

Zeitschrift:	Mémoires de la Société Vaudoise des Sciences Naturelles
Herausgeber:	Société Vaudoise des Sciences Naturelles
Band:	25 (2013)
Artikel:	Estimation quantitative du risques (QRA) pour les bâtiments lié aux éboulements roucheux : progrès et défis
Autor:	Corominas, Jordi / Mavrouli, Olga-Christina
DOI:	https://doi.org/10.5169/seals-389835

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 05.01.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

19. Estimation quantitative du risque (QRA) pour les bâtiments lié aux éboulements rocheux: progrès et défis

par

Jordi COROMINAS¹ & Olga-Christina MAVROULI¹

Résumé.—COROMINAS J. & MAVROULI O.-C., 2013. Estimation quantitative du risque (QRA) pour les bâtiments lié aux éboulements rocheux: progrès et défis. *Mémoire de la Société vaudoise des Sciences naturelles* 25: 229-242.

Un exemple d'étude quantitative du risque lié aux chutes de blocs et éboulements rocheux dans une région urbanisée est présenté dans cet article. La méthodologie a pour but de calculer le risque pour les bâtiments situés au pied d'une zone propice aux éboulements, qui pourraient être touchés par des blocs de roche, ainsi que le risque global par agrégation des résultats. Cette méthodologie analytique peut être appliquée aussi bien à l'échelle locale qu'à l'échelle de l'objet. La fréquence des événements de chutes de blocs et d'éboulements rocheux a été obtenue à partir de documents historiques et de dendrochronologie. La probabilité qu'un bloc atteigne la zone bâtie est obtenue par modélisation trajectographique. Une des questions clés est la prise en compte de la fragmentation. Les masses rocheuses sont susceptibles de se briser lors du premier impact sur le sol, créant ainsi plusieurs blocs individuels qui vont suivre des trajectoires différentes. Différents niveaux d'énergie d'impact peuvent conduire à quatre états potentiels de dommages: (1) dommages non-structuraux, (2) dommages partiels aux structures, (3) effondrement partiel, et (4) effondrement grave ou total. Pour chaque bâtiment, le risque est exprimé en terme de probabilité de perte annuelle. Il est la somme, pour toutes les tailles de blocs, des produits de la fréquence de rupture et de la probabilité conditionnelle d'un bloc atteignant le bâtiment avec une énergie cinétique suffisante pour provoquer un état spécifique de dommages, ainsi que de sa vulnérabilité associée. Les détails de la méthodologie proposée sont présentés ici à travers un exemple d'application dans la Principauté d'Andorre.

Mots clés: Chutes de blocs, évaluation quantitative des risques, Pyrénées.

Abstract.—COROMINAS J. & MAVROULI O.-C., 2013. Quantitative risk assessment for buildings due to rockfalls: some achievements and challenges. *Mémoire de la Société vaudoise des Sciences naturelles* 25: 229-242.

An application example of Quantitative Risk Assessment due to rockfalls for a developed area is presented in this paper. The methodology aims at the calculation of the risk for buildings which are situated at the bottom of a rockfall prone slope and may be impacted by rock blocks and of the global risk by aggregation of the results. It can be applied at either site-specific or local scales and it is analytical.

¹Department of Geotechnical Engineering and Geosciences, Technical University of Catalonia (UPC), Barcelona, Spain; tél.: +34 93 4016861.

E-mail: jordi.corominas@upc.edu

Frequency of the rockfall events has been obtained from historical records and dendrochronology. The probability of a rockfall reaching the developed area is obtained by trajectographic modelling. A key issue is the consideration of fragmental rockfalls. Falling rock masses are expected to break apart after first impacts on the ground, leading to individual blocks that will follow independent paths. Different impact energy levels may lead to four potential damage states: (1) non-structural damage, (2) local structural damage, (3) partial collapse, and (4) extensive to total collapse. For every building, the risk is expressed in terms of the annual probability of loss and it is the sum, for all rockfall magnitudes, of the products of the rockfall frequency with the conditional probability of a rock block reaching the building with a certain kinetic energy sufficient to cause a specific state of damage and its associated vulnerability. The details of the proposed methodology are presented here through an application example in the Principality of Andorra.

Keywords: Rock falls, Quantitative Risk Assessment, Pyrenees.

INTRODUCTION

L'estimation quantitative du risque (QRA) devient progressivement une exigence pour les administrations en charge de la gestion des risques de mouvements de terrain. La QRA vise à fournir une évaluation objective des risques standard et reproductible, évitant l'utilisation de termes ambigus et favorisant ainsi la comparaison du niveau de risque entre des lieux différents. La QRA peut fournir des informations sur les pertes potentielles (en euros par an) induites par des dangers naturels, permettant ainsi l'interprétation fondée sur des critères d'acceptabilité du risque. Les résultats de QRA peuvent être utilisés par les autorités administratives pour la planification urbaine et/ou de mesures de protection, ainsi que par les compagnies d'assurance pour l'application de leurs politiques.

Les méthodologies de QRA pour les mouvements de terrain utilisées dans le monde varient selon le type de mécanisme, l'échelle appliquée, et les données de base disponibles. En ce qui concerne le risque de chutes de pierres, de nombreuses contributions importantes dans le domaine de la QRA peuvent être citées, notamment HUNGR *et al.* (1999), BELL & GLADE (2004), ROBERDS (2005), COROMINAS *et al.* (2005), AGLIARDI *et al.* (2009), LI *et al.* (2009).

L'objectif de cette article est de présenter une méthodologie pour la quantification du risque pour les bâtiments qui se trouvent au bas d'un versant soumis à des chutes de blocs et éboulements rocheux (COROMINAS & MAVROULI 2010). La méthodologie proposée prend en compte la fragmentation des masses rocheuses et les caractéristiques structurales des bâtiments touchés. Elle est analytique et comprend des sous-procédures permettant un degré de détail variable en fonction des informations disponibles, de l'ampleur du travail et du degré de détail souhaité. Les conditions locales sont prises en compte, y compris le relief topographique et les limites de la zone construite.

