

Évaluation de la vulnérabilité associée aux bâtiments en maçonnerie soumis à l'action d'une avalanche

Cédric Bonnevie^a, Philippe Berthet-Rambaud^{a,b,c}, François Nicot^a

Les zones de montagne sont marquées, au-delà d'une certaine altitude variable géographiquement, par l'abondance des précipitations neigeuses. Par ailleurs, ces mêmes régions se déclinent sous des traits géomorphologiques communs, tel que la présence d'un réseau de vallées définissant un système de versants aux abrupts plus ou moins prononcés.

Sous l'effet de la pesanteur, un manteau neigeux placé en situation de versant peut acquérir une instabilité mécanique dont l'évolution dépend de nombreux facteurs (propriétés rhéologiques du matériau, nature du sol, topographie, facteurs climatiques...). Ce processus d'instabilité nivologique est à l'origine de nombreux phénomènes générant des actions dynamiques (les avalanches, les coulées de neige) ou des actions quasi-statiques (mouvements de reptation du manteau) (photo 1).



Un contexte socio-économique vulnérable

Si une chaîne de montagne telle que les Alpes est restée jusqu'au début du vingtième siècle un territoire enclavé, l'explosion industrielle et touristique a au contraire induit au cours du siècle dernier une forte pression d'aménagement des mêmes régions qu'elle abrite. Avec le développement des échanges internationaux, de nombreux axes de communication ont été tracés, et parcourent aujourd'hui les vallées alpines. Par ailleurs, afin d'exploiter la présence abondante de l'eau, mais tirant aussi profit de la morphologie des lieux, des installations hydroélectriques ont été implantées dans les zones de resserrement de vallée (verrous). Il convient également de souligner les ressources minières (argent, plomb,

cuivre...) présentes dans de nombreux secteurs ; elles ont conduit au développement d'un tissu industriel conséquent orienté sur l'électrochimie.

La conquête industrielle d'une partie du territoire alpin s'est accompagnée d'un accroissement de la fréquentation touristique. À partir des années 1950, la société urbaine s'est emparée de certaines zones de ces régions de montagnes, dans un but de loisir et de repos : le tourisme hivernal a été le moteur de cette migration saisonnière massive.

L'implantation d'un réseau étendu d'infrastructures et d'équipements dans les territoires de montagne, marqués par des contraintes naturelles fortes dans un espace réduit, s'est ainsi poursuivie au cours des dernières décennies ; or, ces différents

▲ Photo 1 –
Avalanche de neige récente.

Contact

a. Cemagref, UR
Érosion torrentielle
neige et avalanches,
Domaine universitaire,
2 rue de la Papeterie,
BP 76, 38402 Saint-
Martin-d'Hères Cedex
b. Laboratoire régional
des Ponts & Chaussées
- CETE, Lyon, France
c. Laboratoire 3S,
Grenoble, France

aménagements sont bien souvent exposés à l'action d'aléas divers, tels que les avalanches, dont la réelle capacité destructrice justifie que l'on puisse associer à l'espace construit la notion de vulnérabilité. Or, l'idée même de risque, défini comme le croisement d'un *aléa* et d'une *vulnérabilité*, ne fait plus l'objet d'une acceptation sociale. Cette évolution a sous-tendu une prise en charge effective de la gestion des risques naturels de la part des divers organismes de gestion ou de recherche. Afin d'assurer la protection des usagers et des biens, il incombe aujourd'hui à la communauté scientifique de contribuer au développement de méthodes et outils afin de réduire le risque.

Une mosaïque architecturale

L'accroissement de la fréquentation des régions de montagne s'est accompagnée d'une urbanisation particulièrement significative dans de nombreux secteurs : maisons individuelles, centres d'hébergement, immeubles, bâtiments administratifs, centres commerciaux, ouvrages de communication, complexes industriels et producteurs d'énergie.

Si l'habitat montagnard au cours des siècles précédents a su conserver une identité locale très forte, garantissant une certaine homogénéité d'ensemble, ces dernières décennies ont au contraire connu une explosion des styles architecturaux (photo 2). Cette diversité architecturale se retrouve bien évidemment dans

▼ Photo 2 – Exemple de diversité architecturale en montagne (Val-d'Isère).



l'organisation structurale du bâti : diversité des formes et des dimensions des éléments structuraux porteurs, diversité des morphologies et des agencements internes, diversité des façades et de leurs ouvertures (Berthet-Rambaud, 1999).

Or, la réponse mécanique d'un bâtiment soumis à l'action d'une avalanche dépend fortement de cette organisation structurale. Il importera donc, de manière à proposer un processus de calcul le plus général possible, d'exhiber une représentation polyvalente mais représentative des bâtiments considérés.

Problématique et objectifs

La construction actuelle des bâtiments repose surtout sur un savoir-faire et un état de l'art éprouvé qui, à partir de considérations principalement fonctionnelles et esthétiques, assure aussi un degré de protection suffisant vis-à-vis de phénomènes naturels courants comme le vent, le poids du manteau neigeux sur le toit, etc. Il est bien certain que de telles structures ne sont pas conçues ni dimensionnées pour résister à une sollicitation hors plan de la nature et de l'intensité d'une avalanche. Les documents réglementaires tels que les plans de prévention des risques trahissent les lacunes dans la connaissance de l'effet d'une avalanche sur une construction en maçonnerie, et l'inexistence de dispositions constructives adaptées.

Cet article s'intéresse donc au comportement mécanique d'éléments de structures verticaux soumis à une sollicitation hors plan dynamique. En simulant l'initialisation de lignes de rupture au sein d'une structure en maçonnerie, sans s'intéresser au comportement post-rupture de l'ensemble, l'objectif visé est de pouvoir affecter à une habitation donnée, et pour une avalanche d'intensité bien définie, un état d'endommagement

À cet état d'endommagement sera alors associée une classe de vulnérabilité humaine intégrant le degré d'exposition des personnes résidant à l'intérieur de l'habitation.

Méthodologie

L'interaction mécanique qui existe entre l'avalanche et la structure impose *a priori* de décrire ces deux objets de façon couplée. Dans le cadre de l'approche proposée, on admettra cependant que le problème peut être découplé.

En effet, la structure étant globalement très rigide vis-à-vis de l'écoulement avalancheux, on peut raisonnablement considérer que la réponse mécanique de la structure (déformations) ne modifie pas la sollicitation exercée par l'écoulement sur ce même obstacle non déformé.

La démarche consistera donc à définir, pour différentes classes et intensités d'avalanches, un chargement distribué sur la façade exposée. De manière à prendre en compte les caractéristiques dynamiques de la sollicitation, ce chargement se présentera sous la forme d'un spectre temporel de pression. Les progrès réalisés par la mécanique de l'endommagement au cours des dernières années (Mazars, 1984) permettent aujourd'hui de modéliser l'endommagement de structures complexes sous sollicitations sévères.

Grâce aux techniques d'homogénéisation, le cadre de la mécanique de l'endommagement a pu être étendu au cas particulier des structures en maçonnerie (Cecchi, 2002). Néanmoins, la nature même de ces structures favorisant le développement de faciès de rupture localisés le long des joints de mortiers, l'utilisation de la méthode des éléments discrets semble particulièrement bien adaptée (El Shabrawi *et al.*, 1994). Cet article se base donc sur cette méthode pour modéliser l'initialisation de lignes de rupture au sein d'une façade en maçonnerie soumise à l'action d'un chargement dynamique.

