaine. Devant cette question difficile, et compte-tenu du caractère exceptionnel des dommages en termes de vies humaines (les coulées de boues et les chutes de blocs constituent les principaux phénomènes concernés), seules des cartes de localisation des secteurs où les vies humaines étaient menacées ont été produites et les coûts estimés des pertes en vies humaines n'ont pas été intégrés dans les évaluations de coûts cumulés.

6. Cartographie du risque

6.1. Etape 9 – évaluation des dommages par phénomène de référence

A l'issue des phases précédentes, on dispose :

- pour chacun des phénomènes de référence : d'une carte de zonage de l'aléa exprimé en pourcentage de surface potentiellement affectée dans chaque zone sur la période de référence considérée,
- pour chacune des catégories d'enjeux : d'une carte d'enjeu, exprimée en termes de nombre d'éléments exposés de chaque type, et de leurs valeurs et de fonctions de vulnérabilité, spécifiques à chaque type d'enjeux.

Le croisement systématique de ces différentes données permet ensuite d'évaluer le niveau de dommages, par catégorie d'enjeu et par phénomène de référence. Pour chacune des cartes, le niveau de dommages est déterminé en choisissant le niveau maximal d'endommagement obtenu à partir des différentes fonctions de vulnérabilité associées à chacune des sollicitations du phénomène de référence pris en compte.

6.2. Etape 10 – cumul des dommages attendus

Il s'agit ensuite de compiler l'ensemble des cartes de dommages pour obtenir une carte unique présentant, par secteur, le cumul des dommages attendus.

7. Résultats

7.1. Principaux résultats sur la zone d'étude

L'ordre de grandeur du coût des dommages sur les 100 prochaines années, tel qu'évalué selon la méthode proposée, avoisine les 310 millions d'euros (hors coûts associés aux dommages aux personnes). Le coût moyen des dommages, par habitant et par an, varie de 14 à 34 euros selon les arrondissements.

Plus des trois quarts de la somme totale seraient imputables aux seuls phénomènes de fluage.. A l'exception de ces fluages, des coulées boueuses et des grands glissements, qui constituent les 3 phénomènes les plus significatifs en termes de coûts, tous les autres phénomènes correspondent aux mêmes ordres de grandeur, variant entre 0,3 et 1 million d'euros sur les 100 prochaines années.

7.2. Evaluation de l'incertitude

Le niveau d'incertitude constitue un critère déterminant dans l'appréciation des résultats obtenus. Une réflexion spécifique a été menée pour son évaluation. Sept paramètres principaux ont été reconnus comme susceptibles d'induire des incertitudes : 4 concernant l'aléa (dimensions géométriques moyennes, intensité moyenne, fréquence, limites cartographiques), et 3 les enjeux (taux d'endommagement retenu, coût unitaire, répartition cartographique).

Une analyse de sensibilité de ces paramètres donne un facteur d'incertitude moyen de l'ordre de 3,5. Ce qui signifie que la valeur finale de dommages peut se révéler 3,5 fois plus grande ou 3,5 fois plus petite. Le paramètre identifié comme étant le plus sensible est l'évaluation de la fréquence des événements.

8. Conclusion

Le développement méthodologique a permis de mettre en évidence la faisabilité d'une réelle analyse des risques liés aux mouvements de terrain sur une agglomération.

Il a montré la possibilité de donner une dimension financière aux problèmes en proposant une évaluation du coût global des différents phénomènes. Cette information peut aider les responsables à identifier les priorités entre les phénomènes, et à déterminer le niveau d'effort à réaliser pour diminuer le risque.

Par ailleurs, ces travaux ont mis en évidence la nécessité de recherches complémentaires pour la caractérisation mécanique des mouvements de terrain ainsi que pour l'évaluation, vis-à-vis d'eux, de la vulnérabilité des infrastructures.

9. Remerciements

Cette étude a bénéficié d'un financement du Ministère français en charge de l'aménagement et de la gestion des risques naturels, et du soutien de la Direction Générale de la Prévention et de la Protection (DGPP) de la Mairie de Marseille.

10. Références bibliographiques

- Grünthal G., Thieken A.H., Schwartz J., Radtke K.S., Smolka A. and Merz B. (2006) Comparative risk assessments for the city of Cologne – Storms, Floods, Earthquakes, *Natural Hazards* 38: 21-44
- GSC, Météo France, Cemagref (2002) Détermination d'une échelle d'intensité en 5 niveaux par type de phénomènes naturels. Phase 6. Validation des échelles + Annexes. MEDD/DPPR/SDPRM.
- Husbergern J.G., Carrée G.J. (1987) A method for estimating damage to buildings in subsiding areas. *European conference on soil mechanics and foundation engineering*. (2), 699-702.
- Kaynia A.M., Papatoma-Köhle M., Neuhäser B., Ratzinger K., Wenzel H. and Medina-Cetina Z. (2008). Probabilistic assessment of vulnerability to landslide: application to the village of Lichtenstein, Baden-Württemberg, Germany, *Engineering Geology* vol. 101, no. 1-2, pp.33-48.
- Léone F. (1996) Concept de vulnérabilité appliqué à l'évaluation des risques générés par les phénomènes de mouvements de terrain. Rapport de thèse. Université Joseph Fourier Grenoble 1.
- LESSLOSS Committee (1997) Vulnerability assessment for landslides – Phase II. Rapport, Deliverable 93, 166 pages.
- Michael-Leiba M., Baynes F., Scott G. and Granger K. (2003) Regional landslide risk to the Cairns community, *Natural Hazards* 30 : 233-249
- OFAT Office fédéral de l'aménagement du territoire, OFEE Office fédéral de l'économie des eaux OFEFP Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage (1997) Prise en compte des dangers dus aux mouvements de terrain dans le cadre des activités de l'aménagement du territoire. Recommandations, série Dangers naturels.
- Thierry P., Prunier-Lepartementier A.M., Lembezat C., Vanoudheusden E., Vernoux J.F. (2009) 3D geological modelling a turban scale and mapping of ground movement susceptibility from gypsum dissolution: the Paris example (France), *Engineering Geology* (105), 51-64.
- Thierry P., Rivet F. et Vanoudheusden E. (2008) Scénarios risque mouvements de terrain (y compris effondrement de cavités) dans les agglomérations urbaines : développement méthodologique – Rapport final Rapport BRGM RP-56243-FR, 78 pp., 16 Illustrations, 24 tableaux, 1 annexe
- UN/IDNDR (2000) RADIUS: Risk Assessment Tools for Diagnosis of Urban Area against Seismic Disasters, Geneva. 46 p.
- UNIGE - Draft document (2003) I Level methodology for the vulnerability assessment of current buildings and guidelines for the implementation-RISK-UE WP4. Vulnerability assessment of current buildings. 28 p.
- Zihri G. (2004) Risques liés aux ouvrages souterrains : constitution d'une échelle de dommages. Rapport de thèse. Institut national Polytechnique de Lorraine – Ecole des mines de Nancy.