Tout d'abord, la méthodologie ainsi que ses sous-procédures sont présentées à travers un exemple d'application dans la Principauté d'Andorre. Pour terminer, une discussion est faite sur ses possibilités et ses limites.

La zone d'étude est un versant situé à côté de la zone urbaine de Santa Coloma, dans la Principauté d'Andorre, dans le centre-est des Pyrénées (figure 1). Elle connaît une activité relativement élevée de chutes de blocs et a été l'objet de plusieurs études de danger d'éboulement au cours des dernières années (p. ex. COPONS 2004, COPONS *et al.* 2005, COROMINAS *et al.* 2005). La roche affleurante est composée de granodiorite intensément

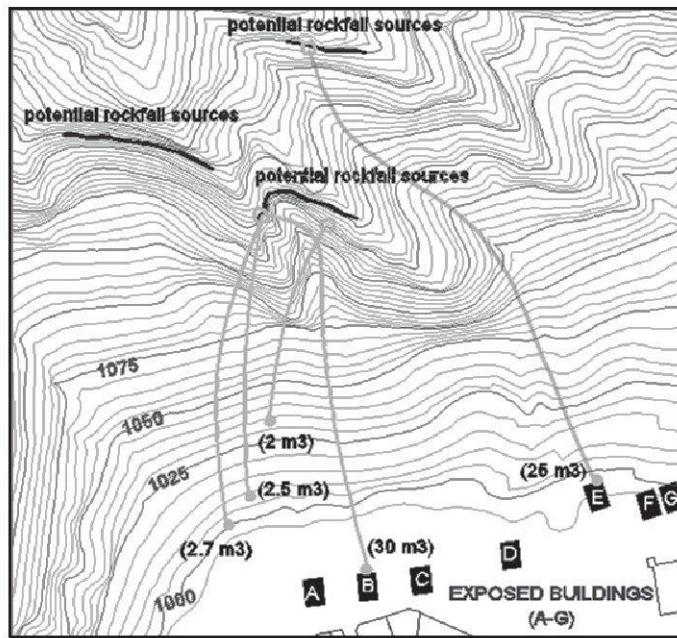


Figure 1.—Vue d'une partie de la zone d'étude de Santa Coloma, Principauté d'Andorre. Les sources potentielles, les trajectoires, les points d'arrêt et de volumes de certains événements éboulements récents sont représentés.

fracturée, façonnée par les glaciers du Pléistocène qui ont formé les pentes abruptes de la vallée suite à leur retrait. L'activité intense de chutes de blocs a produit d'épais dépôts d'éboulis, en grande partie urbanisés au cours des années septante et huitante.

MÉTHODOLOGIE

Procédure générale

Pour la QRA de chutes de blocs menaçant des régions développées, une méthodologie analytique intégrée est proposée ici, pour une application à l'échelle locale. L'équation générale du risque de chutes de blocs et éboulements rocheux est donnée comme suit:

$$R = \lambda(M_i) \cdot P(X, M_i) \cdot P(T, X) \cdot V_i \cdot C \quad (\text{Equation 1})$$

Où:

R : risque ou perte attendue en raison des chutes de blocs et éboulements rocheux;

$\lambda(M_i)$: fréquence d'une chute de masse rocheuse de magnitude M_i ;

$P(X, M_i)$: probabilité que la masse atteigne un certain point X de la trajectoire;

$P(T, X)$: probabilité spatio-temporelle de présence de l'élément à risque au point X ;

V_i : vulnérabilité de l'élément à risque à un impact de magnitude i ;

C : valeur de l'élément à risque.

Les termes $\lambda(M_i)$ et $P(X, M_i)$ représentent l'aléa, $P(T, X)$ l'exposition et V_i la vulnérabilité.

L'équation (1) permet le calcul du risque pour un événement de taille unique. Pour obtenir le risque total, toutes les tailles d'éboulements possibles doivent être prises en compte avec leur fréquence respective. Dans le cas où les éléments à risque sont des bâtiments, le potentiel de dommages est donné par la vitesse ou par l'énergie cinétique du bloc plutôt que par sa taille. Si les bâtiments sont placés au point X, l'équation (1) doit être remplacée par l'équation suivante pour obtenir le risque annuel:

$$R_k(P) = \sum_{i=1}^i \sum_{j=1}^j [\lambda(M_i) \cdot P(X_{E_j}, M_i) \cdot V_{ij}] \cdot C \quad (\text{Equation 2})$$

$R_k(P)$: perte annuelle à la propriété en raison des éboulements rocheux attendue (pour le bâtiment k);

$\lambda(M_i)$: fréquence annuelle des éboulements rocheux de magnitude «i»;

$P(X_{E_j}, M_j)$: probabilité que l'éboulement rocheux atteignant le point X où se trouve le bâtiment considéré avec une certaine énergie cinétique. Cette dernière est calculée en fonction de la magnitude (volume) «i» et de la vitesse «j». Les niveaux d'énergie cinétique sont ceux qui conduisent aux états respectifs des dommages (défini dans le tableau 6);

V_{ij} : vulnérabilité du bâtiment considéré pour l'impact d'une masse rocheuse de magnitude «i» et de vitesse «j»;

C : valeur de l'immeuble.

La probabilité spatio-temporelle de l'élément à risque $P(T, X_{E_j})$ pour des éléments statiques, tels que des bâtiments est de 1. Par conséquent, elle n'est pas considérée dans l'équation 2.