La sollicitation avalancheuse

Description sommaire et typologie du phénomène

Une avalanche se définit usuellement comme « un écoulement gravitaire rapide de neige, suite à une rupture du manteau neigeux » (Ancey, 2001). Trois zones caractérisent une avalanche : la zone de départ, le canal d'écoulement, et le cône d'arrêt. La rupture initiale, grossièrement ponctuelle ou linéaire, se produit dans la zone de départ, et permet la mise en mouvement d'une partie du manteau neigeux. Le canal d'écoulement est la zone dans laquelle le phénomène prend de l'ampleur, associant dépôts ou reprises en fonction du relief. Le cône d'arrêt correspond à la zone où l'avalanche perd de la vitesse jusqu'à s'arrêter en formant un dépôt. Les habitations susceptibles d'être exposées à l'effet d'une avalanche sont en principe situées dans le cône d'arrêt, rarement plus en amont.

Il importe de noter qu'il existe plusieurs types d'avalanches, se distinguant de part le mode de rupture initiale, les caractéristiques de l'écoulement, la nature du fluide écoulé (neige sèche, humide, cohérente) ou encore la forme du dépôt. La sollicitation exercée par l'écoulement sur un obstacle, réputé rigide, dépend bien sûr du type d'avalanche considéré.

Néanmoins, il a semblé réaliste de retenir essentiellement trois types d'avalanche, chacun d'eux ayant un spectre temporel de pression bien caractéristique (figure 1, p. 140) :

- avalanches de neige humide, de forte densité, et faible vitesse ;
- avalanches de neige sèche, de faible densité, et vitesse élevée ;
- avalanches avec formation d'aérosols, de très faible densité mais vitesse très élevée.

Profils spatio-temporels des pressions d'impact

Les premières estimations de pression d'impact ont été obtenues par analyse en retour à partir d'observations de dégâts sur le terrain.

Ces estimations ont été par la suite affinées à l'aide de mesures réalisées sur plusieurs sites expérimentaux permettant le déclenchement artificiel d'avalanches, et l'acquisition de données issues de capteurs de pression placés dans l'écoulement. Il importe de noter la relative dispersion des résultats obtenus par les différents auteurs de 30 à 1 300 kPa. Néanmoins, il semble admis que pour des avalanches d'ampleur moyenne, la pression moyenne d'impact soit comprise entre 30 et 300 kPa.

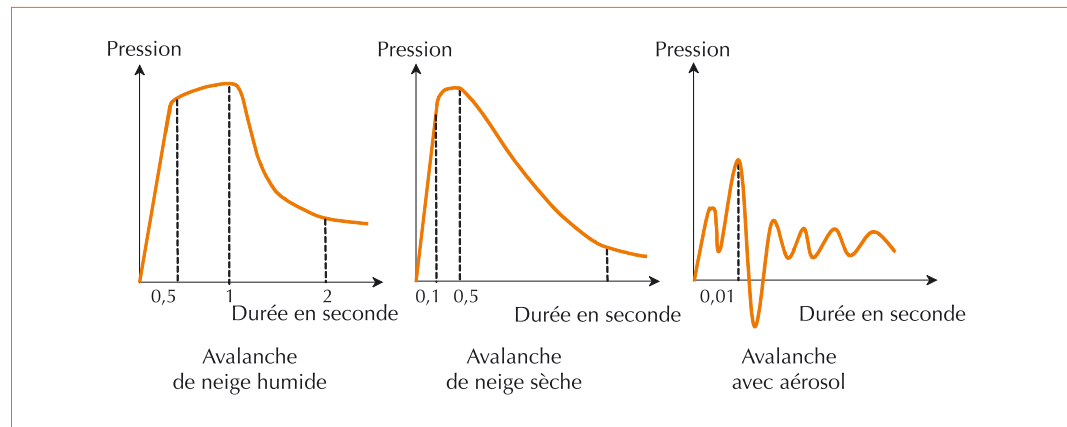
On précisera par ailleurs que cette pression d'impact dépend fortement de la forme de l'obstacle, ce qui est résumé à travers la formule suivante :

$$P = C \rho V^2 \quad (1)$$

où P est la pression moyenne sur l'obstacle, V la vitesse moyenne de l'écoulement, ρ sa masse volumique moyenne et C un coefficient intégrant notamment la traînée de l'obstacle.

La pression moyenne est une mesure qui intègre sur la durée de l'impact et la surface de l'obstacle une distribution spatio-temporelle de pression.

► Figure 1 – Principaux spectres temporels de pression.



Cette distribution est encore mal connue mais au moins d'un point de vue qualitatif, les auteurs s'accordent à retenir les spectres temporels et spatiaux suivants présentés sur les figures 1 et 2 (Auge, 1995). Les temps caractéristiques sont donnés à titre comparatif.

On retiendra en particulier le caractère fortement dynamique d'une avalanche, quelle que soit sa nature. Les spectres indiqués figure 1 soulignent la nécessité de tenir compte de cette caractéristique de l'écoulement dans la sollicitation imposée sur un obstacle.

Modélisation mécanique du problème et numérisation

Description spatiale du bâtiment

LE CONCEPT DE SOUS-STRUCTURATION

Introduction

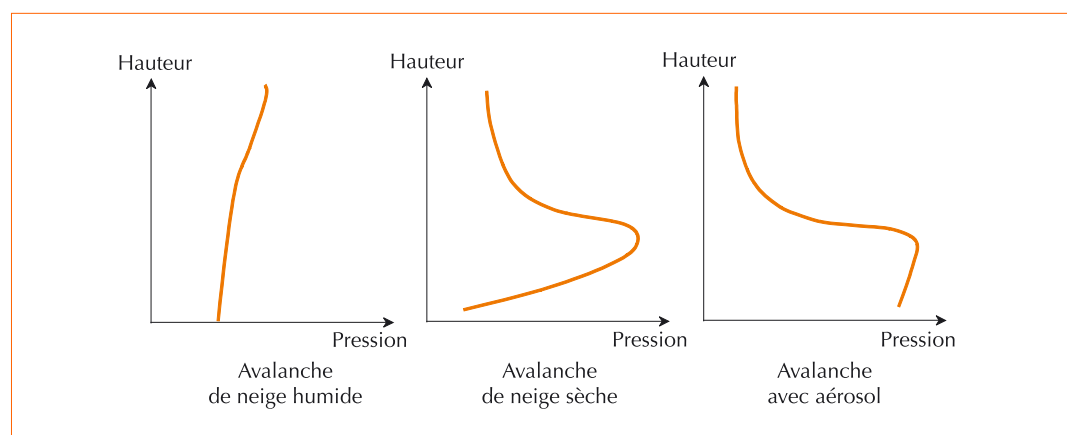
Une habitation est un exemple de structure complexe, intégrant de nombreux éléments

(dalles, murs de refend, cloisons, toitures) reliés les uns aux autres. Pour traiter de cette complexité structurale, une méthode très commode consiste à décomposer l'ouvrage en sous-structures élémentaires. Chaque sous-structure est alors traitée de façon indépendante, le reste de la structure étant pris en compte au travers de conditions limites adéquates (Rabasa, 2001). Il convient de noter toutefois que cette méthode suppose que les réponses des différentes sous-structures sont indépendantes les unes des autres, ce qui semble réaliste au moment de l'impact d'une avalanche sur une façade d'habitation.