Fréquence des éboulements rocheux $\lambda(M_i)$

La fréquence des chutes de blocs peut être calculée au moyen d'analyses statistiques de cadastre des événements (p. ex. HUNGR *et al.* 1999, DUSSAUGE-PEISSER *et al.* 2002, GUZZETTI *et al.* 2003). Malheureusement, la disponibilité de ces documents est limitée à quelques services d'entretien de routes ou de chemins de fer, ainsi qu'à des services de parcs nationaux. Les documents historiques sont souvent trop courts en comparaison de l'échelle de temps à considérer pour des événements de chutes de blocs et des éboulements rocheux importants. Dans le cas de Santa Coloma, la base de données disponible couvre une période d'environ 50 ans, mais elle est complète uniquement pour les 15 dernières années, durant lesquels l'administration andorrane a établi un inventaire systématique de tous les événements survenant dans la région. Cet inventaire couvre exclusivement les chutes de blocs d'un volume supérieur à 1m^3 qui ont été signalés par les habitants de la région ou par des relevés annuels effectués en hélicoptère. L'inventaire a été complété par des analyses dendrogéomorphologiques intensives d'arbres endommagés (MOYA *et al.* 2010) qui ont permis l'extension de l'enregistrement aux 40 dernières années. La fréquence moyenne annuelle λ_t pour toutes les tailles chutes de blocs et éboulements est de 0,5 événement par an. Ce chiffre doit être considéré comme une valeur minimale, car l'existence de chute de blocs de petite taille ne produisant pas d'impact sur les arbres ne peut pas être complètement ignorée.

La relation magnitude (volume) - fréquence des événements inventoriés dans l'ensemble du territoire de Santa Coloma, est présentée au tableau 1 et est supposée être la même pour le site étudié. La fréquence annuelle de chutes de blocs et éboulements rocheux pour chaque volume est le produit de λ_i , avec la fréquence relative de chaque classe de volume. Le volume correspond à celui mesuré à la source.

Tableau 1.—Événements de chutes de blocs observés dans la région de Santa Coloma. $\lambda(V_i)$ est la fréquence relative de chaque catégorie de volume et $\lambda(M_i)$ sa fréquence annuelle.

Volume à la source (m^3)	Nombre d'événements	$\lambda(V_i)$	$\lambda(M_i)$
≤ 5	14	0.667	0.333
10	4	0.19	0.095
25	2	0.095	0.048
150	1	0.048	0.024

Cependant, le volume à prendre en compte dans l'analyse trajectographique ne va pas de soi. Un événement peut entraîner le déplacement d'un ou de plusieurs blocs distincts. Il peut aussi commencer par le détachement d'une masse rocheuse plus ou moins cohérente qui, après le premier impact avec le sol, se divise en plusieurs morceaux. Ce dernier cas est celui d'un éboulement qui se caractérise par le mouvement indépendant des fragments de roche individuels après le détachement d'une paroi rocheuse (EVANS & HUNGR 1993). Le mécanisme de fragmentation des éboulements rocheux n'est pas actuellement inclus dans les modèles trajectographiques les plus courants et peut affecter sérieusement la fiabilité et la validité des résultats. Considérer la chute de gros volumes de roche sans tenir compte de la fragmentation après les premiers impacts sur le sol donnera des distances de parcours irréalistes, supérieures à celles auxquelles on pourrait s'attendre. L'effet important du nombre et de la taille moyenne des roches fragmentées sur le danger dû à un événement unique a été développé par JABOYEDOFF *et al.* (2005), qui en ont proposé une évaluation empirique.

Le tableau 2 montre la répartition moyenne des tailles de blocs de plusieurs événements de la région de Santa Coloma, inventoriés au cours de la dernière décennie. Tant le nombre que la taille des blocs augmente avec le volume de la masse rocheuse détachée. L'hypothèse retenue dans la méthodologie présentée ici est que la fréquence des chutes de blocs d'une taille donnée doit être augmentée en y ajoutant la fréquence des blocs de même taille produits par fragmentation de blocs d'événements plus grands et en enlevant ceux que se fracturent en des blocs plus petits.

Tableau 2.—Nombre de blocs fragmentés de chaque classe de taille pour différents volumes de masse rocheuse détachée de la zone source.

Taille des blocs (m^3)	Volume de roche détaché de la zone source (m^3)			
	5	10	25	150
1	1	2	4	12
2.5	1	1	1	8
10	0	0	1	2
30	0	0	0	1

Ainsi, la fréquence des chutes de blocs d'une taille de bloc défini «s» est donnée par l'expression suivante:

$$\lambda(M_s) = \sum_{i=1}^I [\lambda(M_i) \cdot N_s(M_i)] \quad (\text{Equation 3})$$

Où

$\lambda(M_s)$: fréquence de blocs de taille «s»;

$\lambda(M_i)$: fréquence d'éboulements de volume «i»;

$N_s(M_i)$: nombre de blocs de taille «s» pour chaque éboulement de volume «i».

Le tableau 3 montre la fréquence annuelle de chaque catégorie de bloc dans la région de Santa Coloma calculée en utilisant l'équation 3.

Tableau 3.-Fréquence de blocs de différentes tailles dans la région de Santa Coloma calculée à partir de l'équation 3.

Taille du bloc (m^3)	$\lambda(M_s)$
1	1.000
2.5	0.667
10	0.095
30	0.024

Analyse trajectographique $P(X_E, M_s)$

Pour chaque catégorie de volume de bloc, une étude trajectographique tridimensionnelle probabiliste a été réalisée à l'aide du logiciel ROTOMAP 32 afin de définir le pourcentage de trajectoires de chutes de blocs pouvant atteindre chaque bâtiment se trouvant dans la zone de propagation pour un niveau donné d'énergie cinétique. Ces niveaux sont définis par les niveaux de dommages potentiels causés aux bâtiments (MAVROULI & COROMINAS 2010a), à savoir: les dommages non-structuraux, les dommages structuraux partiels, l'effondrement partiel et l'effondrement grave à total. Les seuils de classes d'énergie utilisés pour les classes de dommages sont calculés sur la base de l'analyse de la réponse des structures exposées aux impacts de blocs. De plus ample informations sont données dans la section «Vulnérabilité du bâtiment exposé».

Le modèle ROTOMAP 32 propose différentes trajectoires de chutes de blocs à partir de différentes vitesses initiales, directions respectives et emplacement exact des zones sources. Certaines sources de blocs produisent des trajectoires qui sont plus susceptibles d'affecter certains bâtiments que d'autres, ce qui est pris en compte dans l'analyse. L'éventail potentiel de l'énergie cinétique E des blocs atteignant les bâtiments est également calculé. Les blocs qui atteignent un bâtiment en particulier, sont classés en groupes en fonction de leur énergie, puis la probabilité de chaque groupe est évaluée.

Le modèle a été calibré sur la base de données historiques (COROMINAS & MAVROULI 2010). Les résultats ont été jugés acceptables lorsque les points d'arrêt simulés se

trouvaient proches de ceux des événements réels. Dans le cas de blocs de 30 m³, la vitesse d'impact sur les bâtiments n'étant pas connue, les coefficients de restitution et les angles limites ont été calibrés par des essais successifs visant à reproduire la trajectoire de blocs observés. Toutefois, les vitesses obtenues par la calibration donnent des niveaux d'énergie extrêmement élevés dont la fiabilité devrait être validée par l'analyse de futurs événements.

Après la calibration, l'analyse trajectographique a été effectuée. Étant donné le niveau élevé de détail, le risque dans cet exemple est évalué en utilisant l'équation 2, et la probabilité d'atteindre directement un bâtiment avec une certaine énergie a été obtenue par:

$$P(X_{Ej}, M_s) = \frac{n_E}{n_T} \quad (\text{Equation 4})$$

Où:

n_E : nombre de trajectoires atteignant un bâtiment quelconque avec une certaine énergie;
 n_T : nombre total de trajectoires.

Les valeurs obtenues pour $P(X_{Ej}, M_s)$ sont indiquées dans la figure 4. En outre, la figure 2 présente un exemple de toutes les trajectoires potentielles produites par un bloc de 2,5 m³, les sources associées et les bâtiments potentiellement touchés. Le nombre total de simulations effectuées pour chaque classe de magnitude est de 1500.

Les seuils d'énergie utilisés pour délimiter les différentes ampleurs de dommages ont, pour cet exemple, été obtenus au cours de la sous-procédure décrite à la section section «Vulnérabilité du bâtiment exposé» (tableau 4). Ils sont les suivants: inférieur à 14 kJ pour les dommages non-structuraux, de 14 à 28 kJ pour les dommages structuraux localisés ou partiels, supérieur à 28 kJ pour les effondrements graves à totaux.

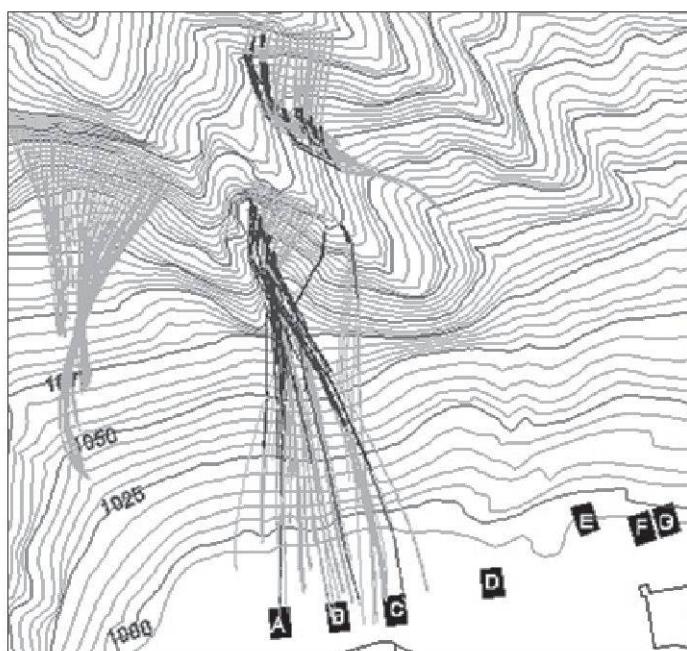


Figure 2.—Trajectoires simulées pour des blocs de 2,5 m³.

Tableau 4.–Conditions conduisant à tous les États et les dommages associés au CRR.

Niveau de dommages	Elément endommagé	E (kJ)	CRR
Pas de dommages	Colonne quelconque	< 14	0
Dommages non-structurels	Mur non-porteur		0.01
Dommages structurels locaux	Colonne centrale	14 - 28	0.2
Effondrement partiel de la structure	Colonne angulaire	14 - 28	0.4
Dommage généralisé	Plusieurs colonnes	> 28	1

Vulnérabilité du bâtiment exposé

Les éléments exposés considérés dans cette étude sont les bâtiments (A à G dans la figure 2) qui sont situés au bas de la pente. Une typologie de structure unique est considérée, à savoir une structure en béton armé de 2 étages.

La vulnérabilité est quantifiée en fonction du coût des réparations éventuelles de l'immeuble, par rapport à sa valeur de reconstruction. Pour l'évaluer, la procédure en étapes pour la réponse des bâtiments en béton armé aux impacts de blocs isolés sur leurs piliers, proposée par MAVROULI & COROMINAS (2010a), est utilisée. C'est une méthode d'analyse qui peut être adaptée aux différentes typologies structurelles, pour l'évaluation des dommages physiques en cas de perte d'éléments structurels et non-structurels d'un bâtiment, en prenant en considération le potentiel d'une cascade de défaillances (effondrement progressif) qui s'étend à une partie ou à l'ensemble du bâtiment, en considérant la perte initiale de l'élément particulier.