Le motif élémentaire

La configuration des zones montagnardes constructibles conduit en général à aligner une des façades de l'habitation sur les courbes de niveau. On admettra par conséquent qu'une avalanche sollicite seulement la façade amont alignée perpendiculairement à la ligne de plus grande pente qui correspond aussi souvent à la

► Figure 2 – Principales distributions verticales de pression.



ligne d'écoulement de l'avalanche. Cette dernière va donc imposer un champ de pression qui peut être considéré en première approximation comme étant normal à la façade considérée. On ne s'intéressera donc pas à l'effet de l'écoulement le long de la façade.

Dans le cadre d'une représentation par sous-structuration, une habitation peut être modélisée par la façade exposée, à laquelle sont adjointes des conditions aux limites prenant en compte la présence des autres éléments structuraux liés à celle-ci. Dans de nombreux cas toutefois, une habitation peut posséder plusieurs niveaux, chaque niveau pouvant comporter plusieurs volumes délimités par des éléments porteurs.

On définira alors le motif élémentaire (Berthet-Rambaud, 1999) comme chaque entité de façade dont le pourtour est lié à des éléments porteurs verticaux et horizontaux (figure 3). Une façade se compose en général de plusieurs motifs élémentaires, chacun pouvant comporter des ouvertures diverses (fenêtres, portes). On se limitera au cas le plus répandu utilisant des géométries rectangulaires.

En revanche et dans le cadre de la méthode exposée, la présence d'éléments annexes tels que des escaliers extérieurs ou des balcons ne sera pas prise en compte. Par ailleurs, l'effet de l'avalanche sur une toiture ne sera pas abordé.

Liaisons technologiques et conditions aux limites

Chaque motif élémentaire, de forme rectangulaire, est lié par l'intermédiaire de son contour au reste de la structure. Ces liaisons peuvent être de différentes natures ; ci-dessous sont exposés les trois types les plus courants.

- Liaison par joint de mortier

Ce type de liaison se rencontre dans le cas de murs de remplissage (figure 4). Les moellons sont liés aux poteaux porteurs par l'intermédiaire d'un joint de mortier.

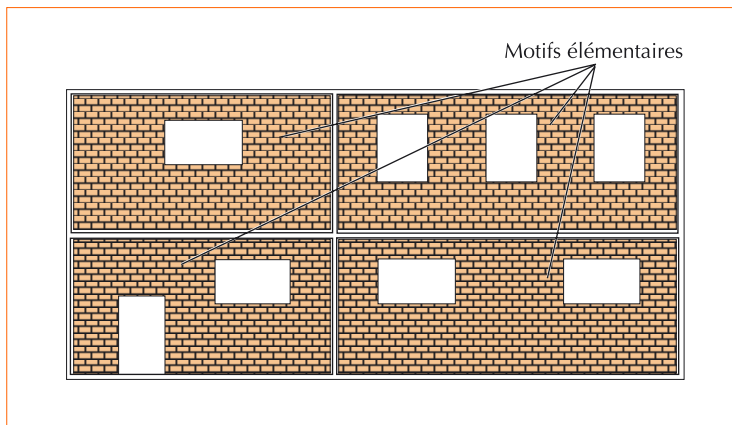
- Liaison par imbrications croisées

Il s'agit d'une liaison courante en extrémité de façade (figure 5). On admettra que les moellons d'angle sont bloqués en déplacement.

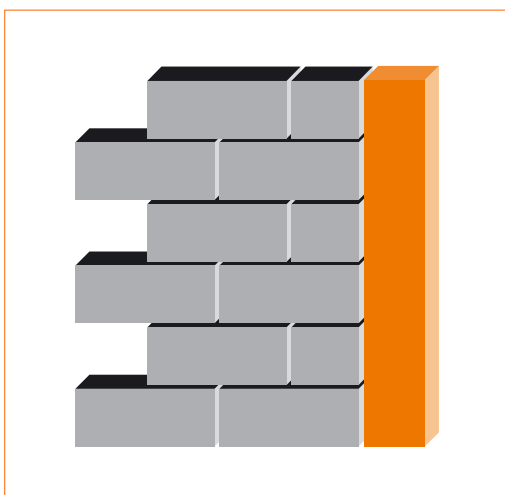
- Liaison libre

Il s'agit par exemple du bord supérieur d'un motif ne prenant pas appui sur une dalle ou une poutre.

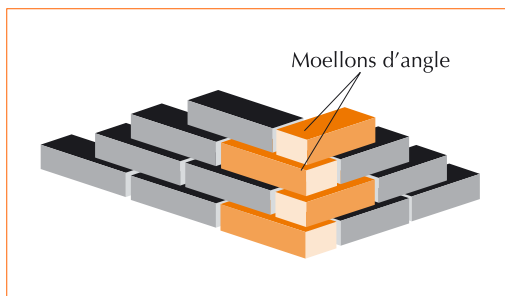
▼ Figure 3 – Exemple d'une façade composée de 4 motifs.



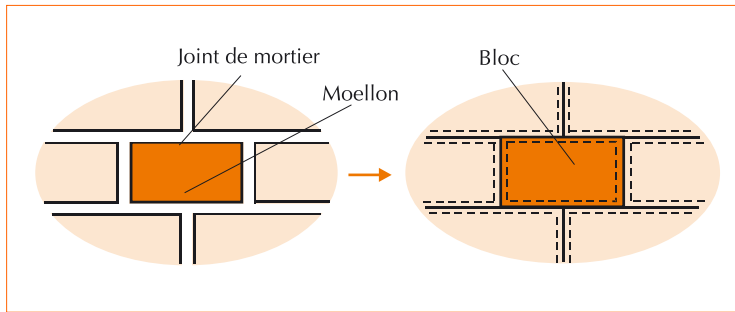
▼ Figure 4 – Liaison par joint de mortier.



▼ Figure 5 – Liaison par imbrications croisées.



Dans ce cas, les moellons de la rangée supérieure ne sont pas bloqués en déplacement.



▲ Figure 6 – Représentation spatiale des moellons et des joints de mortier.

DESCRIPTION SPATIALE DES MOELLONS ET DES JOINTS DE MORTIER

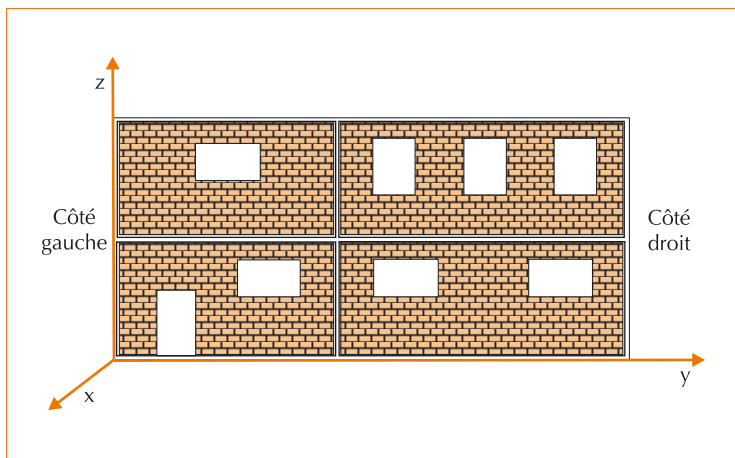
Chaque moellon est représenté par un élément parallélépipédique réputé parfaitement rigide. Les dimensions de ce bloc sont égales à celles du moellon, augmentées des demi-épaisseurs du joint de mortier lorsque ceux-ci existent (figure 6). Le comportement mécanique du mortier sera pris en compte à travers la loi de contact qui sera introduite à l'interface de deux éléments en contact.