Pour des bâtiments à ossatures régulières simples en béton armé, l'ampleur des dommages et le potentiel d'effondrement progressif dépend du nombre d'élément(s) touché(s) et des dommages produits par un impact d'énergie donnée, ainsi que de leur importance pour la stabilité globale du bâtiment. Les dommages potentiels peuvent être classés en quatre états d'endommagement: (a) dommages non-structurels des murs non-porteurs, (b) dommages structurels locaux, (c) effondrement partiel et (d) effondrement grave à total.

Dans l'exemple développé, la typologie de construction est considérée identique à celle utilisée dans COROMINAS & MAVROULI (2010b) et est représentée sur la figure 3. Les résultats de l'analyse de l'immeuble considéré, qui est composé de deux cadres (trois colonnes) sur sa façade exposée, trois cadres perpendiculaires à celle-ci, sur sa longueur, et 5 m de murs non-porteurs (cadres) entre les colonnes, donne les conditions qui peuvent conduire aux états de dommages proposés. Les quatre scénarios de dommages initiaux suivants sont étudiés: (a) perte d'une colonne centrale, (b) d'une colonne angulaire, (c) d'un mur non-porteur entre deux colonnes et (d) de deux ou plus de colonnes centrales ou angulaires le long des murs perpendiculaires à la façade exposée. Ils sont fonction de la zone d'impact et de l'énergie cinétique, qui détermine la capacité d'un bloc à détruire une ou plusieurs colonnes. Les scénarios envisagés sont défavorables puisque l'orientation de la trajectoire des blocs est toujours perpendiculaire à la façade touchée.

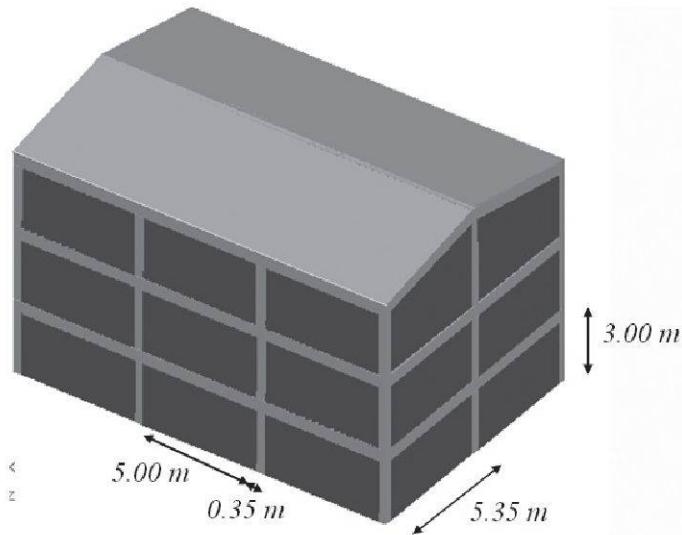


Figure 3.–Typologie structurelle typiques de la région.

La vulnérabilité est considérée comme étant la somme des produits de la probabilité d'impact d'un bloc sur un élément structurel ou non-structurel avec le coût de reconstruction relatif associé:

$$V_{sj} = \sum_{k=1}^k (P_{e,k} \cdot CRR_k) \quad (\text{Equation 5})$$

Où:

V_{sj} : vulnérabilité à un bloc de magnitude «s» et de vitesse «j»;

$P_{e,k}$: probabilité d'atteinte d'un élément structurel ou non structurel d'un bâtiment «k» par un bloc de magnitude «s» et de vitesse «j»;

CRR_k : Coût de reconstruction relatif correspondant au dommage d'un ou de plusieurs éléments structurels et/ou non-structurels d'un bâtiment «k» par un bloc de magnitude «s» et de vitesse «j».

Pour calculer la probabilité associée à chaque point d'impact, les équations suivantes sont utilisées:

$$P_{ec} = \frac{l_c + d}{a \cdot \sin \psi} \quad (\text{Equation 6})$$

$$P_s = \frac{1}{n} \frac{l_c + d}{a \cdot \sin \psi} \quad (\text{Equation 7})$$

$$P_w = \frac{1}{n} \frac{l_w + d}{a \cdot \sin \psi} \quad (\text{Equation 8})$$

Où:

P_{ec} : la probabilité d'atteinte de n'importe quelle colonne par un bloc;

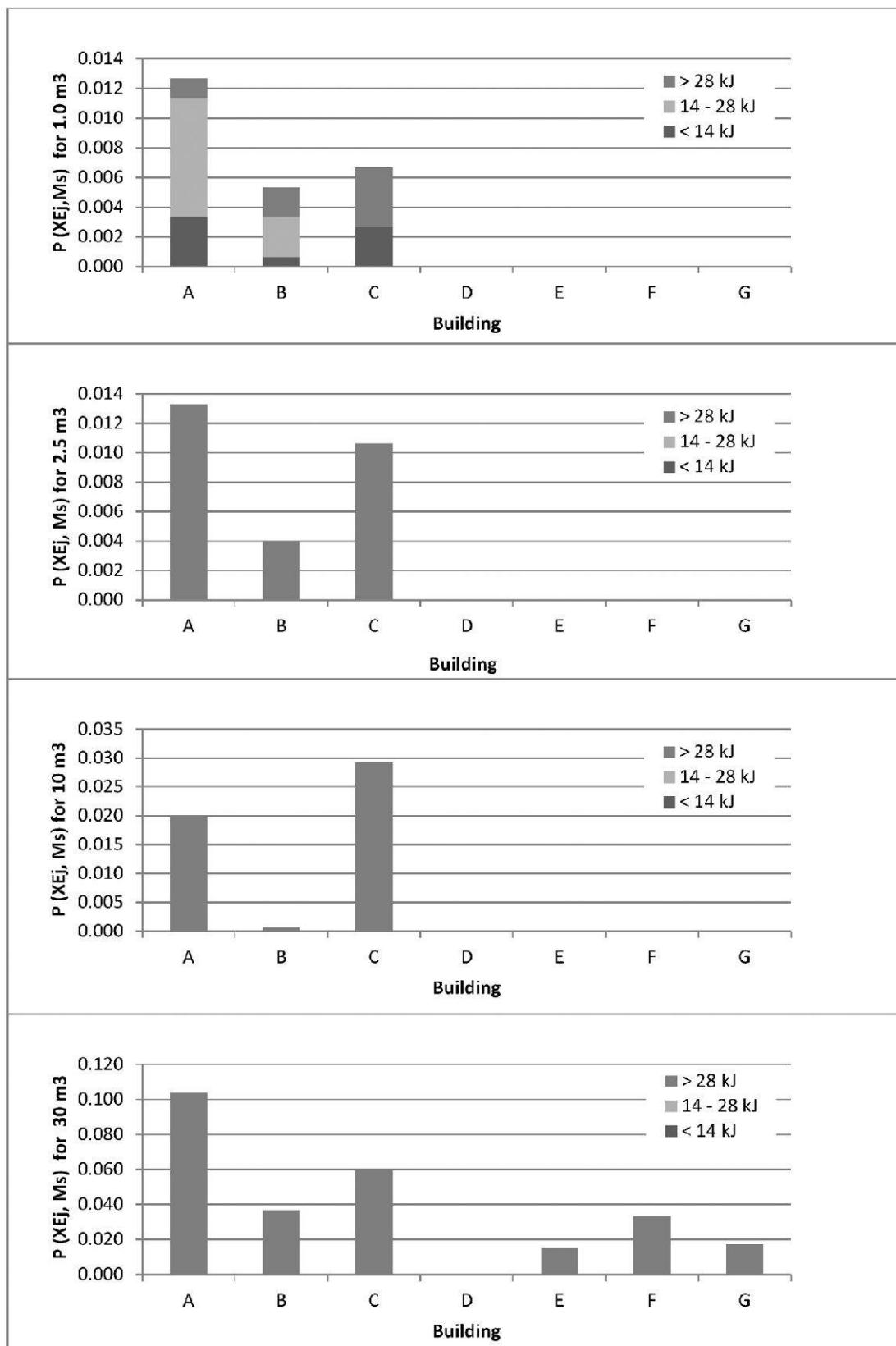


Figure 4.–Probabilité d'atteinte d'un bâtiment donné avec une certaine énergie $P(X_{Ej}, M_s)$ tel que calculé dans l'analyse trajectographique.

- P_s : la probabilité d'atteinte d'une colonne donnée par un bloc;
 P_w : la probabilité d'atteinte d'un mur non-porteur;
 n : le nombre de colonnes projetée sur une ligne parallèle à la trajectoire de la roche;
 l_c : largeur de la colonne;
 l_w : largeur de la paroi de remplissage;
 a : distance entre les centres de colonnes;
 d : diamètre de blocs rocheux;
 ψ : angle entre la trajectoire de la roche et le plan de façade.

En utilisant les équations (6) à (8) pour un bâtiment donné, la probabilité d'atteinte d'un élément structurel est donnée par la figure 5. Le point d'impact est supposé être situé exclusivement dans les éléments structuraux présents au premier niveau du bâtiment.

Le CRR exprime le coût de la réparation par rapport à la valeur de l'immeuble. Il est calculé en fonction des dommages physiques structurels et non-structurels, traduit en coûts économiques, pour chaque point potentiel d'impact (MAVROULI & COROMINAS 2010b).

Pour le type de bâtiment considéré, le CRR est fourni par le tableau 4 pour chaque scénario (point d'impact et énergie cinétique suffisante pour causer la perte d'un ou plusieurs éléments).

Compte tenu de ce qui précède, la vulnérabilité est calculée en fonction du diamètre de bloc et de l'énergie cinétique comme indiqué dans la figure 6.

Calcul du risque

Pour chaque bâtiment, le risque est calculé ici en utilisant l'équation (2) en substituant la fréquence de l'éboulement $\lambda(M_i)$ par la fréquence correspondant à la taille de bloc considéré $\lambda(M_g)$ tel que discuté à la section «Fréquence des éboulements rocheux $\lambda(M_g)$ ». Les résultats sont présentés dans la figure 7.

Le risque global d'une région est ensuite évalué en additionnant les produits du risque pour l'ensemble des bâtiments exposés.

$$R(P) = \sum R_k(P) \quad (\text{Equation 9})$$

Où:

- $R(P)$: risque global d'une région;
 $R_k(P)$: risque pour un bâtiment «k»;

En considérant 4 appartements par bâtiment, valant 400.000 € chacun, la valeur de chaque bâtiment est égale à 1,6 millions €. Donc, la perte annualisée est, pour toute la région, la somme du risque de chacun des 7 bâtiments et est égal à 30 000 €/année environ.

Dans les bâtiments A, B et C, le risque est plus élevé pour les petites tailles de blocs (1 et 2,5 m³). Cela est dû aux fréquences plus élevées qui leur sont associées. Au contraire, les bâtiments E, F, G sont affectés par les plus grands blocs seulement. La raison étant que, pour ces cas particuliers, seuls les blocs de 30 m³ sont capables d'atteindre les bâtiments avec le niveau d'énergie nécessaire pour produire des dommages (figure 4). Il faut toutefois garder

à l'esprit que ces résultats sont ceux d'une simulation et doivent être validées avec des cas réels. Le bâtiment D n'a aucun risque, car aucune des trajectoires modélisées ne traverse l'emplacement du bâtiment.