REPÉRAGE DE LA FAÇADE ET DES ÉLÉMENTS

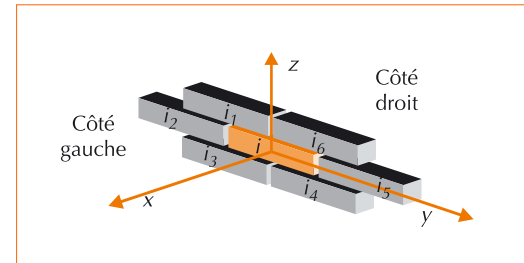
Un système de coordonnées (x, y, z) est associé à la façade ; la coordonnée x est portée par la direction normale sortante à la façade, la coordonnée y est portée par la direction horizontale appartenant au plan de la façade, et la coordonnée z est portée par la direction verticale (figure 7). Ce système permet de définir un repère $\{0, x, y, z\}$ dont l'origine O est placée au coin inférieur gauche du rectangle constituant la façade.

▼ Figure 7 – Façade et repérage dans l'espace.

Par ailleurs, il est commode de numéroter chaque moellon de 1 à N , N étant le nombre d'éléments nécessaires pour représenter la façade.



Un élément i admet un nombre n_i d'éléments voisins, dont les numéros sont enregistrés dans un tableau de contingence ; ce tableau de contingence reste inchangé au cours du calcul. De manière générique, ces numéros sont désignés par le symbole i_p , où p est un entier variant de 1 à n_i (figure 8).



▲ Figure 8 – Exemple de repérage des éléments en contact.

Comportement mécanique des objets

HYPOTHÈSES FONDAMENTALES

Le type de modélisation mis en œuvre s'inscrit dans le cadre général de la méthode des éléments discrets (Cundall, 1992). Les objets décrits sont représentés par une collection d'éléments rigides, pouvant interagir les uns avec les autres, et dont les déplacements satisfont aux équations d'équilibre de Newton. L'évolution du contact entre éléments voisins permet de rendre compte de l'interaction entre ces objets (cas de matériaux divisés), ou au contraire de traduire un comportement homogène global du matériau (cas de matériaux cohérents). Dans le cadre des constructions en maçonnerie, on admettra que les déformations hors plan que subit un mur voile se concentrent essentiellement au niveau des joints (Sutcliffe, 2001).

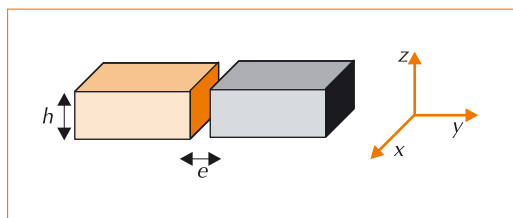
Par conséquent, les moellons constituant le mur mais aussi les linteaux pris en compte au-dessus des ouvertures peuvent être décrits comme des éléments rigides ; les interactions entre chaque paire d'éléments en contact prennent alors en compte le comportement mécanique global du mur voile, piloté essentiellement par celui des joints de mortier. La déformation des joints se compose d'un mécanisme de flexion et de cisaillement.

En outre, on admettra en première approximation que le mécanisme de cisaillement est prépondérant devant celui de flexion. Cette hypothèse nous

semble réaliste dans la mesure où, compte tenu de la faible épaisseur des joints, la rigidité de flexion¹ K_f est importante devant la rigidité de cisaillement K_c . En particulier, si l'on évalue les rigidités de flexion et de cisaillement d'un joint soumis à un mécanisme de déformation plane (figure 9) dans le plan (x, y) , il vient :

$$\frac{K_{fz}}{K_{cz}} = \frac{1+\nu}{6} \left(\frac{h}{e}\right)^2 \quad (2)$$

où h est la hauteur des joints, e leur épaisseur, et ν le coefficient de Poisson du matériau de remplissage des joints. Pour $\nu = 0.25$, $h = 20$ cm et $e = 1$ cm, on obtient un rapport $\frac{K_f}{K_c}$ de l'ordre de 80.



▲ Figure 9 – Description d'un joint rocheux en déformations planes.

Comme indiqué précédemment, l'effet de l'écoulement d'une avalanche le long d'une façade ne sera pas abordé. Dans ces conditions, la mobilité des éléments (blocs) sera limitée à un seul degré de liberté de translation dans la direction normale au plan du mur (axe x). Il convient de remarquer que cette hypothèse portant sur la cinématique des blocs est valide dans la mesure où l'on s'intéresse seulement à l'initialisation de l'endommagement de la façade. Le mécanisme de ruine de la façade, au cours duquel la cinématique des blocs est plus complexe, n'est pas traité.

LOI DE CONTACT AUX INTERFACES

Le comportement mécanique d'un joint de mortier et de ses interfaces avec les deux moellons adjacents est pris en compte de manière globale à travers la loi de contact introduite à l'interface des deux éléments en contact. Cette loi de contact permet de relier les contraintes s'exerçant à l'interface des deux éléments, à leurs déplacements relatifs. L'intégration des contraintes sur la surface de contact fournit les efforts de contact normal et tangentiel appliqués à chacun des deux éléments.

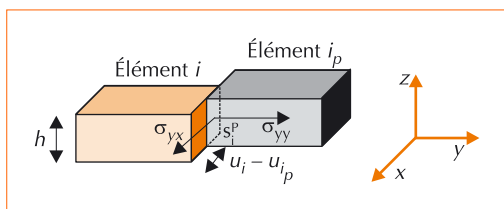
En supposant que les contraintes sont uniformes le long des interfaces, il vient dans le cas d'un joint vertical (figure 10) :

$$T_i^p = S_i^p \sigma_{yx} \quad (3)$$

où T_i^p est l'effort de contact tangentiel à l'interface des éléments i et i_p , σ_{yx} la contrainte tangentielle et S_i^p la surface de contact entre ces deux éléments. Les déformations tangentielles peuvent être évaluées simplement à partir du déplacement relatif $u_i - u_{i_p}$ des deux éléments :

$$\varepsilon_{yx} = \frac{u_i - u_{i_p}}{e} \quad (4)$$

où e est l'épaisseur du joint.



◀ Figure 10 – Déformation d'un joint vertical par cisaillement.