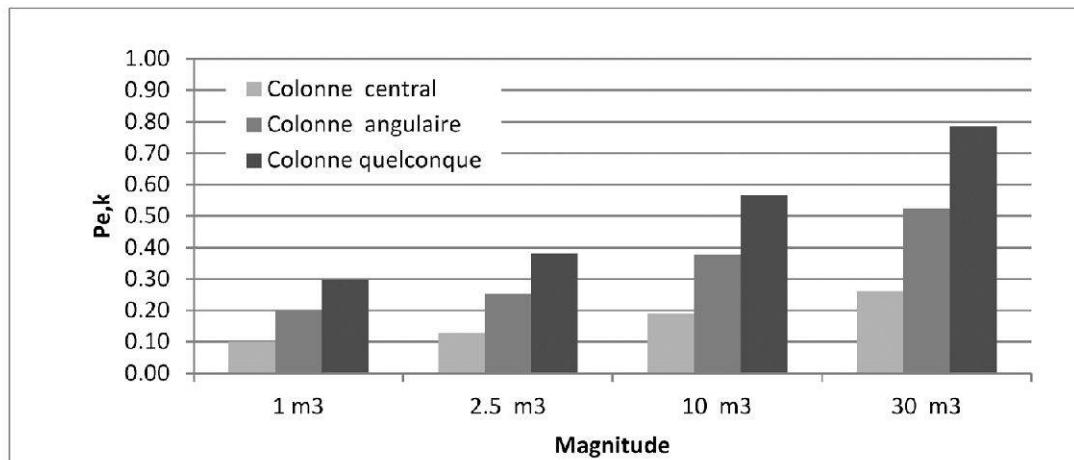


Figure 5.–Probabilité de rencontre avec chaque type de colonne $P_{e,k}$.

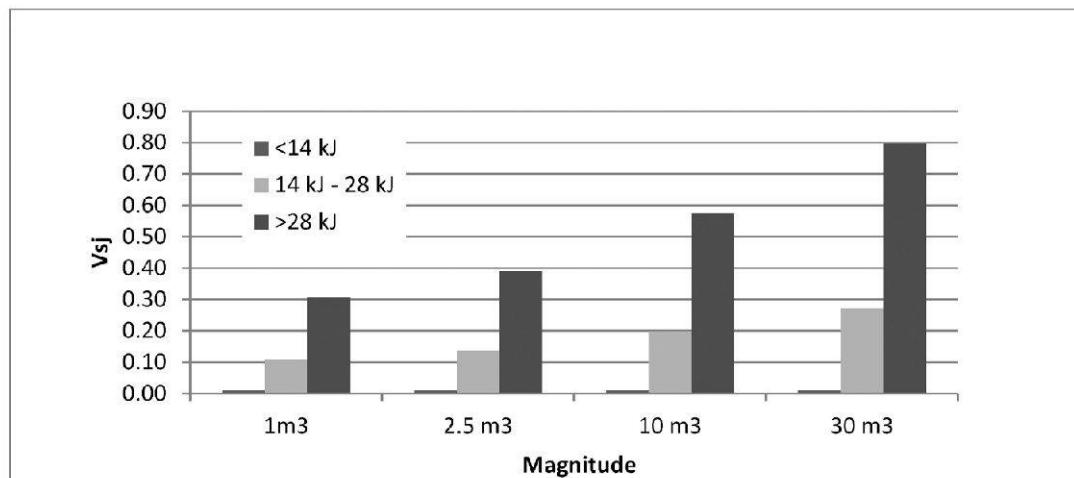


Figure 6.–Vulnérabilité V_{sj} pour chaque énergie d'impact possible.

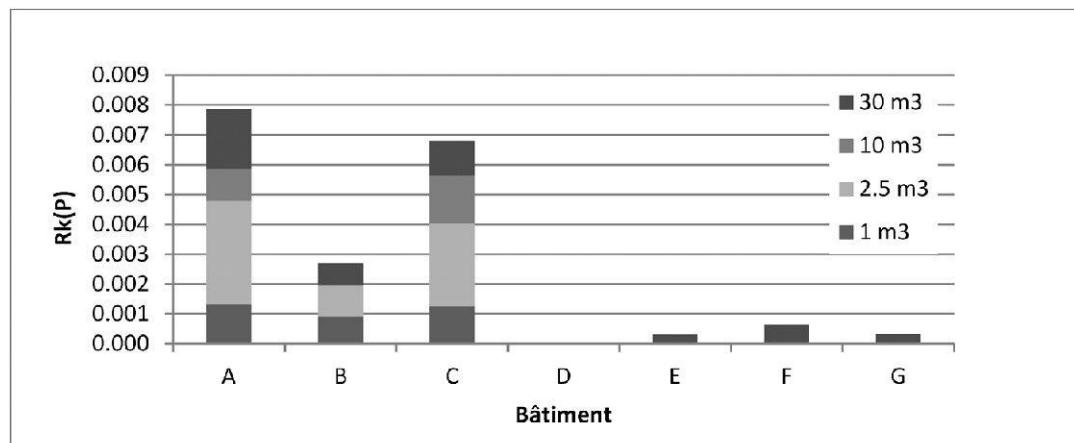


Figure 7.–Risque pour chaque bâtiment $R_k(P)$.

CONCLUSIONS

Le calcul du risque par la méthode proposée est quantitatif et peut être exprimée en termes de pertes annuelles.

La procédure proposée tient compte de la fragmentation de la masse de roche détachée qui, sans cela, aurait produit des distances d'arrêt plus longues et des énergies d'impact plus élevées dans les analyses trajectographique. L'augmentation du nombre de blocs de petite taille induits par la fragmentation de la masse rocheuse de départ a été inclue dans l'évaluation de la fréquence des blocs par classes de tailles. Toutefois, cela n'empêche pas une sous-estimation de leur énergie cinétique et de la distance d'arrêt. Il est donc encore nécessaire de valider les résultats avec des événements futurs.

En ce qui concerne la vulnérabilité, la méthodologie comprend une vulnérabilité pondérée qui tient compte de la probabilité d'impact d'éléments clés structuraux et non-structuraux par un bloc ainsi que des dommages qui en résultent. Ainsi, la vulnérabilité peut être intégrée dans l'équation du risque. L'exemple présenté ne considère qu'une typologie des bâtiments de structure particulière, il est donc nécessaire d'ajouter d'autres typologies avant de généraliser la procédure.

La méthodologie qui a été présentée ici peut être utilisée pour le calcul du risque pour un bâtiment qui est percuté à sa base par un bloc, ainsi que pour le calcul du risque global pour une zone construite, par agrégation.

L'exemple d'application a été réalisé à l'échelle du site. Cette analyse a indiqué que tous les bâtiments exposés n'ont pas la même probabilité d'impact, mais plutôt que les blocs suivent des trajectoires préférentielles en direction de certains d'entre eux. En conséquence, le risque pour chaque bâtiment est différent même si leur vulnérabilité ainsi que leur emplacement au pied du versant, sous la source de chutes de blocs, sont comparables. Cela peut être utile pour l'optimisation de la rapport coût/bénéfice des mesures de protection.

REMERCIEMENTS

Ce travail a été effectué au sein des projets «Safeland», financé par l'Union européenne (7^e programme-cadre) convention de subvention 226 479 et «Big Risk», financé par le ministère espagnol de la science et de l'innovation, numéro de contrat BIA2008-06614. Une prise en charge partielle a été donnée au deuxième auteur par la «European Reintegration Grant» pour le projet RISK-LESS, convention de subvention 268180.

Les auteurs remercient Julien Godefroy pour son aide à la calibration du modèle trajectographique et Pierrick Nicolet et Michel Jaboyedoff pour leur soutien à la rédaction et la révision de l'article.

RÉFÉRENCES

- AGLIARDI F., CROSTA G.B. & FRATINI P., 2009. *Integrating rockfall risk assessment and countermeasure design by 3D modelling techniques*. Natural Hazards and Earth System Sciences, 9: 1059–1073.
- BELL R. & GLADE T., 2004. *Quantitative risk analysis for landslides - Examples from Bildudalur, NW-Iceland*. Natural Hazards and Earth System Sciences, 4(1): 117-131.
- COPONS R., 2004. *Avaluació de la perillositat de caigudes de blocs a Andorra la Vella (Principat d'Andorra)*, PhD Thesis, UB, Barcelona, 244pp.

- COPONS R., VILAPLANA J.M., COROMINAS J., ALTIMIR J. & AMIGÓ J., 2005. *Rockfall hazard management policy in urban areas: the Andorran experience*. In: T. Glade, M. Anderson and M. Crozier, Editors, Landslide Hazard and Risk, John Wiley & Sons, Chichester, 675-698.
- COROMINAS J., COPONS R., MOYA J., VILAPLANA J., MALTIMIR J. & AMIGÓ J., 2005. *Quantitative assessment of the residual risk in a rock fall protected area*. Landslides, 2: 343-357, 2005.
- COROMINAS J. & MAVROULI O., 2010. *Methodology for the Quantitative Risk Assessment for Rockfalls at Site-Specific Scale*. In MALET J.-P., GLADE T. & CASAGLI N., (editors). Mountain Risks: Bringing Science to Society. CERG Editions, Strasbourg, 343-350.
- DUSSAUGE-PEISSER A., HELMSTETTER C., GRASSO J.R., HANTZ D., DESVARREUX P., JEANNIN M. & GIRAUD A., 2002. *Probabilistic approach to rockfall hazard assessment: potential of historical data analysis*. Natural Hazards and Earth Systems Sciences 2, 15-26.
- GUZZETTI F., REICHENBACH P. & WIECZOREK G.F., 2003. *Rockfall hazard and risk assessment in the Yosemite Valley, California, USA*. Natural Hazards and Earth System Sciences 3, 491-503.
- EVANS S.G. & HUNGR O., 1993. *The assessment of rockfall hazard at the base of talus slopes*. Canadian Geotechnical Journal, 30: 620-636
- HUNGR O., EVANS S.G. & HAZZARD J., 1999. *Magnitude and frequency of rock falls and rock slides along the main transportation corridors of south-western British Columbia*. Canadian Geotechnical Journal 36, 224-238, 1999.
- JABOYEDOFF M., DUDT J.P. & LABIOUSE V., 2005. *An attempt to refine rockfall hazard zoning based on the kinetic energy, frequency and fragmentation degree*. Natural Hazards and Earth System Sciences, 5, 621-632
- LI Z.H., HUANG H.W., XUE Y.D. & YIN J., 2009. Risk assessment of rockfall hazards on highways, Georisk, 3 (3): 147-154.
- MAVROULI O. & COROMINAS J., 2010a. *Vulnerability of simple reinforced concrete buildings in front of the rockfall impact*. Landslides, 7 (2): 169-180, 2010a.
- MAVROULI O. & COROMINAS J., 2010b. *Rockfall vulnerability assessment for reinforced concrete buildings*. Natural Hazards and Earth System Sciences, 10: 2055-2066,
- MOYA J., COROMINAS J., PEREZ-ARCAS J. & BAEZA C., 2010. *Tree-ring based assessment of rockfall frequency on talus slopes at Solà d'Andorra, Eastern Pyrenees*. Geomorphology, 118: 393-408
- ROBERDS W.J., 2005. *Estimating temporal and spatial variability and vulnerability*. In: HUNGR O., FELL R., COUTURE R. & EBERHARDT E., (editors). Landslide risk management, Proceedings of the International Conference on Landslide Risk Management, Vancouver, 31 May–3 June 2005, Taylor & Francis, London, 129-157.