La contrainte tangentielle peut être reliée à la déformation tangentielle à partir d'un essai de cisaillement d'un joint de mortier. On admettra (Prat, 1997) que le comportement obtenu est bien représenté par un modèle mono-dimensionnel élasto-plastique avec radoucissement (figure 11, p. 144). Le comportement est élastique jusqu'au point A. À partir du point A, des fissures apparaissent au sein du joint ; le plateau AB (pic de résistance) correspond à l'extension de ces fissures qui conduit à la rupture complète du joint au point B. Cette rupture s'accompagne d'une perte de résistance caractérisée par le décrochement vertical BC (radoucissement), et donne lieu à un comportement plastique parfait (plateau au-delà du point C). Ce modèle introduit donc 5 paramètres : le module de cisaillement G , les seuils de fissuration ε_f et de rupture ε_r , les valeurs de résistance de pic σ_p et résiduelle σ_r . Par ailleurs, si l'on admet que la surface de charge est bien décrite par le critère de Mohr-Coulomb, σ_p et σ_r peuvent être reliés à l'angle de frottement interne φ et à la cohésion c du joint de mortier :

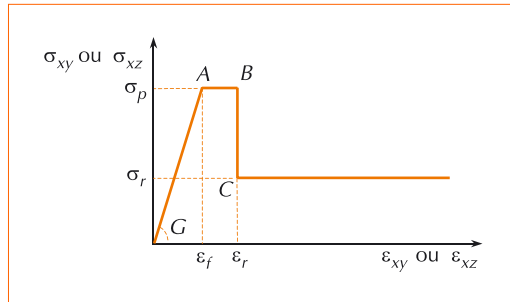
$$\sigma_p = c + \sigma_n \tan \varphi \quad (5)$$

et

$$\sigma_r = \sigma_n \tan \varphi \quad (6)$$

où σ_n est la contrainte normale existant à l'interface.

► Figure 11 –
Modèle de
comportement
élasto-plastique
d'un joint de mortier.



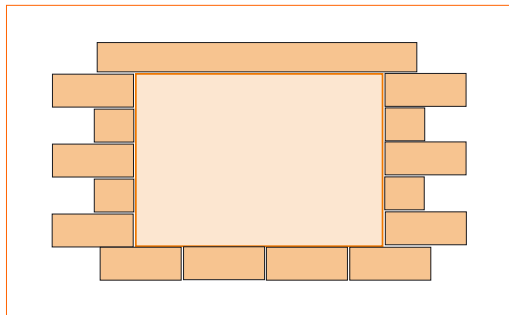
Dans le cas de joints horizontaux, la contrainte normale $\sigma_n = \sigma_{zz'}$, qui est supposée uniforme dans tout plan horizontal, est évaluée sur chacun de ces plans à partir du poids de façade sus-jacente.

Dans le cas de joints verticaux, on admettra que la contrainte normale est nulle. Il convient de remarquer que cette simplification est plutôt pénalisante, dans la mesure où la dilataction des joints verticaux induit par le cisaillement génère des contraintes normales non nulles.

Traitement des ouvertures

Les ouvertures, portes ou fenêtres, sont traitées comme des éléments fusibles. Tout comme leurs analogues, ils subissent sur leur surface la pression de l'avalanche ; en contact avec d'autres éléments, moellons ou linteaux (figure 12), ils sont soumis

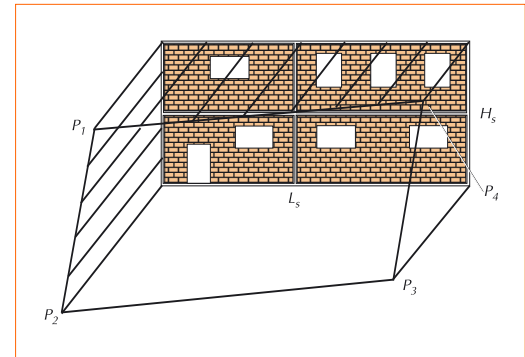
► Figure 12 –
Représentation
d'une ouverture
de type fenêtre.



pression limite propre à chaque type d'ouverture, celle-ci était éventrée (Bonnevie, 2002). Cela entraîne, par suppression de l'élément d'ouverture, la disparition de la pression d'impact de l'avalanche sur une partie de la façade. En revanche, il importe de remarquer qu'une partie de l'écoulement est susceptible de pénétrer au sein de l'habitation qui perd ainsi en partie sa fonction de protection. Cette discussion est intéressante, car elle assure la transition de la vulnérabilité physique vers la vulnérabilité humaine.

Modélisation de la sollicitation avalancheuse

On considère un écoulement avalancheux sollicitant une façade de largeur L et de hauteur H . La sollicitation avalancheuse est représentée par une distribution spatiale de pression qui évolue au cours de l'impact. On désigne par H_a la hauteur de l'écoulement avalancheux. On admettra que la façade est soumise sur la largeur $L_s = L$ et la hauteur $H_s = \min(H_a, H)$ à une pression distribuée de façon bilinéaire (figure 13).



▲ Figure 13 – Distribution spatiale de la pression d'impact sur une façade.

Si $P_i(t)$, ($i = 1,4$), est la pression appliquée aux points de coordonnées $(0, H_s)$, $(0,0)$, $(L_s, 0)$ et (L_s, H_s) , la pression appliquée au point de coordonnées (y, z) est donnée par :

$$P(y, z, t) = \frac{z P_1 + (H_s - z) P_2}{H_s} \frac{L_s - y}{L_s} + \frac{z P_4 + (H_s - z) P_3}{H_s} \frac{y}{L_s} \quad (7)$$

également à des efforts de contact dont on admettra qu'ils sont gouvernés par une loi analogue à celle décrite figure 11. La capacité de résistance à une pression d'impact d'une porte ou d'une fenêtre étant inférieure à celle d'un moellon, il a été convenu qu'au-delà d'une

$P_i(t)$ est caractérisé par le spectre temporel dont la forme générale est indiquée figure 14. Les instants t_1 , t_2 , t_3 , et les valeurs de pression de pic P_i^{max} et résiduelle P_i^{res} , constituent les paramètres de la sollicitation avalancheuse, permettant de reproduire les cas énoncés figure 1 (p. 140).

Équations d'équilibre

Chaque élément est soumis à l'effet de son poids propre, à une distribution de pression modélisant l'effet de l'avalanche, et à des efforts de contact aux différentes interfaces. Le déplacement u_i de chaque élément i dans la direction x est alors solution de l'équation suivante :

$$m_i \ddot{u}_i = F_i^a + \sum_{p=1}^{n_i} T_i^p \quad (8)$$

où m_i représente la masse de l'élément i , F_i^a est l'effort résultant dû à l'avalanche appliqué sur la face externe de l'élément i de surface S_i^x , et T_i^p est l'effort de contact existant à l'interface de chaque paire d'éléments en contact i et i_p . En désignant par y_i et z_i les coordonnées du centre de gravité de l'élément i , il vient :

$$F_i^a(t) = S_i^x P(y_i, z_i, t) \quad (9)$$

Le système d'équations 3, 4 et 8, auquel est adjointe la loi de contact proposée figure 11, constitue un système complet permettant de décrire l'évolution mécanique des éléments représentant la façade étudiée.

Il convient par ailleurs de préciser que l'effort résultant dû à l'avalanche dépend non seulement de la position de l'élément dans l'espace, mais évolue également dans le temps et ceci de manière très brutale (figure 1, p. 140).

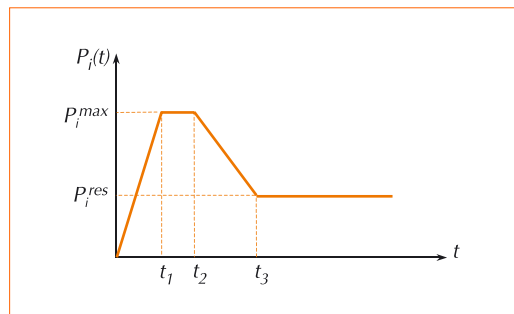
Schéma numérique

Le système d'équations précédent a été résolu à l'aide de la méthode des différences finies centrées. L'équation 8 devient alors :

$$u_i(t+\tau) = 2u_i(t) - u_i(t-\tau) + \frac{\tau^2}{m_i} \left(F_i^a(t) + \sum_{p=1}^{n_i} T_i^p(t) \right) \quad (10)$$

où τ est le pas de temps associé au schéma de discrétisation temporelle.

▼ Figure 14 – Spectre temporel de pression.



En prenant avantage des équations 3 et 4, le terme $T_i^p(t)$ qui apparaît dans l'équation 8 ne dépend que du déplacement des éléments i et i_p à l'instant t . Par conséquent, on obtient un schéma numérique explicite permettant d'évaluer à chaque itération le déplacement courant d'un élément i en fonction du déplacement de cet élément et de ses voisins aux instants antérieurs. Un tel schéma est très simple à mettre en œuvre ; en revanche, il présente l'inconvénient d'être conditionnellement stable. La stabilité du schéma est assurée en imposant un pas de temps suffisamment petit, inférieur à une valeur critique τ_c fonction des masses et des raideurs locales. Cette valeur critique peut être estimée de la façon suivante :

$$\tau_c = \sqrt{\frac{\min_{i,p} \left(\frac{m_i}{S_i^p} \right)}{G}} \quad (11)$$

De manière à avoir une bonne représentation du contenu fréquentiel de phénomènes hautement dynamiques, on admet que le pas de temps peut être donné par l'expression suivante (Argyris, 1991) :

$$\tau = \frac{\tau_c}{10} \quad (12)$$

Usuellement, l'ordre de grandeur du pas de temps est de 10^{-4} seconde.

Un outil de gestion à l'usage des praticiens

Description sommaire du code

Le modèle décrit dans les sections précédentes a été intégré au sein d'un outil informatique de calcul pour proposer à terme un outil de gestion conviviale. Cet outil pourrait permettre au gestionnaire d'une part d'asseoir la démarche de zonage sur des bases scientifiques, et d'autre part d'évaluer la résistance des constructions en maçonnerie et, le cas échéant, de discuter la pertinence de solutions architecturales ou de dispositions constructives.

L'utilisateur a en charge de décomposer la façade exposée de l'habitation considérée en motifs élémentaires, puis de traduire les spécificités architecturales en éléments géométriques simples ou en conditions limites particulières. La sollicitation avalancheuse est définie par la hauteur utile de l'écoulement H_a , par les pressions de pic et résiduelles aux quatre coins de la surface de la façade interceptée par l'écoulement, ainsi

que par les instants t_1 , t_2 et t_3 définissant l'allure du spectre temporel de pression. Le calcul simule l'impact de l'écoulement sur une durée fixée par l'utilisateur, et fonction du type d'écoulement (figure 1, p. 140) ; néanmoins, le calcul est stoppé lorsque l'état d'endommagement de la structure a atteint un certain niveau repéré, par le pourcentage de joints rompus égal à 50 %.

Le code de calcul fournit en sortie le champ de déplacement des divers éléments, l'état des ouvertures (sain ou éventré), l'état des joints (sain, partiellement fissuré, ou rompu). Ces informations, caractérisant l'état d'endommagement des différents motifs constituant la façade, permettent d'établir un diagnostic de vulnérabilité associée à l'habitation, pour l'avalanche considérée.

Il importe de noter qu'il n'existe pas aujourd'hui de base de données reconnue relative au comportement de murs voiles en maçonnerie sollicités hors plan. Cela rend d'une part plus difficile l'identification des paramètres impliqués dans le modèle et d'autre part empêche toute démarche de validation générale de la modélisation proposée. Soulignons cependant que les matériaux concernés sont bien connus dans le champ général du génie civil. Par ailleurs, les résultats obtenus d'un point de vue qualitatif ont pu être vérifiés et permettent déjà de mener des comparaisons pour différentes configurations.

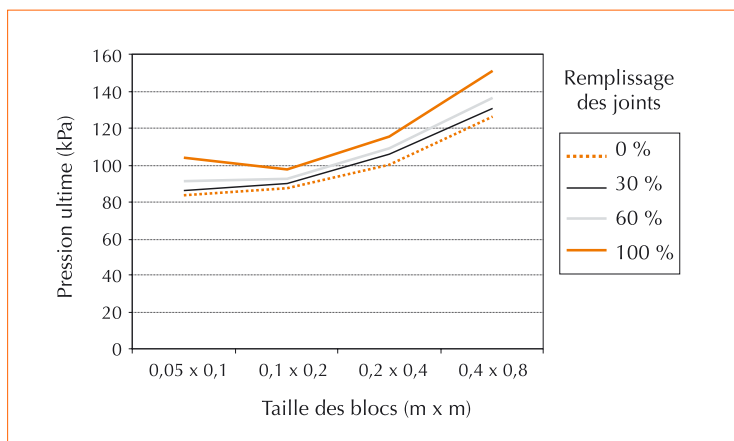
Capacité du code de calcul

ANALYSES PARAMÉTRIQUES

Influence de la taille des blocs et du remplissage des joints verticaux

À la fois pour tester les capacités du code de calcul et pour mesurer l'influence du mode de réalisation

▼ Figure 15 – Influence de la taille des blocs.



du mur, l'influence de la taille des blocs a été évaluée en parallèle à la hauteur de remplissage des joints verticaux. h étant la hauteur des joints, une hauteur partielle de remplissage des joints par du mortier (h_j) a été introduite telle que $h_j \leq h$; cela signifie que l'interface entre les éléments en contact admet une surface réduite de hauteur h_j . Le comportement mécanique des joints a été défini par les paramètres $G = 1\,400\text{ MPa}$, $\varepsilon_p = 10\%$, $c = 450\text{ kPa}$ et $\varphi = 0$ degré.

L'influence a été étudiée sur un cas simple, correspondant à un mur aveugle de hauteur $H = 2,60$ mètres et de longueur $L = 5,20$ mètres, dont les quatre côtés sont bloqués en déplacement. La sollicitation avalancheuse a été définie de manière à appliquer une pression uniforme croissante à la vitesse de 300 kPa/s .

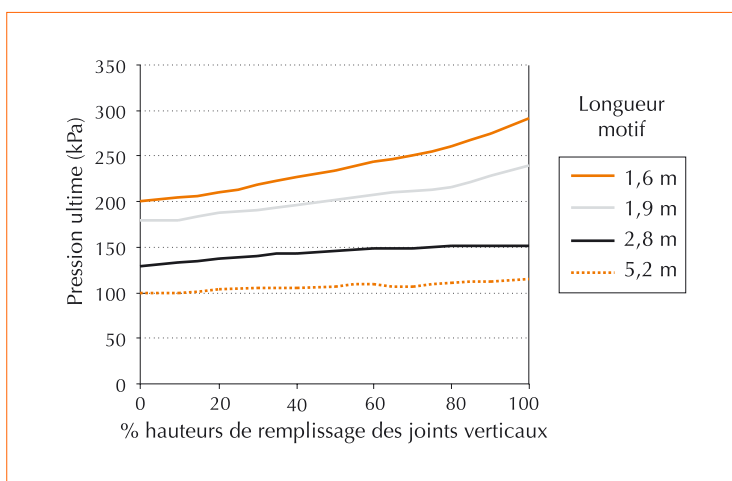
Au cours des simulations, pour différentes tailles de blocs et différentes hauteurs de remplissage h_j , la pression de pic P_i^{max} critique a été recherchée de manière à obtenir un pourcentage de joints rompus égal à 50 %. Les blocs testés ont tous le même ratio longueur/hauteur égal à 2. Les courbes représentées figure 15 montrent que la taille des éléments influence fortement la résistance du mur. Plus les éléments sont petits (et donc nombreux pour le même mur) et moins le mur est résistant. Ce résultat paraît parfaitement cohérent dans la mesure où la faiblesse du motif est concentrée au niveau des joints. Ceci est confirmé par l'influence du remplissage des joints verticaux : moins ceux-ci sont remplis et donc résistants et plus la pression ultime diminue.

Ensuite, pour la même taille de blocs ($0,2 \times 0,4\text{ m}$ ici) et en conservant la même hauteur de motif $2,60$ mètres, la figure 16 confirme que le mur sera plus résistant s'il est petit mais surtout l'influence du remplissage des joints sera plus importante dans cette situation. Ce résultat paraît parfaitement cohérent dans la mesure où l'influence des joints verticaux par rapport aux joints horizontaux dépend directement du rapport

Influence de la surface des ouvertures

Afin d'évaluer l'influence de la surface des ouvertures, le problème précédent a été repris en introduisant en outre une ouverture centrée par rapport au motif. Les dimensions (H_o/L_o) de l'ouverture ont été choisies telles que $H_o/L_o = H_o/L_o = 1/2$. Par ailleurs, il a été supposé que la résistance de l'ouverture était nulle. La courbe indiquée figure 17

révèle globalement que la pression ultime augmente avec la taille de l'ouverture. Ce résultat, à première vue surprenant, s'explique par le fait que d'une part la façade est moins chargée (la même pression s'exerce sur une surface moindre), et que d'autre part une surface de mur résiste à une pression d'autant plus élevée qu'elle est de dimensions plus petites. Cependant, il faut également remarquer que la présence d'une petite ouverture peut être préjudiciable par rapport à la situation sans ouverture. En effet, dans ce cas, la réduction du chargement, proportionnelle à la surface des ouvertures, n'est pas suffisante pour compenser la suppression de résistance aux frontières de cette surface. En terme de vulnérabilité, cette analyse serait bien sûr à compléter par la prise en compte de l'invasion de l'habitation par l'écoulement.

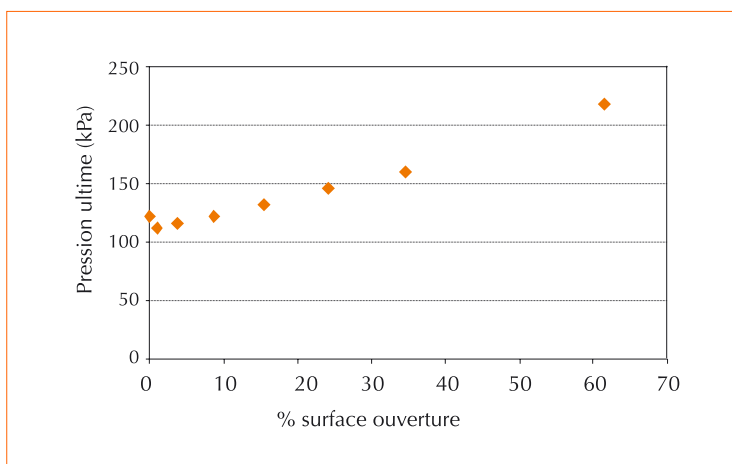


▲ Figure 16 – Influence du remplissage des joints verticaux.

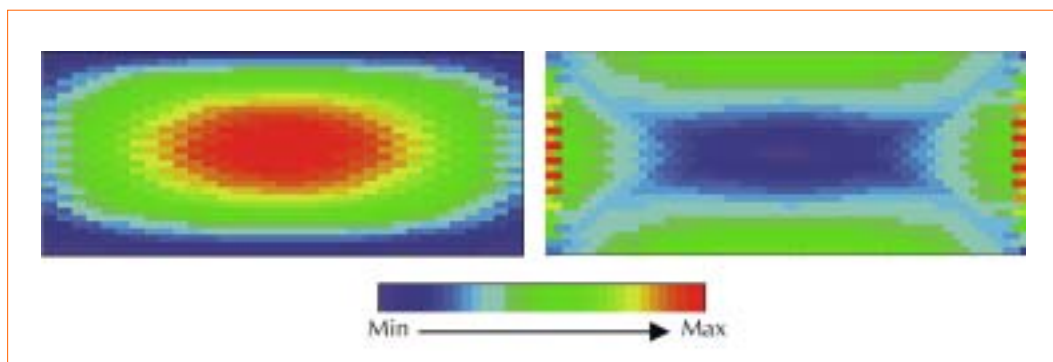
ANALYSE DES FACIÈS DE DÉFORMATION

À l'aide de sorties graphiques adaptées, l'outil proposé permet de visualiser la cartographie de l'état du motif étudié. La figure 18 montre les déplacements absolus et relatifs des éléments d'un motif bloqué sur ses quatre cotés et soumis à une pression uniforme sur toute sa surface. Il a été convenu de définir le déplacement relatif d'un élément comme le maximum des déplacements relatifs de cet élément avec ses voisins.

La carte des déplacements relatifs est particulièrement intéressante puisque qu'on y retrouve les caractéristiques du faciès prévues par la théorie des lignes de rupture pour cette configuration (Davenne, 1996). Cette analogie peut être vérifiée pour les différentes configurations envisageables (4, 3 ou 2 côtés bloqués). L'analyse de la cartographie des déplacements relatifs ainsi définis doit donc permettre d'approcher les zones potentielles d'apparition des fissures au sein du motif.



▲ Figure 17 – Influence de la présence d'une ouverture centrée.



◀ Figure 18 – Champs des déplacements absolus et relatifs d'un mur aveugle bloqué sur 4 côtés et soumis à une pression uniforme.

Le fait de raisonner à partir des déplacements relatifs est parfaitement cohérent puisque leurs valeurs sont directement reliées à la déformation des joints. À l'échelle locale, ces déformations permettent de définir le domaine mécanique dans lequel se trouvent ces joints via la courbe de la figure 11 (p. 144). À l'échelle macroscopique, un indicateur de l'état d'endommagement du motif est finalement obtenu en exhibant la proportion des joints dans les états sains, fissurés ou rompus. En première approche, l'évaluation de la vulnérabilité physique consiste alors à confronter ces proportions à des limites d'acceptation fixées définissant différentes classes d'endommagement.

De la vulnérabilité physique à la vulnérabilité humaine

Pour chaque type architectural et suivant des niveaux de sollicitation différents, un diagnostic d'endommagement distinguant plusieurs classes est défini dans le tableau 1.

Un bâtiment, même s'il n'est pas conçu directement pour être un ouvrage paravalanche, assume cependant un rôle de protection jusqu'à une valeur limite d'intensité d'avalanche que l'on appellera valeur limite admissible ; sous cette limite, l'état d'endommagement associé appartient alors à la classe 1 correspondant ici à des joints entre éléments encore sains après l'événement. Pour des intensités d'avalanche supérieures, la structure sera endommagée mais pourra selon les cas garder ou non son rôle de protection au moins à court terme. Pour les sollicitations intermédiaires en deçà d'une valeur que l'on appellera limite

ultime, ce rôle de protection est assurée (classe 2). En revanche, si l'intensité de l'avalanche dépasse cette limite ultime, le bâtiment n'assure plus aucune protection (classe 3). Dans l'approche mécanique présentée ici, ceci se traduit par une proportion acceptable de joints fissurés voire rompus après l'avalanche. La valeur de cette proportion doit être fixée suivant la situation. À noter que pour la classe 2 et à plus long terme, des travaux de réparation seront quand même nécessaires pour recouvrer le niveau de résistance initiale. Le tableau 2 résume cette classification et fait le lien avec la vulnérabilité humaine.

Il faut noter ici que les limites admissible ou ultime indiquées peuvent aussi dépendre de la fonction et de l'utilisation des pièces protégées par la façade considérée. Les exigences de protection seront par exemple plus élevées pour des pièces de vie que pour des pièces annexes ou des locaux techniques. Ceci rappelle que la réponse quant à vulnérabilité d'un bâtiment ne peut pas être uniquement mécanique mais plutôt « socio-mécanique », les aspects humains gardant bien souvent la priorité.

Le cas des ouvertures est à ce titre intéressant : comme cela a été montré précédemment, leur présence favorise globalement une meilleure tenue mécanique de la partie structurelle du motif (et donc une moindre vulnérabilité physique), mais il est évident qu'une ouverture sur une façade exposée au risque avalancheux n'est pas acceptable pour des pièces de vie (invasion de l'écoulement). Il faut donc absolument pondérer la part de vulnérabilité physique que permet

► Tableau 1 – Classes d'endommagement.

Classe 1	Le bâtiment ne présente pas de signes d'endommagement significatifs
Classe 2	Le bâtiment présente des signes d'endommagement significatifs mais le rôle de protection de sa structure est maintenu à court terme
Classe 3	Le bâtiment est détruit et n'assure plus sa fonction de protection

► Tableau 2 – Vulnérabilités physique et humaine.

	Niveau d'endommagement	Rôle de protection	Sécurité pour les vies humaines	Intensité de l'avalanche
Classe 1	Nul à faible	Maintenu	Optimale	admissible
Classe 2	Faible à moyen : fissurations, etc.	Maintenu à court terme Travaux nécessaires	Bonne	
Classe 3	Très endommagé à détruit	Non assuré	Non assurée	ultime

d'obtenir l'approche mécanique présentée ici par une part de vulnérabilité humaine intégrant la fonction de la partie de bâtiment étudié mais dont la formulation sort du cadre de cet article.

Conclusions et perspectives

La gestion du risque avalancheux se décline de plusieurs manières dont en particulier l'élaboration de plans réglementaires conduisant au zonage des territoires exposés. Cette démarche suppose une connaissance suffisante de l'aléa et des conséquences de son action sur les biens exposés (habitations, voies de communication, etc.). L'originalité de l'outil présenté à travers cet article est de permettre une évaluation de la vulnérabilité associée à une habitation en maçonnerie. S'appuyant sur une modélisation

basée sur la méthode des éléments discrets, cette évaluation est proposée par l'intermédiaire d'un diagnostic simple prenant en compte le niveau d'endommagement de l'habitation attendu pour une intensité donnée d'avalanche.

Il convient bien sûr de rappeler les hypothèses retenues portant en particulier sur le nombre de degrés de liberté des éléments (moellons) ou le mécanisme de déformation des interfaces (joints). Ces hypothèses nous ont cependant paru cohérentes avec le niveau de précision et l'esprit général de la modélisation, de même que l'état encore lacunaire des connaissances du phénomène avalancheux. Ce dernier aspect fait d'ailleurs l'objet d'importants travaux de recherche menés en partie sur le site expérimental du Col du Lautaret (Hautes-Alpes). □

Résumé

Ces dernières décennies, l'engouement pour la montagne n'a cessé de croître et les zones urbanisées de ces régions ont subi un important développement. Dans un contexte de risque avalancheux, l'évaluation de la vulnérabilité des bâtiments dans les zones exposées est devenue une préoccupation d'actualité. Cet article traite du cas des structures en maçonnerie soumises à une sollicitation hors plan dynamique. Une approche numérique originale aux éléments discrets est proposée. Elle a conduit au développement d'un outil d'évaluation de la vulnérabilité physique de ces structures.

Abstract

Since last decades, mountainous areas have assumed great importance for tourism and the economy. Infrastructures were set up in regions where avalanche risk is likely to exist. Thus, the assessment of the vulnerability of infrastructures is now regarded as a major challenge. This paper is devoted to the case of masonry buildings which are submitted to dynamic out-of-plane loadings. An original numerical approach, which is based on the discrete element method, is proposed. This approach has allowed an engineering tool for vulnerability assessment to be developed.

Bibliographie

- ANCEY, C. *et al.*, 2001, Nivologie pour l'ingénieur, In *Géomécanique environnementale risques naturels et patrimoine*, édité par Schrefler, B. et Delage, P., Éd. Hermès, p. 45-67.
- ARGYRIS, J., MLEJNEK, H.-P., 1991, *Dynamics of structures . Texts on Computational Mechanics*, vol. 5, Éd. NH.
- AUGE, A., 1995, *Dynamique des avalanches, étude de l'interaction entre les avalanches et les obstacles*, mémoire de fin d'étude, ENGEEES.
- BERTHET-RAMBAUD, P., 1999, *Endommagement des bâtiments soumis aux avalanches*, travail de fin d'études, ENTPE.
- BONNEVIE, C., 2002, *Évaluation de la vulnérabilité des bâtiments en maçonnerie soumis à l'action d'une avalanche par modélisation aux éléments discrets*, projet de fin d'études, ENSAIS.
- CECCHI, A., SAB, K., 2002, A multi parameter homogenization study for modeling elastic masonry, *European Journal of Mechanics A/solids*, vol. 21, p. 249-268.
- CUNDALL, P.-A., ROGER, D.-H., 1992, Numerical modelling of discontinua, *Engineering computations*, vol. 9, p. 101-113.
- DAVENNE, L, DELMOTTE, P., WAMBA-FOSSO, S., 1996, Calcul des murs en maçonnerie sous chargement hors plan, *Cahiers du CSTB*, livraison 373, 22 p.
- MAZARS, J., 1984, *Application de la mécanique de l'endommagement au comportement non linéaire et à la rupture du béton de structure*, thèse de doctorat, ENS Cachan.
- EL SHABRAWI, A., VERDEL, T., PIGUET, J.-P., 1994, *The distinct element method : a new way to study the behaviour of ancient masonry structures under static or dynamic loading, by the use of numerical modelling*, 1st Cairo Earthquake Engineering Symposium on « Seismic Risk Assessment », 3-5 Décembre, p. 169-178.
- PRAT, M., 1997, La modélisation des ouvrages en maçonnerie, In *Calcul des ouvrages généraux de construction*, AFPC, Éd. Hermès, p. 495-567.
- RABASA-GRAU, J., 2001, *Contribution à l'endommagement d'habitations exposées à l'action d'avalanches*, mémoire de DEA, université Joseph Fourier-Grenoble, Cemagref, 42 p.
- SUTCLIFFE, D.-J., YU, H.-S., PAGE, A.-W., 2001, Lower bound limit analysis of unreinforced masonry shear walls, *Computers and structures*, vol. 79, p. 1295-1312.